Babinszki Edit, †Horváth Ferenc szerk.: **A Balaton kutatása Lóczy Lajos nyomdokán**

A BALATON KUTATÁSA
LÓCZY LAJOS NYOMDOKÁN




A Balaton kutatása
Lóczy Lajos
nyomdokán

A Balaton kutatása
Lóczy Lajos nyomdokán

Szerkesztette

Babinszki Edit, †Horváth Ferenc

Magyarhoni Földtani Társulat
Budapest, 2020

© Copyright Magyarhoni Földtani Társulat, 2020
Minden jog fenntartva!

Szerkesztette

Babinszki Edit, †Horváth Ferenc

Szerzők

Brezsnyánszky Károly, Budai Tamás, Cserny Tibor, Csillag Gábor, Demény Attila, Fodor László, G.-Tóth László, Gábris Gyula, Galambos Csilla, Gulyás Sándor, Harangi Szabolcs, Havril Tímea, Héja Gábor, †Horváth Ferenc, Jakab Gusztáv, Karátson Dávid, Katona Lajos, Kövér Szilvia, Mádlné Szőnyi Judit, Magyar Imre, Molnár Dávid, Nagyné Bodor Elvira, Németh Károly, Pósfai Mihály, Prónay Zsolt, Ruszkiczay-Rüdiger Zsófia, Sárdy Julianna, Sebe Krisztina, Serlegi Gábor, Schöll-Barna Gabriella, Síkhegyi Ferenc, Sümegi Balázs Pál, Sümegi Pál, Sztanó Orsolya, Szurominé Korecz Andrea, Tari Gábor, Timár Gábor, Tóth Ádám, Törőcsik Tünde, Varga György, Visnovitz Ferenc, Zlinszky András

Műszaki szerkesztő, tipográfia, borítóterv, DTP

Palotás Klára

Képszerkesztő, olvasószerkesztő

Piros Olga

2., javított digitális kiadás

A kiadvány a Magyar Tudományos Akadémia, a Nemzeti Kulturális Alap, Balatonfüred Város, a Balaton Fejlesztési Tanács, a Balatonarácsi Református Egyházközségért Alapítvány, a Lóczy Lajos Gimnázium Lóczy Lajos Alapítványa, valamint a Dobosi Pincészet támogatásával készült.

Kiadja a Magyarhoni Földtani Társulat.

Felelős kiadó

Budai Tamás elnök

Megjelent id. Lóczy Lajos halálának centenáriuma tiszteletére.

ISBN 978-963-8221-81-0

Tartalom

Előszó 7

Bevezető 9

1. †Horváth Ferenc, Gábris Gyula, Brezsnyánszky Károly: Lóczy Lajos életműve 11

2. Budai Tamás, Tari Gábor: A Balaton-felvidék földtani felépítése és fejlődéstörténete 49

3. Fodor László, Héja Gábor, Kövér Szilvia: A Balaton-felvidék és környezete szerkezeti felépítése 73

4. Visnovitz Ferenc, †Horváth Ferenc: Törésrendszer a Balaton alatt 91

5. Sztanó Orsolya, Magyar Imre, Katona Lajos: A Pannon-tó és a Balaton 107

6. Németh Károly, Harangi Szabolcs, Csillag Gábor, Karátson Dávid: A Balaton-felvidék alkálibazalt-vulkanizmusa 127

7. Csillag Gábor: A Balaton környékének geomorfológiája 151

8. Sebe Krisztina, Ruszkiczay-Rüdiger Zsófia, Csillag Gábor, Fodor László: A szél felszínalakító munkája a Balaton környezetében 171

9. Cserny Tibor, Prónay Zsolt, Nagyné Bodor Elvira, Szurominé Korecz Andrea, Sárdy Julianna: A Balaton földtani kutatása a XX. század végéig 189

10. Sümegi Pál, Demény Attila, Nagyné Bodor Elvira, Törőcsik Tünde, Jakab Gusztáv, Schöll-Barna Gabriella, Serlegi Gábor, Sümegi Balázs Pál, Gulyás Sándor, Molnár Dávid, Timár Gábor: Mit mesélnek a Balaton berkei az ősföldrajzról és a régi klímáról? 215

11. Pósfai Mihály, G.-Tóth László: A Balaton iszapjának ásványai 233

12. Visnovitz Ferenc: Gázok „szellemképe” a balatoni üledékekben 251

13. Varga György: A Balaton vízjárását befolyásoló tényezők 271

14. Tóth Ádám, Havril Tímea, Mádlné Szőnyi Judit: Rejtőzködő vizek nyomában a Balaton térségében – Mi hiányzik a Balatonból? 287

15. Síkhegyi Ferenc, Timár Gábor, Brezsnyánszky Károly, Galambos Csilla, Zlinszky András: A Balaton és térségének ábrázolása térképeken 311

Előszó

A Balaton és környezetének földtudományi kutatásával foglalkozó kutatók egy csoportja 2018 nyarán határozta el, hogy tanulmánykötet megjelentetésével kíván tisztelegni id. Lóczy Lajos, minden idők legkiemelkedőbb magyar geológusa, akadémikus, a Budapesti Tudományegyetem professzora, a Magyar Királyi Földtani Intézet igazgatója emléke előtt.

A tanulmányoknak már a fele elkészült, amikor a kiadvány megálmodója, kedves kollégánk és tanárunk, Horváth Ferenc professzor eltávozott közülünk. Az így gazdátlanná vált kézirat gondozását és a kötet kiadását a továbbiakban a Magyarhoni Földtani Társulat vállalta fel. Nekem személy szerint ez az újabb feladat szinte sorsszerűen jelentkezett. Szakmai pályafutásom jelentős részében ugyanis Lóczy Lajos nyomdokain jártam, térképező geológusként végigkalapálva a Dunántúli-középhegységet, a Keszthelyi-hegységtől kezdve, a Balaton-felvidéken és a Vértesen át a Gerecséig.

Lóczy életművének egy jelentős része a Balaton és környékének a tudományos tanulmányozásához kapcsolódott. Vezetésével készült el a világviszonylatban is egyedülálló, 32 kötetes „Balaton monográfia” a XX. század elején, és éppen száz éve, 1920-ban jelent meg a tó környezetének geológiai térképe. Nem véletlen tehát, hogy a kötetben megjelenő tanulmányok középpontjában is a Balaton környéke szerepel, szerzőik az elmúlt néhány évtized során született új tudományos eredményeiket adják közre.

Lóczy Lajos tisztelete messze túlterjed a földtudományokkal foglalkozó hazai szakközönség körén. Bizonyíték erre többek között a könyv megjelentetését támogatók névsora is, akiknek ez úton kívánunk köszönetet nyilvánítani.

Budapest, 2020. július 6.

Dr. Budai Tamás
a Magyarhoni Földtani Társulat elnöke

Bevezető

Amikor egy évvel ezelőtt e tragikus hirtelenséggel magára maradt kötetet szárnyai alá vette a Magyarhoni Földtani Társulat, magától értetődő volt, hogy elvállalom a szerkesztését. Egyrészt a Balaton iránti szenvedélyem, másrészt az ismeretterjesztés iránti elkötelezettségem, de legfőképp egykori kiváló tanárom, Horváth Ferenc professzor emléke miatt. Csak amikor elkezdtem dolgozni rajta, akkor jöttem rá, hogy milyen nehéz ez az örökség: a tanulmányok szerkesztése, a kötet szerkezetének tervezgetése közben számtalanszor gondolkodtam el azon, hogy Ő vajon ezt hogyan csinálná, vajon milyennek szerette volna látni. Csak remélem, hogy ha Feri most kézbe foghatná a végeredményt, a sajátjának érezné.

A kötetben az első tanulmány id. Lóczy Lajosról szól, az utána következő 14 a Balaton és környékének legújabb földtudományi kutatási eredményeit mutatja be. A különböző témájú tanulmányok egymástól függetlenül, elkülönülten, de egymásra hivatkozó módon követik egymást. Az első fejezet előtt id. Lóczy Lajos egykori kollégájának és barátjának, Cholnoky Jenőnek az írásából emeltem ki részleteket, amelyből jobban megismerhetjük Lóczyt, az embert. A további fejezetek előtt a „Balaton monográfiából" szerepel egy-egy rövid részlet, amely betekintést enged abba, hogy az adott tudományterületen milyen ismeretekkel rendelkeztek száz évvel ezelőtt, majd a tanulmányokból kiderül, hogyan jutottunk el attól a tudástól a mai eredményekig.

Ajánlom e kötetet minden földtudományi szakembernek és szakmán kívüli érdeklődőnek, aki szereti a Balatont, aki érdeklődik Lóczy szellemi hagyatéka iránt, de mindenekelőtt Ferinek, e kötet megálmodójának.

Nagymaros, 2020. július 26.

Babinszki Edit
szerkesztő



Arpadites lóczyi

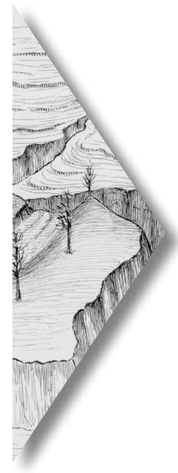
MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

†Horváth Ferenc, Gábris Gyula, Brezsnyánszky Károly

1

Lóczy Lajos életműve

Kevés olyan ember van, akit két tudományág művelői is sajátjuknak éreznek. Egyikük idősebb Lóczy Lajos, akit mind a földtan, mind a földrajz tudományterületén kiemelkedő egyéniségnek ismernek el. A földtudományok iránti szeretete gyermekkoráig nyúlik vissza, amikor édesapjával barangolt az Erdélyi-középhegység vadregényes tájain. Alig múlt 28 éves, amikor elfogadva Széchenyi Béla meghívását, a számára ismertséget és elismertséget hozó kelet-ázsiai expedícióra elindult. Korszakalkotó felfedezései közül nem egy máig megállja a helyét. A Budapesti Tudományegyetemen kiváló geográfusiskolát teremtett, melynek keretében meghonosította a hazánkban akkor még új tudományágat, a természetföldrajzot. Élete delén túl, 59 évesen került a Magyar Királyi Földtani Intézet élére. Igazgatóságának 11 éve, a nehézségek ellenére mély nyomot hagyott az intézet életében. Az ő nevéhez fűződik a tudományos irodalomban is páratlan, 28 évnyi kutatómunka eredményeit összefoglaló, 32 kötetes *Balaton monográfia* megjelenése is.



Lóczy, az ember

Olyan különös ember volt, hogy meg kell örökítenünk szellemi arcképét, mert a lélektan búvárainak ritkán akad érdekesebb tanulmány tárgya. Ritkaság az, hogy valakinek a lelki világát annyira betöltse egyetlen egy gondolat, egyetlen egy törekvés, mint az övét. Bátran mondhatom, hogy minden mást elhanyagolt, csak tudományának élt. Talán keménynek tetszik a szó, ha azt mondom, hogy minden mást „elhanyagolt", de nem találok rá megfelelőbb kifejezést.

Nem lehet azt mondani, hogy, „tudákos korlátoltság" (Fachsimpelei) jellemezte volna. Ettől megmentette nagy elméje, mert élvezetesen és okosan hozzá tudott szólni úgyszólván mindenhez, saját tárgyán kivül is. De csakis nagy elméje mentette meg, mert különben minden mást elhanyagolt.

Feltünt ez már gyakran külső megjelenésében is. Hogy mégsem volt annyira hanyag külsejű, mint lett volna elhagyatva, azt áldott jó feleségének köszönhette. Felesége nyirta és borotválta, ő vigyázott öltözetére, tisztaságára és kellő, külső megjelenésére. …

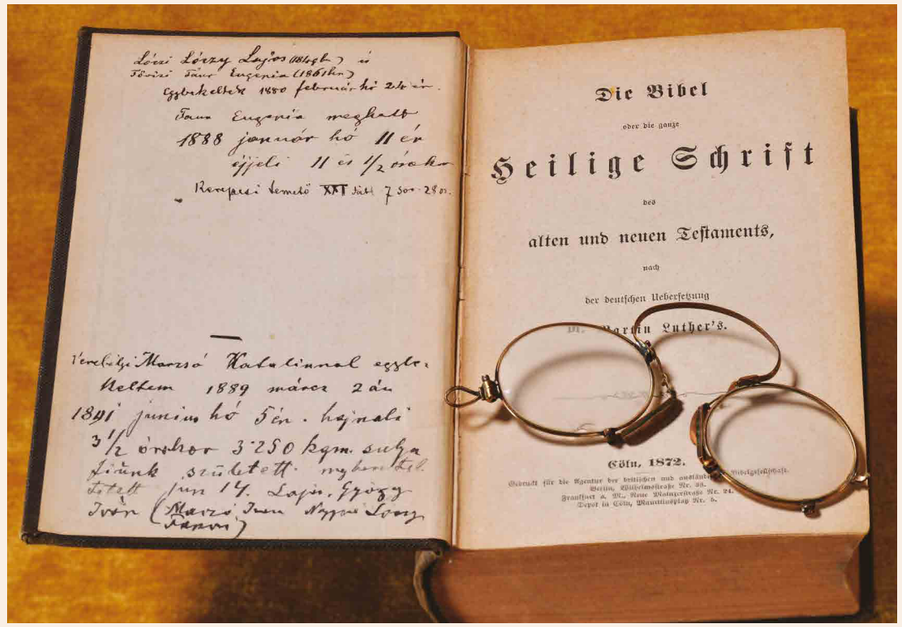
Kirándulásokon különösen hanyag volt ruhájára. Akarattyán történt a mulatságos eset. Akarattya alatt a szakadékos, pannoniai rétegekből álló meredek falakat akartuk tanulmányozni. Mivel nekem akkor adminisztrációs küldetésem volt s nem terveztem kirándulást, csak városi ruhában, sötét felöltőben jöttem ki. Lóczy azonban sokat akart járni s így meglehetősen viseltes turistaruhában, gyűrött puha kalapban volt. Alacsonyabb termete volt, mint nekem s akkor már én ősz voltam, fehér hajam meg nem érdemelt tekintélyt parancsolt elegáns, fekete, kemény kalapom alól.

Nem volt hol megszállnunk, Akarattyán a bérlőhöz, nemes akarattyai Fischer urhoz kivántunk beszállni. Nem ismertük még személyesen, de tudatta velünk már régebben, hogy barátságos uri lakában, Akarattyán, mindig szivesen lát. Veszprémből kocsizván ki, elég későn délben érkeztünk s az uri lak elé hajtattunk, de Fischer nem volt otthon. Ott hagytuk a kocsit és gyalog mentünk le a partra. Ott Lóczy felmászott a szakadékokra s engem kiállított a szakadékok alá, hogy dirigáljam, hova kússzék az alulról jól látható rétegek megvizsgálására. Aki a falakon mászkál, az nem veheti észre azokat a finom szinkülönbségeket, amelyeknek okát éppen ismerni akartuk.

Én tehát keztyüs kézzel, fekete kalapban, felöltőben, vasalt nadrágban és városi cipőmben lenn állok és dirigálom mesteremet: „kicsit jobbra, följebb; nem ott; nem, nem! tulságosan fölmentél, egy arasszal lejebb, úgy!" … akkor jön utánunk Fischer s udvariasan bemutatkozik, de persze a helyzet nem engedte a szokásos onnőrök alkalmazását, valahogy eltévesztette a nevünket s engem, a magasabbat, az őszebbet, a fessen öltözettet, a dirigálót tartotta a mesternek, a fülig sáros, fekete hajú, szőke bajszú fiatalost pedig az asszisztensnek. Ebédre hivott bennünket s mi örömmel tettünk eleget szives meghivásának s némi kézmosás után engem per tu szólítva, karon fog s a fő helyre ültet, Lóczyt pedig egy leereszkedő intéssel leülteti a második helyre. Ekkor nem állhattam meg, hogy ne figyelmeztessem tévedésére. Lóczy természetesen nem vette észre, ilyesmire nem szokott figyelni. De azután annál jobban ujongott, hogy őt nézték fiatalabbnak s erre annyira büszke volt, hogy még évek mulva is emlegette. …

Megismerkedésünk után nemsokára itt Budapesten ki kellett mennem a lakására. Az Alsóerdősor-utcában laktak. Az előszobából az ember a szalonba nyitott, onnan balra nyilt az „öreg" dolgozószobája, jobbra az ebédlő, azontul a hálószoba. Amint az előszobából beléptem, csodálkozva láttam, hogy a dolgozószoba ajtaja is, meg az ebédlő ajtaja is be van hajtva, de a szalonon az egyik ajtótól a másikig szárogatókötél nyulik végig a padlón és szabályosan ide-oda jár, hosszában. Bámulva állok meg a látvány előtt. Ekkor kinyilik az ebédlőajtó s Lóczyné jelenik meg, elmosolyodva az én zavaromon. A kötél az ebédlőn is keresztül vonul a hálószobaajtóig, ott az ajtó szemöldökfájáról hinta csügg le s abban szundikál Lóczy két kis fiacskája, akkor még csak egy-két évesek s a kötél őket hintálja.

Benyitottam ezután a dolgozószobába s ott láttam ülni a mestert, szemben az ajtóval, kis diványon. Előtte dohányzóasztal, tele mindenféle holmival, indiai szivar és dohánytartó dobozok, khinai porcellánfigurák, könyvek, kalap, mansetta és műszertok s mindezeknek tetején egészen diskordansan egy fogás irópapiros, ezen irja az ázsiai utazás tudományos eredményeit. A tintatartó a földön s a mester keresztbe vetett lábára van kötve a rejtelmes kötél s leirhatatlan flegmával és utánozhatatlan igénytelenséggel him-



Lóczy Lajos Bibliája és szemüvege (MBFSZ gyűjteménye)



Lóczy Lajos csopaki nyaralójának zárt verandája (Magyar Földrajzi Múzeum gyűjteménye)

Festeni nem tudott, mert szinvak volt. A zöldet nem tudta megkülönböztetni a vöröstől s még több finomabb szinárnyalatot is összezavart. Ezért a geológiai térképek szinezéséhez használt festékek alá oda kellett irni, hogy miféle szinek. Mivel azonban ezeket sem tartotta rendben, sajátkezű festése valóságos masztikolás volt, ember legyen, aki kiismerte magát rajta. …

Műszerekkel nem tudott bánni. Valósággal sirtak azok a kezében. Amikor meglátogatott egyszer Kolozsvárott, szép uj fényképező gépemet nagy érdekkel nézte meg, azután fel akarta huzni a pillanatzárt s mivel nehéz kezével nem érezte meg, mikor ért a felhuzó a végére, még egy nagyot csavarintott rajta s aztán az egész darabokra zúzva hullott az ölébe. Sohasem láttam, hogy valaki olyan gorombán bánjék a bányász-kompasszóval, mint ő. …

Mindez csak annak a következménye volt, hogy szenvedélyes szeretettel egyedül a geológiának élt, azt tartotta a tudományok királyának s az emberiség legnagyobb jóltevőjének. …

Sohasem felejtem el a következő történetet sem. Nem teszek hozzá semmit, nem szinezem, nem tódítom, a valóságot mondom el, van reá elég tanum.

bálja lábát, mártja a tollat s ir nehéz, vastag, kusza betüket a gyürt papirosra, temérdek törléssel, malaccal, olvashatatlan beszurásokkal. És mégis remekmű lesz belőle!

Tintatartója, tolla, ceruzája, mindig a leglehetetlenebb állapotban volt. Itatósa nemigen volt a deszkán, hanem csak úgy a deszkával mázolta el a tintát. Emiatt irás közben tintás volt a keze, a kézelője, sőt, mivel irás közben sokszor nézte nagyító üvegen át a térképet vagy a kövületeket, még az orra is. Ha aztán rászóltak, hogy tintás az arca, akkor a zsebkendőjével állt neki a tisztogatásnak s természetes, hogy a zsebkendő is tönkre ment. …

A Szerb-utcai intézetben barátságosan egy teremben dolgozott a két professzor asszisztensével és kitünőbb tanítványaival együtt. Lóczy befejezte előadását, jegyzeteit lecsapta asztalára, néhány hallgatóval még pár szót váltott, asztalán keresett egyet s mást, feldulva ott minden rendet, kapta a kabátját, kalapját és ezüstfejű, nádbotját s kezdett kiviharzani az intézetből. Az adjunktus azonban fele uton lefogta s megnézte, rendben van-e. Kézelőit elfelejtette fölvenni, azokat tehát reá erőszakolta, kabátját kikefélte, a kabát gallérját lehajtotta rendesen, a nyakkendőt hátul a gallérgomb alá szorította s megkérdezte, hova megy?

— Megyek a Franklinhoz, onnan… ejnye, jó, hogy eszembe jut, az Akadémiára is fölmegyek… —

Azzal visszaviharzik elhagyott csatatérhez hasonlító asztalához s a gummiarabikumos üveget feldöntve, sikerült megtalálni azt a valamit, amit az Akadémiára kellett vinnie.

— Nos és az Akadémiáról?

— Az Akadémiáról? Igen! Kérlek el ne felejtsd, hogy a somogyi 25.000-es lapokat kiküld a lakásomra délután, de mindjárt jöjjön ki az Imre… No Isten veletek.

Azzal ismét rohamlépésre egyengeti a lábát.

— De professzorom! Hova mész az Akadémiáról?

— Hornyánszkyhoz! — hangzik vissza a folyosóról.

Meg kell jegyeznem, hogy a Franklin-nyomdában készültek a Földrajzi Könyvtár kötetei, meg akadémiai dolgok. Hornyánszky nyomdájában pedig a Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. Azt is meg kell jegyeznem, hogy az intézet akkori szolgája, Csányi Imre baptista prédikátor volt, a világ legügyetlenebb, de legböcsületesebb embere. A háború alatt nyugdijazták szegényt s amint hallom, valósággal éhen halt. Jó kortörténeti kép.

Professzorunk gyors léptei tehát elhangzottak a folyosón, most már csak versenyfutó tudná utolérni. Visszatértem asztalához, hogy rendbe hozzam. Ez nem kis feladat, de már volt hozzá szisztémám. Természetes, hogy ott találom a Franklin-nyomdába való korrekturákat, amikről tudtam, hogy még ma be kellene őket adni.

Pillanatnyi gondolkozás után kaptam kabátomat és rohantam a korrekturával Franklinhoz. A szokott szobában a szokott ur fogadott.

— Kérem, volt itt Lóczy ur?

— Igen kérem, itt volt, hagyott is valamit itt, de az nem hozzánk tartozik, már a külsején látszik, hogy valami másodrangú nyomda…

(Minden nyomda szerint a „másik” másodrangú.)

— Köszönöm.— rebegtem — itt az igazi, az elsőrangú sajtóhibagyüjtemény.

— Oh kérem! Csak amilyen a kézirat! Ez sajtóhibagyüjtemény? Miért sajtóhibagyüjtemény? Olyan kézirat után létezhet más szedés?

— No hisz nincs semmi baj! Alásszolgája!

— Bocsánat, doktor ur, a tanár ur itt hagyta az egyik keztyüjét, talán lenne szives átadni neki.

— Köszönöm —

Tehát a Hornyánszky-korrekturával és az egyik keztyüvel fölszerelve vágtattam az Aka-

démiához. Ott Szily Kálmán bátyám fogadott szokott diplomatikus mosolyával.

— No kedves öcsém, a maga professzora igazán szórakozott ember, jó hogy jön, mert baj van.

— Jaj, mi történt?

— Tudja, hogy hogyan szokott sietni. Még ma kellett volna kéziratot hozni, összetapogatta minden zsebjét, azt hittem, betöri az oldalbordáját, de bizony kézirat nem került elő, pedig azt állítja, hogy zsebre tette. Most hova lett a kézirat? Mit csinálunk, ha meg nem találjuk!

— Méltóztassék csak egy kis türelemmel lenni, mindjárt hozom.

— De honnan, az ég szerelmére!

— Az már az én titkom, de tessék csak nyugodtan lenni.

Azzal futottam tovább.

— Megálljon csak, kedves öcsém, a maga szeleburdi professzora itt hagyta a botját, ugyan kérem, vigye utána. Mi a csoda lesz a kézirattal!

Az Akadémia épületében volt a Hornyánszky-nyomda irodája. Oda robogtam be.

— Volt itt Lóczy ur?

— Igen kérem, de nem tudjuk, mit csináljunk ezzel a kézirattal, ez aligha szól nekünk.

— Nem, nem! Itt az önök korrekturája, a kézirat máshova szól, kérem csak ide. — Az akadémiai volt.

— Nem hagyta itt valamiét még azonkivül?

— Nem tudom kérem, de itt van egy gazdátlan félkeztyű!

Mivel a párja már a zsebemben volt, szerencsésen igazoltam jogos tulajdonosát s magamhoz véve, ismét visszamentem az Akadémiába s leadtam nagy megnyugvásra a kéziratot s többi zsákmányommal kivillamosoztam az Izsó-utcába, Lóczy lakására, hogy beadjam a keztyüt és botot s megnyugtassam a mestert, hogy nem veszett el az akadémiai kézirat. Mint valami egészen természetes dolgot vette tudomásul, csak annyit mondott, hogy köszönöm s rögtön arról kezdett beszélni, hogy van-e diskordancia a werfeni palák és a vörös homokkő között a Balaton partján. …

Családi élete

… Második neje, verebélyi Marzsó Katalin, előkelő nemes családból származott. Atyja, verebélyi Marzsó Lajos kir. tan., M. Á. V. főfelügyelő volt, ennek anyja pedig Colonna hercegnő.

Lóczy második nejével példás boldog házaséletet élt. Mint nagy műveltségű, művészi képességekkel megáldott nő, gyönyörűen zongorázik és szépen énekel, ezzel különösen a csopaki estéken családját és a család bizalmas barátait valósággal elragadta. Feledhetetlen szép esték voltak azok a csopaki nyaralóban. Egész napi fáradságos munka, hajózás vagy gyaloglás után este együtt ültünk a verandán. A gyermekek már álmosak voltak. Lóczy a rossz világítás miatt már nem dolgozott, hanem végig feküdt heverő székén, mi fiatal tanítványai a diófa lombjai alól bámultuk a végignyuló Balatont, amint a Hold lassankint fölemelkedett s csillogó aranyhidat vert a homályos vizen át. Az aranyhid széles csikján megjelent a gőzhajó fekete szilluett-



A Lóczy-család Csopakon (1905) (Magyar Földrajzi Múzeum gyűjteménye)

je s csendesen, némán surrant át Siófok felé. Csöndes éjjeli szellő suhant végig néha-néha a fák lombjai közt, finom bárányfelhők közt kezdett bujkálni a mélán bámuló Hold. A verandáról kihangzottak a zongora csendes futamai, mindig jól, sohasem bántó dilettantizmussal. Néha-néha belecsendült az énekhang, az is olyan finoman, csendesen, mint ahogy a hangulat megkivánta. A pihenés poétikus nyugalmában meg is feledkeztünk a jó csopaki borról, amely a malomkő-asztalon szép üvegkancsóban csillogta vissza a kivetődő lámpafényt. Mi, fiatalok belemerültünk a hangulat poézisébe…

Egyszerre megszólal Lóczy: „Urak, holnap alighanem eső lesz, de az nem baj, azért megyünk a Tormahegyre, jó lesz mindent előkészíteni.” Persze nem mozdultunk, hisz olyan ritka a pihenésnek ilyen kellemes órája. De Lóczy úgy vélte, hogy jó lesz jó példával elüljárni s elkezdett az asztalán matatni, a székeket tologatni. Erre aztán felsőbb helyről leintették, hogy maradjon békességben. A jó hangulat helyreállítására nekem kellett tréfával beleavatkoznom: „De ugyan Professzorom, ha fáradt és álmos vagy s félsz, hogy nem aluszod ki magadat, parancsolj lefeküdni, mi „fiatalok” nem vagyunk fáradtak s ezt a kis ébrenlétet kibirjuk.”

Ez aztán elevenbe vágott! Hogy ő fáradtabb, mint mi! Olyan nincs!

„Ugyan már, hogy gondolsz olyant! Hiszen csak titeket akarlak kimélni.”

Azzal végigfeküdt ismét a heverő-széken s öt perc múlva jóizüen horkolt. Miatta sirhatott Santuzza vagy Mignon, kacaghatott Bajazzo, ő álmodott ammonitesekről és pseudomonotisokról.

Utazásaira, tanulmányaira kissé meggondolatlanul költött, mert szomorú,

soha meg nem bocsátható valóság, hogy nálunk kortescélokra, pártérdekek számára mindig jutottak százezrek, de ilyen nagy munkájú, végtelen hasznú munkásságot mindig csak nyomorult fillérekkel tudtak támogatni. Pedig a szén, földgáz, bauxit stb. alighanem többet jelent az országnak, mint a pártoskodó férfiak lekenyerezése.

A költekezés fölbillentette volna a család vagyoni egyensúlyát, ha felesége nem lett volna olyan ügyes, szinte zseniális, hogy még fiainak is megvarrta a ruháikat s bár a háztartás fényét megtudta óvni, mégis csodálatosan takarékos és előre látó tudott lenni. Lóczy munkaképességére s így a magyar tudományra és kulturára is nagy áldás, hogy ilyen, valóságos őrangyal állt a zseniálisan naiv, a tudományszeretet őrületétől elragadott férfiú mellett őrt.

Lóczy, a tudós

Amennyi jogos bírálat illetheti Lóczyt, az embert, külsőségeinek elhanyagolása miatt, annál több dicséretet és magasztalót kell irnunk a természetvizsgálóról és tudósról. Ezen a téren kifejtett tevékenykedése, vasakarata és biztos itélete felülmulhatatlan.

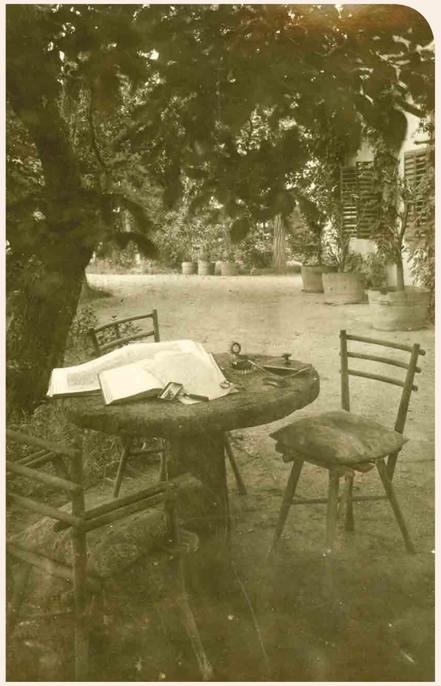
Ha az ő tudományos készültségét és alkotásainak legnagyobb értékeit beható vizsgálat alá vesszük, meg kell állapítanunk, hogy ő a geológia geografusa volt. Ezt a kifejezést még nem hallottam és nem olvastam, de ezzel tudom legjobban jellemezni működését. Nem volt petrografus, mert kőzeteit mindig szakpetrografusoknak adta ki meghatározás végett. Nem volt paleontológus sem, mert kövületeit a szakembereknek adta meghatározni. De ha a rétegeket petrografiailag és paleontológiai alapon sztratigrafiailag is pontosan ismerte, akkor helyzetüket, keletkezésüket, a belőlük fölépített hegy keletkezését és jellegét senki nála élesebb szemmel és biztosabb itélettel nem tudta volna tisztázni.



Lóczy Lajos jobbján Cholnoky Jenővel, balján Papp Károllyal (Magyar Földrajzi Múzeum gyüjteménye)

Lóczyt az tudta igazán helyesen értékelni, aki kellő geológiai erudicióval fölfegyverkezve, künn járt vele a szabad természetben. Egy-kettőre fölismerte a dolgokat, nagy áttekintéssel értette meg az összefüggéseket és gyorsan térképezte, mert csak a térképen kijelölt határok alapján lehet aztán tovább, logikusan dolgozni s a tévedéseket elkerülni. Azonnal tisztázta a vetődéseket, eltolódásokat s nem nyugodott addig, amíg a hegy szerkezetéről tiszta képet nem nyert. Különösen sokat jártam vele a Balaton-Felvidéken. Ez a terület ugyan geológiailag kitünően föl volt véve, mert legpontosabb és legélesebb szemű geológusunk, Böckh János tanulmányozta, de Böckhnek csak rövid ideje volt s nem térképezhetett olyan részletesen, mint ahogy azt bizonyosan megtette volna, ha ideje engedi. Ezért aztán a törmelékkel, löszös málladékkal elfedett részleteket lösznek jelezte, mert itt nem volt ideje olyan aprólékos kopogtatással eljárni, amilyenre itt szükség van. Munkánk egyik főrésze abban állt, hogy ezeket a nem térképezett (lösznek jelzett) területeket pontosan fölvegyük s a többi részen is a szerkezetet sokkal behatóbban taglaljuk.

Elemében volt Lóczy. A jól, sőt kitünően kidolgozott Böckh-féle sztratigrafia alapján gyorsan ment a munka s mesésen bontakozott ki a hegység gyönyörű szerkezete. Később tovább mentünk. Laczkó Dezső veszprémi kegyesrendi áldozópap és tanár csatlakozott hozzánk s bejártuk a Bakonyt is. Mindketten bámultuk a mester éles szemét, fáradhatatlan mozgékonyságát és biztos tudását. Bátran merem állítani, hogy nincs a



A kerek, vörös homokkő asztal, amelyen balatoni munkájának legnagyobb részét írta (Magyar Földrajzi Múzeum gyüjteménye)

Föld kerekségén geológiailag jobban ismert terület, mint a Balaton-Felvidék. Böckh az itteni rétegekből mintegy 600 állatfaj fosszilliáját ismerte, ma több, mint 6000 ismeretes és úgyszólván minden deciméternyi vastag réteg kortörténeti helye ismeretes.

Fáradságot nem ismert és nem félt semmitől. Hogy nem lesz mit enni, nem lesz hol hálni, hogy az erdőben kell éjjelre maradni stb. ez őt egyáltalában nem zavarta. Bámulatos vakmerőséggel ment neki mindennek, ha a tudományos érdek úgy parancsolta. Különösen Khinában és Szerbiában tanusított ilyen vakmerőséget s néha majdnem keservesen fizetett meg érte.

Részletek Cholnoky Jenő Lóczy Lajos *című cikkéből, 1920-ból.*

A hazai geológia felvirágzása a magyar gazdaság és társadalom egyik legtermékenyebb időszakához, a kiegyezéstől az I. világháborúig tartó közel fél évszázadhoz kötődik. Ekkor élt és alkotott Lóczy Lajos (1849–1920), akit két tudományterület, a földtan és a földrajz is kiemelkedő művelőjének tart.

Az ifjú Lóczy és a himalájai nagytektonika

Gyermekkorának legszebb éveit az aradi Hegyalján töltötte, ahol édesapjával bebarangolta a Hegyes-Drócsa vadregényes tájait. Aradon érettségizett, majd megözvegyült édesanyja nyomatékos kívánságára és óriási áldozattal járó anyagi támogatásával egyetemi tanulmányait a Zürichi Polytechnikumban (ma ETH) végezte (1870–1874). Legkedvesebb tanárai a korszak két kiemelkedő geológusa, az idős mester, Escher von der Linth és fiatalabb tanítványa, Albert Heim voltak. Hírnevüket az alapozta meg, hogy személyükhöz fűződik a takaróelmélet első megfogalmazása, nevezetesen: a Glarusi-Alpokban található, megkérdőjelezhetetlen fordított rétegsort fekvőredő kialakulásával magyarázták. Lóczy elsősorban az ő hatásukra választotta élethivatásul a geológia művelését.



Lóczy Lajos zürichi tanulmányai idején (MBFSZ gyűjteménye)

Lóczy éppen befejezte egyetemi tanulmányait, amikor néhány rövidebb értekezéssel a háta mögött, 1876-ban értékelést közölt a hegységképződési elméletekről, amelyhez az apropót Suess 1875-ben megjelent, első jelentős műve adta. Az akkori földtudomány legnagyobb problémájának korszerű kifejtése, és ennek során önálló véleményének megfogalmazása kiemelkedő tudásának első, kétségbevonhatatlan megnyilvánulása volt: *„Mi módon képződtek a hegyek, mily okok és erők befolyása alatt emelkedtek az Alpesek 4600 méter, a Himalaya csúcsai 9000 méter magasságra a tengerszín fölé? E kérdésekre a földtan határozott és kielégítő feleletet adni mindeddig nem képes”* – kezdi a cikket. Majd a kurrens külföldi elméleteket áttekintve megállapítja, hogy *„Jelenleg tehát mindinkább a kihűlő földtest összehúzódásából kifejlő oldalerőnek róják fel a hegyalakítást…”*. Ezek az oldalerők határozott polaritású torlódásokat és redőket hoztak létre, amelyek az Alpok és a Nyugati-Kárpátok esetében északra (északkeletre) irányulnak. *„Eme hegylánczok a vízfelület hullámaival hasonlíthatók össze, melyek a partfelé üzetve s az őket szegélyző régibb hegytömegek előfokain megtörve, egymásba torlódtak és összegyűrődtek…”*. Majd így folytatja: *„De nemcsak az Alpesek utalnak egynemű általános oldalnyomásra fölépítésükben, hanem Európa többi hegységei is…”*. Tisztán látta azonban, hogy az északi irányú torlódás nem általános: *„Nem csak a Himalaya, hanem a többi közép-ázsiai hegységek leírásából is az tűnik ki, hogy ezek szintén úgy, miként az alpesi rendszer, egyoldalú fölépítésűek; csakhogy tömegök mozgása, ellentétben az Alpes-rendszerével, délnek irányult, megfelelve a délfelé domboruló görbületüknek”*. Nem hagy kétséget a felől sem, hogy a különböző irányú torlódások során a rétegek egymás fölé nyomulhatnak és áthajló redők, azaz takarók alakulhatnak ki.

Ezután következett, közel egy év múlva a kelet-ázsiai expedíció, melynek útvonala a 22–23. oldalon, a Lóczy Lajos szerkesztette földtani térképen látható. A Széchenyi-expedíció tagjai (gróf Széchenyi Béla, Lóczy Lajos, Kreitner Gusztáv osztrák térképész főhadnagy és Bálint Gábor nyelvész) Triesztből Bombaybe hajóztak. Ezután Lóczy Kreitner társaságában Calcuttába utazott, ahol a Bengáli Ázsiai Társaság könyvtárában búvárkodott. Itt bukkant rá Kőrösi Csoma Sándor elveszettnek hitt önéletrajzára, és a nagy székely tudós példája nyomán érlelődött meg benne az elhatározás, hogy az ő egykori útját követve megkísérel eljutni Tibetbe. Saját költségén, a terület angol köztisztviselőinek támogatásával négy nap alatt felértek Dardzsilingbe (1879. február 12.), ahol felkereste Kőrösi Csoma sírját, majd ötven teherhordóból álló karavánnal feljutott a Szikkim területén lévő 4423 méter magas Dzselep-hágóra. Bár ez Tibet egyik kapuja, tovább nem tudtak menni és 1879. február 28-án visszaindultak

Idősebb Lóczy Lajos

A Gömör vármegyéből származó, nemesi eredetű Lóczy család előnevét a Sajószentkirály melletti Lóczipusztáról kapta. Lóczy Lajos édesapja, Lóczy Sándor szőlőbirtokot szerzett az Arad megyei Ópáloson. Szülei a szabadságharc idején Pozsonyba költöztek, ott született meg lóczi Lóczy Lajos, 1849. november 4-én. Iskoláit Aradon, egyetemi tanulmányait a zürichi műegyetemen végezte, ahol 1874-ben mérnöki oklevelet szerzett.

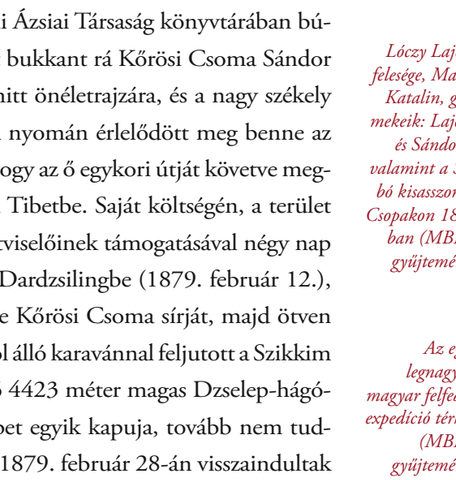
Tudományos pályafutását, mint múzeumi segédőr, a Magyar Nemzeti Múzeum Ásvány- és Őslénytárában kezdte, 1874. december 2-án. 1877 decemberében indult útnak gróf Széchenyi Béla tudományos expedíciója. A mai napig az egyik legnagyobb magyar felfedező expedíciónak tartott, két és fél éves utazáson részt vett az akkor még csak 28 éves Lóczy Lajos is.



Nem sokkal hazatérte után Lóczy elfogadta Böckh János meghívását a Földtani Intézetbe, de alig három év elteltével székhelyét a Királyi József Műegyetemre tette át, ahol földtant tanított. Még ugyanebben az évben meghívta a Budapesti Tudományegyetem az Egyetemes Földrajzi Tanszékére nyilvános rendes tanárnak, amit végül el is fogadott.

1908-ig maradt az egyetemen, akkor nevezték ki a Földtani Intézet igazgatójává. A Földtani Intézet éléről 11 év elteltével vonult vissza csopaki kúriájába. Nem sokkal később, 1920. május 13-án meghalt. Id. Lóczy Lajos magánéletét csapások sora kísérte: ahogy hazatért Kínából megnősült, de feleségét és rövidesen két kislányát, 3, illetve 5 éves korukban elveszítette, tüdővészben. Alig telt el a gyászév, újra megnősült, de első kisfia 1 éves korában meghalt. Élete utolsó három évtizedét feleségével, két fiával és lányával boldog családi létben töltötte budapesti otthonában és csopaki nyaralójában.

Fia, az 1891. június 5-én, Budapesten született ifjabb Lóczy Lajos már pályája kezdetén apja nyomdokaiba lépett: tanulmányait szintén a zürichi egyetemen végezte. Az 1930-as évektől a szénhidrogén-kutatás állt érdeklődése középpontjában. Szakértőként a világ csaknem minden részén dolgozott. 1932-től a Földtani Intézet igazgatója lett és jelentős szerepet vállalt az első hazai szénhidrogénmezők termelésbe állításában is. Ifj. Lóczy Lajos a második világháború után végleg elhagyta az országot és 1961-ben Brazíliában telepedett le.



Lóczy Lajos és felesége, Marzsó Katalin, gyermekeik: Lajoska és Sándorka, valamint a Szabó kisasszonyok Csopakon 1896-ban (MBFSZ gyűjteménye)

Az egyik legnagyobb magyar felfedező expedíció térképe (MBFSZ gyűjteménye)

ÁTNÉZETI TÉRKÉP Gróf Széche

nyi Béla keletázsiai utazásához 1877-1880.

A topográfiai tervezetet készitette
Kreitner Gust. cs. és kir. főhadnagy.

A geologiai tervet Lóczy Lajos.

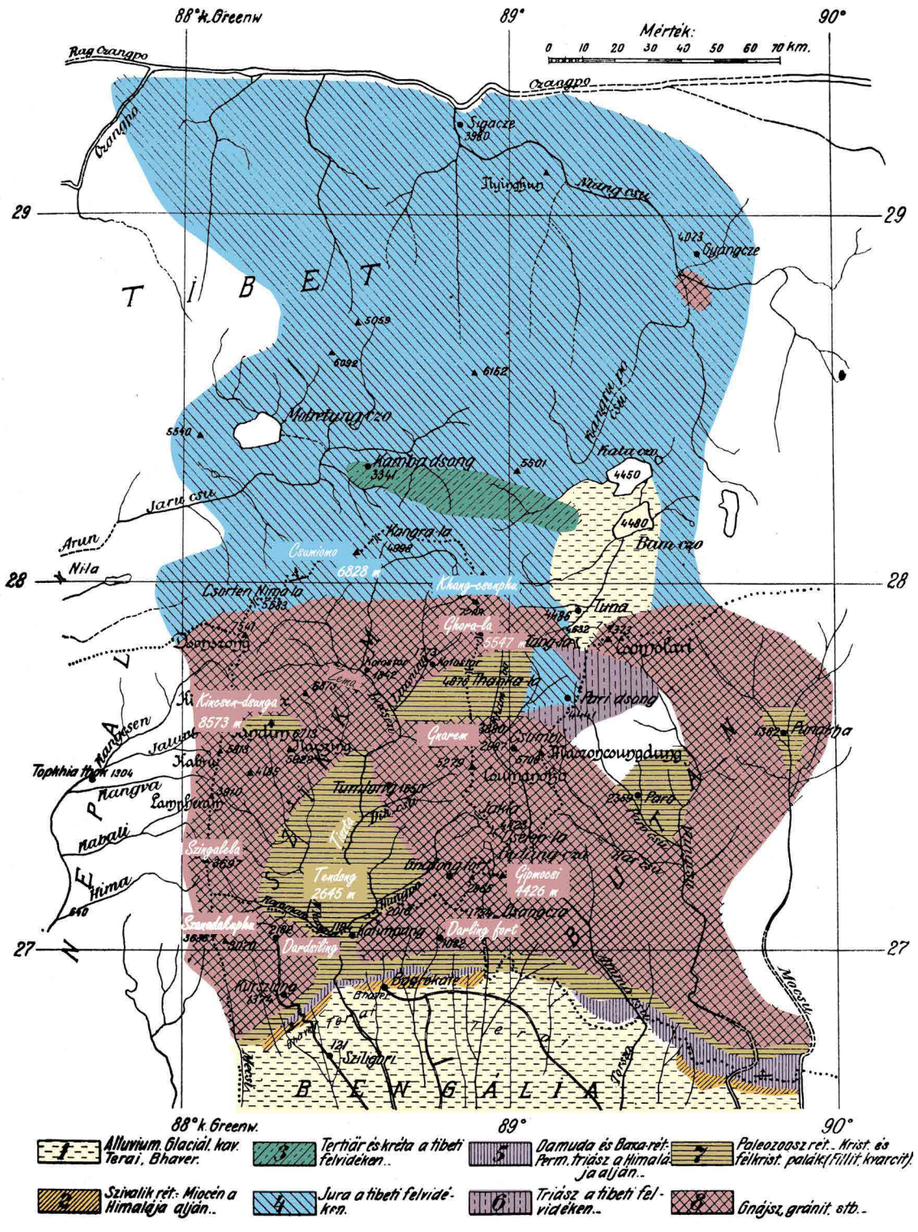
JELMAGYARÁZAT.

- SZEN.FU-TARTOMÁNYI FŐVÁROSOK.
- Fu-Megyei székvárosok.
- Csou - 1ső rendü törvényhatósági székvárosok.
- Sahien - 2ső " " "
- Kisebb helyek
- Kutak
- Birodalmi határok.
- Tartományok és függő államok határai.
- Kinaifal.
- Czatornák.
- Magasságok méterekben.
- Szerzőkéz kikötők.
- Gróf Széchenyi útja.
- a. Állomány. b. Futóhomok.
- a. Löss. Szubaérikus képződmények általában. b. Laterit.
- Pliocen.
- a. Eocen - Miocen. b. Kréta.
- Jura.
- Trias.
- Perm - Trias.
- a. Ismeretlenkorú homokkő. Fekükarbon - Triasz.
- Devon.
- Szilur. Azóe paleozoos képződmények általában.
- a. Szini képződmény. Huron - Kambri. b. Vulkáni. " " "
- Oneiss, Gneiss - Granit stb. (Azok képződményei.)
- Eruptiv Granit, Diorit stb.
- a. Porphyr, Diabas. b. Bazalt, Andezitlávo.

Mérték: 1:5,000000.

Kidolgoztatott a cs. és kir. katonai földrajzi intézetben Bécsben. 1883. Decemberben.

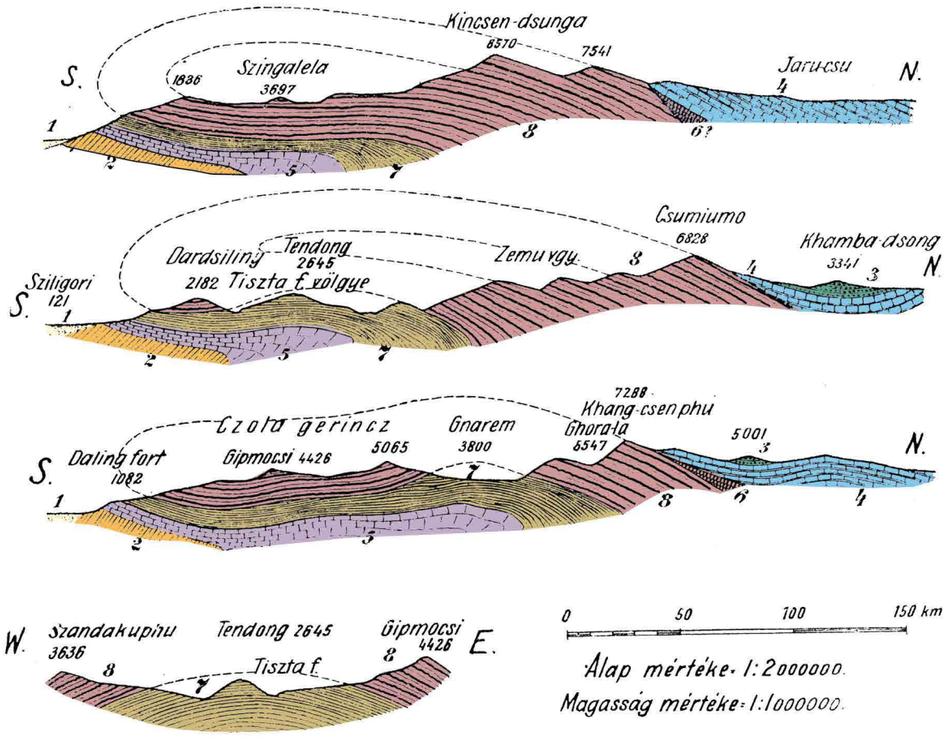
MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA KÖNYVTÁRA



Lóczy által szerkesztett földtani térkép a szikkimi Himalájáról

Calcuttába. *„Bárha geológus kalapáccsal tíz napig jártam Szikkim délkeleti részében és jócskán gyűjtögettem kőzeteit, mégis csak futólagos megfigyeléseket jegyezhettem naplómba…”* – írta majd 20 évvel később, mikor ezeket a megfigyeléseket kellően kiérlelve, 1907-ben közreadta a Földrajzi Közlemények hasábjain. Legfontosabb megfigyeléseiről azonban már 1883 májusában, a Földtani Társulat előadóülésén beszámolt. E rövid utazás során tett „futólagos megfigyelések” jelentették a kelet-ázsiai expedíció legfontosabb tektonikai felfedezését, amit a szikkimi Himalája geológiai térképe, valamint négy földtani szelvény mutat be.

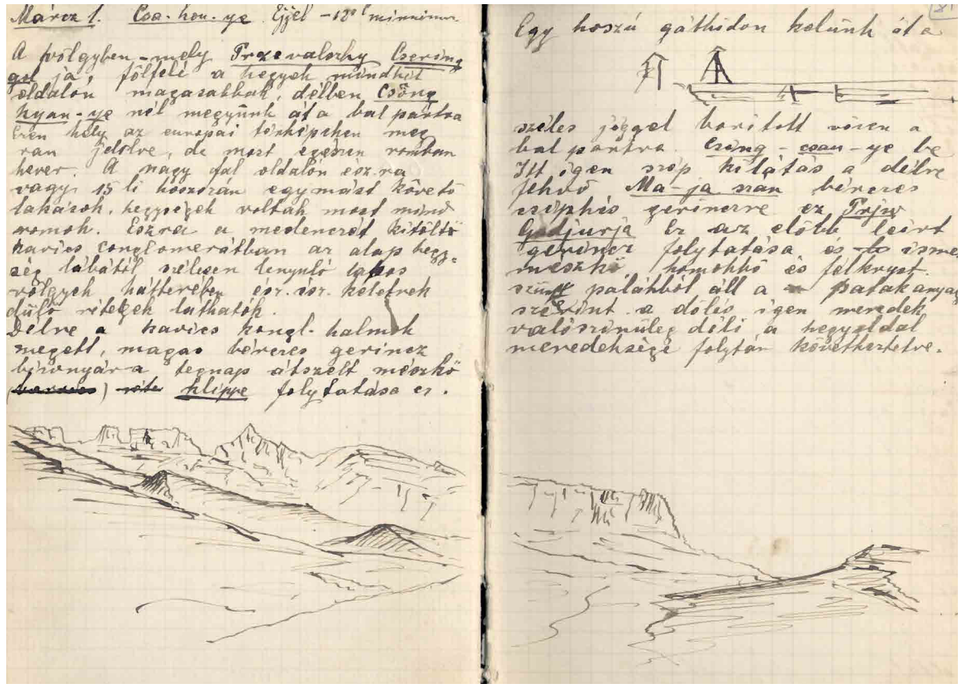
A térkép és a szelvények megegyeznek Lóczy 1907-ben publikált eredeti ábráival, de a jobb áttekinthetőség kedvéért kiszíneztük és néhány részen a nehezen olvasható neveket átírtuk. Lóczy cikkében beszámolt arról is, hogy a terület geológiájára vonatkozó minden fontos irodalmat áttanulmányozott, ezért nyilvánvaló, hogy úgy a térkép, mind a metszetek szerkesztése során mások eredményeit is figyelembe vette. A valóban világraszóló következtetés a térképen és a szelvényen jelölt gneisz–gránit összlet tektonikai pozíciójára és a teljes Himalája takarós szerkezetére vonatkozik. A metszetek alapján jól látható, hogy a Himalája legmagasabb csúcsait a legellenállóbb gneisz–gránit összlet alkotja. Ezek alatt gyengén metamorf paleozoos palák, a Dalingi Fillitek találhatók. Az eredeti térképező angol geológus, Frederick Richard Mallet 1875-ben publikált tanulmányában normális rétegsorrendről ír, a gneisz–gránit összletet fiatalabbnak tartja a Dalingi Filliteknél. Bár Mallet számára is kellemetlenül zavaró volt az a tény, hogy a rétegtanilag magasabb helyzetben lévő gneisz metamorfózisának foka sokkal magasabb, mint az alatta lévő filliteké, dilemmáját inkább puritán erkölcsi alapon, semmint tudományos érveléssel oldotta fel. Vitán felülállónak vélte azt, hogy nem lehet a dolgok normális rendje az inverz



Lóczy által szerkesztett négy földtani szelvény a szikkimi Himalájában (jelmagyarázat a szemközti ábrán)

helyzet. Lóczy volt az első, aki ki merte jelenteni, hogy a rétegsorrend fordított, tehát a gránit a fillitekre *„…tektonikai mozgás következtében borult reá takaróként”*. Sőt a fillit is része a fordított rétegsornak, tehát *„…alig lehet kétség abban, hogy itt a mezozói és paleozói – cambriumi lerakódások a gnejszig megfordított helyzetben vannak. A rétegáttolódásnak, az átgyűrt antiklinálisnak olyan világos esete van itt, hogy azt szembeszökőbbnek képzelni sem lehet”*. Ezután Lóczy visszautalt a klasszikus alpi területekre és atyai barátjára Suessre, aki kezdeti idegenkedése ellenére *„…hajlandó volt olyan rétegáttolásokkal magyarázni a Himalája szerkezetét, mint a schweizi alpok bonyolult tektonikáját újabban a „charriage”-zsal az illetékes kutatók csaknem egyértelműen teszik”*. Majd *„A Nyugati-Alpok szerkezetének mindinkább terjedő magyarázataihoz képest kifogástalan bizonyosságú ablak van a dardsilingi angol terület és Szikkim határán… Ez az ablak nem más, mint metamorfikus palák területe, amelyet mindenfelől gneisz, gnejsz-gránit magaslatok vesznek körül…”*.

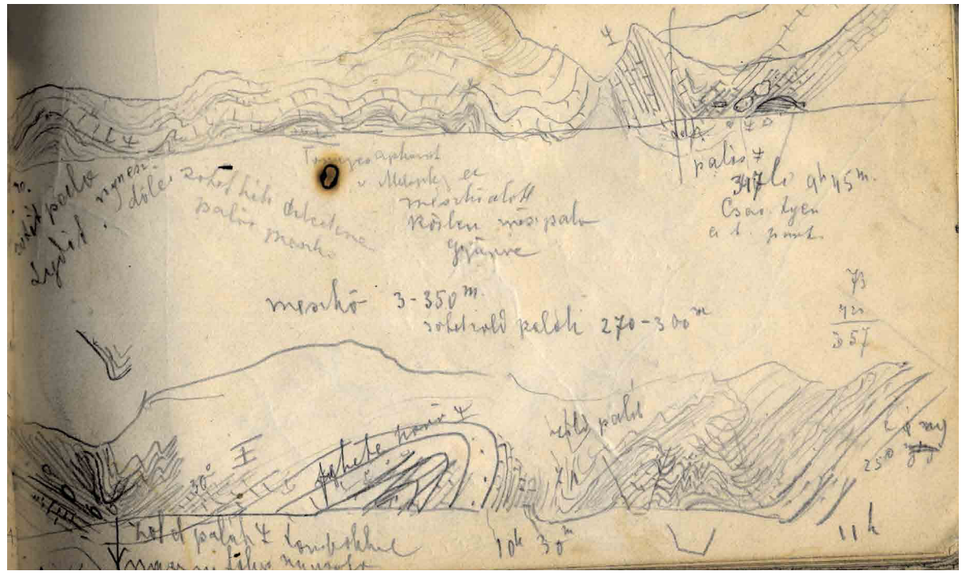
Mai ismereteink fényében Lóczy 1907-ben napvilágot látott geológiai térképe helyes és azzal összhangban vannak a geológiai szelvények.



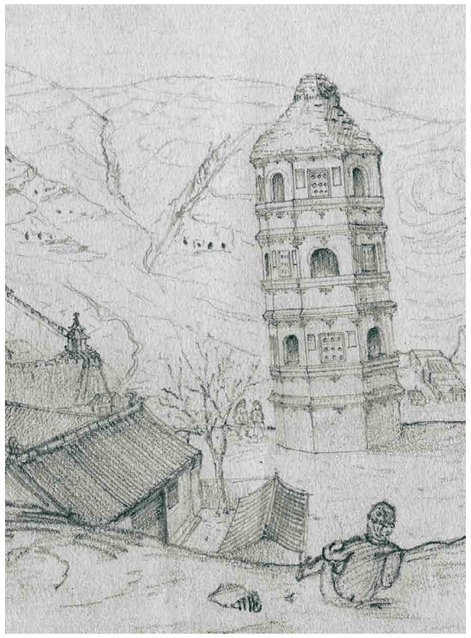
Részlet Lóczy Lajos ázsiai útjának jegyzőkönyvéből (MBFSZ gyűjteménye)

A takaróképződés akkori, Escher-féle modelljének megfelelően a gneisz–gránit takarót az első két szelvényen átbuktatott redőként ábrázolta. Ezért használta Lóczy a „rétegáttolódást” és az „átgyűrt antiklinálist” azonos értelemben. Escher von der Linth – Lóczy professzora Zürichben – a svájci Glarus-dóm geológiai szelvényének értelmezése során már 1846-ban javasolta a fekvőredőket, mint a takaróképződés mechanizmusát. Marcel Bertrand 1884-ben azonban ugyanezt a szelvényt újraértelmezve, elsőként dolgozta ki a takaróképződés áttolódásos (charriage) mechanizmusát, ami megfelel a mai tudásunknak. Még egy fontos dolog megemlítendő a szelvényekkel kapcsolatban: ezek azt mutatják, hogy a perm–triász összlet (Damuda rétegek) és minden, ami felette van, rá van tolva a „harmadkori” Szivalik rétegekre is, amelyek az előtéri molaszt képviselik. Ez azt bizonyítja, hogy a Himalája déli frontján a feltolódás posztmiocén korú. Lóczy ezt a bátor következtetést csak lerajzolni merte, szövegben csak a megfigyelési tényt rögzítette: *„Harmadkori rétegek a Tiszta folyó két oldalán nagy elterjedésben kísérik a Himalája alját. Lágy homokkő, vékony barnaszéntelepekkel 35°-kal dől N vagy NNW felé, a triászkorú Damuda rétegek alá”*.

Végül nem kevésbé fontos az, hogy Lóczy már 1907-ben, mai szemmel nézve is korrekt magyarázatot adott az ablakok kialakulására, valamint a kutatási területet közel észak–déli irányban harántoló Tiszta (Tista) folyó markáns bevágódására. Leírta, hogy az ablakokban kibukkanó fillitek antiklinálist alkotnak, amelyek főleg miocén kori gyűrődések eredményei, valamint *„Bizonyosan most sem pihentek el a Föld hegyóriásain azok az erők, amelyek az izosztázia megváltozásából fakadnak”*. Idézte, hogy újabban, az utolsó jégkorszak során kialakult skandináviai és skóciai jégtakarók eltűnésével hozzák



Lóczy Lajos ázsiai expedíción készített rajza (MBFSZ gyűjteménye)



Lóczy Lajos ázsiai expedíción készített rajza (MBFSZ gyűjteménye)

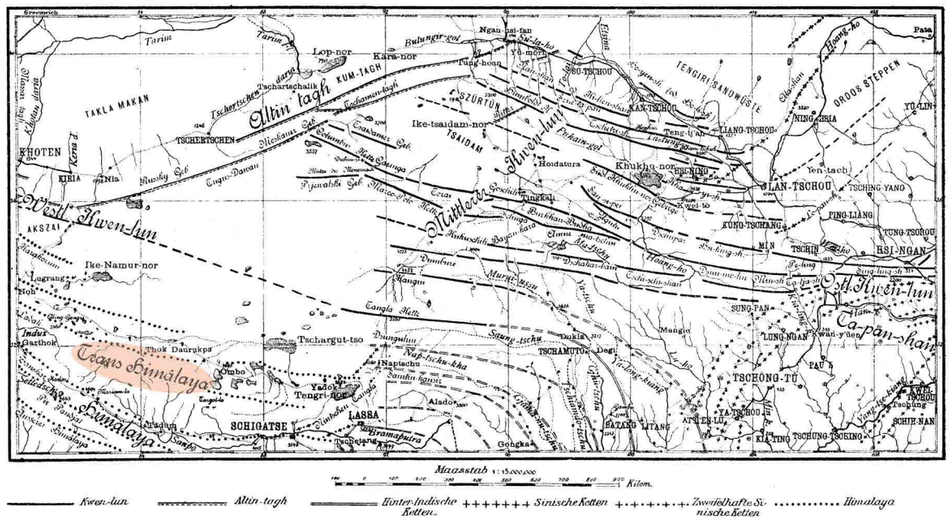
kapcsolatba azok emelkedését, a 200 m magasságú tengeri színlők jelenlétét. Ezt a modellt alkalmazta a himalájai területre is: *„A Tiszta völgy jegeseinek elpusztulása után a bevágódó és hátráló erózió több mint 1000 m vastagságú kőtömeget távolított el a Szikkim medencéjéből és elhordta a gnejsz-gránit takarót, úgy hogy a fillit ablak keletkezését tisztán a denudáció okozta”*.

Jogos kérdés, hogy Lóczy himalájai eredményei – elsősorban a hegység takarós szerkezetének felismerésében való prioritása – csak a hazai geológia büszkesége, avagy szerepét a nagyvilág is elismeri. Örömmel állapítható meg, hogy a legjobbak tudatában vannak és elismerik Lóczy szerepét. A XX. század közepén új lendületet kapott és mára szinte divatossá vált himalájai kutatások legnagyobb alakja, a svájci Augusto Gansser 1991-ben azt írta, hogy a Magas-Himalája gránit–gneiszei és az alatta lévő palák közti fordított metamorf fok problémájára elsőként Lóczy adott magyarázatot. Nevezetesen: *„Nagy átbuktatott redőket (takarókat), mint lehetséges okot Lóczy Lajos Szikkimben már 1878-ban javasolta, még azt megelőzően, hogy hasonló takarókat az Alpokban felfedeztek volna. Sajnos, Lóczy eredményeit csak 30 évvel később publikálta”*.

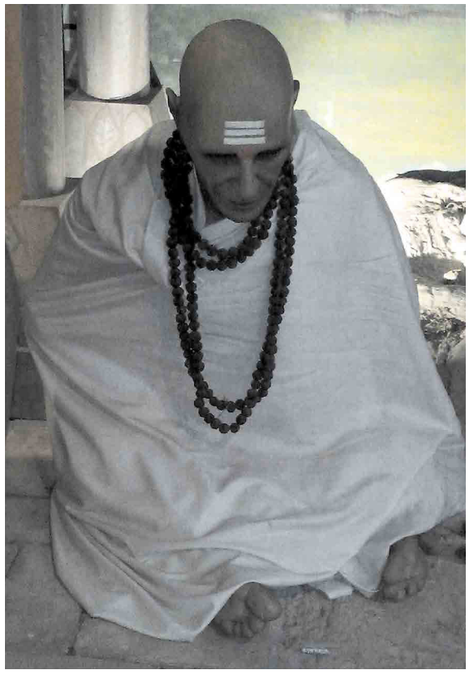
Megállapítható, hogy zürichi tanulmányai és a kelet-himalájai expedíció tapasztalatai eredményeképpen Lóczy mindent tudott és alkalmazott mindabból, amit a XIX. század végén korszerű, mobilista nagytektonikának nevezhetünk.

Ki fedezte fel a Transzhimaláját?

A kelet-ázsiai kutatások értékelése kapcsán nem csak Lóczy érdemeinek felmutatása, hanem egy gyakran félremagyarázott másik híres „felfedezés” valódi történetének a bemutatása is a célunk. Ez pedig a Transzhimalája hegyláncának a kérdése. Tasnádi Kubacska András 1974-ben megjelent, emelkedett stílusú Lóczy könyvében a szikkimi expedíció leírása során úgy véli, hogy Lóczy *„Felderítette, hogy a Himalája fő hegyvonulata mögött egy addig ismeretlen, második hatalmas hegység húzódik. Berajzolta térképébe és a Transzhimalája nevet jegyezte mellé. Hosszú évek múlva Sven Hedin más oldalról szerencsésen eljutva a hegységbe, szintén Transzhimalájának nevezte a roppant vonulatot. A Royal Geographical Society kételkedve a hegység létezésében Lóczyhoz fordult, hogy döntené el a kérdést. Lóczy igazat adott Sven Hedinnek, de megjegyezte, hogy útitérképébe korábban ő is ugyancsak Transzhimalája néven rajzolta be a hegységet”*.



Lóczy 1893-ban megjelent térképe Sven Hedin munkájából



Pundit (pöndit, forrás: wikipédia)

Cholnoky Jenő 1920-as cikkében ugyanezt a történetet ennél hitelesebben adta elő. Eszerint Sven Hedin tibeti nagy útjáról (1905–1908) hazatérve *„Előadást tartott a londoni Földrajzi Társulat előtt s kifejtette, hogy a Himalájától északra, az Indus és a Brahmaputra (Szan-po) felső völgyületének északi oldalán, a Himalájával párhuzamos, hatalmas hegylánc húzódik. Névtelen és alig ismeretes, félelmes óriás ez, vetekedik a Himalájával. Indítványozza, hogy nevezzék el ezt a hegyláncot Transzhimalájának. Az ülés lezajlása után az angol geográfusok legkiválóbbjai szép levélben fordultak Lóczyhoz, hogy mondjon ítéletet a kérdésben. Lóczy egyszerűen hivatkozott gróf Széchenyi Béla kelet-ázsiai utazásának tudományos eredményeire. Az I. kötet 567. oldalán a 111. ábra bemutatja Tibet hegyvonulatait s ott már jókora betűkkel fel van írva, hogy »Trans Himalája«. Ő tehát már 1890-ben megjelent nagy munkájában publikálta ezt a fölfedezést, természetesen elméleti alapon s az indiai pönditek tapasztalataiból következtetve”*.

Ebben a leírásban minden megállapítás helyes, de az egyértelműség kedvéért célszerű bővebben kifejteni ennek tartalmát. Nevezetesen a Transzhimalája felfedezése „elméleti alapon” történt és az „indiai pönditek tapasztalataiból” következett. A valóság az, hogy Lóczy nem fedezte fel a Transzhimaláját, sem szikkimi útja, sem a kínai expedíció során közelébe sem jutott, sőt nem is láthatta ezt az óriási hegyláncot. Lóczy érdeme mégis nagy, mert ő volt az a kiemelkedő tudós, aki nem csak mindent elolvasott, hanem mindent megértett és ez alapján ténylegesen elsőként rajzolta le a Transzhimalája vonulatát a Cholnoky által hivatkozott és *A tibeti felföld hegyvonulatai* címet viselő ábrán.

A leghitelesebb forrás természetesen maga Lóczy, aki 1886-os, *A Khinai Birodalom természeti viszonyainak és országainak leírása* című nagy tanulmányában először is elmagyarázta, kik azok a pönditek és milyen szerepet játszottak Tibet feltérképezésében: *„Pöndit-nek nevezik azon bennszülött tibeti eredetű indiai alattvalókat, kiket Walker tábornoknak, az indiai trigonometriai és topografiai felvétel volt igazgatójának kezdeményezésére a Himaláján túl fekvő vidékek fölvételére az angolok kiküldenek. E férfiak kellő geografiai ismeretekkel bírnak, jártasak a sextáns és az aneroid kezelésében és a térkép-fölvételben. Természetesen álczím alatt, kereskedők módjára utaznak, és nehogy*

Sven Hedin reakciója

Sven Hedin 1922-ben megjelent, Southern Tibet 1906–1908 című könyvében így emlékezett vissza a Transzhimalájai esetre: „A művelt és szakértő magyar geológusprofesszor, Lóczy Lajos, aki részt vett gróf Széchenyi Béla híres, 1877-től 1880-ig tartó, Ázsia szívét megcélzó expedícióján, nagyon tiszta és világos összefoglalását adta a kontinens belsejében húzódó hatalmas hegylánc szerkezetének." Hedin a szöveg lábjegyzetében leírta, hogy 1886-ban megjelent Lóczynak A khinai birodalom természeti viszonyainak és országainak leírása című könyve, de „Én nem tudom elolvasni ezt a könyvet, melyet tudomásom szerint még nem fordítottak le."



Ezután részletesen tárgyalja Lóczy e témakörben publikált eredményeit, egy az egyben közli Lóczy eredeti, 1893-ban megjelent térképét, a Transzhimalája felirattal. Beismeri, hogy Lóczy már 16 évvel azelőtt a Transzhimalája nevet adta a hegyláncnak, mielőtt ő hazatért volna saját expedíciójáról, s végül megjegyzi: „Sajnálom, hogy nem vettem észre Lóczy térképét, amely megerősített volna a Transzhimalája név javaslatában."

személyüket a féltékeny tibet-khinai hatóságok kifürkésszék, nevöket is titokban tartja az angol kormány, csupán betűkkel vagy számokkal jelölve meg őket a jelentésekben. Nain-Szing neve csak utolsó utazásai után, midőn nyugalomba lépett, lőn megismertetve; elismerésül a londoni geografiai társulat egy arany órával és 1877-ben éremmel tüntette ki, az angol indiai kormány pedig telekkel és házzal ajándékozta meg".

Lóczy ugyanitt elmagyarázta, hogy Nain-Szing (a 9-es számú pöndit) érdeme a Transzhimalája hegyláncainak felfedezése és leírása. Lóczy azért volt tökéletesen tájékozott ebben a kérdésben, mert a leírásokat a londoni Földrajzi Társulat publikálta és a térképeket megkapta: *„Walker tábornok úrnak, az indiai nagy földrajzi intézet nyugalomba vonult igazgatójának köszönhetem e térképeket, melyekkel ő lekötelező szívességgel ajándékozott meg engem"*. A történet érdekessége az, hogy a Walker tábornok által felügyelt térképezések eredményeiről Lóczynak volt egyedül átfogó tudása és olyan szakmai tekintélye, amellyel Sven Hedin, a „messziről jött utazó" mesésnek tűnő leírásait a társulat kérésére verifikálhatta. A Transzhimalája felfedezésének valódi története talán megfoszt bennünket egy legendától, de megajándékoz annak jobb megismerésével, hogy Lóczy mennyire elismert szaktekintélye volt az európai tudományosságnak.

Mai földtani ismereteink fényében a Transzhimalája nem egyszerűen csak egy viszonylag későn felfedezett, rejtőzködő hegylánc, hanem India és Ázsia (Tibet) konvergenciájának és ütközésének fontos tektonikai bizonyítéka. A legújabb vizsgálatok ugyanis kimutatták, hogy a transzhimalájai hegylánc, amelyet a tektonikai irodalomban gyakran Gangdese-övnek hívnak, egy nagyjából 2500 km hosszúságban húzódó gránitbatolitsort alkot. Ezek a granitoid plutonok a kontinens-kontinens kollíziót megelőző és Tibet alá irányuló Tethys-óceán szubdukciójához kapcsolódó vulkáni ív mélységi magmás képződményei, amelyet a hegység nagymértékű kiemelkedése és az erózió tárt fel.

Lóczy és a magyar föld tektonikája

A hazai föld megismerésében és tektonikai fejlődésének magyarázatában Lóczy munkásságának az utolsó, a Magyar Királyi Földtani Intézetben töltött évtizede volt a leggyümölcsözőbb.

Mindezen kutatások nagytektonikai esszenciája a „közbenső tömeg koncepció", amelynek Lóczy a szülőatyja, bár az elnevezés csak később született meg, ennek a nagyhatású és elegáns koncepciónak az általánosítása és kiterjesztése során, Leopold Kober és Böckh Hugó munkásságával. Az eredeti koncepció célja az volt, hogy megadja a magyar föld különleges helyzetének magyarázatát az alpi orogén övben. Magyarázatot kíván ugyanis az az érdekes helyzet, hogy az alpi hegyláncok egymás mellett futó ágai szétnyílnak, majd ismét egyesülve egy közbenső és fiatal üledékkel nagymértékben fedett, de láthatólag gyengén deformált tömeget ölelnek körbe.

Lóczy a koncepció kialakulásának történetéről és motívumairól 1913-ban és 1915-ben megjelent cikkében is ír, méghozzá személyes hangnemben. Az elsőből való a következő idézet: *„Mojsisovics E. Bosznia és Herczegovina okkupálása idején geológus törzskarával először megismerve déli határainkat, a balkánfélszigeti föltevéses ősi szárazulat fogalmát vetette fel a Száván túli hegyekre és hozzávette a szlavóniai hegyrögöket, sőt a Pécsi-hegységet is. »Orientalisches Festland«, vagyis Keleti szárazulat névvel jelölte ezt. Mojsisovics e szellemes föltevését én kiterjesztem az egész nagy magyar medencére, melynek helyére a palaeozoos-mezozoos korszakok idejére összefüggő magas hegységeket, a középeurópai variszkuszi hegytömegek keleti nagy előörsét képzelem. Ennek a nagy hegységnek legnagyobb részéről azt vélem, hogy mélyen leszakadt az Alföld alá.*

A kerületén visszamaradt szigethegyek, ezek között a balkáni rögök is, szerintem mind a variszkuszi rendszerű hegyekhez tartozó tagok. Az újabb tektonikai elméletek, melyek nagy távolságokból jött vízszintes földkéregmozgásokkal, egymásra ránczolással és egymásra nyomulásokkal magyarázzák meg a Kárpátok szerkezetét a mi belső hegységeinkben, eddigi ismereteink szerint semminemű támaszt nem lelhetnek. Néhai boldog emlékű Uhlig Viktor barátomnak az a sejtése, hogy talán a Bakony és a magyarországi középhegységek triaszkorú rétegeikkel a mediterrán rétegek felett úsznak, a tudományos fantazmagóriákhoz utalható. Nem gáncsként mondom ezt, mert a képzelet munkáját a tudományban is nagyra tartom és szükségesnek ítélem".

A közbenső tömeg

Lóczy Lajos „közbenső tömeg koncepciója" magyarázatának lényegi elemei a következők:

- A körülölelt tömeg egy merev, altaida–variszkuszi masszívum maradványa, amely a Rhodope-masszívummal van összeköttetésben.
- A késői paleozoikumtól a miocén elejéig ez a nagy kiterjedésű masszívum emelkedett a magyar medence helyén. Ebbe öbölként nyomultak be a paleozoos és mezozoos tengerágak, amelyek transzgressziói és regressziói hozták létre a különböző kifejlődésű tengeri és szárazföldi üledékes kőzetek egymás melletti és feletti váltakozását.
- Ezt a kiemelt belső hegységet nem érte soha erős alpi deformáció, csak helyenként vannak az idősebb mezozoos rétegek enyhe boltozatokba és teknőkbe gyűrve. Uralkodóak a „harmadkori" hosszanti és ezekre közel merőleges haránttörések, amelyek sakktáblaszerűen rögökre darabolták összes belső hegységünket.
- A magyar medence ezen törésrendszer által irányított beszakadás során jött létre, amely részben ma is tart, de fő fázisa az andezitvulkánossággal egyidős.
- A belső tömeget körülölelő hegységkoszorú külső övei (alapvetően a flisösszlet) igazi geoszinklinális képződmények, amelyek alpi deformációk hatására gyűrt–takarós rendszert képeztek. Általános szabályként megállapítható, hogy a tektonikai aktivitás kora kifelé haladva a felső-krétától a pliocénig fokozatosan fiatalodik.

Kevéssé ismert, hogy mobilista szemléletét hazai vizsgálatai és értelmezései során sem felejtette el. A kárpáti maghegységeket variszkuszi masszívum részének tartotta, bár paradox módon a maghegységek északi szárnyán lévő mezozoos képződményeknek a kréta során kialakult takarós szerkezetét nem vonta kétségbe. Sőt, az Erdélyi-érchegységben és az Északnyugati-Kárpátokban végzett magyar geológiai felvételek feletti összehasonlító szemlélődése során ismét fellobbant benne a szikkimi Himalájában tapasztalt mobilista szenvedély. Olyan messzire jutott az alpi takarós szerkezetek felismerésében, hogy szinte saját köztes tömeg koncepciójának cáfolatát adta 1918-ban, a Földtani Közlöny hasábjain.

Abból indult ki, hogy a mindkét régióban meglévő flisvonulat a geoszinklinálisban felhalmozódott, nagytömegű üledékösszletből jött létre, amelyből hosszú gerincek vagy szirtek alakjában mezozoos vagy idősebb, gyökértelen kőzetblokkok emelkednek ki. Az Északnyugati-Kárpátokban, a szirtövtől délre lévő gyűrt mezozoos összleteket egy hatalmas mész- és dolomittakaró borítja. *„A chocstakaró áttolódása a legfelső kréta, vagy óharmadkori időben mehetett végbe”*. A flis aszimmetrikus szerkezetű és egymásra, valamint az előtérre van rátolva. Ezzel szemben az Erdélyi-érchegység flise szimmetrikus szerkezetű, ami azt jelenti, hogy legyezőszerűen északra és délre is fel van tolódva. *„A szimmetriát lényegesen kiegészíti a terület tengelye, amely Lippától Tordáig széles diabáz-gabbró-augitporfirit zónából áll”*. Fontos további megfigyelése *„…a chaotikusan redőzött kárpáti homokkővel ellentétben a gosau nyugodt rétegzése; azonkívül a kárpáti homokkő a diabázzal és a tuffittal együtt csaknem mindenütt a gosau fölé van tolva”*.

Lóczy, a földrajz egyetemi tanára

A földrajz első magyarországi egyetemi tanára, Hunfalvy János 1870-ben nyert katedrát Pesten. Hunfalvy János korának kiemelkedő földrajztudósa volt; akadémikus, a Magyar Földrajzi Társaság alapítója és első elnöke, az 1887/88-as



Terepen Finnországban (Lóczy kalapban, cigarettával a szájában, Magyar Nemzeti Múzeum gyűjteménye)



Geológusok a Szent György-hegyen, 1911 Balról jobbra: Pálfy Mór, Lóczy Lajos, Tagányi Károly, Maros Imre, Palkovics József, Szontagh Tamás, László Gábor, Schréter Zoltán, Papp Károly, Vendl Aladár (MBFSZ gyűjteménye)

tanévben a Budapesti Tudományegyetem rektora. Váratlan halála komoly űrt hagyott maga után, amelynek betöltése nem kis gondot okozott a geográfusoknak és az egyetem professzori karának. Lóczy Lajos egyetemi tanári kinevezése meglepetést kelthetett a kívülállók körében, de ha körültekintően megvizsgáljuk a helyzetet, a választás megalapozottnak tűnik. Két indíték is feltételezhető a kinevezéskor bizalmat szavazó döntéshozó professzorok részéről: Lóczy korábbi geográfiai jellegű tevékenységének ismerete, valamint a földrajzoktatás új alapokra történő helyezésének szándéka.

Szakmai szempontból a bizalom mindenképpen előlegezett volt, mert Lóczy geológiai szakértelme és főként e tárgybeli irodalmi teljesítménye mellett a földrajzi jellegű munkássága akkor még eltörpült. A kinevezésben tükröződő tudományos bizalmat alapvetően belső-ázsiai utazásának eredményeivel érdemelte ki. A Széchenyi Béla vezette expedíció tagjaként 1878 és 1880 között geográfiailag igen különböző területeket járt be: a trópusi éghajlatú Jávától (d. sz. 8°) – az Egyenlítőt ismételten átszelve – eljutott a mérsékeltövi monszun területekig, a szigorú telű Koreai-öbölig (é. sz. 40°). Tanulmányozta Ázsia legszárazabb sivatagját, hónapokig kutatott Kína hatalmas kiterjedésű löszvidékein, s felkapaszkodott a Keleti-Himalája örök hóval és jéggel borított vonulatai közé. Ez az utazás Lóczy Lajosnak olyan – többek közt földrajzi – iskolát jelentett, amilyenben akkor csak kivételesen részesedett egy-egy európai geológus vagy geográfus, magyar pedig rajta kívül senki.

A földrajz iránti érdeklődését, e tárgykörben is végzett megfigyeléseit még tanári kinevezése előtt is többszörösen bizonyította. Minthogy a Széchenyi-expedíció eredményeit összefoglaló nagy munkában a földrajzi részt Kreitner írta, Lóczy csak külön kiadványokban jelentethette meg temérdek idevágó megfigyelését. Kiemelendő a magyar földrajzi irodalom egyik nagy teljesítménye, a *Khinai birodalom természeti viszonyainak és országainak leírása* 1886-ból, valamint a Földrajzi Közleményekben 1880-ban megjelent *Kukunor* és *Kelet Tibet* című előadások anyaga. Alaposabban visszatekintve azonban a Földtani Közlönyben és a Természetrajzi

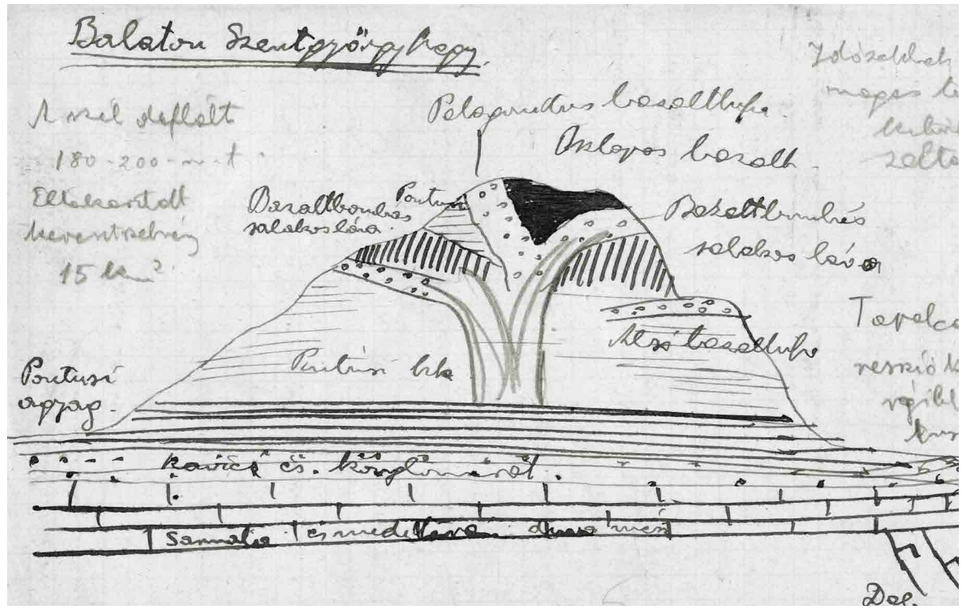
Füzetekben is megtalálhatjuk múzeumi tisztviselő korában, még 1877-ben írt cikkeit – *A Biharhegység egy sajátos völgyalakjáról*, illetve *A baráthegyi barlang és a benne talált őskori tárgyak leírása* címűeket –, amelyekben részben egy érdekes földrajzi, pontosabban geomorfológiai kérdésről – az epigenetikus völgyek keletkezéséről –, részben pedig széleskörű érdeklődését jelző régészeti megfigyeléseiről értekezett.



A Magyarhoni Földtani Társulat kirándulása, Révfülöp és Boglár között. Balról jobbra: Lóczy Lajos, Palkovics József, Zalányi Béla, Vígh Gyula, Rozlozsnik Pál, Glück Zoltán, Marzsó Lajos, valamint Vajai János, altiszt (MBFSZ gyűjteménye)

A második nyilvánvaló ok az volt, hogy a földrajznak külföldön már tapasztalható változását kívánták itthon is meghonosítani, s ezt a tudományok akkori szervezeti körülményei között csakis új szemléletű egyetemi tanár kinevezésétől remélhették.

Az egyetemes földrajzot művelő Hunfalvy a természetföldrajzot illetően Humboldt szintetizáló geográfiájának, az emberföldrajzban pedig Ritter történelmi és összehasonlító földrajzának követője volt, s az akkori időkben még lehetséges módon polihisztor és enciklopédista. Geográfiáját illetően úgy nyilatkozott, hogy *„…egyfelől a természettudományok fejlődését kell figyelemmel kísérnem s más felől a történelmi és társadalmi tudományokat sem hanyagolhatom el egészen, mert hiszen a földrajz e kétféle tudománykört mintegy összekapcsolja, mesgyéjöket áthidalja…”*. Hunfalvy – mint Ritter tanítványa – azonban elsősorban leíró földrajzot tanított, melynek fő problémaköre a természeti környezetnek az emberiség történetére gyakorolt hatása. Ez a geográfia azonban az új, természettudományos alapokon álló földrajzzal szemben elvesztette tekintélyét, és ötven évvel virágzása után, a XX. század elejére az iskolai földrajz szintjére süllyedt.



Lóczy jegyzőkönyve a Szent György-hegyről (MBFSZ gyűjteménye)

A 40 éves Lóczytól – előzőleg műegyetemi rendkívüli tanártól – az oknyomozó földrajz hazai meghonosítását, a természettudományos gondolkodás bevezetését és modern földrajzi szakemberek nevelését várták. A törekvéseket jól jellemzi az is, hogy néhány hazai tekintélyen kívül Ferdinánd von Richthofen, a berlini egyetem világhírű tanára, a geográfia vezető, iskolateremtő alakja – akinek kínai kutatásai Lóczy előtt is ismertek, és követendőek voltak – ajánlotta Lóczyt a Budapesti Tudományegyetem földrajzi tanszékére; s éppen azért, mert a kínai expedíció eredményei alapján ő tudta legjobban megítélni a pályázó szakmai alkalmasságát. (Elgondolkodtató, hogy Lóczy kapott meghívást 1905-ben Berlinbe, Richthofen megüresedett tanszékére. Ő azonban ezt nem fogadta el.)

Az eddigiek összefoglalásaképpen érdemes a tanítvány és utód, Cholnoky Jenőt idézni a kinevezést illetőleg: *„Valóságos szerencse, a földrajzra nézve, hogy akkor ő került a tanszékre, mert abban az időben nem volt hazánkban egyetlen igazi geográfus sem. Külföldön akkor már Richthofen, Heim, és kortársai magasra emelték a geográfiát … s örülhettünk, hogy hozzájuk hasonló gondolkozású és képzettségű, velük legalábbis egyenrangú nagyságot nyerhettünk meg a földrajznak”*.

Lóczy Lajos tehát tanári kinevezést kap 1889. július 1-től a Budapesti Tudományegyetemre, ahol 1889-től 1908-ig az összehasonlító és egyetemes földrajz rendes tanára volt.

Lóczy tanári működését akkor értékelhetjük igazán, ha összehasonlítjuk elődjének munkájával. Hunfalvy az egyetemes – természet- és társadalomtudományi, általános és regionális – földrajzot művelte, de beállítottságánál fogva inkább a leíró földrajzot tanította, s a geográfiának a történelemmel és a néprajzzal való kapcsolódását emelte ki, s keveset adott a gyakorlatokra.

Lóczy előadásainak fő vonalául az általános természeti – akkori szóhasználattal – fizikai földrajzot választotta (félévenként heti 3 óraban), de azért a leíró földrajzot sem hanyagolta el, igaz óraszámát erősen lecsökkentette

heti kettőre. Megtapasztalva, hogy előadásai – különösen az elsőévesek számára – nehezen érthetők, ezen úgy változtatott, hogy csak a másodéveseknek adott elő, de ehhez is megkövetelt bizonyos földrajzi előismereteket. Teljesen új elem a tanrendben a rendszeres kirándulások meghirdetése, ami napjainkig élő hagyomány megteremetése volt. Se szeri, se száma a kisebb-nagyobb kirándulásoknak az ország területén, amelyek során a természeti (fizikai) földrajz előadásain ismertetett problémáit valóságos példákkal szemléltetve, a terepen magyarázta. A kirándulásainak nagy híre támadt, és csapatostul jöttek a külföldi, például bécsi és boroszlói (Breslau–Wrocław) diákok is.

Lóczy csaknem 20 éves tanárkodása idején, minden esztendőben hosszú, külföldi kirándulást is szervezett (például Kijev–Moszkva–Szentpétervár–Helsingfors–Königsberg, illetve Róma–Nápoly–Messzina–Lipari és vissza Firenze–Bologna–Velence felé, valamint a leghosszabb út: Bukarest–Ogyessza–Batumi–Tbiliszi–Grúz-hadiút–Vlagyikavkaz–Ogyessza–Budapest). Cholnoky így írt a tanulmányutat vezető Lóczyról: *„…az úton folyton tanítványaival van, mindenre felhívja figyelmüket, és ugyanolyan harmadosztályú, kemény fapadon alszik, mint a diákok.”*

Lóczy kezdetben egyedül adta elő a geográfia teljes körét. Később a következő magántanárokat nyerte meg az egyes tárgyak színvonalas oktatása érdekében: Kövesligethy Radó (csillagászati földrajz és a földkéreg fizikája), Anderkó Aurél (meteorológia), Steiner Lajos (földmágnesség), Thirring Gusztáv (demográfia), Cholnoky Jenő (leíró földrajz). Mindez lehetővé tette, hogy tovább koncentráljon kedvenc témáira: tanári működésének utolsó éveiben az általános (természeti) földrajzi előadások heti óraszáma már négyre emelkedett, a leíró földrajzé pedig maradt kettő.

Fontos változás a tanrendben, hogy a mai speciális kollégiumokhoz hasonlítható módon, félévenként egy-egy különlegesen érdekes témát kiemelve hirdetett előadást. Tudjuk, hogy a Vezúv 1906. áprilisi kitörése után több hetet töltött megfigyeléssel és térképezéssel a tűzhányón, s a következő tanévben már megjelent a tanrendben a vulkánokról szóló előadása heti egy órában. Ilyen jellegű volt a második félévre meghirdetett, gleccserekről szóló kollégiuma is.

Lóczy sokat tett az oktatás intézményrendszerének fejlesztése érdekében is. Az 1880-as években az egyetemi oktatás javítását szolgáló szemináriumok és intézetek létesítését szorgalmazta Eötvös Loránd és Trefort Ágoston. 1888-ban Hunfalvy ugyan tervezi ezek létrehozását, de sajnos abban az évben meghal, így Lóczy csak 1891-ben váltja valóra a terveket.

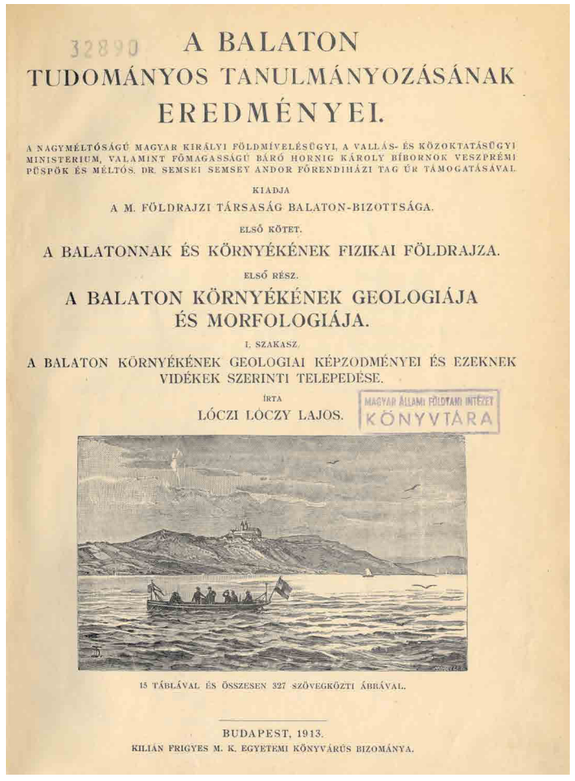
A Földrajzi Intézet gyors fölvirágzása, a hallgatók számának folyamatos növekedése Lóczy személyes érdeme. Nagyszerű szervezőképessége következtében a támogatók megszerzése is jól haladt. Közülük is kitűnt Semsey Andor, akinek bőkezű adományaiból szerezte be a folyóiratokat és a könyveket a könyvtár számára, mert egyéb forrásból csak kevés dotáció jutott erre. Cholnoky azt írta: az intézetet *„…drága műszerekkel, könyvekkel, folyóiratokkal és térképekkel felszerelvén, Közép-Európa egyik legszebb geográfiai tanszékévé fejlesztette.”* Az ELTE levéltári anyagai bizonyítják, hogy *„…alig volt olyan nap, hogy a Földrajzi Intézetből valami kérés vagy beadvány ne ment volna a Miniszterhez, a Karhoz vagy egyéb hatóságokhoz.”* Lóczy alapította meg az egyetemi Földrajzi Intézet fényképtárát is. A gyűjtemény eddig katalogizált, több mint tíz és félezer képéből mintegy 1000 darabot számlál Lóczy fényképészeti hagyatéka. A Lóczy készítette magyarországi képek egyrészt az Erdélyi-érchegységben és a Maros mentén, 1874 és 1890 között folytatott geológiai felvételezések idején, másrészt a Balaton környéki kutatások során készültek. Külföldi útjai során is készített felvételeket: a gyűjteményben találunk képeket a Krím nyugati partjairól, Belgrád, Galambóc és Szendrő városáról, de Kalkutta és a Vezúv 1906-os kitörése is lencsevégre került.

Lóczy hatása a földrajzra Cholnoky Jenő értékelése szerint a következő volt: *„Meghonosította a geográfiában is azt a szigorú kritikát, amit geológusként megszokott. Mindig az eredeti dokumentumokra, a szigorú észleletekre fektette a fősúlyt, s véget vetett azoknak a levegőbe épített spekulációknak, amelyek a geográfiát előtte annyira ellepték, és hitelét annyira rontották. Az okok és okozatok összefüggéseit keresve a természettudományos gondolkodást vezette be tudományunkba”.*

Lóczy Lajos földrajztanári működése révén a földrajz történelmi jellegű tudományból geomorfológiaként újjászülető természettudománnyá vált. Előbbrevalónak tartotta az általános földrajzot, mivel véleménye szerint, abban lehet eljutni törvényszerűségek megállapításához. Az elemző terepi kutatás gyarapítja az általános földrajz ismeretkörét, s ez egyben szembeállítja a szabad természetben dolgozót a leíró földrajz szobatudósával. Kitűnő példaként szolgált erre maga Lóczy Lajos, aki a kiváló tanítványokat, az új, alkotó szellemű nemzedéket nem elsősorban az előadásaival, hanem inkább a szemináriumokkal, de főleg a terepen nevelte. A Lóczy-féle geográfiának fontos eleme az is, hogy az ok-okozati összefüggéseket, az egymásra hatásokat állítja a kutatás központjába és hangsúlyozza, hogy különösképpen a kölcsönhatások tanulmányozása teszi lehetővé a földrajz elhatárolását azoktól a földtudományoktól, amelyekkel egyébként van közös vizsgálati tárgya.

A Magyar Földrajzi Társaság elnöke, a Balaton kutatás megindítója és szervezője

1891-ben Lóczy Lajost választották meg a Magyar Földrajzi Társaság elnökének, s ekkor indította el világra szóló vállalkozását, a Balaton tudományos tanulmányozását, aminek szellemi vezére és fáradhatatlan szervezője volt. A társaság választmányának 1891. március 7-i rendes ülésén Lóczy indítványára elhatározták, hogy


32890

A BALATON
TUDOMÁNYOS TANULMÁNYOZÁSÁNAK
EREDMÉNYEI.

A NAGYMÉLTÓSÁGÚ MAGYAR KIRÁLYI FÖLDMÍVELÉSÜGYI A VALLÁS- ÉS KÖZOKTATÁSÜGYI MINISTERIUM, VALAMINT FŐMAGASSÁGÚ BÁRÓ HORNIG KÁROLY BÍBORNOK VESZPRÉMI PÜSPÖK ÉS MÉLTÓS. DR. SEMSEI SEMSEY ANDOR FŐRENDIHÁZI TAG ÚR TÁMOGATÁSÁVAL

KIADJA
A M. FÖLDRAJZI TÁRSASÁG BALATON-BIZOTTSÁGA.

ELSŐ KÖTET.

A BALATONNAK ÉS KÖRNYÉKÉNEK FIZIKAI FÖLDRAJZA.

ELSŐ RÉSZ.

A BALATON KÖRNYÉKÉNEK GEOLOGIÁJA ÉS MORFOLOGIÁJA.

I. SZAKASZ.

A BALATON KÖRNYÉKÉNEK GEOLOGIAI KÉPZODMÉNYEI ÉS EZEKNEK VIDÉKEK SZERINTI TELEPEDÉSE.

ÍRTA
LÓCZI LÓCZY LAJOS.

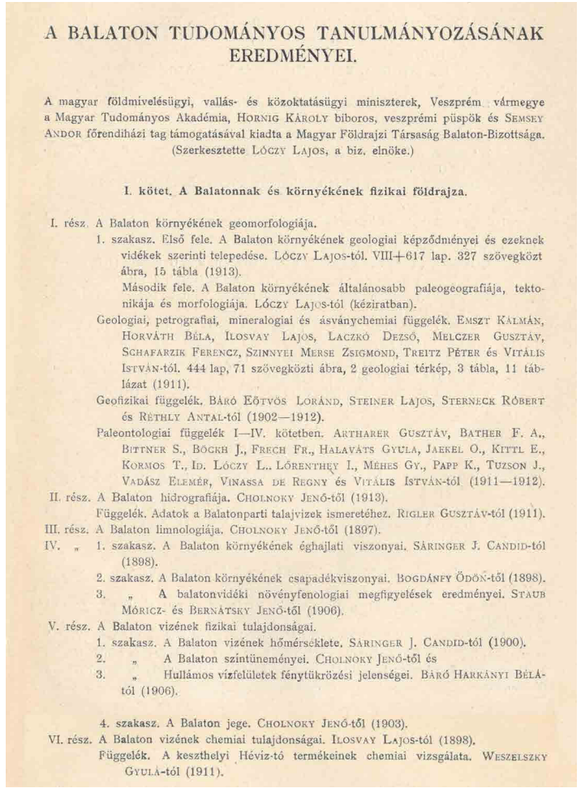
MAGYAR ÁLLAMI FÖLDTANI INTÉZET KÖNYVTÁRA

15 TÁBLÁVAL ÉS ÖSSZESEN 327 SZÖVEGKÖZTI ÁBRÁVAL.

BUDAPEST, 1913.
KILIÁN FRIGYES M. K. EGYETEMI KÖNYVÁRUS BIZOMÁNYA.

A Balaton monográfia címlapja

Magyarország egyes vidékeinek földrajzi tanulmányozását a Balaton kutatásával kezdik el, s a feladatot egy bizottságra ruházták. Ennek az elhatározásnak eredményeként, Lóczy vezetésével az ország jeles szakembereiből megalakult a Balaton Bizottság, amely azonnal munkához látott és az 1892. évi közgyűlésen bemutatta a munka tervezetét. Eredetileg 3 kötet jelent volna meg, költségként 5000 koronát irányoztak elő. Végül a hatalmas, két évtizedes kutatómunkának az eredménye – melynek motorja és fáradhatatlan szervezője, a pénzforrások előteremtője Lóczy volt – a tudományos irodalomban páratlan Balaton-monográfia 32 kötetben, magyar és német nyelven készült el, körülbelül 300 000 korona felhasználásával. Nem kevesebb, mint 60 különböző szakember sorakozott fel Lóczy Lajos hívó szavára – köztük sok külföldi is. E mellett a Földrajzi Társaságon kívül számos hazai intézmény, mint a Földművelésügyi Minisztérium Vízrajzi Osztálya, a Meteorológiai és Földmágnességi, valamint a Földtani Intézet segített elvégezni azt, amit Lóczy a tó és környezete tudományos tanulmányozásához szükségesnek tartott. A monográfia köteteiben a tágabb vidék kőzeteit, őslényeit, földtani felépítését, geomorfológiáját, a tó vizének sokféle tulajdonságát – kémiai jellegét, fizikai tulajdonságait, hullámzását, színét, jégviszonyait –, a talajvizet, a meteorológiai tényezőket, a tó és környéke növény- és állatvilágát, a hajózást és a halászatot, az ősi és újabb történetét, néprajzát stb. dolgozták fel egy kisebb könyvtárt kitevő kiadványsorozatban.



A BALATON TUDOMÁNYOS TANULMÁNYOZÁSÁNAK EREDMÉNYEI.

A magyar földmivelésügyi, vallás- és közoktatásügyi miniszterek, Veszprém vármegye a Magyar Tudományos Akadémia, Hornig Károly biboros, veszprémi püspök és Semsey Andor főrendiházi tag támogatásával kiadta a Magyar Földrajzi Társaság Balaton-Bizottsága. (Szerkesztette Lóczy Lajos, a biz. elnöke.)

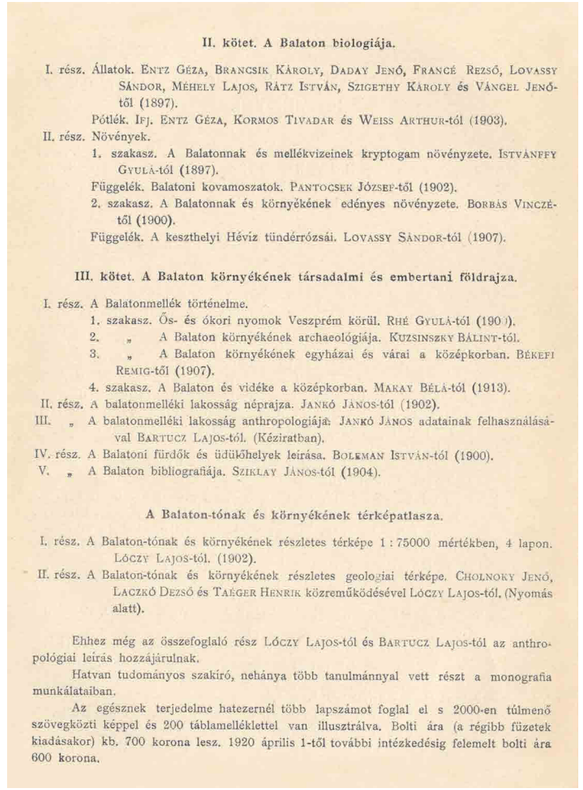
I. kötet. A Balatonnak és környékének fizikai földrajza.

I. rész. A Balaton környékének geomorfologiája.
1. szakasz. Első fele. A Balaton környékének geologiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése. Lóczy Lajos-tól. VIII+617 lap. 327 szövegközt ábra, 15 tábla (1913).
Második fele. A Balaton környékének általánosabb paleogeografiája, tektonikája és morfologiája. Lóczy Lajos-tól (kéziratban).
Geologiai, petrografiai, mineralogiai és ásványchemiai függelék. Emszt Kálmán, Horváth Béla, Ilosvay Lajos, Laczkó Dezső, Melczer Gusztáv, Schafarzik Ferencz, Szinnyei Merse Zsigmond, Treitz Péter és Vitális István-tól. 444 lap, 71 szövegközti ábra, 2 geologiai térkép, 3 tábla, 11 táblázat (1911).
Geofizikai függelék. Báró Eötvös Loránd, Steiner Lajos, Sterneck Róbert és Réthly Antal-tól (1902—1912).
Paleontologiai függelék I—IV. kötetben. Artharer Gusztáv, Bather F. A., Bittner S., Böckh J., Frech Fr., Halaváts Gyula, Jaekel O., Kittl E., Kormos T., Id. Lóczy L., Lörenthey I., Méhes Gy., Papp K., Tuzson J., Vadász Elemér, Vinassa de Regny és Vitális István-tól (1911—1912).
II. rész. A Balaton hidrografiája. Cholnoky Jenő-től (1913).
Függelék. Adatok a Balatonparti talajvizek ismeretéhez. Rigler Gusztáv-tól (1911).
III. rész. A Balaton limnologiája. Cholnoky Jenő-től (1897).
IV. „ 1. szakasz. A Balaton környékének éghajlati viszonyai. Sáringer J. Candid-tól (1898).
2. szakasz. A Balaton környékének csapadékviszonyai. Bogdánfy Ödön-től (1898).
3. „ A balatonvidéki növényfenologiai megfigyelések eredményei. Staub Móricz- és Bernátsky Jenő-től (1906).
V. rész. A Balaton vizének fizikai tulajdonságai.
1. szakasz. A Balaton vizének hőmérsékletе. Sáringer J. Candid-tól (1900).
2. „ A Balaton színtüneményei. Cholnoky Jenő-től és
3. „ Hullámos vízfelületek fénytükrözési jelenségei. Báró Harkányi Béla-tól (1906).
4. szakasz. A Balaton jege. Cholnoky Jenő-től (1903).
VI. rész. A Balaton vizének chemiai tulajdonságai. Ilosvay Lajos-tól (1898).
Függelék. A keszthelyi Héviz-tó termékeinek chemiai vizsgálata. Weszelszky Gyula-tól (1911).

Az óriási munka *A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei* összefoglaló címen, két évtizeden áthúzódóan jelent meg. Az első kötet 1898-ban, az utolsó pedig 1918-ban került nyomdába. Ez a mű a ma szakembereinek olyan kincsesbányája, amelyre bizton építhetett és építhet a környező térségekben dolgozó kutató.

Lóczy legfontosabb személyes hozzájárulása az indító kötet (*A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése*), az 1920-ban megjelent, összefoglaló, záró kötet (*A Balaton földrajzi és társadalmi állapotának leírása – a Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei czimű monográfia-gyűjtemény adatai alapján*), valamint a Balaton-felvidék 1:75 000-es méretarányú földtani térképének elkészítése volt.

A Balaton monográfia köteteinek jegyzéke



II. kötet. A Balaton biologiája.

I. rész. Állatok. Entz Géza, Brancsik Károly, Daday Jenő, Francé Rezső, Lovassy Sándor, Méhely Lajos, Rátz István, Szigethy Károly és Vángel Jenő-től (1897).
Pótlék. Ifj. Entz Géza, Kormos Tivadar és Weiss Arthur-tól (1903).
II. rész. Növények.
1. szakasz. A Balatonnak és mellékvizeinek kryptogam növényzete. Istvánffy Gyula-tól (1897).
Függelék. Balatoni kovamoszatok. Pantocsek József-től (1902).
2. szakasz. A Balatonnak és környékének edényes növényzete. Borbás Vinczétől (1900).
Függelék. A keszthelyi Héviz tündérrózsái. Lovassy Sándor-tól (1907).

III. kötet. A Balaton környékének társadalmi és embertani földrajza.

I. rész. A Balatonmellék története.
1. szakasz. Ős- és ókori nyomok Veszprém körül. Rhé Gyula-tól (1909).
2. „ A Balaton környékének archaeológiája. Kuzsinszky Bálint-tól.
3. „ A Balaton környékének egyházai és várai a középkorban. Békefi Remig-től (1907).
4. szakasz. A Balaton és vidéke a középkorban. Makay Béla-tól (1913).
II. rész. A balatonmelléki lakosság néprajza. Jankó János-tól (1902).
III. „ A balatonmelléki lakosság anthropologiája. Jankó János adatainak felhasználásával Bartucz Lajos-tól. (Kéziratban).
IV. rész. A Balatoni fürdők és üdülőhelyek leírása. Boleman István-tól (1900).
V. „ A Balaton bibliografiája. Szinnyei János-tól (1904).

A Balaton-tónak és környékének térképatlasza.

I. rész. A Balaton-tónak és környékének részletes térképe 1 : 75000 mértékben, 4 lapon. Lóczy Lajos-tól. (1902).
II. rész. A Balaton-tónak és környékének részletes geologiai térképe. Cholnoky Jenő, Laczkó Dezső és Taéger Henrik közreműködésével Lóczy Lajos-tól. (Nyomás alatt).

Ehhez még az összefoglaló rész Lóczy Lajos-tól és Bartucz Lajos-tól az anthropológiai leírás hozzájárulnak.

Hatvan tudományos szakíró, nehánya több tanulmánnyal vett részt a monografia munkálataiban.

Az egésznek terjedelme hatezernél több lapszámot foglal el s 2000-en túlmenő szövegközti képpel és 200 táblamelléklettel van illusztrálva. Bolti ára (a régibb füzetek kiadásakor) kb. 700 korona lesz. 1920 április 1-től további intézkedésig felemelt bolti ára 600 korona.

Lóczy, a Magyar Királyi Földtani Intézet igazgatója

Lóczy Lajos alig pár nappal 59. életévének betöltése után, 1908. november 10-én vette át Böckh Jánostól a Magyar Királyi Földtani Intézet vezetését. A geológia hazai vezető intézményének, a Földtani Intézetnek az igazgatói székébe történő meghívása egy életmű kiteljesedésének ígéretét hordozta: *„Két kézzel ragadtam meg az alkalmat a kedvemhez való munkához azzal a reménnyel, hogy a tapasztalataim egy jó részét mégsem viszem magammal a sírba és annyi sok évi munkám nem megy veszendőbe. Hatvan esztendővel a vállamon azonban már csökkenő erőben indulok új feladataim mezejére…”* – írta székfoglalójában.

Lóczy számára nem volt idegen a Földtani Intézet. Három évig, 1883-tól 1886-ig, mint osztálygeológus már volt az intézet tagja. 1889-ben azonban elfogadta a Királyi József Műegyetem Közgazdaságtudományi Kara Gazdasággeológiai Intézetének tanári állását, majd a következő évben a Budapesti Tudományegyetem Földrajzi Intézetének vezetését, és munkásságának több mint 20 évét az oktatásnak szentelte.

Lóczy a Földtani Intézet igazgatói székfoglalójában következőképp méltatta elődei tevékenységét: *„Kimondhatatlanul nagy és sok munkát végzett el az intézet fennállása óta. Térképezte az egész dunántúli országrészt: befejezte a krassó-szörényi és hunyadvármegyei hegyvidékek: a Bánáti hegység és a Retyezát, valamint a tágabb értelemben vett Bihar csoport geológiai fölvételét. Óriási munkát végzett a petroleumkutatások érdekében, kiállításokon fényes eredményekkel szerepelt. Kétszer költözködött, mígnem 1899-ben jelenlegi gyönyörű otthonát elfoglalta és abban állandóan berendezkedhetett. Az összes európai államok között most Magyarországnak van a legszebb, a legjobban fölszerelt földtani intézete”.*

A székfoglaló azonban kritikai számvetés is volt a Földtani Intézet előző negyvenévnyi működéséről. Úgy látta, hogy nincs egyensúlyban a bámulatosan nagy terület térképezése a térképezés eredményeinek feldolgozásával. A Dunántúl 1:144 000-es méretarányú földtani térképeinek nagy részét nem kísérte magyarázó szöveg. Erről a méretarányról a részletesebb, korszerűbb 1:75 000-es méretarányra kívánt áttérni, és addig nem akarta új

A Balaton környékének földtani térképe (MBFSZ gyűjteménye)

A BALATON-TÓ KÖRNYÉKÉNEK
részletes geológiai térképe
4 lapon.

A nagyméltóságú m. kir. földmüvelésügyi és a vallás- és közoktatásügyi Miniszter urak támogatásával

kiadja

a Magyar Földrajzi Társaság Balaton-Bizottsága.

A m. kir. Földtani Intézet 1869—70. évi felvételei alapján

Cholnoky Jenő, Kormos Tivadar, Lacskó Dezső, László Gábor, Taeger Henrik, Treitz Péter, Vadász Elemér, Vitális István

közreműködésével összeállította és szerkesztette

Lóczy Lajos.

Mértéke 1 : 75.000.

Budapesten 1920.

Szín- és jelmagyarázat.

Holocén.

- Folyó- és patak-üledékek.
- Berekföld (ősmocsárföld) és tőzeg.
- Homok- és kavics-teraszok.

Pliocén.

- Édesvízi mészkő, porlasú (pannóniai) beiszárításokkal.
- Homok, homokkő, agyag, márga, szürkés kavicsos-löszös. Paludinás (pannóniai vagy congeria-) rétegek.
- Kvarc-homokkő, homok és konglomerátum.
- Bazalt.
- Ergolivas és tréngarati bazalt-tufa.

Miocén.

- Dakorniai dacsa-márga (Cerithium-mészkő).
- Kavics- és konglomerátum (Magosliatfelső kőszénkőnél).
- Lajta-mészkő és nyírségi Hydrobia-mészkő.
- Vörösvil rétegek, agyag (gypsus) és Pinnitesa Gervaisi-vel (gróbbi rétegek).

Eocén.

- Nummulina márga és orbitoidás mészkő (Bartoni emelet).
- Nummulina-mészkő, közép-eocén (Lutetien?) és parisi emelet).

Felső-kréta.

- Ajkai szénrétegek (Gosaui rétegek).
- Hippurites-mészkő (Gosaui rétegek).

Alsó-kréta.

- Caprotinás mészkő (Barrême-Aptien-emelet).

Mein.

- Diphyris mészkő (Tithon-emelet).

Közép- és alsó-liasz.

- Vörös, márgás mészkő, mészkőbreccsiával. Világos, mészkő-mészkőbreccsiával. Világos, egyes hólyagos, tömött mészkő (Dachstein rétegek).

Felső-triasz (keuper).

- Dachsteini mészkő és dolomit rétegek (Lóczi emelet).
- Pálosdolomit.
- Sárdolomitot és jerzsenidolomitot mutató és márga (Pszeudomonotis Hawashi).

Triász.

Felső.

- Virtzi (gróbbi) homokkő, palás agyag, mész-dyasmok, konglomerátumok.

Közép-triasz (kagylómészk).

- Virtzi és virgáti, tűzköves mészkő (Arcestes Studeri, Ceratites trinodosus-mészkő-tűzkő (Neogyrai rétegek).
- Rózsa, világos, tűzköves mészkő, homokos tűzkőtagokkal, Pietra verde, Trachytoma Fischeri-mész. (Reiflingeni rétegek).
- Alsó kagylós-mészkő. Dasea, sötétszürke mészkő, tűzkövekkel. Mészkőbreccsia. Szürke tűzkő tömbökben. Szürkésfehér kalcitcsiszar és fényesmárvány-darabokkal szövve.
- Magyarhegyi dolomit. Tűzkő-dolomit Gyenesdiásnál.

Alsó-triasz (barka-homokkő).

Felső Campil-rétegek.

- Lecsosa mészkő Hierogly phikkel.
- Vörösvenyhes, lyukacsos dolomit.

Alsó Campil-rétegek.

- Tömösi-márga mészkőtagokkal. Pszeudomonotis-mészkő, gyöngyházfényű. Kalcit-mészkő-breccsia. Vörös, zöldes agyagpala. Vörösen zöld, pálás homokkő. Pszeudomonotis Clarai-mészkő. Vörös, zöldes agyagmárga tufás, zöldes mészkőpad Hyalopekin faunával.

Seisi-rétegek.

- Vörösvörös márga (Pszeudomonotis aspera). Homokkőlapok lyukacsos dolomit. Pszeudomonotis Clarai-mész.

Perm.

- Virtzi (gróbbi) homokkő, palás agyag, mész-dyasmok, konglomerátumok.

Bizonytalan paleozoos-kori üledékek.

- (p-k) Pilli braccit-telepekkel és -erekkel.
- (p-k) Kristályos mészkő.
- Kvarcporfir-erek a paleozoos-kori fillitben.
- Diabáz-porfirit a fillitben.

A tófenék közetei.

- Agyag.
- Homok.
- Portsai (pannóniai) agyag.
- Basalt-tufa.

Kivülvi-kőbányák. Dűlő rétegek. Vízszintes rétegek. Forrás. Kőtenző.

terület földtani felvételét az intézet programjába állítani, míg a régebben felvett területek ellenőrzése, reambulálása meg nem történt.

Helytelennek tartotta azt a munkamódszert, amellyel a geológiai felvétel térképlapok szerint, és nem morfológiailag egységes vidékenként történik. A helyes módszert egyrészt abban látta, hogy a felvételi munkát végzők előbb általánosságban ismerjék meg az egész térképezendő területet és valamivel részletesebben a szomszédos munkatársnak a területét. A felvétel folyamán pedig gyakori egyeztetéssel igyekezzenek munkájukat egyöntetűvé tenni. A térképezés módszerén is változtatni kívánt: *„A felvétel ne kizárólag geognoziai természetű legyen, hanem vessen ügyet a hegységek morfologiájára, általános tektonikájára, terrassz alakulataira, az erozio és denudáció jelenségeire és egész paleogeografiájára”*. Az volt a véleménye, hogy az agrogeológiai felvételnek is csatlakoznia kell a földtani felvételhez, mert az éppen olyan fontos a mezőgazdaság számára, mint a bányageológia a föld alatti nyersanyagok hasznosításában.

Az igazgatói felelősséget teljes egészében magáévá tevő Lóczy nagy koncepciójú munkaprogramját áthatotta a széles látókörű, nemzetközi tapasztalatokkal rendelkező, világviszonylatban is nagy tekintélyű tudós szakmai lelkesedése.

Mai szemmel nézve azt is megállapíthatjuk, hogy a magyar földtani kutatás történetében ez az az elgondolás, amelyben először szerepel az ország regionális egységek szerinti felvételére, és az ország területének egészére kiterjedő, komplex megismerésre való törekvés. Az intézet létszáma a feladat nagyságához mérten azonban igen kicsi volt. Lóczy igazgatósága alatt a maximális geológus létszám 22 volt, amihez még néhány külső munkatárs segítsége járult.

A Földtani Intézet legfontosabb tevékenysége, a földtani térképezés területén



▶ *A Magyar Királyi Földtani Intézet palotája az 1900-as évek elején (MBFSZ gyűjteménye)*

1908-ban – még a korábban megkezdett munkák folytatásaként – Ung, Szepes és Beszterce–Naszód vármegyében, a zalatnai térképlapon, Hunyad, Nagyküküllő, Kisküküllő, Alsó-Fehér, Krassó–Szörény, Szerém és Gömör vármegyében, Nógrádban és Hevesben folytak geológiai felvételek.

Lóczy 1912-ben megfogalmazott munkaprogramja szerint: *„Nagyobb új területek geológiai fölvételét nem szabad addig munkába vennünk, amíg a krassószörényi hegyvidék, a krassószörényi havasok, a Pojana-Ruszka, a Kudsir–Szebeni havasok és a tágasabb értelemben vett Biharhegység kiegészítő és egységesítő bejárását el nem végeztük és ezeknek a hegyvidékeknek a monografikus leirását nem biztosítottuk”*.

A politika azonban közbeszólt. A Földtani Intézet – állami fenntartású intézményként – nem vonhatta ki magát az ország sorsát befolyásoló politikai lépésekből. Így a háborús készülődés, és az I. világháború eseményei is közvetlenül érintették, mind feladatai, mind általános működése tekintetében. Lóczy munkaprogramját felülírták azok a kormányzati feladatok, amik a korábban elhanyagolt, nemzetiségi területek földtani megismerésére irányultak.

1910-ben elkezdődött és a vesztes háború befejezéséig tartott a Magyar Koronához tartozó Horvát–Szlavónország karsztvidékén és Fiume város területén a felvételező és térképező munka. Indoklásnak részben a magyar medence déli, délnyugati lezárásának szükségességét, részben pedig az említett országok iránti méltányosságot hozta fel Lóczy.

A terepmunkában 1913-ban a 20 földtani intézeti geológuson kívül 16 külső munkatárs és 2 bányamérnök vett részt. Ezek közül hatan dolgoztak a tenger menti karsztvidéken. Külső munkatársak dolgoztak a Bakony, a Velencei-hegység, a Mecsek és a Villányi-hegység, a Cserhát, a Mátra és a Bükk felvételezésén. Az előző évek térképezési területein – a folyamatos munka és Lóczy elképzeléseinek következetes érvényesítése nyomán – már szép tudományos eredmények is születtek, főleg a térképezett területek korszerű tektonikai értékelése révén.



▲ *Lóczy Lajos mint a Földtani Intézet igazgatója (MBFSZ gyűjteménye)*

Még ugyanebben az évben jelentős új vállalkozásba, a Kárpátok geológiai újrafelvételébe kezdett az intézet, mert a földmívelésügyi miniszter tíz évre szóló külön költségvetési tételt állított be erre a célra. Lóczy ezt a munkát nagyon fontosnak tartotta. A bejárás nem volt egyöntetű, a fölvételező geológusok nem érintkeztek egymással sem a terepen, sem a jelentések szövegezésekor. Hiányoztak az egységes szempontok és hegységszerkezeti vizsgálatok alig történtek. Lóczy szükségesnek tartotta az újratérképezést a bányászati, építkezési és vízellátási ügyek szempontjából is, mert ilyen irányban semmi adat nem állt a Földtani Intézet rendelkezésére, sőt, még a korábban készült geológiai térképeket is csak a bécsi Geologische Reichsanstalt árusította. A munkát az Északnyugati-Kárpátoknak a

kárpáti homokkő alkotta határláncolatától a Vág, Turóc, Nyitra folyók síksági zónájáig terjedő hegyvidéken kezdték el. A nagyszabású munkának – évekkel később – a háborút követő békekötés határozata vetett csak véget.

A világtörténelmi események azonban újabb fordulatot hoztak a Földtani Intézet tevékenységében, miután Ausztria–Magyarország 1914. július 28-án hadat üzent Szerbiának. Szerbia lerohanása/okkupálása nagyobb nehézséget jelentett az osztrák–magyar seregeknek, mint amit a hadvezetés gondolt. Szerbia megszállása súlyos harcok árán, több mint egy évvel később, 1915 októberében fejeződött be, és a helyzet konszolidálódása után a civil munkák lehetősége is megteremtődött.

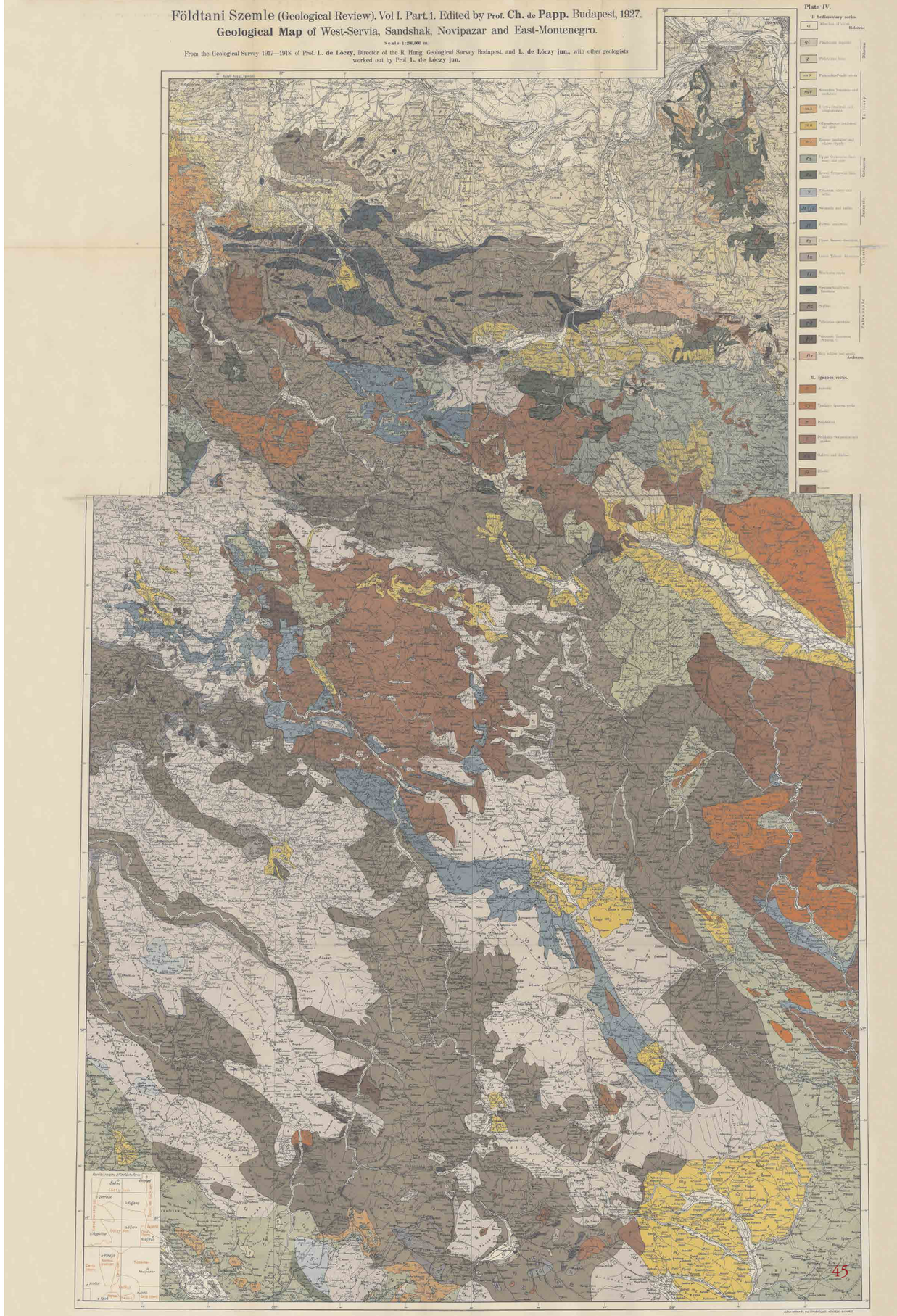
Lóczy Lajos igazgató az 1916. évről szóló jelentésében a következőt írta: *„Idei események között örvendetes megbízatásunk volt az, amelyet régebbi előterjesztésemre a cs. és kir. Hadügyminiszter és a m. kir. Földmívelésügyi Miniszter uraktól nyertünk az okkupált Szerbia nyugati részeinek bányászati és geológiai szempontból való beutazására. Engem betegség gátolt abban, hogy a szerbiai tanulmányútra elmenjek: ezért helyettem iglói Szontagh Tamás aligazgató vállalta el az expedíció vezetését, amelyet október és november havában Timkó Imre m. kir. főgeológus, Jekelius Erich dr. m. kir. II. oszt. geológus és Zsigmondy Árpád okleveles bányamérnök, ny. bányafőfelügyelő munkatársunk társaságában bőséges tudományos, valamint gyakorlati tapasztalatokkal sikerült megvalósítania”.*

A Földtani Intézet vállalkozása támogatásra talált gróf Teleki Pál, a Magyar Tudományos Akadémia által szervezett balkáni expedíciók értelmi szerzője részéről, akinek az eredmények közreadásában is fontos szerep jutott. Támogatta a vállalkozást Böckh Hugó miniszteri tanácsos, a m. kir. Kutató Bányahivatal vezetője, későbbi földtani intézeti igazgató is.

Az 1916. évi, alig kéthónapos szerbiai terepbejárást 1917-ben és 1918-ban további 4–6 hét időtartamú munkák követték. További intézeti – Kormos Tivadar, Telegdi Roth Károly, Timkó Imre – és külsős munkatársak – Vadász Elemér, ifj. Lóczy Lajos – kapcsolódtak be a munkákba. Utóbbiak akkoriban a Papp Károly vezette műegyetemi tanszék gyakornokai voltak. Ifj. Lóczy nagy terheket vett le apja válláról a terepi munkák végzésében, később pedig – apja halála után – letéteményese volt a szerzett ismeretek összefoglalásának, publikálásának. A kutatómunka fő iránya Szerbia geológiai felépítésének minden további kutatáshoz alapot biztosító, minél részletesebb feltárása volt. Ehhez a geológiai ismeretek összesítésének legfontosabb eszközét, a földtani térképezést alkalmazták. Nagy hangsúlyt fektettek továbbá az ismert nyersanyag-előfordulások (kőszén, vasérc, színesfémércek) vizsgálatára, gazdasági jelentőségük értékelésére. A Száva folyó völgyének mezőgazdasági területein agrogeológiai vizsgálatok folytak, melyek a talajviszonyok, a talajok termőképességi potenciáljának felmérésére irányultak. Mind a nyersanyagok, mind a mezőgazdasági termények stratégiai fontossággal bírtak a háborús időkben.

A hegyvidéki földtani térképezés mellett az ország megismerésére irányuló intézeti tevékenység másik nagy területe a síkvidéki országrész agrogeológiai felvétele volt. Az intézetben 1891 óta folytatott tevékenységnek fordulatot adott a Lóczy nemzetközi kapcsolatrendszerén alapuló Első Nemzetközi Agrogeológiai Értekezlet megszervezése 1909 áprilisában, Budapesten. Nyolc külföldi állam

▶ *Nyugat-Szerbia földtani térképe (MBFSZ gyűjteménye)*





▲ *Az I. Nemzetközi Agrogeológiai Kongresszus résztvevői a Földtani Intézet előtt, 1909 tavaszán (MBFSZ gyűjteménye)*

képviseletével, 92 résztvevővel zajlott a tanulmányi kirándulásokat is tartalmazó, közel kéthetes értekezlet, melynek eredményeiről önálló magyar és idegen nyelvű kötet is megjelent. Az értekezlet egyik határozata szerint kívánatos az európai talajtípusok átnézeti térképének mielőbbi felvétele, mégpedig a talaj zonális elterjedésének figyelembevételével.

A határozat – melyen világosan látszik a porosz gyakorlattól eltérő orosz talajtani iskola hatása – gyökeresen megváltoztatta az agrogeológiai osztály munkatervét, melyről Lóczy a következőket írta 1912-es igazgatói jelentésében: *„Az agrogeológusok is szakítottak azzal az iránnyal, amely szerint eddig – idegen minta után – hazánk síksági részeinek különböző helyein részletes felvételeket végeztek. Arra a meggyőződésre jutottunk, hogy a Nagy Magyar Alföld talajának természetét és keletkezését ott kell vizsgálni kezdenünk, ahonnét annak anyaga nagyobbrészt származik, vagyis a síkság keleti hegykörnyezetén”.*

Lóczy Lajos, aki a hasznosítható ásványi nyersanyagok felkutatása terén elévülhetetlen érdemeket szerzett az erdélyi kálisó kutatás és a kissármási földgáz felfedezésében való részvételével, hivatalba lépését követően azonnal úgynevezett gyakorlati osztályt szervezett az intézetben. Erre a célra 25 000 koronás külön költségkeretet kapott. Az osztály feladatai a következők voltak: 1. ásványszénterületek tanulmányozása; 2. cementgyártásra alkalmas kőzetek felkutatása; 3. kőolajfúrásokra alkalmas pontok kijelölése; 4. a Balaton vidékén építendő vasútvonal geológiai felvétele, környezetének gyakorlati tanulmányozása és térképezése; 5. tőzeg- és lápterületek tanulmányozása és térképezése; 6. a Magyar Birodalom geológiai térképének kiadása; 7. gazdaságilag, iparilag és kereskedelmileg felhasználható ásványokat és kőzeteket összefoglalóan tárgyaló munka írásának megkezdése. Ekkortájt az intézet napi munkájának jelentős részét a vízügyek körébe tartozó feladatok ellátása képezte. Számos artézi kút és gyógyvíz feltárása fűződik az intézet nevéhez.

Lóczy nagy súlyt helyezett a könyvtár fejlesztésére és a korszerű térképtárra is. Könyvtárosi és könyvtártiszti állást szervezett, és ezzel egy időben megnyitotta a könyvtárat a nagyközönségnek, miután egységes könyvkatalógust adott ki. Nagyszabású elképzelést vázolt a múzeum kiállításainak átszervezésére is: *„Az Intézet által létesítendő kőzet- és őslénytani gyűjtemények oly módon állíttatnak fel, hogy ezek által a magyar államterületet, valamint egyes hegységeinek földtani alkotását minél részletesebben tüntessék elő”* – írta a múzeum kiállításának vezetőjében, 1909-ben.

Lóczy Lajos a külföldi tudományos világgal is szoros és élénk kapcsolatot ápolt. Intézeti igazgatóságának kezdetén, csaknem kéthónapos tanulmányút keretében, 26 európai földtani intézetet, múzeumot, egyetemet látogatott meg. Tapasztalatai irányították munkaprogramjának megalkotását, tevékenységének mindennapjait. Állandó meghívásai voltak tudományos összejövetelekre, kongresszusokra. Képviselte Magyarországot különböző konferenciákon. 1909-ben részt vett azon a nemzetközi értekezleten, amelyet Londonban, a Külügyi Hivatalban tartottak az 1:1 000 000-os méretarányú világtérkép szerkesztési elveinek tisztázása tárgyában.

Amilyen örömmel és reménnyel telítve foglalta el az igazgatói széket, olyan fájdalommal, megaláztatva adta be lemondását 1919-ben a Tanácsköztársaság direktóriumának személye és a Földtani Intézet tevékenysége ellen indított támadása következtében. A Tanácsköztársaság bukása után még néhány hónapra visszatért ugyan, de romló egészségi állapotára való hivatkozással, 1919. november 1-én véglegesen megvált a Földtani Intézet vezetésétől. A csaknem napra pontosan tizenegy esztendő, amit a Földtani Intézet vezetésének szentelt, életpályájának egyik legjelentősebb, ám a háborús évek miatt egyik legnehezebb szakasza is volt egyben. Életműve ezekben az években teljesedett ki. Egy hagyományokkal rendelkező, tudományos eredményekben gazdag intézmény munkáját irányította, melyben bőséges teret kapott elképzelései megvalósítására. Megalkotta a *Magyarország földtani szerkezete* című elsőrangú összefoglalást. Ekkor jelent meg a világon máig példátlan Balaton monográfia számos kötete, közte életének egyik fő műve *A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése* című tanulmány és néhány év múlva a hozzá tartozó térkép.

Ajánlott irodalom

Böckh H. 1930: Lóczy Lajos és a magyar geológia. – Földrajzi Közlemények 58 (7–8), 106–115.

Cholnoky J. 1920: Lóczy Lajos. – Földrajzi Közlemények 48 (6–10), 33–82.

Lóczy L. 1876: Az Alpesek keletkezése. – Természettudományi Közlöny 82 (8), 225–236.

Lóczy L. 1886: A Khinai Birodalom természeti viszonyainak és országainak leírása. – Kir. M. Természettudományi Társulat kiadványai, Budapest, 865 p.

Lóczy L.1907: Megfigyelések a Keleti-Himalájában. – Földrajzi Közlemények 35 (7), 293–310.

Lóczy L. 1913: Balaton környékének geomorfológiája. – Pótfüzetek a Természettudományi Közlöny 45. kötetéhez, 1–2. pótfüzet, 17 p.

Lóczy L. (szerk.) 1918: A magyar szent korona országainak földrajzi, társadalomtudományi, közművelődési és közgazdasági leírása. – A Magyar Földrajzi Társulat kiadványa, Budapest, I–VIII. kötet, 528 p.

Lóczy L. 1918: Magyarország földtani szerkezete. – In: Lóczy L. (szerk.), 1918: A magyar szent korona országainak földrajzi, társadalomtudományi, közművelődési és közgazdasági leírása. I. kötet, 5–43.

Lóczy L. 1918: Összehasonlító szemlélődések az Erdélyi Érchegység és az Északnyugati Kárpátok geoszinklinálisai felett. – Földtani Közlöny 68, 229–234.

Lóczy L. (szerk.) 1920: A Balaton-tó környékének részletes geológiai térképe, 1:75 000. – Magyar Földrajzi Társaság Balaton-Bizottsága, Budapest.

Lóczy L. 1920: Nyugatszerbiai tanulmányutam. – Földrajzi Közlemények 48 (6–10), 82–84.

Stille, H. 1924: Grundfragen der vergleichenden Tektonik. – Gebrüder Bornträger, Berlin, 413 p.

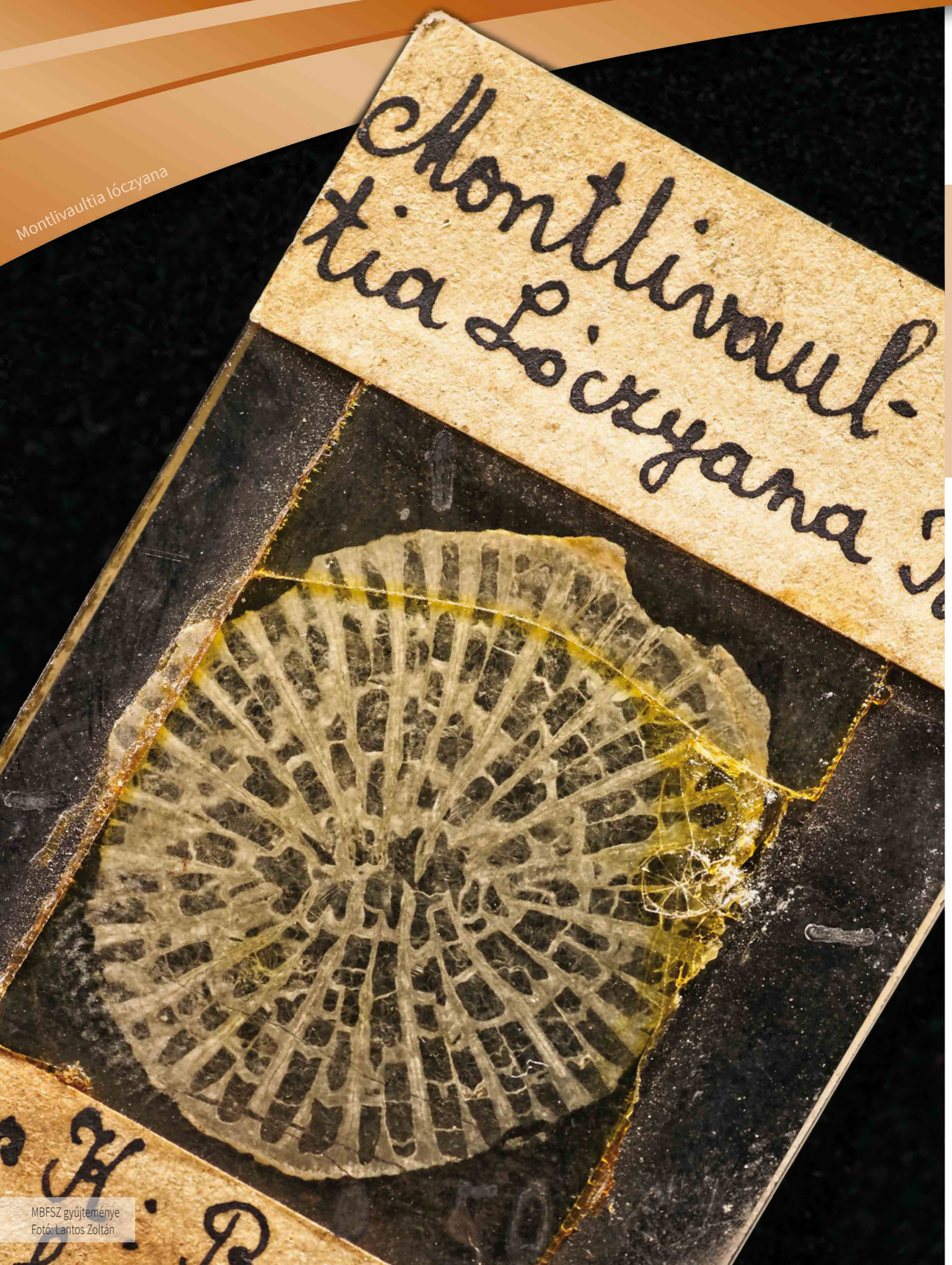
Suess, E. 1875: Die Entstehung der Alpen. – W. Braumüller, Wien, 168 p.

Suess, E. 1885–1909: Das Antlitz der Erde. – Vol. I–II. Freytag, Wien, valamint Tempsky, Prag, vol. I. (1885), 778 p., vol. II. (1888), 703 p., vol. III/1 (1901) 508 p., vol. III/2 (1909), 789 p.

Széchenyi, B. 1890–1897: Gróf Széchenyi Béla keletázsiai útjának tudományos eredménye, 1877–1880. – I–III. kötet, Budapest.

Tasnádi-Kubacska A. 1974: Lóczy Lajos. – Akadémiai Kiadó, Budapest, 150 p.

Telegdi Roth K. 1949: A geológus Lóczy Lajos. Születésének 100 éves évfordulója alkalmával tartott előadás. – Földtani Közlöny 79 (1–4), 311–319.



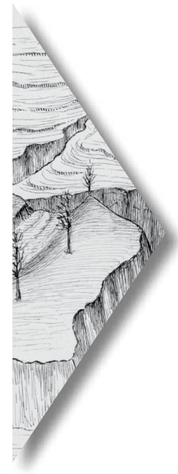
MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

Budai Tamás, Tari Gábor

A Balaton-felvidék földtani felépítése és fejlődéstörténete

2

A Balaton-felvidék hazánk egyik geológiailag legrégebben és legalaposabban kutatott tájegysége, ahol a magyar földtan legjelesebb személyiségei közül igen sokan dolgoztak. E természeti, tájképi szépségekben oly gazdag terület titkait több száz éve kutatják a geológusok. Valószínű, hogy változatos földtani felépítésén és üledékes képződményeinek faunagazdagságán túl a Balaton közelsége, kellemes éghajlata és jó borai is minden időben vonzották a szakembereket. E kutatások közül messze kiemelkedik az id. Lóczy Lajos vezette Balaton-kutatás, melynek legtöbb földtani eredménye máig megállja a helyét és azokat az elmúlt 100 évben csak finomítani tudták az újabb kutatások. Ebben a fejezetben nem csupán a terület földtani felépítését és ősmaradványait ismerhetjük meg részletesen, hanem azt is megérthetjük, hogy Lóczy és kortársai miért vetették el a Dunántúli-középhegység szerkezeti kapcsolatát az Alpokkal, annak ellenére, hogy az itt található és a Keleti-Alpokat felépítő kőzetek megdöbbentő hasonlóságát már a területen dolgozó osztrák geológusok is meglepve tapasztalták.



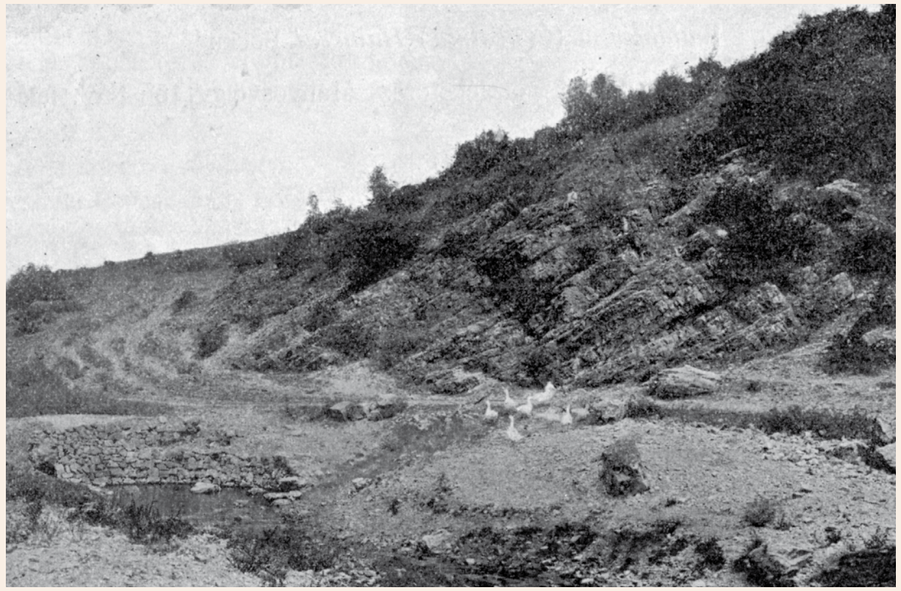
A Balaton-tó medenczéjének helyzete és felépítése

... A Balatonfelvidék és a tulajdonképeni Bakony tüzetes geológiai vizsgálatából azt a főeredményt szögezhetem le, hogy ezen a vidéken az Északkeleti- és a Déli-Alpok geológiai képződményei egymással váltakoznak és a két régióbeli fosszilis, tengeri faunák elkeveredtek. A Balaton mellékén a triászkori lerakódások partmelléki (neritikus) tengeri képződmények, amelyek vastag szárazföldi eredetű veres homokkövön a permi-korszak szárazulatának maradványain nyugosznak. Ezek alatt vannak a Balaton partján Alsóörs és Révfülöp környékén az erősen összegyűrt, metamorfált, régibb paleozoos palákból álló tömegek, amelyeket 100–300 m mélyen a síkság alatt Siófokon és Balatonföldváron ártézi kútfúrások értek el.

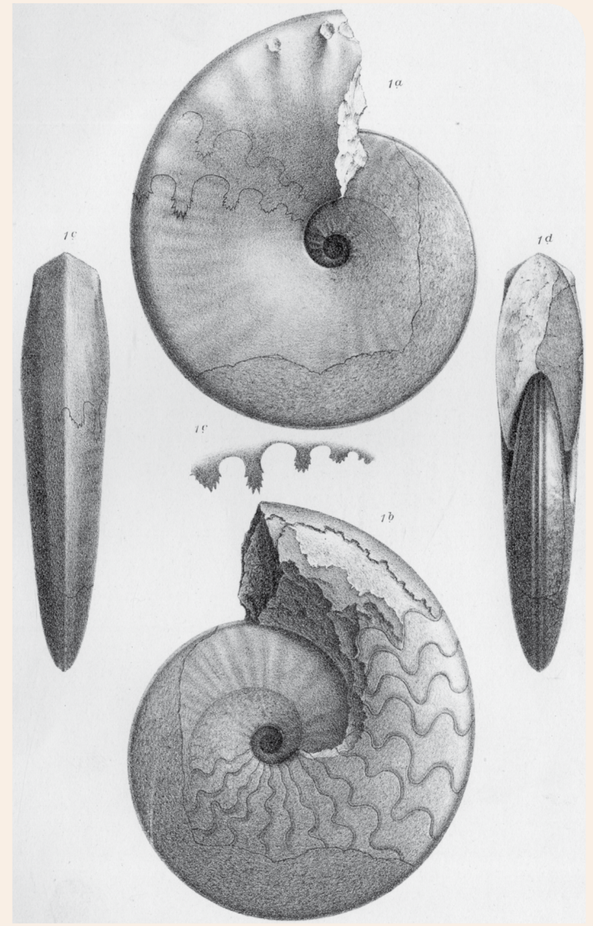
A Balaton partjaitól északnyugatnak, a Balatonfelvidékre felemelkedve mindinkább fiatalabb triászkori rétegeken keresztül haladunk. Egy órai járás után megismerkedünk az egész triász rétegsorral és pedig olyan kifejlődésekben, aminőket az Alpokban csak többnapi kirándulásokban láthatunk meg. A triász csak a veszprém–nagyvázsonyi fennsíkig és a Séd–Torna-patak vízválasztójáig terjed, azután a jura- és krétakori rétegek tűzkőből és mészkőből álló kőzetei következnek, ezek építik fel a Zircz és Bakonybél körüli magas Bakonyt. Még csak északon a Bakonynak Kis-Alföldre néző ereszkedőjén bukkannak elő a felső triásznak dachsteini mészkőtömegei.

Az egész mezozoikumot képviselő képződmények kőzettani és fosszilis organikus maradványaikban mutatkozó jellegét tekintve felismertük, hogy a Balatonfelvidéken az ősi szárazföld partjaihoz közel, az alsó- és középtriász rétegekben egymásmelletti különböző fáccieszekkel rakódtak le tengeri üledékek, minél tovább távozunk a parti régióktól északnyugatra, annál egyneműebb felsőtriász, jura- és krétarétegekkel találkozunk. Azzal magyarázom ezt a jelenséget, hogy a triásztenger öblökkel nyomult bele a mioczén idejéig az Alföld helyén emelkedő nagy masszívumba, ezekben az öblökben keletkeztek azután a különböző képű parti lerakódások. A magyarországi, ezek közt a bakonyi mezozoós képződmények nagyobbrészt pelagikusak, az alpiakkal megegyezők és általában ahhoz a nagykiterjedésű mezozoikus középtengerhez tartoznak, amelynek a tudomány a tethysz nevet adta. Mindazonáltal vannak köztük olyan lerakódások is, amelyek középeurópai neritikus parti képződményekkel egyeznek meg. Ez arra mutat, hogy az Alpoktól keletre a magyar ősi nagy masszívumba nyuló öblökben és szorosokban északi és déli tengervizek közelítették meg egymást és lerakódásaik váltakoztak egymással.

Rá kell mutatnom még arra is, hogy miként az Alpokban és a Bakonyban is nagyvastagságú és Megalodus kagylós mészkövek, mészalgás dolomitok, és a Hippuritesekkel és Nerinea-csigákkal jellemzett krétakorbeli lerakódások szintén littorális, zátonyszerű képződmények. Az igazi pelagikus jellegű, nagy parttávolságban keletkezett lerakódások tehát a Bakonyban alárendeltek. ...



Fő-dolomit padok Balatonfüreden a siskevölgyi felső forrásnál



Uj cephalopodák a bakonyi alsó triaszból

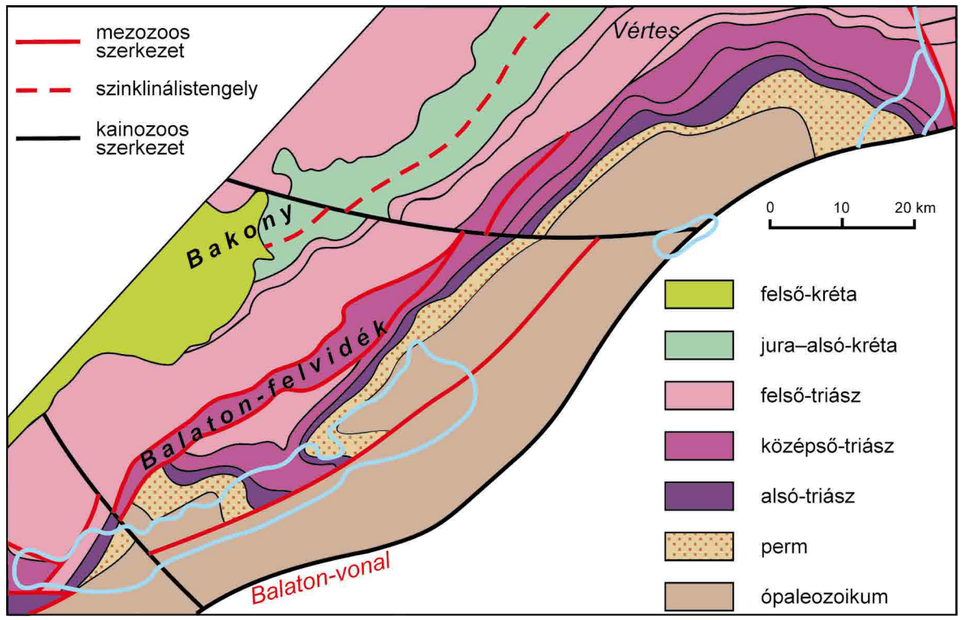
Részlet Lóczy Lajos A Balaton földrajzi és társadalmi állapotainak leírása *című könyvéből*

Magyarország – geológiai vonatkozásban – egyik legrészletesebben kutatott tájegysége a Bakony déli részét képező Balaton-felvidék. A földtani kutatás kezdete „természetbúvárok”, a francia François Sulpice Beudant, az osztrák Victor Leopold Ritter von Zepharovich, majd Rómer Flóris nevéhez fűződik, akik leírták az első tudományos igényű megfigyeléseiket a területet felépítő képződményekről és a bennük előforduló ősmaradványokról. A kutatás történetének következő időszaka az Osztrák–Magyar Monarchia területének áttekintő jellegű földtani térképezése volt. A Bakony földtani felvételezését a bécsi földtani intézet geológusai végezték el 1860-ban és 1861-ben, amelynek eredményeként született meg az első földtani térkép a területről 1870-ben, 1: 596 000-es méretarányban.

A kiegyezést követően új lendületet kapott a magyar területek geológiai kutatása, amely a Magyar Királyi Földtani Intézet 1869-ben történt megalapítása után vált rendszeressé. A részletes földtani felvételezés egyik első célterülete éppen a Bakony lett. Böckh Jánosnak *A Bakony déli részének földtani viszonyai* című értekezése a Balaton-felvidéki triász és a bakonyi jura rétegtan alapvető, azóta is példaértékű összefoglalása. Hofmann Károly is olyan színvonalon írta le a Déli-Bakony bazaltjait, hogy ahhoz érdemben nem lehetett sokat hozzátenni hosszú időn keresztül. Ennek a felvételezésnek az eredményeként készült el Magyarország dunántúli területének részletes földtani térképe 1:144 000-es méretarányban.

A Balaton-felvidék földtani kutatásának történetében messze kiemelkedő jelentőségű a *Balaton monográfia* megszületése. Id. Lóczy Lajos 1913-ban jelentette meg *A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése* című korszakalkotó munkáját, amelyhez 1920-ra készült el az 1:75 000-es méretarányú, részletes geológiai térkép. A kötet geológiai függelékében Laczkó Dezső Veszprém környékéről, Vitális István pedig a Balaton környéki bazaltokról adott részletes földtani ismertetést. A négykötetes paleontológiai függelékben Európa legnevesebb tudósai foglalták össze a Balaton-felvidékről előkerült ősmaradványokról addig rendelkezésre álló ismereteket. Sok kövületet először éppen a Balaton-felvidékről írtak le, ami az egyes ősmaradványok nevében is kifejeződik (például *Hungarites, Balatonites, Arpadites* stb.).

Id. Lóczy Lajos munkásságát követően, mintegy hatvan éven keresztül szünetelt a rendszeres földtani felvételezés a Balaton-felvidéken. Az 1960-as évek közepén a Balaton partvidékének egyre fokozódó beépülése tette indokolttá a tó környékének, majd kiterjesztett üdülőkörzetének építésföldtani térképezését. Ezt követte a Balaton-felvidék legújabb rendszeres és részletes földtani felvételezése, amely a Magyar Állami Földtani Intézet regionális térképezési programjának keretében vette kezdetét 1982-ben. A térképezés eredményeinek összefoglalásaként jelent meg a Balaton-felvidék 1:50 000-es méretarányú tájegységi földtani térképe és az ahhoz tartozó térképmagyarázó, 1999-ben.



A Balaton-felvidék szerkezeti helyzete a Dunántúli-középhegységi–egységen belül (Haas et al. 2010 nyomán)

Földtani felépítés

Szerkezeti helyzetét tekintve a Balaton-felvidék a Dunántúli-középhegységi-egységhez, azon belül a Bakonyhoz tartozik. A Dunántúli-középhegység ÉK–DNy-i irányban elnyúlt szinklinális szerkezetét a tengelyétől a szárnyai felé távolodva egyre idősebb mezozoos, illetve paleozoos képződmények alkotják. A szerkezet déli szárnyát alkotó Balaton-felvidéken bukkannak felszínre a Dunántúli-középhegység legidősebb képződményei. A Balaton-felvidéket felépítő kőzetek közül a legidősebbek az ópaleozoikum során (körülbelül 500–360 millió évvel ezelőtt) képződtek, amelyek a variszkuszi tektonikai ciklus során szenvedtek kis fokú metamorfózist. A terület rétegsorának túlnyomó részét alkotó üledékes kőzetek a paleozoikum végén (a perm időszak során) és a mezozoikum elején, a triász idején keletkeztek. Ezeket nem érte metamorf hatás.

A Balaton-felvidék földtörténete – a földtani felépítés és a szerkezetfejlődés alapján – két nagyobb szakaszra osztható: a variszkuszi és az alpi lemeztektonikai ciklusra.

Variszkuszi lemeztektonikai ciklus

A Balaton-felvidék legidősebb képződményei az ópaleozoikum során lerakódott, uralkodóan törmelékes tengeri üledékek, amelyek a variszkuszi hegységképződés során metamorfizálódtak. A rétegsort alkotó szürke agyagpala és aleurolitpala (Lovasi Agyagpala) Alsóörs és Révfülöp környékén

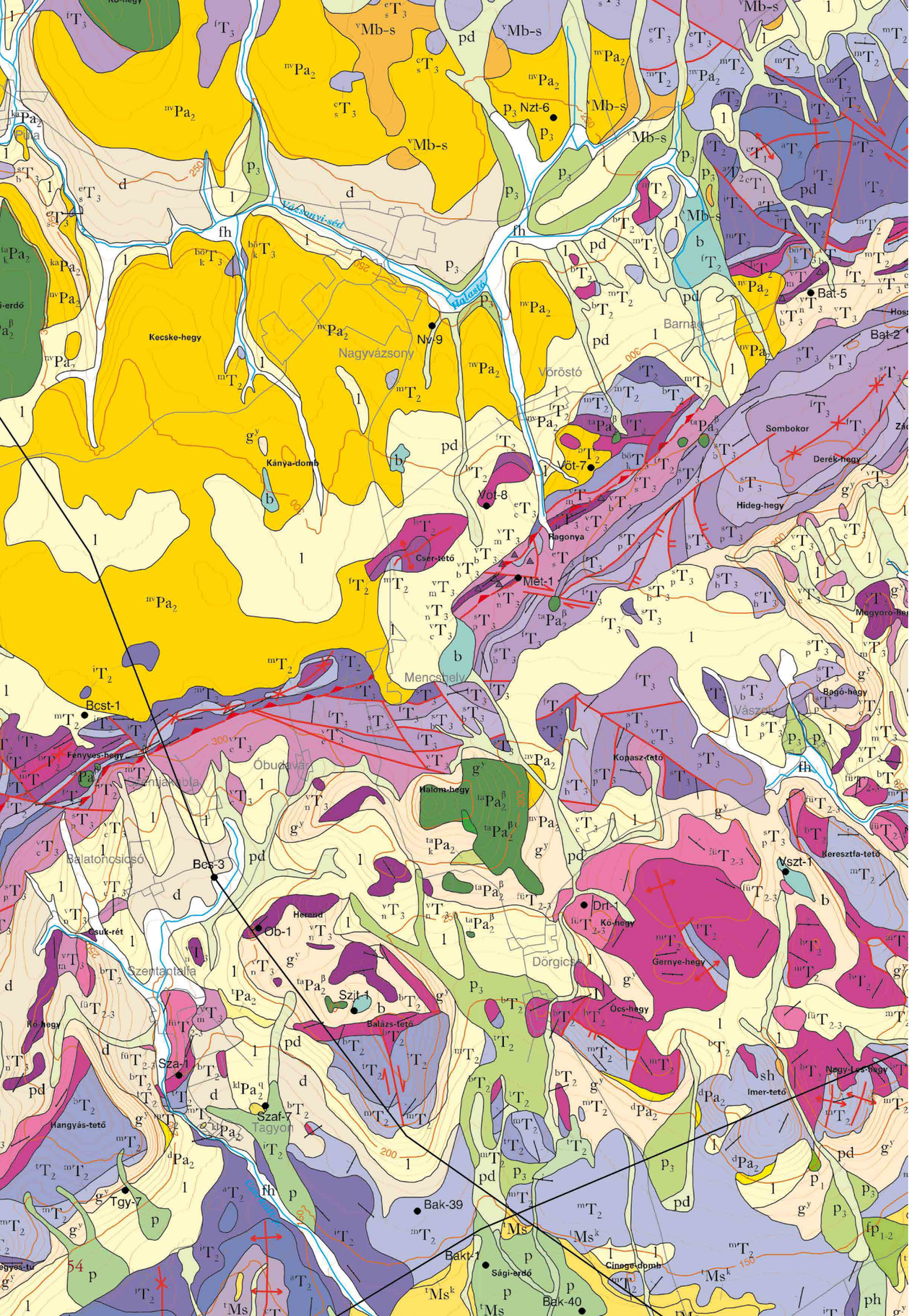
Szinklinális szerkezet

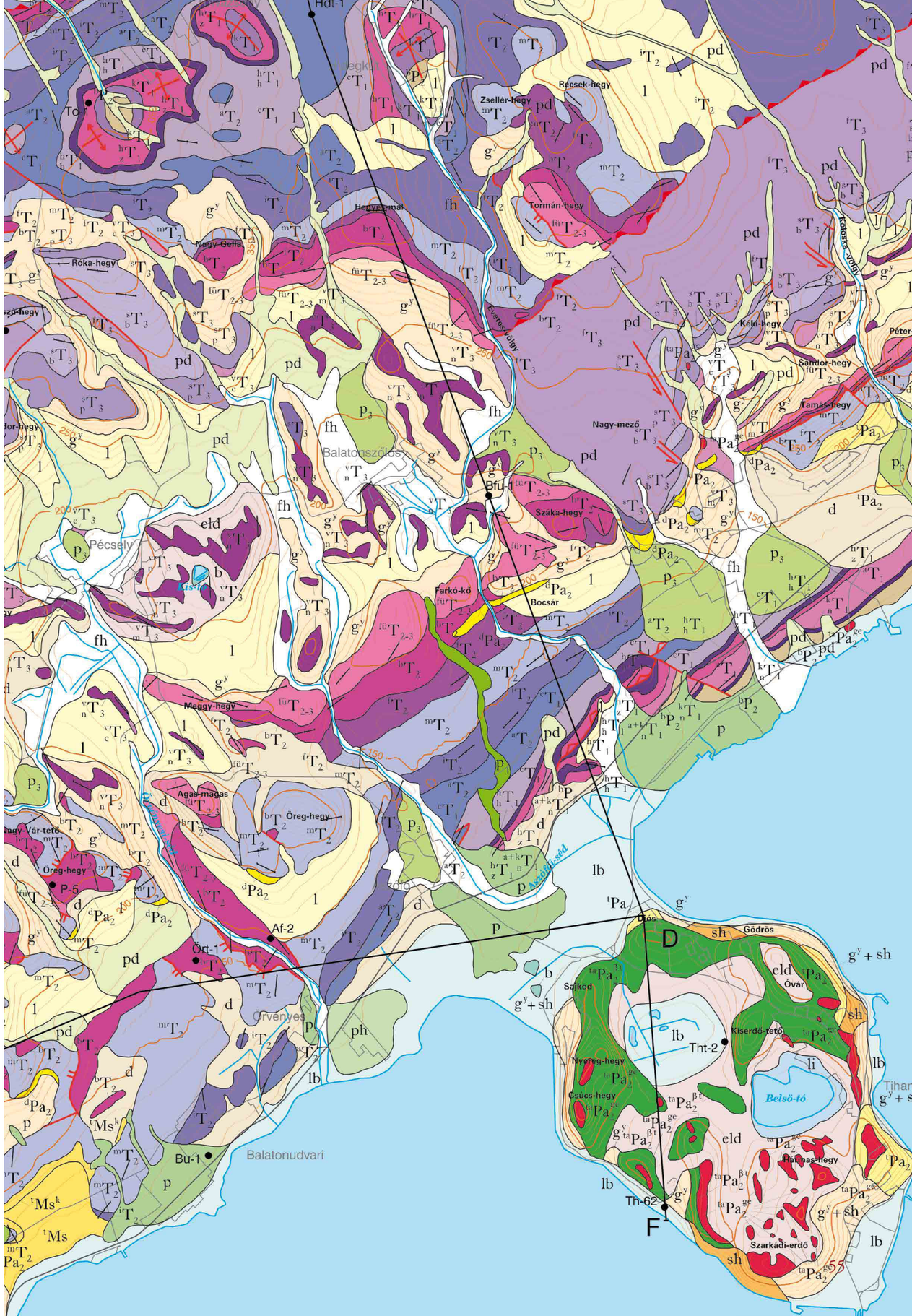
Kompressziós (térrövidüléses) tektonikus erőhatásra a kőzetekben létrejövő, plasztikus gyűrődéses (redős) szerkezet. A redőteknőt felépítő kőzetrétegek a redőszárnyak felől a redőtengely irányába dőlnek, és a szárnyak felől a tengely felé egyre fiatalabb képződmények települnek egymásra.

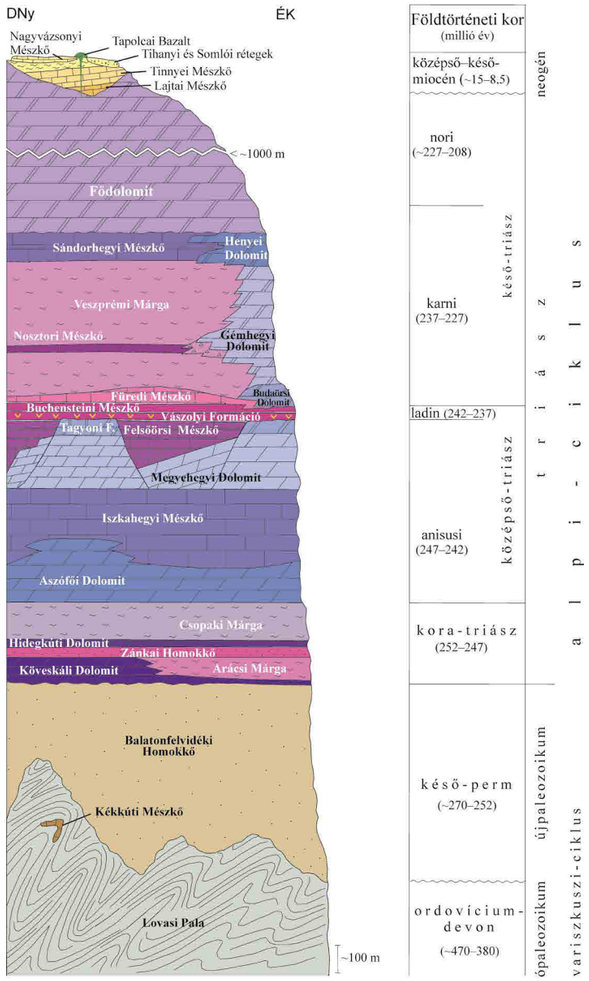


Devon–alsó-karbon rétegekből formálódott szinklinális szerkezet az Appalache-hegységben (Sideling Hill, Washington Állam, USA). A legfiatalabb képződmény a hegytetőt alkotó alsó-karbon konglomerátum, a teknős szerkezet tengelyében.

Részlet a Balaton-felvidék 1: 50 000-es méretarányú földtani térképéből (Budai et al. 1999a)


Kecske-hegy
Nagyvázsony
Vöröstó
Barnag
Kánya-domb
Sombokor
Derék-hegy
Hideg-hegy
Ragonya
Csér-tető
Mencshely
Bagó-hegy
Kopasz-tető
Halom-hegy
Balatoncsicsó
Keresztfa-tető
Herend
Ob-1
Drt-1
Kő-hegy
Gernye-hegy
Dörgicse
Öcs-hegy
Szit-1
Balázs-tető
Szentantalfa
Imer-tető
Nagy-Les-hegy
Hangyás-tető
Tagyon
Tgy-7
Bak-39
Bakt-1
Ságí-erdő
Cinege-domb
Bak-40
Bcst-1
Fényves-hegy
Bcs-3
Vszt-1
Bat-5
Bat-2
Nzt-6
Nv-9
Vöt-7
Vöt-8
Met-1
Vázsonyi-séd
Halastó


Hdt-1
Zsellér-hegy
Recsek-hegy
Tormán-hegy
Hegyes-mál
Nagy-Gella
Róka-hegy
Kéki-hegy
Sándor-hegy
Tamás-hegy
Nagy-mező
Balatonszőlős
Bfu-1
Száka-hegy
Pécsely
Farkó-kő
Bocsár
Meggy-hegy
Agas-magas
Öreg-hegy
Öreg-hegy
P-5
Af-2
Ört-1
Örvényes
Balatonudvari
Bu-1
Sajkod
Gödrös
Óvár
Kiserdő-tető
Tht-2
Nyereg-hegy
Csúcs-hegy
Belsö-tó
Hármas-hegy
Th-62
Szarkádi-erdő
D
F



A Balaton-felvidéket felépítő képződmények elvi rétegoszlopa (Budai et al. 1999a)

ben. A Kékkúton mélyült egyik fúrás vörös, gumós mészkövéből olyan ősmaradványok (conodonták és tentaculitesek) kerültek elő, amelyek alapján meghatározható volt a kőzetek kora és képződési környezete. Devonnál fiatalabb paleozoos tengeri üledékek a Balaton-felvidéken nem ismertek.

Az újpaleozoikum első felében, a karbon idején játszódott le a variszkuszi hegységképződés, amelynek során meggyűrődtek és metamorfizálódtak a korábban képződött üledékes kőzetek, a radiometrikus korhatározások szerint mintegy 325–310 millió évvel ezelőtt.

Alpi lemeztektonikai ciklus

Az újpaleozoikum során, az őskontinensek közötti óceánok bezáródásával létrejött a Pangea szuperkontinens. A perm időszakban a variszkuszi hegységrendszer kiemelkedése és lepusztulása zajlott, amelynek eredményeként nagy mennyiségű törmelék rakódott le a szárazföldi területeken. Ennek az időszaknak a jellegzetes üledéke a Balaton-felvidék jelentős területén felszínre bukkanó vörös homokkő, bukkan felszínre. A finomszemű törmelékes üledékek (agyag és kőzetliszt) lerakódása az ordovícium elejétől a devon közepéig igazolható ősmaradványokkal. Ezt két ízben szakította meg jelentősebb vulkáni esemény, amelyről az alsó-ordovíciumi riolit (savanyú vulkanit), és az annál feltehetően fiatalabb andezit (neutrális vulkanit) tanúskodik Alsóörs, illetve Révfülöp környékén.

A devon középső szakaszában a törmelékes üledékek képződését karbonátok lerakódása szakította meg a nyílt tengermedencé-



A triász végén kihalt gerinces csoport (Conodonta) apró, fogszerű maradványai

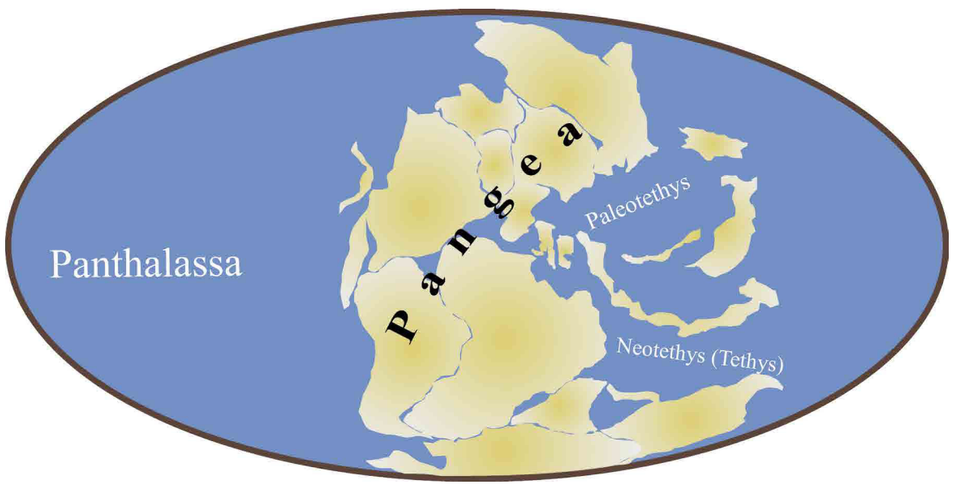


A közkedvelt építőkő, a Balatonfelvidéki Homokkő

kavicsos homokkő, konglomerátum és aleurolit alkotta, több száz méter vastag rétegsor (Balatonfelvidéki Homokkő). A homokkőből előkerült egykori növények spóráinak a vizsgálata alapján folyóvízi és tavi üledékképződési környezet rekonstruálható a paleozoikum vége felé. Az összletre jellemző vörös, lilásvörös szín alapján oxidatív képződési környezet, félsivatagi éghajlat tételezhető fel. Kövületek a legnagyobb ritkaságnak számítanak benne, Pálköve kőfejtőjében azonban találtak őshüllő lábnyomokat.

A Balaton-felvidék területének túlnyomó része olyan kőzetekből épül fel, amelyek a mezozoikum első időszaka, a triász során lerakódott üledékekből képződtek, körülbelül 252–210 millió évvel ezelőtt. Az ősföldrajzi rekonstrukciók szerint a Dunántúli-középhegységi-egység területe ebben az időben annak a Tethys nevű, óceáni méretű öbölnek a nyugati peremén helyezkedett el, amely az ősóceánból (Panthalassa) a Pangea szuperkontinensbe kelet felől ékelődött be. Ennek az óceánnak a selfjén meglehetősen változatos rétegsor rakódott le, amelynek a részletes vizsgálata segítségével rekonstruálhatóak az egykori üledékképződési környezetek.

A perm során kialakult, nagy kiterjedésű folyóvízi síkságot a triász elején, mintegy 252 millió évvel ezelőtt öntötte el a tenger. Ennek eredményeként sekélytengeri self jött létre,



Az óceánok és kontinensek elrendeződése a triász időszak közepén

44 millió év rövid története

A Balaton-felvidék nagy részét triász korú kőzetek építik fel. A triász üledékgyűjtő fejlődéstörténete öt nagyobb szakaszra osztható fel:

– kora-triász: sekélytengeri törmelékes és karbonátos self kialakulása;
– középső-triász első fele (kora-anisusi korszak): árapályövi síkság és sekélytengeri lagúna kialakulása;
– a középső-triász második fele (középső-anisusi és ladin korszak): sekélytengeri karbonátplatformok és azokat elválasztó mély tengermedencék kialakulása;
– a késő-triász első harmada (karni korszak): a tengermedencék feltöltődése és a karbonátplatformok folyamatos épülése;
– a késő-triász második harmada (nori korszak): a sekélytengeri karbonátplatformok uralomra jutása.

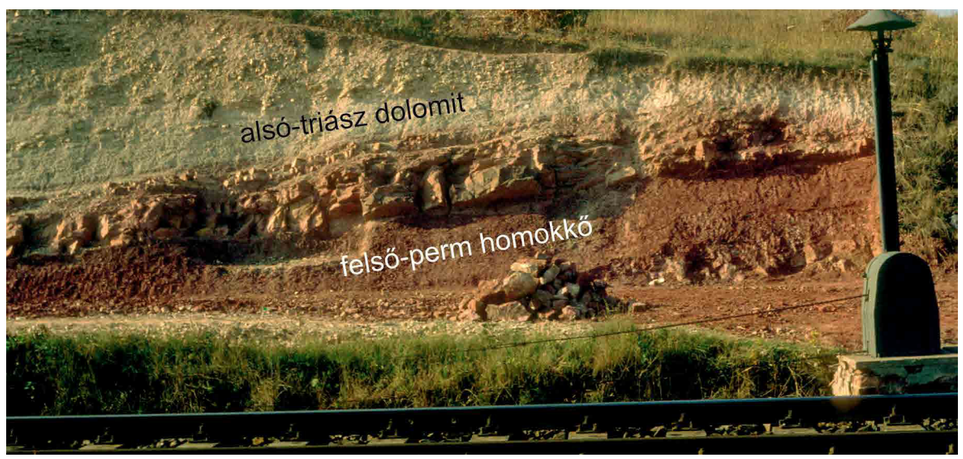
amelyen finomszemcsés törmelékek és karbonátok lerakódása vette kezdetét.

A sekélytengeri rétegsort a Balaton-felvidék délnyugati részén dolomit és homokkő (Köveskáli Formáció), a Tihanyi-félszigettől északkeletre pedig márga alkotja (Arácsi Márga). Mindkettőre jellemzők a *Claraia* kagylónemzetség fajai (*Claraia clarai és Claraia aurita*). A márga rétegsorán belüli mészkő közbetelepüléseiben igen gyakoriak az apró, néhány milliméter nagyságú csigák, amelyek feltehetően a belső selfmedencét a nyílt tengertől elválasztó homokdombokról halmozódhattak át.

A szárazföldi törmelék beszállítódásának erősödésére (azaz a tengert övező szárazföld lepusztulásának a fokozódására) utal a vörös homokkő lerakódása a kora-triász közepe táján (Zánkai Homokkő). A vékonyréteges–lemezes szerkezetű homokkő réteglapjain gyakoriak a hullámfodrok, valamint a különböző tengeri kagylók meglehetősen rossz megtartású lenyomatai és kőbelei (*Bakevellia, Costatoria, Pseudomonotis, Unionites* stb.). Az üledékgyűjtő ezt követő átmeneti sekélyülését és bepárlódó lagúnák kialakulását jelzi a homokkő fölött települő gipszes dolomit rétegsor (Hidegkúti Dolomit).

A kora-triász második felében lezajlott tengerszint-emelkedés eredményeként alakult ki az a nyílt selfmedence, amelyben a korábbinál nagyobb vízmélységre utaló tengeri szervezetek maradványait tartalmazó márga rakódott le (Csopaki Márga). A rétegsor alsó szakaszában az ammoniteszek (*Tirolites cassianus*) mellett gyakoriak a csigák (*Natiria costata*), a kagylók (*Costatoria, Eumorphotis, Gervilleia* stb.), valamint a tüskésbőrűek közé tartozó tengeri liliomoknak, a crinoideáknak a széthullott vázából származó töredékek.

A kora-triász tengermedence ezt követően sekélyebbé vált, és ennek nyomán nagy



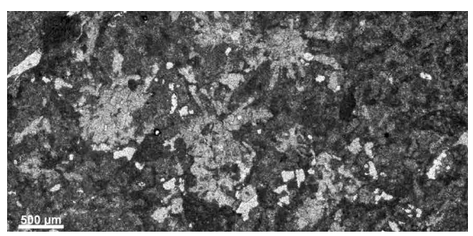
A kora-triász tengerelöntés dokumentuma a balatonarácsi vasúti bevágásban (fotó: Péró Csaba)



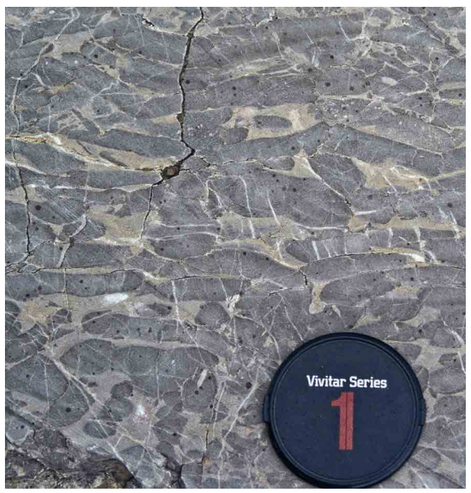
Kagylók, csigák és ammoniteszek vázából álló biogén mészkő a Csopaki Márga sólyi feltárásában

kiterjedésű árapályövi síkság jött létre a középső-triász elején, mintegy 247 millió évvel ezelőtt. A száraz, meleg, sivatagi éghajlaton a sekélytengeri (a mai Arab-öbölhöz hasonló) lagúna időről időre bepárlódott. Erre utalnak a vékonyréteges–lemezes szerkezetű dolomitban (Aszófői Dolomit) gyakori száradási repedések és a gipszkiválások utáni apró „sejtüregek".

A tenger ezt követő mélyülésével belső self-lagúna-rendszer jött létre, amelyben mésziszap lerakódása zajlott. A nyílt tengerről történt időszakos lefűződések időszakában a lagúnákat



pangó vizű, rosszul szellőzött tengerfenék jellemezte. Erre utal a sötétszürke, bitumenes mészkő (Iszkahegyi Mészkő) alsó szakaszának lemezes szerkezete, amelyből az eredeti rétegződés megőrződésére, azaz a fenéklakó, beásó szervezetek



Bioturbációra utaló „féreg-járatos szerkezet" az alsó-anisusi Iszkahegyi Mészkőben (Balatonhenye, fotó: Csillag Gábor)

Gipsz utáni kiválások Aszófői Dolomitban

Balatonites

A Balatonites a triász időszak anisusi korszakában élt és világszerte elterjedt volt. Jellegzetes maradványai az ilyen korú tengeri üledékes kőzetek emblematikus fosszíliái. Lágy testének semmilyen részlete nem őrződött meg, de szépen díszített vázának maradványai gyakoriak a Balaton-felvidéken.



Az első Balatoniteseket alighanem Böckh János gyűjtötte a Balaton-felvidéken 1869–70-ben. A Balatonites balatonicus faj hivatalos leírója mégsem Böckh János, hanem kortársa, a triász ammoniteszek szaktekintélye, a Bécsben dolgozó Edmund von Mojsisovics volt. Az ő nevéhez fűződik a faj első ábrázolása is.

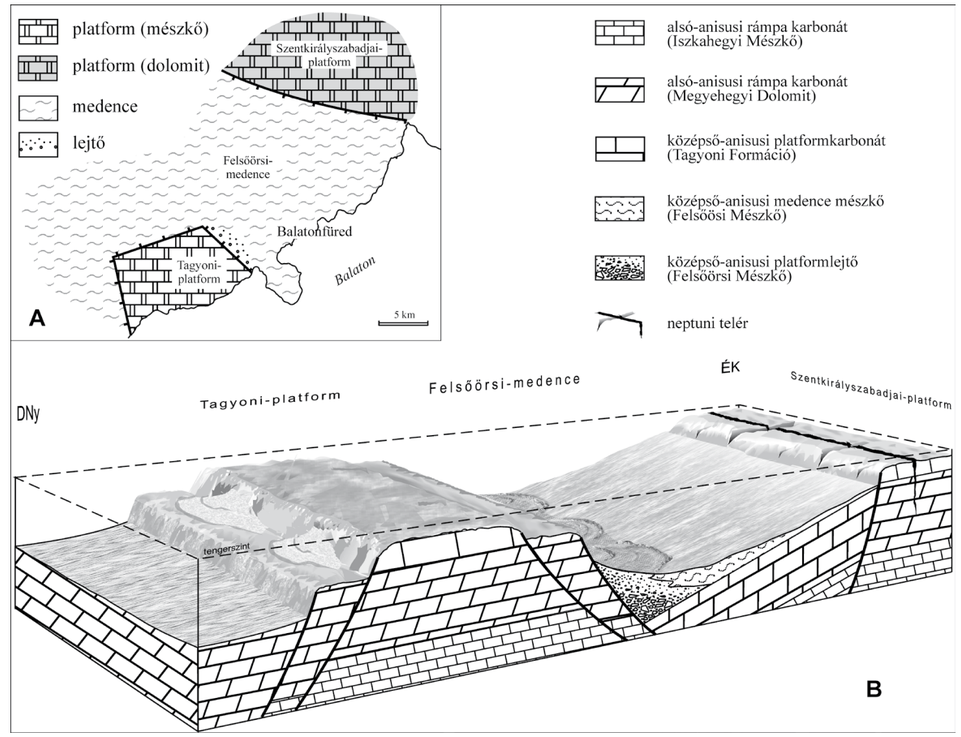
Az ammoniteszek életmódjáról meglehetősen keveset tudunk, de távoli rokonaik, a nautiluszok és a tintahalak ma is élnek a tengerekben. A Balatonites valószínűleg kiválóan tudott úszni, és feltehetően ragadozó életmódot folytatott.

▲ Balatonites *(fotó: Főzy István)*

hiányára lehet következtetni. A rétegsor felső szakaszát alkotó pados mészkő jellegzetes féregjáratos (úgynevezett „hieroglifás”) szerkezete ugyanakkor a beásó szervezetek megjelenésére, azaz a tengerfenék szellőzöttségének javulására utal.

A tenger ezt követő fokozatos sekélyülése nyomán jól átvilágított, enyhe lejtésű, sekélytengeri rámpa jött létre, amelyen továbbra is karbonátok lerakódása folytatódott (Megyehegyi Dolomit).

A triász közepe táján, mintegy 245 millió évvel ezelőtt az üledékgyűjtő addig nyugodt fejlődését drasztikus földtani esemény zavarta meg. A Neotethys-óceán kinyílásához kapcsolódó, tágulásos szerkezeti mozgások hatására az addig egységes self különálló részekre tagolódott szét. A Balaton-felvidék középső, Tagyon és Aszófő közötti blokkja, valamint a Veszprémi-fennsík kiemelt helyzetben maradt, amelyeken sekélytengeri szigetplatformok jöttek létre az anisusi korszak középső szakaszában, a mai Bahama-padhoz hasonló, sekély vízzel borított árapályövi környezetben. A tengerszint ritmusos változására utal, hogy a Tagyoni-platform



◀ *A középső-anisusi platformok és medencék kapcsolata a Balaton-felvidéken (Budai, Vörös 2003, 2006)*



▶ *A középső-anisusi sekélytengeri platform ciklusos rétegsora a kádártai kőfejtőben (balra), egy elemi ciklus részlete (jobbra), felül lemezes sztromatolittal (Szentkirály-szabadja)*

rétegsorában az árapályöv alatti lagúnában lerakódott vastagpados, biogén (zöldalgás, foraminiferás) mészkő ciklusosan váltakozik a lemezes szerkezetű, árapályövben képződött mészkővel (sztromatolit). A Balaton-felvidék északkeleti folytatását képező Veszprémi-fennsíkon (Szentkirályszabadjai-platform) ez a sekélytengeri mészkő utólag dolomitosodott.

A szigetplatformok közötti bezökkent árkokban viszonylag mély tengermedencék alakultak ki (Felsőörsi-medence), amelyekben ammonitesz-es, bitumenes mészkő képződött. A Felsőörsi Mészkő egyes szintjeiben a sekélytengeri szervezetek, például tengeri liliomok (crinoideák) és pörgekarúak (brachiopodák) maradványainak tömeges megjelenése arra utal, hogy a platformok lejtői mentén, időről időre jelentősebb mennyiségű üledék halmozódott át a sekélyebb területekről a medencébe. A Balaton-felvidékről leírt gazdag ammonitesz-fauna alapján a földtörténetnek ezt a korszakát pelsóinak hívják szerte a világon, a Balaton latin neve után (*Lacus Pelso*).

Az anisusi és a ladin korszak határán, mintegy 240 millió évvel ezelőtt, a megelőző tá-

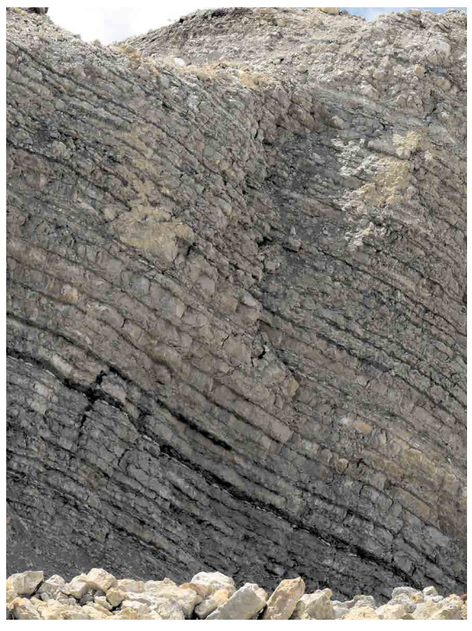


◀ *A Felsőörsi Mészkő lemezes-bitumenes változata az aszófői alapszelvényben (fotó: Vörös Attila)*

gulásos tektonikai mozgások következtében megindult a vulkanizmus, melynek tufaszórásai elsősorban az anisusi végén voltak intenzívek (Vászolyi Formáció). A tengerszint ezzel egyidejű emelkedése eredményeként a sekélytengeri platformok „megfulladtak”, mivel a „karbonát-termelésben” a legjelentősebb szerepet játszó, nagy fényigényű zöldalgák élettere a jól átvilágított víznél mélyebbre került, ahol a fotoszintézishez már nem volt elég fény. Ebben az időben alakult ki a legmélyebb tengermedence a triász során, amit a vulkanitokkal váltakozó, gumós, tűzköves, ammoniteszes mészkő és a kovavázas egysejtűek (radioláriák) vázából képződött vékony rétegek, a radiolaritok jeleznek (Buchensteini Formáció).



Pados-márgaközös Füredi Mészkő a pécselyi Meggy-hegy kőfejtőjében



Gumós-kovás mészkő és mállott vulkáni tufa váltakozása (Buchensteini Formáció) a kádártai kőfejtőben

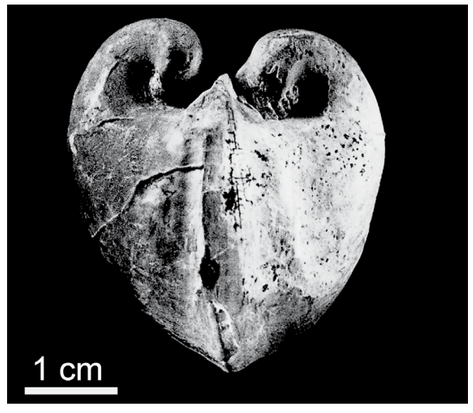
A karni elején a Balaton-felvidéki platformok területe lényegesen kiterjedt a medencék rovására, amelyekben a platformokról átülepedett, finom mésziszap lerakódása zajlott. Ennek eredményeként képződött a Balaton-felvidék egyik legkedveltebb építőköve, a világosszürke, pados Füredi Mészkő.

A késő-triász korai szakaszában a Balaton-felvidék területének túlnyomó része sekélytengeri karbonátplatformok közötti tengermedence volt, amely a klíma csapadékossá válása nyomán felerősödött szárazföldi mállás és behordódás következtében finomszemcsés törmelékkel töltődött fel. Ennek a dokumentuma az a több száz méter vastag márgaösszlet, amelyet a múlt századi klasszikus lelőhelyek után Veszprémi Márgának neveznek. A márga rétegsorát mintegy 10–20 méter vastag, gumós, tűzköves mészkő osztja ketté (Nosztori Mészkő).

A karni korszak végére a tengermedence fokozatosan feltöltődött a terrigén törmelék behordódása következtében, és ezzel egy időben a kiterjedése is csökkent az egyre nagyobb teret hódító sekélytengeri platformok között. Ennek eredményeként rosszul szellőzött aljzatú, túlsós lagúna jött létre, amelynek üledékét a Sándorhegyi Mészkő bitumenes, lemezes alsó szakasza képviseli. A veszprémi Jeruzsálem-hegyen ebből a rétegcsoportból került elő a Bakony egyik legismertebb gerinces ősmaradványa, a „kavicsfogú álteknős” (*Placochelys placodonta*), amelynek első leírása Lóczy Lajos monográfiájának paleontológiai függelékében jelent meg.

A törmelékkel feltöltődő karni medencéket tenger alatti hátságok választották el egymástól, amelyeken sekélytengeri karbonátok képződése folyt. A nagyobb kiterjedésű karni platformok a szűkebb értelemben vett Balaton-felvidéktől DNy-ra (a Keszthelyi-hegységben), illetve ÉK-re (a Veszprémi-fennsíkon) nyomozhatók.

A karni korszak végére, mintegy 227 millió évvel ezelőttre, a Balaton-felvidék középső-triászban felnyílt medencéi teljesen feltöltődtek, és a platformok összeolvadásával közelítően sík morfológiájú, összefüggő térszín alakult ki. A mai Bahama-platformhoz hasonló, de annál lényegesen nagyobb kiterjedésű árapályövi síkság volt a színtere annak a karbonátképződésnek a nori korszak során, amelyet a Dunántúli-középhegység legvastagabb képződménye, a mintegy másfél kilométer vastag Fődolomit képvisel. Ciklusos felépítésű rétegsorában az árapályövi algaszőnyeg alkotta rétegek ritmusosan váltakoznak az árapályöv alatti lagúnában képződött, jellegzetes szív alakú kagylókat (*Megalodus*) tartalmazó padokkal.



A Fődolomit legjellegzetesebb ősmaradványa, a Megalodus

A Fődolomitnál fiatalabb mezozoos (legfelső-triász, jura és kréta) képződmények a Balaton-felvidéken hiányoznak. Ennek az az oka, hogy a Bakony szinklinális szerkezetének kialakulása és kiemelkedése során, a szárnyakon intenzív lepusztulás zajlott a kréta középső és késői szakaszában, valamint a kainozoikum korai időszakában.

Jóval később, az alpi hegységképződés során az egykori Tethysből kialakult tengerágak a miocénben fokozatosan lefűződtek a

„Kavicsfogú álteknős”

A Placochelys placodonta maradványai a legidősebb hazai gerinces testfosszíliák. Az ősmaradványt először Otto Jaekel berlini paleontológus írta le, 1902-ben. A maradványokat még 1899-ben találta a veszprémi Jeruzsálem-hegyen Laczkó Dezső, aki geológusként Lóczy Lajos munkatársa volt a Balaton környékének földtani térképezése során.

A „kavicsfogú álteknős” a triász tengerek ragadozója volt. Testhossza hozzávetőleg másfél méter lehetett. Feltehetően főként külső vázzal rendelkező állatokat fogyasztott, ugyanis a kavicsokra emlékeztető ovális fogaival össze tudta roppantani a pörgekarúak (brachiopodák), kagylók és csigák vázát. Ezt a táplálkozási módot héjtörőnek vagy durofágnak nevezzük.

Neve nem véletlenül álteknős: páncélos tengeri hüllő volt, de nem állt közvetlen rokonságban a mai teknősökkel. Páncélja kúpos lemezkékből állt, amik nem voltak kapcsolatban a csontvázzal, míg a teknősök páncélja a csontvázzal összeforr.



Placochelys placodonta (fotó: Lantos Zoltán)

világtengerről. A Dunántúli-középhegység területe ebben az időszakban az egyre intenzívebben kiemelkedő Alpok északi előterében kialakult Paratethys-tenger része volt. Ennek részmedencéit időnként és helyenként tenger töltötte ki, máskor tavakká, vagy éppen folyók által feltöltött síksággá alakult.

A középső-miocén idején (14–11 millió évvel ezelőtt) sekélytengeri karbonátos üledékképződés zajlott a szűkebb értelemben vett Balaton-felvidéken. A badeni korú Lajtai Mészkő és a szarmata korú Tinnyei Mészkő meglehetősen tagolt partvidékkel jellemzett, sekély, meleg szigettengerben rakódott le, a mai Karib-tengeréhez hasonló környezetben. A badeni és a szarmata tenger partvonala jól követhető a Tapolcai-medence peremén, valamint Balatonszepezd, Zánka, Balatonakali és Balatonudvari környékén. Az egykori tengerpartot alkotó idős, perm vagy triász korú kőzetekből (homokkő, dolomit, mészkő stb.) a miocén tenger hullámverése (abrázió) eredményeként jól kerekített, koptatott parti kavics képződött, amely az egykori tengermedence belseje felé kavicsos mészkővel, majd ősmaradványokban gazdag, biogén mészkővel fogazódik össze.

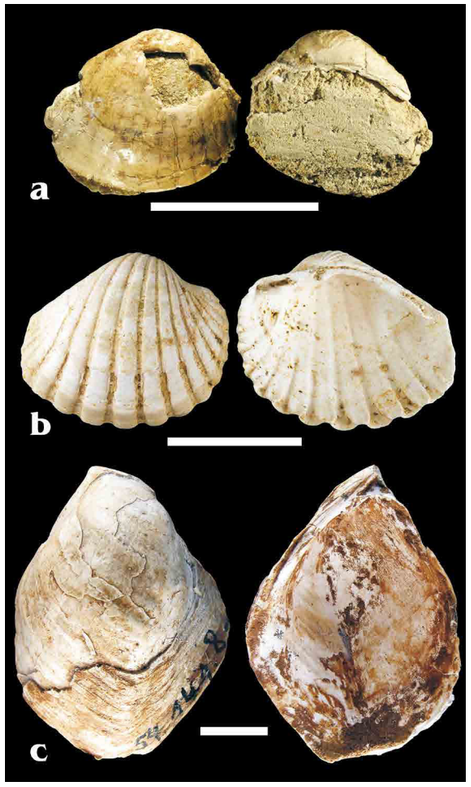
A nyílt világtengerről egyre inkább lefűződött miocén beltenger vizének fokozatos édesedését egyértelműen igazolják a mészkőösszletben gyakran kőzetalkotó mennyiségben megjelenő ősmaradványok (csigák, kagylók, foraminiferák), amelyek között – a rétegsorban felfelé haladva – a csökkent sós vízi fajok fokozatosan uralkodóvá válnak a tengeriek rovására.

A késő-miocén során, mintegy 11 millió évvel ezelőtt, a Paratethys többi medencéjétől teljesen elszigetelődött tó jött létre, amely a beömlő folyók vizének hígító hatására fokozatosan édesedett, az általuk behordott törmelékkel pedig fokozatosan feltöltődött a miocén végére. Ez az óriási kiterjedésű Pannon-tó a Kárpát-medence jelentős részét kitöltötte, jellegzetes partmenti üledékei a Balaton-felvidéken is elterjedtek (ismertetésüket lásd az 5. fejezetben). A „Balatoni riviéra" fölött magasodó hegysor déli oldalán jól követhető a jól kerekített abráziós kavics (helyenként, például a balatonfüredi Bocsár oldalában konglomerátummá cementáltan), amelynek elterjedése a tó hullámverte partvonalát rajzolja körül. A Balaton-felvidék egyes területeire jellemző strandhomok és kavics típusterülete a Káli-medence (Kállai Kavics). A Pannon-tónak a vonulatok közé benyúló öbleiben finom szemcséjű homok, kőzetliszt, majd agyag és szenes agyag rakódott le (Tihanyi rétegek). A tóról a Balaton-felvidék vonulatai által lefűzött, csendes vizű nagyvázsonyi-lagúnában tavi mésziszap képződött (Nagyvázsonyi Mészkő). A Balaton-felvidék pannóniai kövületei között leggyakoribbak a *Congeria* és a *Lymnocardium* nemzetségbe tartozó kagylók, valamint a *Melanopsis* nemzetségbe tartozó csigák.

Az alpi hegységképződési ciklus utolsó szakaszában intenzív bazaltvulkanizmus folyt a Balaton-felvidéken. A vulkáni működés első szakasza kis tömegű piroklasztitot és lávakőzetet szolgáltatott, majd ezt követően indult meg a gőzrobbanásos (freatomagmás explóziós) vulkanizmus Tihanyban, körülbelül 7 millió évvel ezelőtt. (A vulkáni működés további részleteit lásd a 6. fejezetben). A pannóniai üledékképződési ciklus lezáródását követően, már a miocén végén megindult a Balaton-felvidék és a Déli-Bakony mai felszínének kialakulása. Az addigi süllyedést az emelkedés váltotta fel a terület jelentős részén, ami a korábban lerakódott képződmények lepusztulásához vezetett.

Feltehetően a miocén és a pliocén fordulóján, mintegy 5,3 millió évvel ezelőtt zajló utóvulkáni működés hozta létre a tihanyi „gejziriteket". A mai értelmezés szerint ezek az üledékek vulkanotektonikus törésvonalak mentén felszínre tört hévforrások üledékei. Az oldott ásványi anyagokban gazdag, forró vízből mészkő és dolomit anyagú üledék rakódott le a krátertavakban, amelyet a vízből kicsapódott kova itatott át.

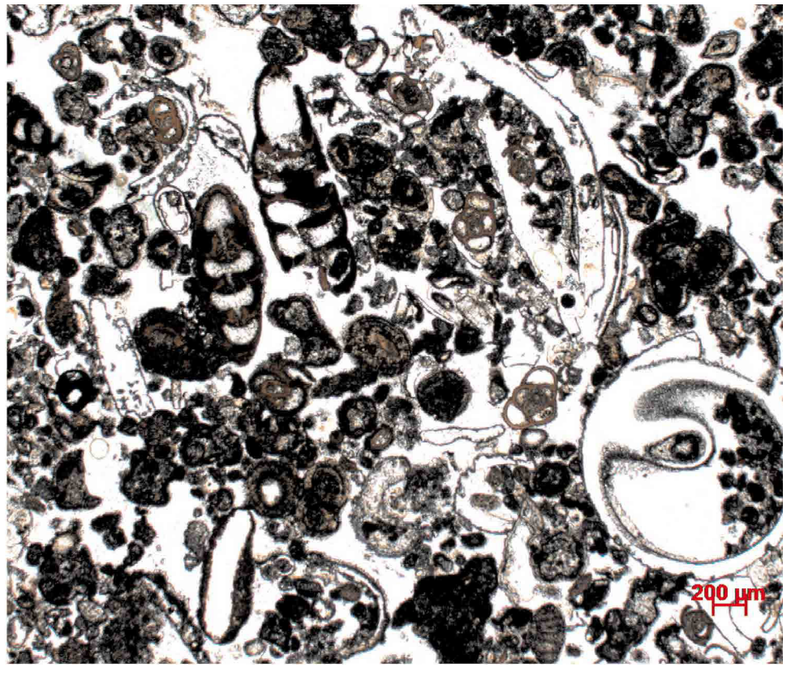
A Balaton-felvidék történetét a pleisztocén során az erózió pusztítása, a patakok bevágódása és völgyképződés, a hegyláncok és a közöttük húzódó medencesorok kialakulása, a szél általi erózió (defláció) jellemezte (ezeknek a folyamatoknak a részletes ismertetését lásd a



◀ *Jellegzetes „pannóniai" kagylók*

Pórusos szarmata Tinnyei Mészkő csiga-vázak lenyomataival (balra), vékonycsiszolati képe foraminifera- és csiga-vázakkal (jobbra) (fotók: Selmeczi Ildikó, Szurominé Korecz Andrea) ▼







A tihanyi Arany-ház dombját alkotó, kovásodott karbonátiszapból álló gejzirit (fotó: Cserny Tibor)

8. fejezetben). Az eljegesedések száraz, hideg időszakában a szél által szállított finom por rakódott le, helyenként 10–15 méteres vastagságban. Ennek a pornak a laza cementálódása eredményeként jött létre a lösz, amely a Balaton-felvidéken is jelentős területeket borít. Ezzel részben egy időben, részben ezt követően a pusztuló hegyoldalakon főként lejtőtörmelék, míg az azokat átvágó völgyek torkolatánál a patakok által lerakott hordalékkúpok képződtek és képződnek ma is.

Mai ismereteink szerint a Balaton medencéje több szakaszban alakult ki a negyedidőszak során, maga a tó körülbelül 15 000 éve jelent meg több sekély, kezdetben egymástól elkülönült tavacska formájában (lásd a 9. fejezetben).

A Balaton-felvidék szerkezeti helyzete az Alpok rendszerében

A Balaton-felvidék paleozoos és mezozoos képződményei nagyfokú hasonlóságot mutatnak az Alpok megfelelő kifejlődéseivel. Ez a jelenség már a területen dolgozó első kutató geológusoknak is feltűnt, ezért is használtak az itteni rétegsorokra alpi neveket, mint például Buchensteini Mészkő, Dachsteini Mészkő stb. A jelenlegi földrajzi helyzetben ugyanakkor a Balaton-felvidék és az egész Dunántúli-középhegység látszólag önálló egységként, viszonylag távol, néhány 100 kilométeres távolságra helyezkedik el az Alpok vonulataitól. Milyen magyarázat adható erre a jelenségre és hogyan rekonstruálhatjuk azt az eredeti állapotot, amelyet a földtani rokonság sugall?

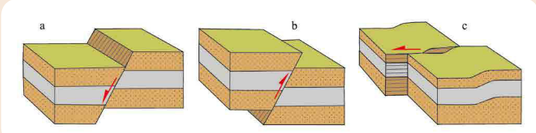
Az 1900-as évek elejére a földtani térképezés eredményeképpen két fő szerkezeti elem vált ismertté a Balaton-felvidéken: az északabbi a veszprémi, a délebbi a litéri feltolódás. Ezek a hosszanti (azaz a középhegységi szinklinális tengelyével párhuzamos) feltolódások délkeleti irányúak, és csapásirányban több mint 100 kilométeren át követhetőek. Kialakulásuk pontos kora azonban napjainkig is vitatott. Dudko Antonyina a feltolódásokhoz kapcsolódó mikrotektonikus szerkezetek vizsgálata alapján azt feltételezte, hogy ezek a szerkezeti elemek nagyobb mélységben, a herciniai aljzatban, egy lenyesési felülethez hajlanak. A két fő feltolódás mentén 1,5–2 kilométeres elmozdulást becsült, hozzátéve, hogy a valós érték ezt akár jelentősen meghaladhatja. A kérdés ezért úgy vetődik fel, hogy a kréta kompressziós szerkezetek a Balaton-felvidéken és a Dunántúli-középhegységben csak pikkelyeződésre vagy takarós felépítésre utalnak-e?

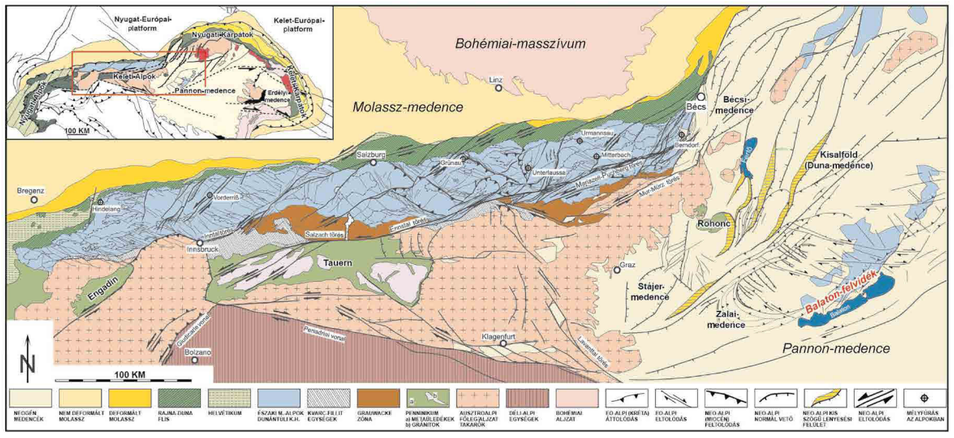
A Balaton-felvidék mezozoos rétegsorának nyilvánvaló hasonlósága az Alpok azonos korú képződményeivel más szempontból vetette föl ugyanazt az alapvető kérdést: jelent-e a nyilvánvaló kőzetkifejlődésbeli rokonság egyúttal hegységszerkezeti hasonlóságot is?

Lóczy és követői erre határozott nemmel válaszoltak, midőn a „plasztikusan” deformálódott alpi hegyláncoktól markánsan különböző, az alpi időszak során blokkosan feldarabolódó, merev közbenső tömeget képzeltek el az alp–kárpáti–dinári hegységkoszorú belsejében (lásd 1. fejezet). Ugyanakkor Uhlig Viktor az akkor újnak számító mobilista koncepció alapján magyarázta a Kárpátok alpi fejlődéstörténetét, és a Dunántúli-középhegységet (beleértve a Balaton-felvidéket is) az ausztroalpi takarórendszer legfelső tagjaként értelmezte. Ezt a nagyszerű korai felismerést a magyar geológiai közvélemény „fantazmagóriának” tartotta sok évtizeden keresztül. Ez azonban nem szakmai szűklátókörűségen, hanem azon a tényen alapult, hogy hagyományos földtani térképezéssel a Dunántúli-középhegység nagy tömegének

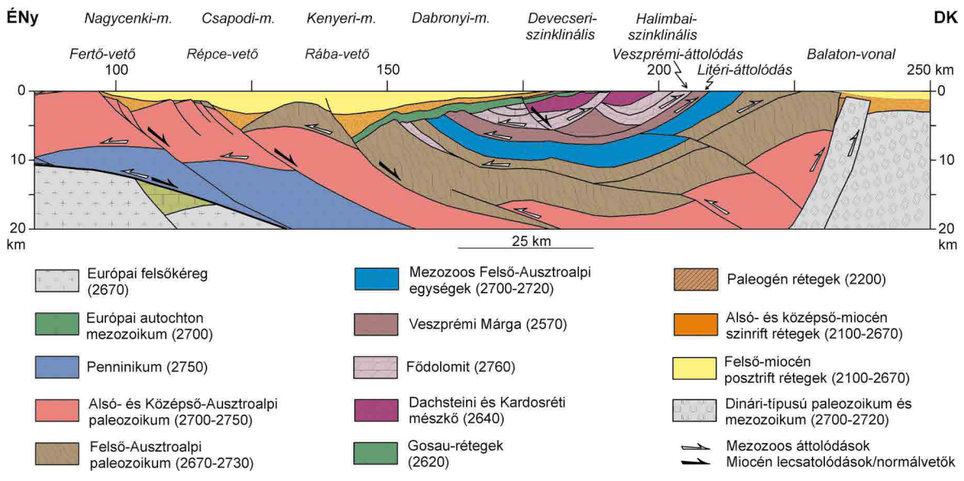
A vetők

Tektonikus erőhatásra a kőzetekben létrejövő rideg (törékeny) deformáció a kőzetblokkokat különböző irányokban mozdíthatja el egymáshoz képest. A törési felület fölötti kőzettest lefelé történő elmozdulása esetén a szerkezetet vetőnek (a), felfelé történő elmozdulása esetén feltolódásnak hívjuk (b). A kőzetblokkok egymáshoz képest vízszintes elmozdulása esetén a szerkezetet eltolódásként minősítjük (c). Utóbbi lehet balos vagy jobbos, attól függően, hogy a szerkezet átellenes oldalán lévő blokk relatív elmozdulása mely irányban történt.





A Dunántúli-középhegység szerkezeti helyzete az Alpok rendszerében (Linzer, Tari 2010)



Az Ausztroalpi-takarók szerkezeti helyzete és földtani felépítése a Keleti-Alpok előterétől a Dunántúli-középhegység déli pereméig (Tari, Horváth 2010)

takarós helyzetét valóban nem lehet bizonyítani. A választ erre csak egy regionális, nagyobb területet átfogó értékelés adhatja meg, mert a földtani feltártsági viszonyok a Balaton-felvidéken nem engedik meg az alpi szerkezeti elemek részletes dokumentálását és meggyőző értelmezését.

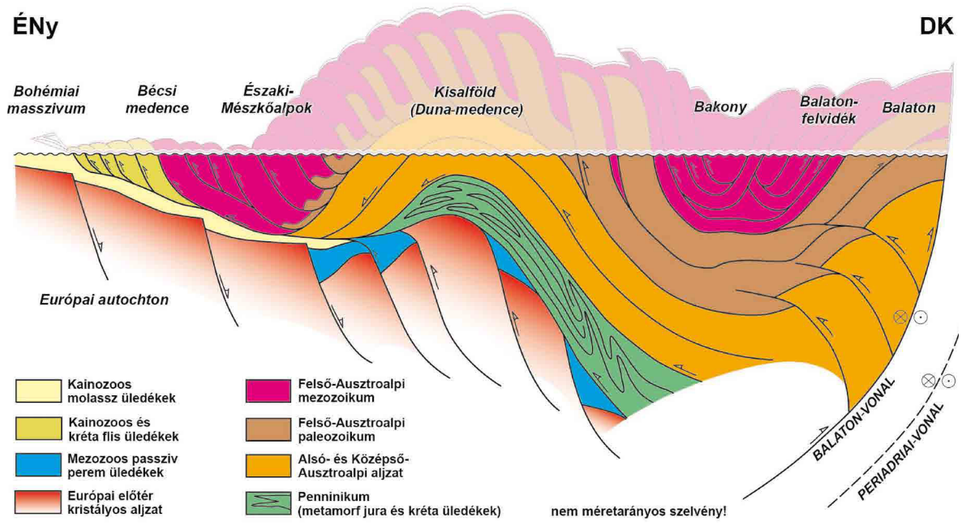
Döntő mértékben a szénhidrogén-kutatás szeizmikus mérései és fúrási adatai alapján született az az értelmezés, hogy az Alpok és a Dunántúli-középhegység között elhelyezkedő Kisalföld és Zalai-medence aljzata zónás felépítésű, amelyet eredetileg jelentősen különböző paleogeográfiai pozícióban lévő kőzettartományok kompressziós feltorlódása hozott létre. A Dunántúl északnyugati részének medencealjzatát tehát az Ausztroalpi-takarórendszer Magyarország területére átnyúló szerkezeti egységei építik fel. Ezek alól bukkan ki a Keleti-Alpok szegélyén, a Kőszegi-hegységet alkotó Pennini-egység, amelynek metamorf jura összletét fillitek alkotják. E fölött az Alsó-Ausztroalpi-takaró paleozoos gneiszből és csillámpalából álló metamorf kőzetei következnek, amelyek a Soproni-hegységben és környékén bukkannak felszínre. A Kisalföld aljzatát nagy részben alkotó, enyhén metamorfizálódott, paleozoos agyagpalából, metahomokkőből és dolomitból álló összlet a Felső-Ausztroalpi-takaróba tartozik. E fölötti szerkezeti helyzetű a Dunántúli-középhegységi-egység, amely az Ausztroalpi-takarórendszer legfelső, nem metamorfizálódott kőzetekből felépülő tagja. Utóbbi egységnek csak a variszkuszi paleozoos aljzata metamorfizált kissé, amelyben karbon gránittestek helyezkednek el a Balaton-vonal mentén.

Szeizmikus mérések és fúrási adatok világossá tették, hogy a Kisalföld medencealjzatának szerkezetét néhány nagyon jelentős, ugyanakkor lapos szögű normál vető dominálja, amelyek nagymértékű megnyúlást (extenziót) eredményeztek a Pannon-medence középső-miocén kialakulása során. Ha az ezekkel a vetőkkel kapcsolatos miocén részmedencéket és az alattuk elhelyezkedő paleogén/senon medencefragmentumokat elhagyjuk egy prekainozoos szintre kiegyenlített rekonstrukció segítségével, akkor látványosan kirajzolódik a Dunántúli-középhegység alpi szerkezeti kapcsolata. Ez alapján megállapítható, hogy a Dunántúli-középhegység eredeti helyzetében – a legfelső-ausztroalpi takarórendszer integráns részeként – közvetlen fizikai kapcsolatban volt az Északi-Mészkőalpokkal, amely a késő-oligocén kiemelkedés és erózió, majd a kora-miocén kipréselődés (extrúzió) hatására szakadt meg. Ez a két alapvető oka annak, hogy a Balaton-felvidéket és a Dunántúli-középhegység egészét – a jelenkori látszólagos elszigeteltségük ellenére is – az Alpok részeként kell kezelnünk.

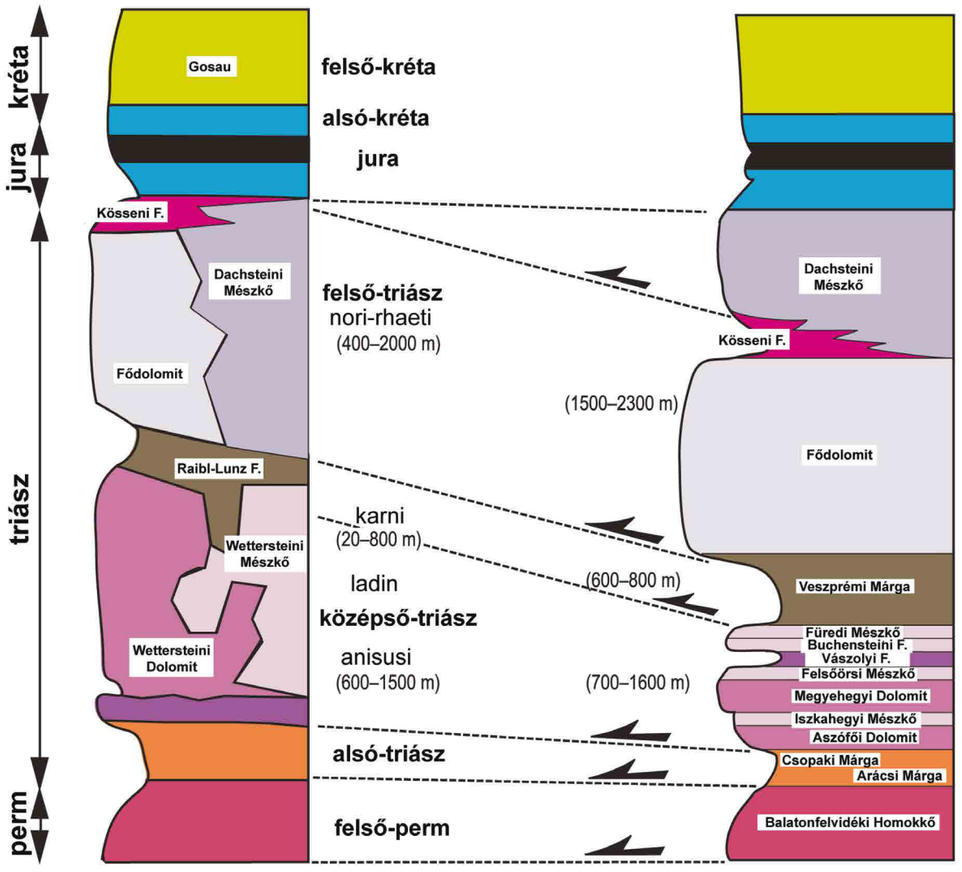
A Balaton-felvidék rétegtani kapcsolatai a Déli-Alpokkal a legnyilvánvalóbbak. Szerkezeti szempontból azonban a Dunántúli-középhegységet a Keleti-Alpok takarós rendszerével lehet jobban korrelálni.

A középső-kréta kompressziós fázisok vastag paleozoos–triász–jura–neocom rétegsort deformáltak. Mivel ez a rétegsor kőzettanilag igen heterogén, egyes szintjei jóval nagyobb valószínűséggel működhettek lenyesési felületként, míg más, ellenállóbb képződmények a kompressziós szerkezetek rámpáit biztosíthatták. Figyelmet érdemel, hogy ezek a szintek jól összevethetők az Északi-Mészkőalpokból leírtakkal.

A szeizmikus szelvényeken több takaróhatár rajzolódik ki a Dunántúli-középhegységi-egységen belül, ami arra utal, hogy a potenciális siklató rétegek közül több is működött. Az értelmezett szeizmikus szelvények információi arra engednek következtetni, hogy a Bakony kisalföldi szárnyán, laposan a hegység alá követhető feltolódásokhoz elsősorban a Veszprémi Márga szolgáltatta a siklató réteget, a rajta áttolódott pikkelyek fő tömegét pedig a rideg Födolomit és a Dachsteini Mészkő alkotja. Ebből és a siklató felületek geometriájából kézenfekvően adódik az a lehetőség, hogy a Balaton-felvidék fő feltolódásait, a Litéri- és a Veszprémi-áttolódást összekapcsoljuk a kisalföldi szárnyon megismert feltolódásokkal, s így alkossuk meg a tektonikailag konzisz-



Regionális szelvény a kainozoos és senon medencék elhagyásával: eo-alpi szerkezet (Tari, Horváth 2010)



A Keleti-Alpok és a Balaton-felvidék tipikus alpi elnyíró felületeinek korrelációja a lenyesési felületekkel (Linzer, Tari 2010)

tens, ugyanakkor idealizált takarós modelljét a Dunántúli-középhegységnek.

Értelmezésünk szerint ennek a szerkezetnek a kialakulása két fő fázisban történt a kréta közepén. Az idősebb (apti) kompresszió felelős a Fődolomitnak önmagára, a Dachsteini Mészkőre, illetve a Zalai-medencében (Szilvágy és Csesztreg környékén) a jura képződményekre történt felpikkelyeződéséért. Ezt az értelmezést támasztja alá a Keleti-Alpok Felső-Ausztroalpi-takarójának a grazi és Gurk-völgyi paleozoikumában végzett számos mikrotektonikai megfigyelés, amelyek alapján a legkorábbi eoalpi takarós áttolódások működése 120–130 millió évvel ezelőttre tehető a radiometrikus mérések alapján.

Az ÉNy–DK-i vergenciájú takarós nagyszerkezet ezt követően, az albai során jött létre, körülbelül 100 millió évvel ezelőtt (ausztriai-fázis). Ekkorra a korábbi NyÉNy–KDK irányú kompressziót ÉÉNy–DDK irányú váltotta fel. Mivel a Keleti-Alpok eoalpi takaróinak mozgásiránya lassan fordult el, ez a váltás a Bakony területén is fokozatosnak tűnik. Az albai során, a velencei antiklinálissal együtt alakult ki a Dunántúli-középhegység elsőrendű szinklinálisa. Az északnyugat–délkeleti rövidülést részben jobbos töréskénti működő oldaleltolódások sorozata vette fel. Ezek a harántszerkezetek, mint például a Telegdi Roth-vonal, a miocén során újraéledtek, ugyanúgy mint ahogy az Északi-Mészkőalpokban is. Térképi nézetben ezért is nagyon hasonló a Bakony és a Balaton-felvidék szerkezete az Északi-Mészkőalpokkal összevetve, annak ellenére, hogy a jelenkori távolság a két terület között néhány száz kilométer nagyságrendű.

Összefoglalás

Az alpi kapcsolatokat illetően a Balaton-felvidék rétegtanilag legnyilvánvalóbban a Déli-Alpokkal korrelálható. Szerkezeti szempontból azonban a Balaton-felvidéket és az egész Dunántúli-középhegységet a Keleti-Alpok takarós rendszerével lehet jobban összefüggésbe hozni.

A magyar földtani irodalom összefoglaló munkáiban a rétegtani felépítést és szerkezetfejlődést – logikus módon – nagytektonikai ciklusok szerint és szerkezeti egységenként tárgyalják. A Dunántúli-középhegységi-egység mezozoos képződményeinek sokféleségével és viszonylag egyszerű szerkezeti felépítésével tűnik ki az általános képből. Az „egyszerűség" autochton szerkezet feltételezését jelenti a „Rába-vonal" és a Balaton-vonal által határolt tektonikai egységre, beleértve a Balaton-felvidéket is. Ez a feltételezés egyfajta „közbenső tömeg relikviává" degradálja a Dunántúli-középhegységet, jóllehet az Alpokhoz és a Kárpátokhoz hasonlóan ez a földtani egység is az eoalpi orogenezis frontzónájában helyezkedett el.

Elsősorban a kisalföldi és a zalai medenceterületeken, szénhidrogén-kutatás céljából mélyített fúrások és szeizmikus szelvények értelmezése alapján nyert bizonyítást, hogy a Dunántúli-középhegység takarós szerkezetű és a Keleti-Alpok szerkezeti hierarchiájában a legfelső allochton egységet képviseli, amint azt Uhlig Viktor több mint egy évszázada elképzelte. A Kisalföld alatt szeizmikusan térképezett középhegységi takaróhatárokról az feltételezhető, hogy a Bakony alatt átnyúlva a Balaton-felvidéken régóta ismert feltolódásokkal kapcsolódnak össze.

Ajánlott irodalom

Böckh 1872: A Bakony déli részének földtani viszonyai. I. – A Magyar Királyi Földtani Intézet Évkönyve 2, 31–166.

Böckh, J. 1874: A Bakony déli részének földtani viszonyai. II. – A Magyar Királyi Földtani Intézet Évkönyve 3 (1), 1–155.

Böckh 1881: Magyarország dunántúli kerületének részletes földtani térképe E.9-es lap. M=1: 144 000. – A Magyar Királyi Földtani Intézet kiadványa

Budai T, Vörös A 2006: Middle Triassic platform and basin evolution of the Southern Bakony Mountains (Transdanubian Range, Hungary). – Rivista Italiana Paleontologica Stratigrafia 112/3, 359–371.

Budai T., Csillag G., Dudko A., Koloszár L. 1999a: A Balaton-felvidék földtani térképe, 1:50 000. – Földtani Intézet kiadványa, Budapest

Budai, T., Császár, G., Csillag, G., Dudko, A., Koloszár, L., Majoros, Gy. 1999b: A Balaton-felvidék földtana. Magyarázó a Balaton-felvidék földtani térképéhez, 1:50 000. – Földtani Intézet Alkalmi Kiadványa 197, 257 p.

Haas J, Budai T., Csontos L., Fodor L., Konrád Gy. 2010: Magyarország pre-kainozoos földtani térképe, 1:500 000. – Földtani Intézet kiadványa

Hofmann K. 1875–78: A déli Bakony bazalt-kőzetei. – A Magyar Királyi Földtani Intézet Évkönyve 3 (2), 339–525.

Laczkó D. 1911: Veszprém városának és tágabb környékének geológiai leírása. – In: Lóczy L. (szerk.): A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei, I. kötet, Geol. Függ. I., 190 p.

Linzer, H.G., Tari, G. 2012: Structural correlation between the Northern Calcareous Alps (Austria) and the Transdanubian Central Range (Hungary). – AAPG Memoir 100, 249–266.

Lóczy L. id. 1913: A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése. A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei, I./1. 617 p.

Lóczy L. id. 1920: A Balaton-tó környékének részletes geológiai térképe. M= 1: 75 000. – A Magyar Királyi Földtani Intézet kiadványa, Budapest.

Tari G., Horváth F. 2010: A Dunántúli-középhegység helyzete és eoalpi fejlődéstörténete a Keleti-Alpok takarós rendszerébe: egy másfél évtizedes tektonikai modell időszerűsége. – Földtani Közlöny 140/4, 463–505.

Uhlig, V. 1907: Über die Tektonik der Karpathen. – Kaiserlich-Königliche Hof- und Staatsdruckerei, Wien, 111 p.

Vitális I. 1911: A balatonvidéki bazaltok – In: Lóczy L. (szerk.): A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei I/I., Geológiai Függelék II.



Procampylaea lóczyi

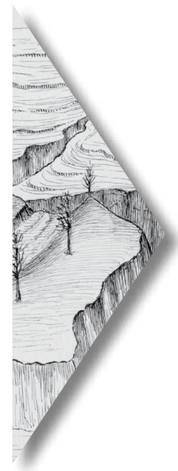
MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

Fodor László, Héja Gábor, Kövér Szilvia

A Balaton-felvidék és környezete szerkezeti felépítése

3

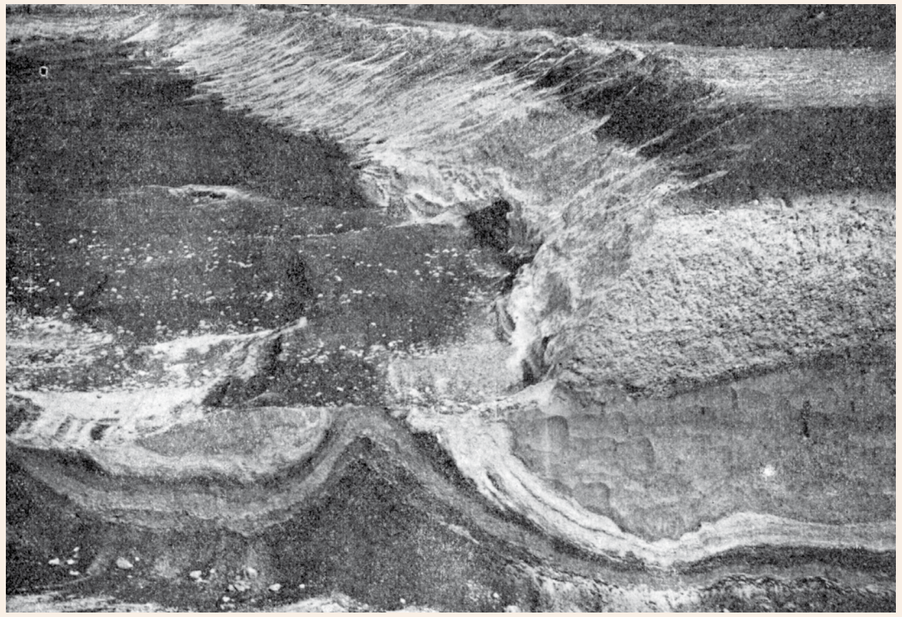
Az 1960-as évek földtudományi forradalma, a lemeztektonika alapján a Föld kérgének és kőzetburkának (litoszférájának) fejlődését alapvetően a lemezek mozgása szabályozza. Az egymáshoz képest elmozduló lemezek a lemezhatárokon a teljes litoszféra és ezen belül a kéreg deformációját váltják ki. A lemezperemi mozgásokat és a kapcsolódó kéregdeformációt ma már több módon is meg tudjuk figyelni. Legmodernebb technika talán a GPS, amely a ma végbemenő mozgásokat rögzíti mm-es pontossággal. A régmúlt lemeztektonikai mozgásait és deformációit a kőzetekbe írt szerkezete révén tudjuk rekonstruálni. A Balaton-felvidék ennek klaszszikus példája, hiszen Lóczy Lajos felismerései a múlt század elején is magas szinten álltak és némelyik ma is igaznak bizonyul. Ebben a fejezetben a Balaton-felvidék és környezetének deformációiról rendelkezésre álló ismereteket foglaljuk össze, egy rövid bevezető után.



A Balaton-tó medenczéjének helyzete és felépítése

… Az egész nyugati magyar középhegység Keszthelytől Budapestig délnyugat-északkeleti irányú, régibb hasadások színhelye. Különösen egy ilyen irányú főtörést ismegat felé lehajló rétegpaketták következnek nagyobb szélességben.

A törések mellett a rétegeknek megismétlődése is látható. A hosszanti töréseket, harántosan északnyugat-délkeleti irányúak metszik, ezeket hosszú tektónikus vonalakban a Balatontól a Bakonyon keresztül a kis



Gyűrődés a várpalotai lignittelepben

rünk, azt, amely a veszprémi Séd-pataktól Litér felé tart és egyenes vonalban a Balatonfelvidék magas párkányperemén végig, a keszthelyi hegységben Vállus falu felett a Szent Miklós-kútnál végződik. Ezzel párhuzamosan a felvidék balatoni aljában és a veszprém—nagyvázsonyi fennsíkon is elnyúlnak rövidebb-hosszabb repedések.

Valamennyin a rétegek keskeny övben össze vannak törve, élükre állítva és mindegyik törésre pikkelyesen északnyumagyar Alföldig sikerült kinyomozni; általában fiatalabb eredetűek az előbbieknél, mert amíg a hosszanti törések a mioczénkori rétegeket már nem érintették, a harántos törések mentén a mediterrán, sőt a pontusi rétegeket is helyükből kimozdulva láttam.

Földkéregmozgások azonban mind a két törési rendszer szerint a középhegységben és kerületén a legutolsó geológiai időkig történtek. …

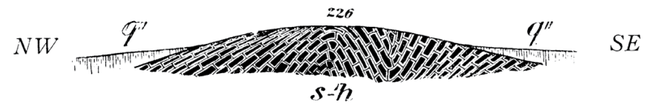
Részlet Lóczy Lajos A Balaton földrajzi és társadalmi állapotainak leírása *című könyvéből*

Kristályos mészkő Szabadbattyán és Polgárdi között.

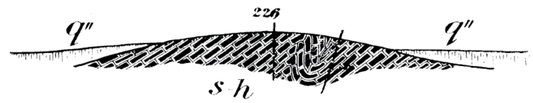
… Újabb időben (1908) a polgárdi Somlyó szőlőhegy nyugati tövében gróf Batthyányi hitbizománya mészégető és kőzúzó gyártelepet emelt és a Szőlőhegy kopár oldalán hatalmas kőfejtőt nyitott (4. és 5a. ábra). Ebben a mészkő finomszemű, úgyszólván tömött és vastag padokban hirtelen szűkülő szinklinálist alkot, amelynek tengelye NE—SW csapású. Kékesszürke sávokkal erezett, gyengén bitumenes, fehér mészkő uralkodik ebben a fejtőben. Elég vastag 30—60 cm. padjait (4. ábra) palás, szericzites vagy talkos közök választják el. Számos hasadék szeli át a kőfejtő hátfalát. A déli oldalon mangános burkolat jelzi a hasadékok mellékét, szélesen kísérve azt; közepett a szinklinális délkeleti oldalán bekérgezett breccsás törmelék és finom, kékes szinekbe játszó aragonit bekérgezés, cseppkő és szkalenoéderes kalczit tölti ki azokat. A kőfejtő északi részében pedig terra-rosszával részben kitöltött 70—80 cm. átmérőjű kürtő mélyed a mészkőbe, amely Pávay-Vajna F. úr mérése szerint 40 m. mélységű.



4. ábra. A gróf Battyányi hitbizományi gyártelep kőfejtője a polgárdi Somlyóhegy nyugati oldalán. (1909. deczember havában.)



5a. ábra. A polgárdi Somlyó szőlőhegy metszete.



5b. ábra. A polgárdi mészkőbányában látható rétegesség. 1 : 12500.
s—h ó-paleozoi mészkő, *q''* lösz.

A kőfejtő szállító siklója mellett mélyebb szintben megnyitott fejtőben ugyanannyira mangánosak a 30°-kal NW felé hajló rétegek, mint a Somlyó északkeleti oldalán.

Részlet Lóczy Lajos A Balaton környékének geologiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése *című könyvéből*

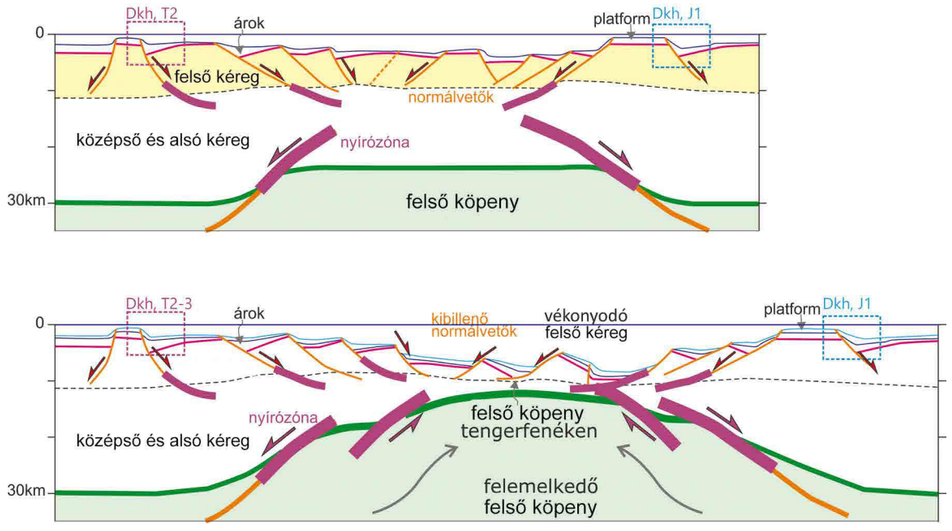
A polgárdi Somlyóhegy

A lemezek mozgását olyan ciklusokban tudjuk elképzelni, amelyek százmillió éves nagyságrendben zajlottak le, többször a Föld életében. Ezek kezdeti szakasza egy egykor egységes lemez szétválása, amelyet riftesedésnek nevezünk. A riftesedés során a kéreg egy adott szélességben megnyúlik, hossza többszörösére változik. A megnyúlás következtében a felszín előbb-utóbb lesüllyed és tenger önti el. Ez a folyamat olyan töréses szerkezetek révén megy végbe, amelyet normálvetőknek vagy normál nyírózónáknak nevezünk. Előbbiek olyan felületek, amelyek 60–70°-ban dőlnek és síkjuk mentén elmozdulás történik: az egyik blokk a másikhoz képest lefelé csúszik. A nyírózónák szélesebbek, kissé laposabbak is lehetnek, és a zóna egésze veszi fel az elmozdulást. A normálvetők mentén határolt blokkok fokozatosan kibillennek. A felső kéreg-rész normálvetői alatt a litoszféra mélyebb részei a nyírózónák mentén vékonyodnak.

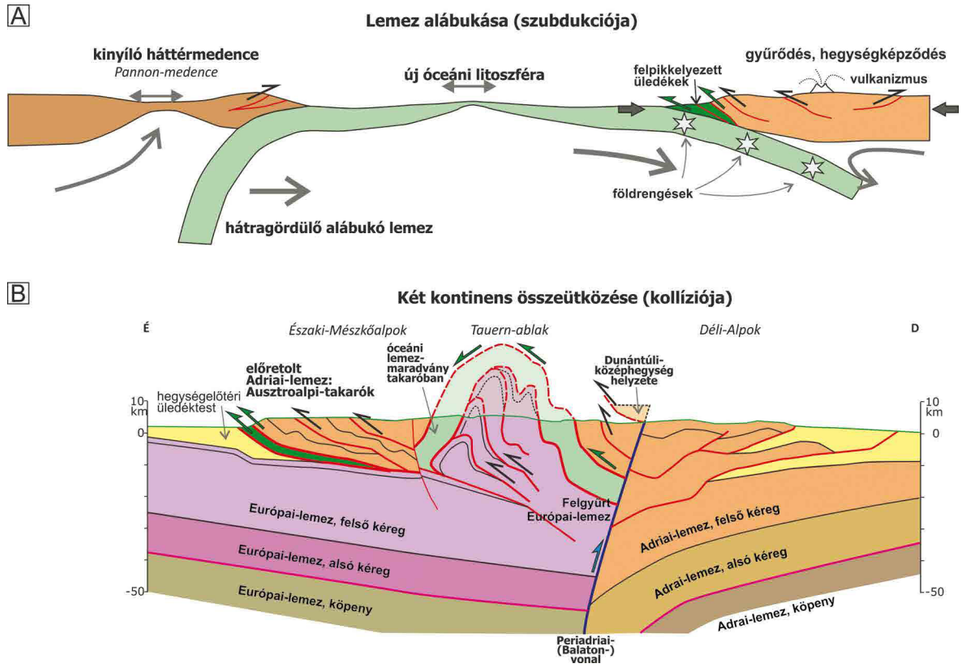
A riftesedés következménye lehet, hogy a kontinentális kéreg annyira elvékonyodik, hogy új óceáni kéreg jön létre a mélyből feláramló köpenyanyag segítségével. A létrejött óceán folyamatosan tágul, két pereme távolodik, amint az ma az Atlanti-óceán esetében történik.

Az óceán szétterjedésében akkor áll be változás, amikor az óceán peremén vagy esetleg éppen az óceáni lemezrészen belül megindul egy alábukási folyamat, azaz valamelyik lemez a másik alá tolódik (szubdukálódik). A gravitációt is figyelembe véve ez majdnem mindig a nehezebb óceáni litoszféra, két óceán esetében pedig az öregebb, amelyik sűrűbb és nehezebb. Az alábukásnak több fajtája is van, attól függően, hogy milyen idős az alábukó lemez, milyenek az érintkező lemezek mozgássebességei.

Az alábukás következménye többféle lehet. Az alábukási zónák mentén pattannak ki a földrengések, felettük aktív vulkánok kezdhetik meg működésüket. Az alábukási zónában a mélytengeri üledékek egymásra torlódhatnak. Egy másik fontos következmény, hogy az alábukás feletti lemez nagyon erősen meggyűrődik, illetve ezen felső lemezt alkotó kőzetek egymásra tolódnak: úgynevezett takarók jönnek létre. Ez a deformáció a rátolódó lemezen viszonylag jelentős területet érint és számos esetben magas platók



Egy lemezhatár születése, azaz a kéreg és a litoszféra vékonyodása, új óceáni kéreg létrejötte – egyszerűsített modell



Két kőzetlemez közeledésekor bekövetkező alábukás (szubdukció), és a lemezhatáron létrejövő rövidüléses szerkezetek (takarók, rátolódások, redők)

kialakulását is eredményezheti (például Andok). Ezek a területek úgynevezett rövidüléses deformációt szenvednek. Ez akkor a legjelentősebb, ha az alábukó óceáni lemez teljesen eltűnik, és az egykor két oldalon levő két kontinens összeütközik – ez történt például az Alpok esetében is.

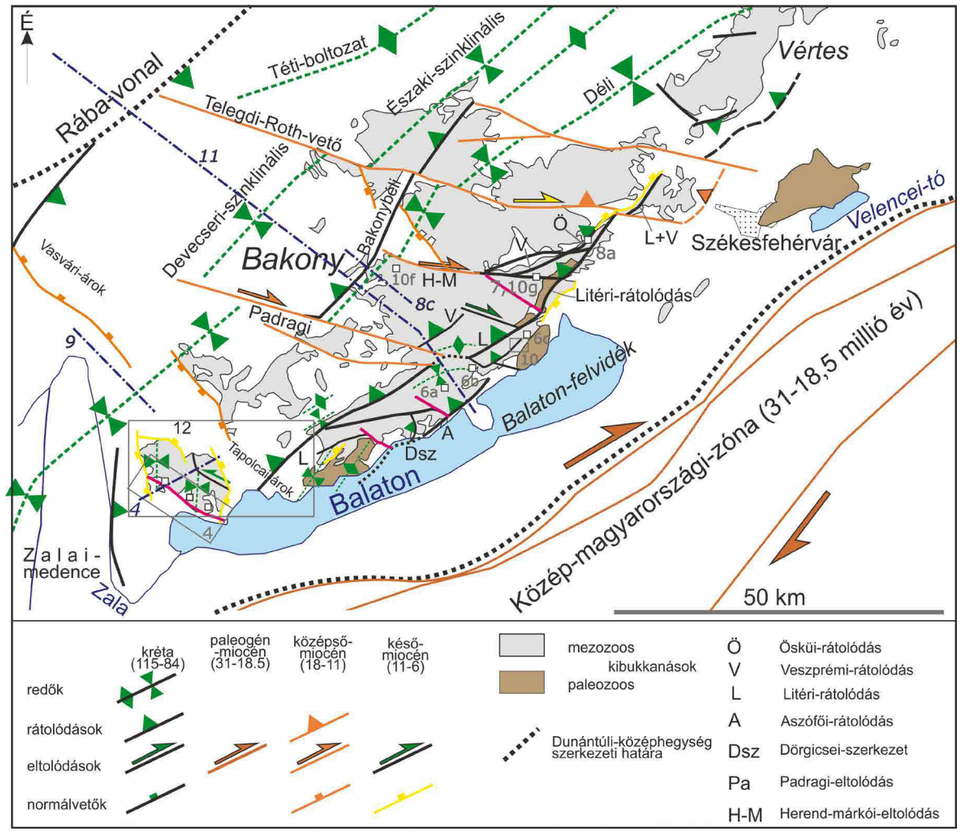
Az egymásra tolódás, rövidülés következménye kéregvastagodás lesz. Mivel a rátorlódott, megvastagodott kéreg könnyű és mintegy úszik a mélybeli köpeny egy részén (asztenoszférán), ezért kiemelkedik. Így születnek a gyűrt-takarós hegységek, idegen szóval orogének (más nevükön lánchegységek). Az Alpok ilyen szerkezetű, de látni fogjuk, hogy a Dunántúli-középhegység és a Balaton-felvidék is igen hasonló.

A Balaton-felvidék és a környező területek deformációi

A fent tárgyalt riftesedési és rövidüléses deformációs folyamatok nyomait felismerhetjük a Balaton-felvidék és a Dunántúli-középhegység egy részének rétegsoraiban és deformációs szerkezeteiben is. A fő deformációs eseményeket időrendben tekintjük át és a szerkezetek vázlatos térképi képét a 78. oldal térképén követhetjük nyomon.

A mezozoikum során két óceán kinyílásának távoli tükröződése is nyomot hagyott a Balaton-felvidék területén. Az egyik a triász közepén kinyíló Neotethys-óceán, a másik a jura közepén óceánná növekedő Piemont–Liguriai-óceán. Különösen az utóbbi esetében jellemző, hogy az óceán kialakulását hosszan tartó kéregmegnyúlásos deformációk előzték meg: normálvetők alakultak ki és a süllyedő árkokban vastag üledéksorok halmozódtak fel.

A Balaton-felvidéken főleg a triász közepén kialakult árokszerkezetek azonosíthatók. A kitöltő mélyebb tengeri üledéksort a felsőörsi híres alapszelvényben és Aszófő táján

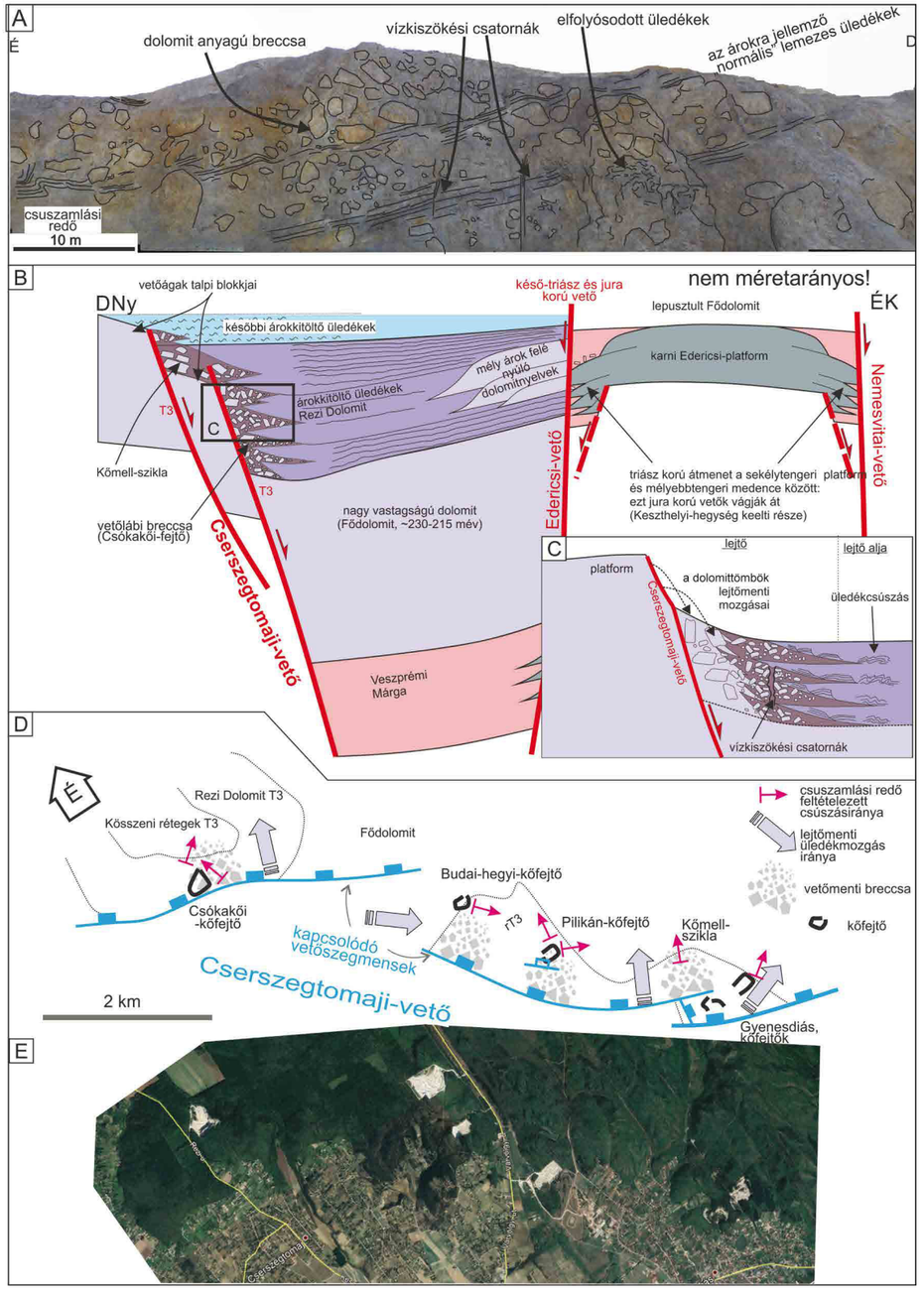


A Balaton-felvidék és a Dunántúli-középhegység szerkezeteinek vázlata

láthatjuk. A normálvetők talpi blokkjában a tengeraljzat kiemelt maradt, és ott sekélytengeri meszes kőzetek jöttek létre az úgynevezett platformokon, mint például a Tagyon melletti Hangyás-tető (részleteket lásd a 2. fejezetben). Ennek az időszaknak az érdekessége, hogy az árkok kialakulásához vulkanizmus is társult: a vulkánokból származó finomszemcsés törmelék (részben vulkáni hamu) adja az agyagnak is nézhető kőzetek jellegzetes zöld színét.

A triász végén, mintegy 215–205 millió évvel ezelőtt megjelenő újabb árkok kialakulását már a Piemont–Liguriai-óceán kialakulásához kapcsolhatjuk. Ilyen árkok leginkább a Keszthelyi-hegységen keresztül húzódhattak és a hegység déli részén, a Balatonhoz közel nyomozhatjuk ezeket. A peremvetők mentén különleges kőzetek, nagy blokkokból álló, úgynevezett breccsák jöttek létre. E vető menti breccsák szép példáit a Gyenesdiás melletti Kőmell és a Rezi melletti Csókakő-bányában láthatjuk. A vető talpi blokkjából letöredezett kőzetblokkok az árokban rakódtak le, közöttük az árok „normális”, vékonyan rétegzett üledéke jelenik meg. Mivel a vetőhöz közel relatíve meredek a tengerfenék, így a lerakódott tömbök és a közöttük levő anyag is megcsúszhatott, és úgynevezett üledékcsúszási redőket formált. A lejtőn többszörösen megmozduló üledék víztartalma pedig a csúszás végén, vízkiszökési csatornák mentén távozott.

A vető menti breccsatestek az árok mélyebb részei felé gyorsan elfogynak, szakszóval kiékelődnek: a vetőtől távolodva ezeket nem is találjuk meg. Ezt szemlélteti a bemutatott egyszerűsített ábra az árkon keresztül. Az egymást követő breccsanyelvek a vetőműködés



215–205 millió éves árok pereme a Keszthelyi-hegység déli részén.
A) vető menti breccsatestek a Csókakői-kőfejtőben.
B) A vetőműködéssel kialakuló árok elvi szelvénye.
C) A vető környezetének üledékei.
D) A triász vetőzóna térképi nézete, a breccsatestek és csuszamlási redők előfordulásával.
E) A kőfejtők elhelyezkedése a Google Earth képen

fázisait szemléltetik: feltehető, hogy a vető növekedése sok-sok földrengésen keresztül valósult meg, és éppen a rengések indították el lefelé a leszakadt dolomitblokkokat.

Ahogy a természetben ez gyakori, az árok északkeleti oldalát határoló vető talán nem volt olyan aktív, így ott nem látunk breccsát a vető mentén, hanem az ottani peremről indulva sekélytengeri dolomitnyelvek nyúltak be az árok mélyebb része felé. Tovább északkelet felé elérjük a Keszthelyi-hegység keleti részének hegyeit, amelyek sekélytengeri karbonátból állnak, és amely terület az árokképződés idején az északkeleti kiemelt perem lehetett.

Térképen jól láthatjuk, hogy a triász árok peremvetője hogyan követhető a mai dombok mentén. Több helyen látunk vető menti breccsacsatesteket és csuszamlási redőket. A fő Cserszegtomaji-vető szegmensekből, szakaszokból áll össze, épp olyan módon, ahogy a mai árkok, például a Kelet-afrikai-árokrendszer esetében is látjuk. A szegmensek kapcsolódása környékén az üledékcsúszás iránya is eltérő a fő szakaszokhoz képest, akár a vetővel párhuzamos is lehet.

A kicsit később, a jura elején, 195–180 millió évvel ezelőtt kialakult árkok inkább a Bakonyban és a Gerecsében érhetők tetten.

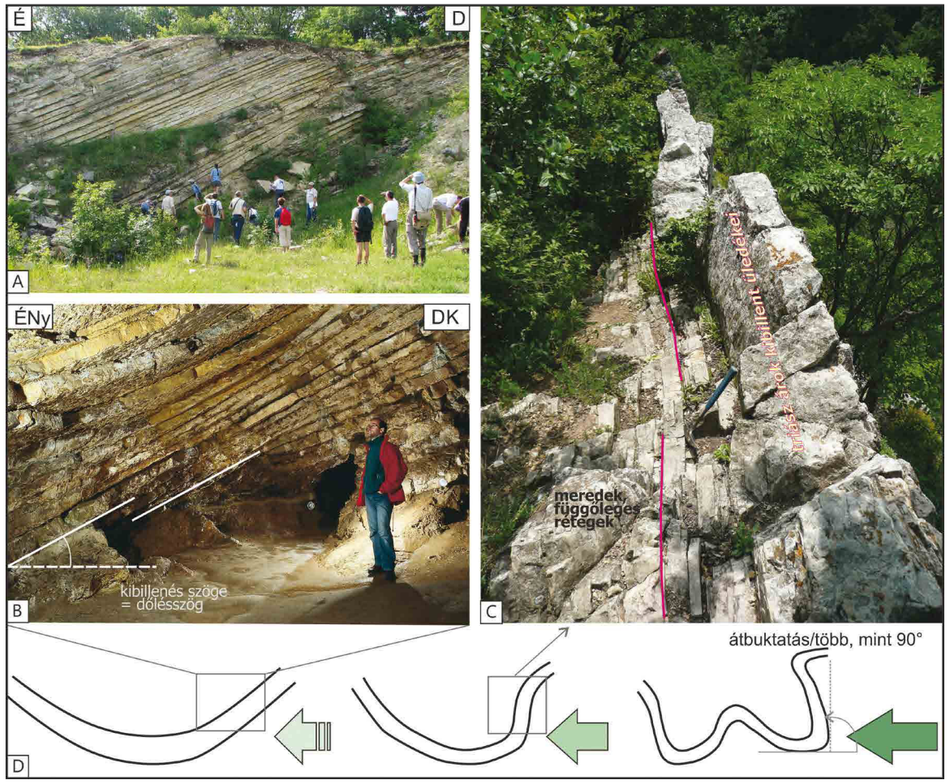
Kréta rövidülés: gyűrődések, áttolódások

A hosszú ideig távolodó kontinensek a jura közepén változtatták meg relatív mozgásukat: elindult az óceáni lemez alábukása. Először, mintegy 180 millió éve a Neotethys, később, talán 100 millió évvel ezelőtt a Piemont–Liguriai-óceán lemeze is megkezdte alábukását.

A rövidülésnek a Dunántúli-középhegység és a Balaton-felvidék szerkezetalakulása szempontjából döntő jelentősége volt. A teljes rétegsor meggyűrődött, nagy hullámhosszú redőteknők (szinklinálisok) és boltozatok (antiklinálisok) jöttek létre. Ennek a Balaton-felvidék területén az a következménye, hogy a rétegek majdnem mindenhol északnyugat felé dőlnek. A Balaton-felvidék tulajdonképpen az egyik redőteknő délkeleti szárnya. Ilyen 20–40° dőlésű rétegeket például a Lóczy-barlangban, a pécselyi Meggy-hegy kőfejtőjében, és számos más kőfejtőben is láthatunk. A további rövidülés, gyűrődés következő lépése, amikor a rétegek egyes helyeken akár függőlegesekké válnak, mint például a felsőörsi Szent-Kereszt-hegyen, de ez a Balaton-felvidéken csak ritkán történt meg. Azt pedig, hogy a rétegek még a függőleges helyzeten is továbbforduljanak, még ritkábban láthatjuk, de Litér mellett, egy nagyobb szerkezeti elem részeként előfordul ilyen nagymértékű rövidülésre utaló redőalak is.

A feltárásnál nagyobb, közepesen nagy redőket a Balaton-felvidék morfológiai adottságai miatt egyetlen pillantással nem fedezhetjük fel. Ezek csak a földtani térképeken, vagy a szerkezeti vázlatokon, keresztszelvényeken tükröződnek. A redők tengelyének iránya jellemzően ÉK–DNy-i. A 78. oldal térképe is jelez néhányat, melyek hullámhossza 1–5 km körüli, amplitudója 50–500 m közeli. E redők egy részét már Lóczy és fia is felismerte, de számuk a kutatás révén folytonosan nő.

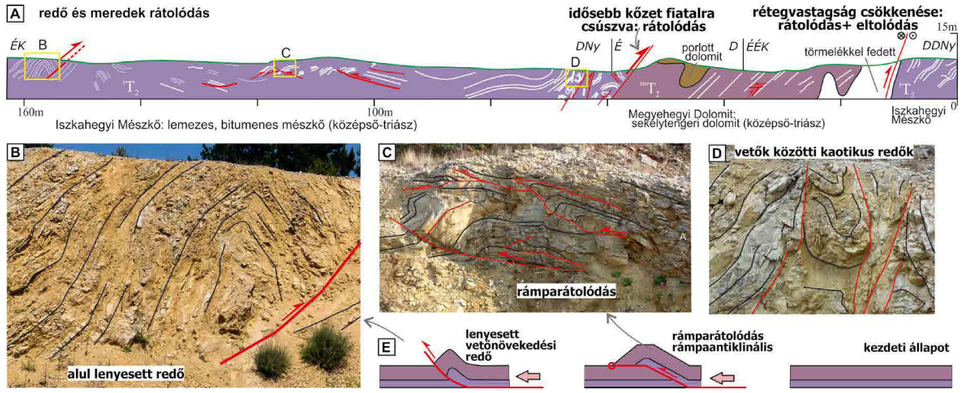
A nagy hullámhosszú redők mellett kisebbek is fellépnek. Talán a legszebbeket a Litéri-murvabányában tanulmányozhatjuk. A redőalak itt változatos, vannak szögletes fordulású, vagy kerekítettebb csuklójú redők. Ilyen kis méret mellett igen valószínű, hogy a redők a rétegek egymáson való elcsúszásával jöttek létre, mint amikor egy kártyapakli egyik végét lehajlítjuk. Mivel a rétegek vékonyak és változatos kőzetekből állnak, ezért a



Kibillentett rétegek a Balaton-felvidéken. A) Pécsely, Meggy-hegy (fotó: Kercsmár Zsolt), B) Lóczy-barlang (fotó: Egri Csaba), C) Függőleges állású rétegek a felsőörsi Szent-kereszt-hegyen (fotó: Budai Tamás). D) A kibillenés a nagy hullámhosszú redőződés következménye; a változó redőalak az egyre nagyobb mértékű rövidülés következménye

redőalak is igen eltérő lehet. Ez attól is függ, hol szakadnak el egymástól a rétegek, milyen kis rátolódások kapcsolódnak hozzájuk. A 82. oldal ábráján két fajtájukat mutatjuk be: a rátolódás két réteg menti lenyesési szakaszt köt össze, illetve amikor a rátolódás mértéke a felszín felé növekszik. Előbbi esetben a rátolódás feletti redő viszonylag lapos, míg a második esetben jobban összecsukott, meredek szárnyú, sőt átbuktatott is lehet. A redők és rátolódások a Litéri-bányában egy nagyobb szerkezethez kapcsolódnak, ami egy nagyobb rátolódás és eltolódás kombinációja: ennek következtében idősebb képződmény került fiatalabb fölé, de mindegyik vastagsága eltér a normálistól.

A redők valójában rátolódásokhoz vagy réteg menti lenyeséshez kapcsolódnak. A rátolódások gyakran közvetlen a redők mellett láthatók, mint a 82. oldal ábrájának B és C részén, de más esetben a mélyben húzódnak meg és csak helyenként jönnek a felszínre, lapos dőlésű felületként. A rátolódások közül az egyik legfontosabb a Balaton-felvidék teljes hosszában nyomozható Litéri-rátolódás. Felismerése már a XIX. században megtörtént, de Lóczy nevéhez fűződik első szisztematikus vizsgálata. Leírásából tudjuk, hogy sikerült e fontos szerkezeti elemet teljes hosszában követni, az északkeleti végétől, Öskü környékétől Litéren keresztül egészen a Tapolcai-medencéig. A XX. század közepén és végén zajló kutatások tisztázták a rátolódás egyes szegmenseinek jellemzőit, bár a geometria és képződés egyes részleteit még ma is elemezzük.



Redők a Litéri-murvabányában. A) teljes szelvény az Iszkahegyi Mészkő rátolódásos ismétlődésével, B–D) változó geometriájú redők és rátolódások, E) rátolódások és a felettük levő redők két lehetséges válfaja

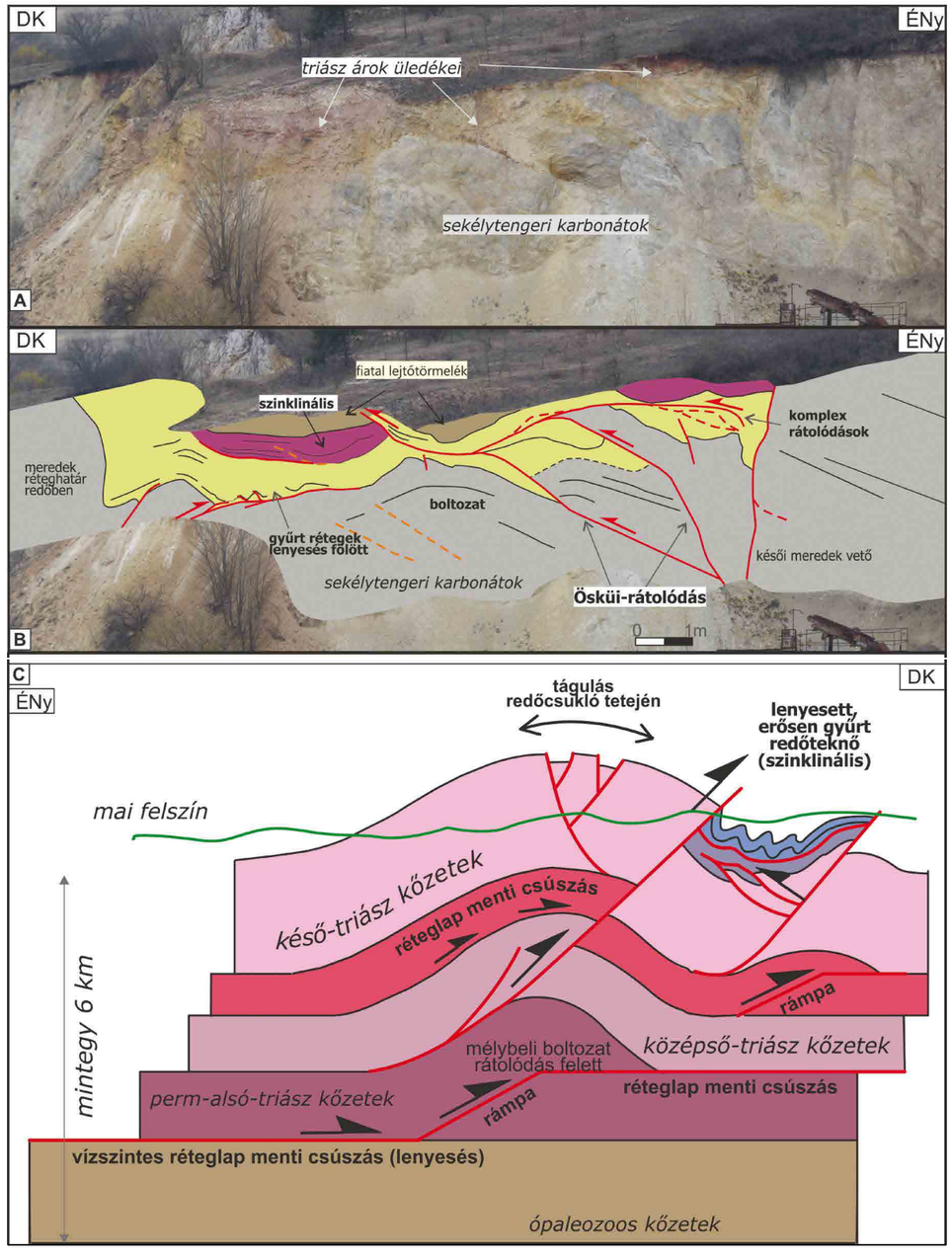
A Litéri-rátolódás menti mozgás következtében az egykor több km mélyen lévő paleozoikumi kőzetek is a felszínre kerültek és a triász végi kőzetekre tolódtak. Ha a vízszintes rövidülést nézzük, mintegy 3–4 km-es mértéket feltételezhetünk. Ez ugyan nem vetekszik az Alpokban található, nagy áttolódásokkal, de már jelentős elmozdulásnak számít.

Ha dél felé lépünk a Litéri-rátolódástól, akkor a Balaton partja mentén az Aszófői-rátolódásra bukkanhatunk, bár ez nehezen követhető a felszínen. A két rátolódás között összetett szerkezeti együttes lép fel, ahol a rétegek csapása a megszokott ÉK–DNy-i irányhoz képest mintegy 90°-kal elfordul. Ez a Dörgicsei-szerkezet, amelyen belül Dörgicse és Pécsely között több kisebb pikkelyben ismétlődik a középső-triász rétegsor. Talán hasonló eredetű lehet az a kisebb redő, amit a balatonfüredi Száka-hegyen is láthatunk. E szerkezeteknek a többitől eltérő iránya egyelőre még fejtörésre ad okot, bár ötletben nincs hiány.

A Keszthelyi-hegység érdekessége, hogy itt a redők iránya megváltozik, és észak–déli csapást vesz fel (lásd 78. oldal térkép). A Pilikáni-bányában, valamint a Gyenesdiási-kőfejtőben jól kirajzolódik egy boltozat, amely a kréta rövidülés során jött létre.

A Litéri-rátolódástól északnyugat felé haladva a következő nagyobb rátolódás a Veszprémi-rátolódás, amely a 8-as út közelében halad. Az út szélesítésekor rövid szakaszai feltárultak, de ma már nem láthatók. E fontos rátolódás egyik kisebb kísérő szerkezete, az Öskü-rátolódás már jobban látható az Öskü és Várpalota közötti úgynevezett Kikeri-bányában, a 8-as úttól közvetlen délre. A kissé idősebb dolomit jól látható ékekben a fiatalabb (középső-triász) sárga, vörös, lila mészkőre, márgára, vulkáni tufás agyagra tolódott. A rátolódás ágai mentén és azok előterében redőket is megfigyelhetünk, melyek a triász közepén kialakult árok üledékeit gyűrték meg. Ezek vékonyréteges mészkövek és vékony agyagfilmek váltakozásából állnak, így könnyen meggyűrhetők voltak.

Ettől még északabbra húzódik a Bakonybéli-rátolódás (amelyet Tari Gábor kollégánk ismert fel). Ez, hasonlóan az eddigi szerkezetekhez, délkeleti irányba tolta fel az idősebb kőzetcsomagot a fiatalabb tetejére (lásd 78. oldal térképe). A Bakony közepén végzett térképezési munkák alapján felállíthatunk egy modellt, ami a rátolódás környezetének szerkezeteit jellemzi. Ezek szerint a rátolódás délkeleti előterében erős gyűrődést tapasztalunk: a kapcsolódó redők egy nagy redőteknőt (szinklinálist) formálnak. Ezen redők meredek, függőleges szárnyát a Kislődtől induló Csolános-völgyben találhatjuk meg a felszínen. A gyűrt jura képződmények a rátolódási sík alá dőlnek. A mélység felé haladva eltérést tapasztalunk a redők alakjában: mivel vastagpados karbonátokban nem könnyen alakulnak ki összeszorított redők, itt másképp valósul meg a rövidülés. Enyhébb redőket sejthetünk, amelyek

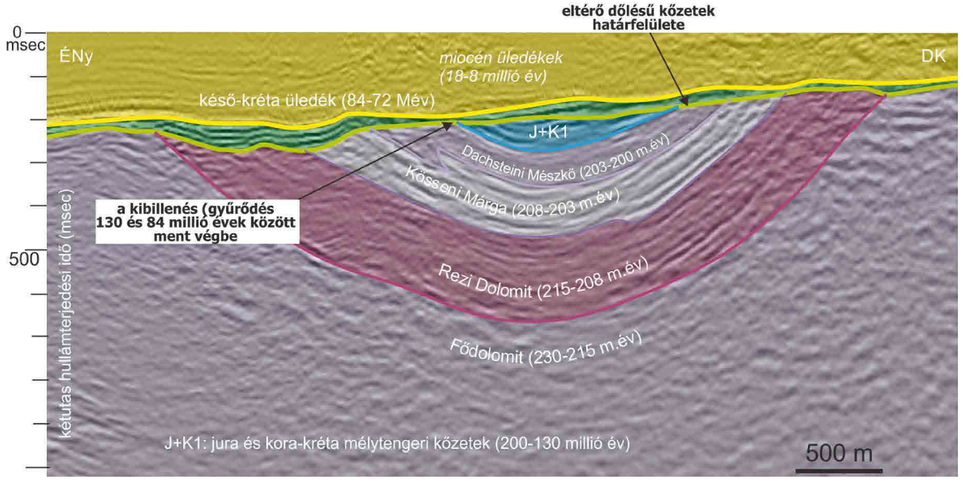


Rátolódások és redők a Balaton-felvidéken és a Dunántúli-középhegységben. A, B) Az Öskü-rátolódás értelmezés nélküli és értelmezett képe. C) Elvi keresztszelvény a Bakonybéli-rátolódáson keresztül.

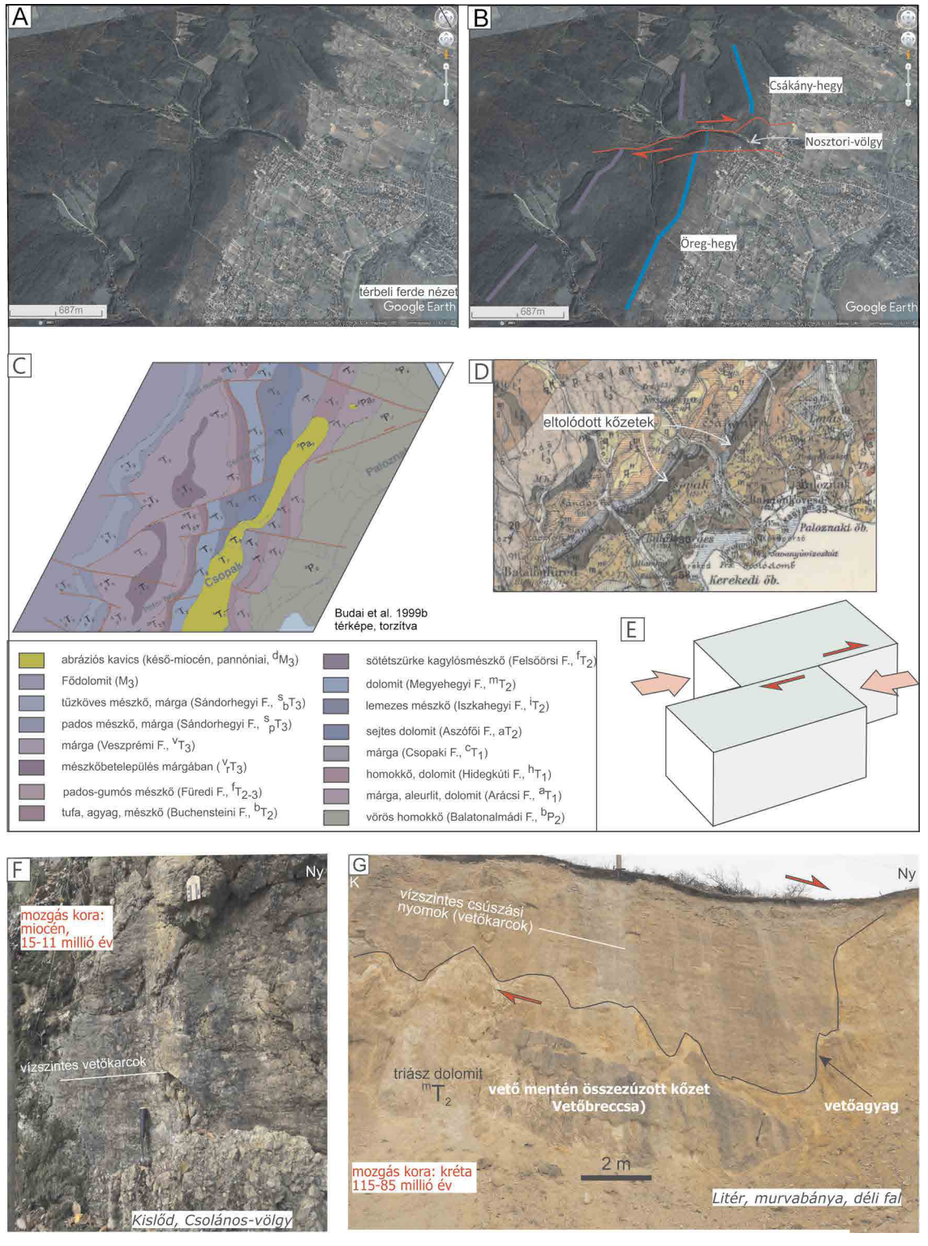
rátolódásokhoz kapcsolódnak. A rátolódások először réteg menti csúszással kezdődnek, majd egy helyen ferdén metszik a rétegeket: ezek azok a rámpák, ahol az igazi rátolódás, a rétegsorok megduplázódása végbemegy. A rámpák felett mindig boltozatok jönnek létre. Ez egykor a felszínen is megvolt, de a későbbi lepusztulás mára eltüntette a jól látható nyomokat. A rámpák és réteg menti csúszások több szintben is jelentkeznek, és a rátolódásoknak akkor is van kihatása a felszíni szerkezetekre, morfológiára, ha a rátolódások maguk nem értek ki az egykori felszínre. E modell azt mutatja, hogy a mélybeli és a felszínközeli szerkezetek bonyolult összekapcsolódásával állt elő a Dunántúli-középhegység és a Balaton-felvidék mai összetett szerkezete.

A Keszthelyi-hegységben és a Zalai-medence fiatal üledékei alatt a gyűrődések kiválóan nyomozhatók, a szénhidrogén-kutatási célból készült szeizmikus reflexiós adattömbökkel. A kép mesterséges rengéshullámok (robbantások) visszaverődése útján keletkezik, ezért a mélységskála nem kilométer, hanem a hullámnak a kétszeres út megtételéhez szükséges időt mutatja milliszekundumban. A skála lefelé nem lineáris. A szeizmikus szelvények egyik előnye, hogy jól látjuk, melyik rétegek gyűrődtek meg és melyek nem: így meg tudjuk határozni a gyűrődések korát. Bár ezen a területen ez csak tág határok között adható meg, de ha figyelembe vesszük a Dunántúli-középhegység egészét, akkor a fő gyűrődés mintegy 115 és 90 millió évvel ezelőtt mehetett végbe, amiből az első 5 millió év tektonikája különösen intenzív volt.

Egy másik olyan szerkezeti, geometriai érdekesség, amit a Balaton-felvidéken Lóczy és későbbi kutatók már rég felismertek: olyan vetők, amelyek vízszintesen eltolják a rétegeket, a redők tengelyét vagy akár a rátolódásokat. A vetők elmozdulása a felszínnel párhuzamos, ezért ezeket eltolódásoknak is nevezzük. Egyik szép példája a Csopak melletti Nosztori-völgy két oldalának, a délebbi Öreg-hegy–Kopasz-domb és az északi Csákány-hegy egymáshoz képest történt elmozdulása. A 85. oldal C ábrán jól látszik, hogy a hegygerinc nem folytatódik tovább egyenesen, hanem mintegy elugrik: ez pontosan az eltolódás hatása. A részletes térképezés megállapította, hogy az északnyugatra kibillent triász rétegek északi blokkja mintegy 500 m-rel



Jellegzetes szeizmikus reflexiós szelvény, amely a Dunántúli-középhegység gyűrt szerkezetét, és annak korát mutatja



Eltolódás a csopaki Nosztori-völgy környezetében. A) és B) Eredeti és értelmezett Google Earth kép. C) A Balaton-felvidék földtani térképe. D) Lóczy eredeti térképe. E) Tömbábra a jobbos eltolódásról. F) és G) egyéb eltolódások a Dunántúli-középhegységben (fotók: Csillag Gábor)

keletre tolódott el a déli blokkhoz képest, holott egykor folytonosak voltak a rétegek.

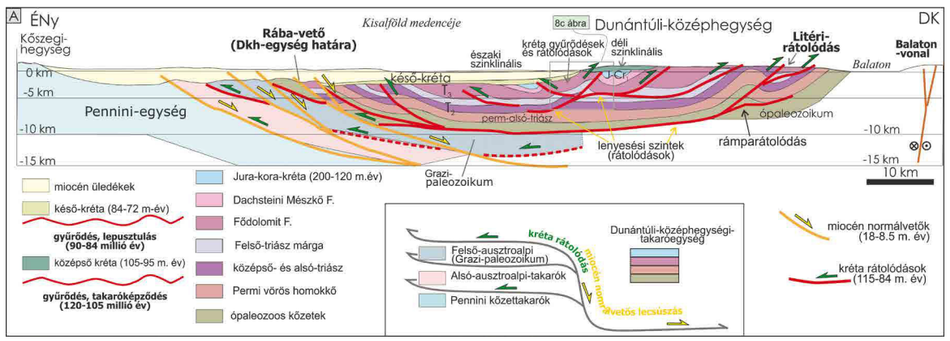
Az eltolódások felismerése tulajdonképpen Lóczyhoz köthető. Sajnos azonban a monográfia ezen felismerése nem került bele a nemzetközi szakmai köztudatba, így amerikai kutatók az 1970-es években mintegy „újra felfedezték" az eltolódásokat. Az is tény persze, hogy a földrengések és eltolódások viszonyát a ma is aktív Szent András-vető mentén sokkal

jobban látni, mint a már „befagyottnak”, inaktívnak tűnő Balaton-felvidékiek esetében.

A Dunántúli-középhegység belsejében néhány kilométeres áttolódásokat tudunk kimutatni. Több olyan földtani metszet, szelvény készült, amely a mélység felé mutatja a szerkezetet és a kőzetek elhelyezkedését. Jól látjuk a felszín közelében levő fő redőket és a rátolódásokat. Izgalmas kérdés, mi van a mélyben, azaz hogy hogyan függnek össze a szerkezetek a mélység felé és főleg hogyan viszonyul a Dunántúli-középhegység más alpi szerkezeti (tektonikai) egységekhez (lásd a 2. fejezetben). Ennek megítélése sokáig vitatéma volt a kutatók között, hiszen a szerkezeti határokat fiatal üledékek fedik. Szerencsére, a mai modern módszereknek köszönhetően a mélyből is vannak szerkezeti információk. Így például egyes geofizikai adatok arra utalnak, hogy a Dunántúli-középhegység alatt olyan zóna van, amely mentén jelentős elmozdulás ment végbe. Más adatok közvetve vagy közvetlenül igazolják a gyűrt-rátolódásos szerkezetet: így szeizmikus szelvények segítségével követni tudjuk a Kőszegi-hegységben feltárt kőzeteket a mélység felé, azaz a Dunántúli-középhegység alá. Aztán Szlovénia (Muraszombat) felé tekintve látjuk, mely takarós egységek vannak a Dunántúli-középhegység alatt. Ezen információk bevetítéséből áll elő a kép, amely azt mutatja, hogy a Dunántúli-középhegység alatt több alpi takaróegység folytatódik: ezeket összefoglalóan Ausztroalpi és Pennini-takaróegységeknek nevezzük. Közülük a legközelebb a Graz környékén ismert, ópaleozoos kőzetekből álló, Grazi-paleozoikum gyanítható a Dunántúli-középhegység alatt is.

Mindezek alapján ma a legtöbb kutató úgy látja, hogy a Dunántúli-középhegység egy nagy áttolódással került más kőzettömegek fölé. Ennek mértéke meghaladta a 10 km-t, inkább 50–100 km körül lehetett, így a Dunántúli-középhegység takarónak tekinthető. A többi alpi takaróhoz viszonyítva a Dunántúli-középhegység a legfelsőbb takaró az alpi orogénben, ezért – az alpi hasonló szerkezetekkel ellentétben – nem szenvedett nagy hőmérsékletű átalakulást (metamorfózist) és ezért nincs felette további kőzettömeg. A rátolódás kora kissé bizonytalan, de nagy valószínűséggel megegyezik a Balaton-felvidék gyűrődéseinek korával, azaz 120–90 millió évvel ezelőtt történhetett.

Ha ez a modell igaz, ez azt jelenti, hogy a Dunántúli-középhegység az alpi hegységrendszer teljesen integráns része volt. Ugyanúgy gyűrt-takarós felépítésű, mint az alpi társai, folytatásai. Felvethető ezért, hogy nem rögheggység, mivel alapvetően gyűrt és csak fejlődésének legvégén tört össze. A mai morfológiai különbségek a kréta utáni, főleg az utóbbi 20 millió év eltérő eseményeinek a következményei: ezek a folyamatok egyrészt a Pannon-medence kialakulásával kapcsolatosak, másrészt a jégkorszaknak az Alpokban, illetve hazánkban eltérő megjelenéséből erednek.



A Dunántúli-középhegység ÉNy–DK-i irányú metszete, amely mutatja a mélybeli kéreg-rész szerkezetét

Késő-paleogén–kora-miocén eltolódás a Balaton-felvidéktől délre

A Dunántúli-középhegységet – és ezen belül a Balaton-felvidéket – délkeletről egy nagyon jelentős törészóna határolja. Ezt együttesen Közép-magyarországi-zónának hívjuk, ennek északi eltolódásos vetőjét pedig Balaton-vonalnak nevezzük, mely a Balatontól kissé délre követhető. Az eltolódási zóna legnagyobb elmozdulása nagyjából 31 és 18,5 millió év közé tehető. Ennek mértékéről még folynak a becslések, de 100 km-es nagyságrendben van (150–350 km). Legfontosabb eredménye az volt, hogy a zónától északra levő kőzettömegek (benne a Balaton-felvidék is) jelentősen keletre mozdult az alpi kőzettestekhez képest. Mivel a Balaton-felvidéken ezen mozgás nyomai kevéssé követhetők, részletes ismertetésétől eltekintünk.

Miocén riftesedés és eltolódások

A miocén folyamán a triászhoz hasonló riftesedési deformáció játszódott le a Balaton-felvidék környezetében. A deformációnak több szakasza volt, és a vetők is többször felújultak. Megkülönböztethetünk 18–15, 15–11,5, és 11,5–8,5 millió évek közötti deformációs szakaszokat. 8,5 és 6 millió év között nem tapasztalunk érdemi vetőmozgást, de a kéreg egységesen süllyedt a lerakódó üledék terhelő hatására, ami ráadásul még a kéreg kihűlésével is kombinálódott.

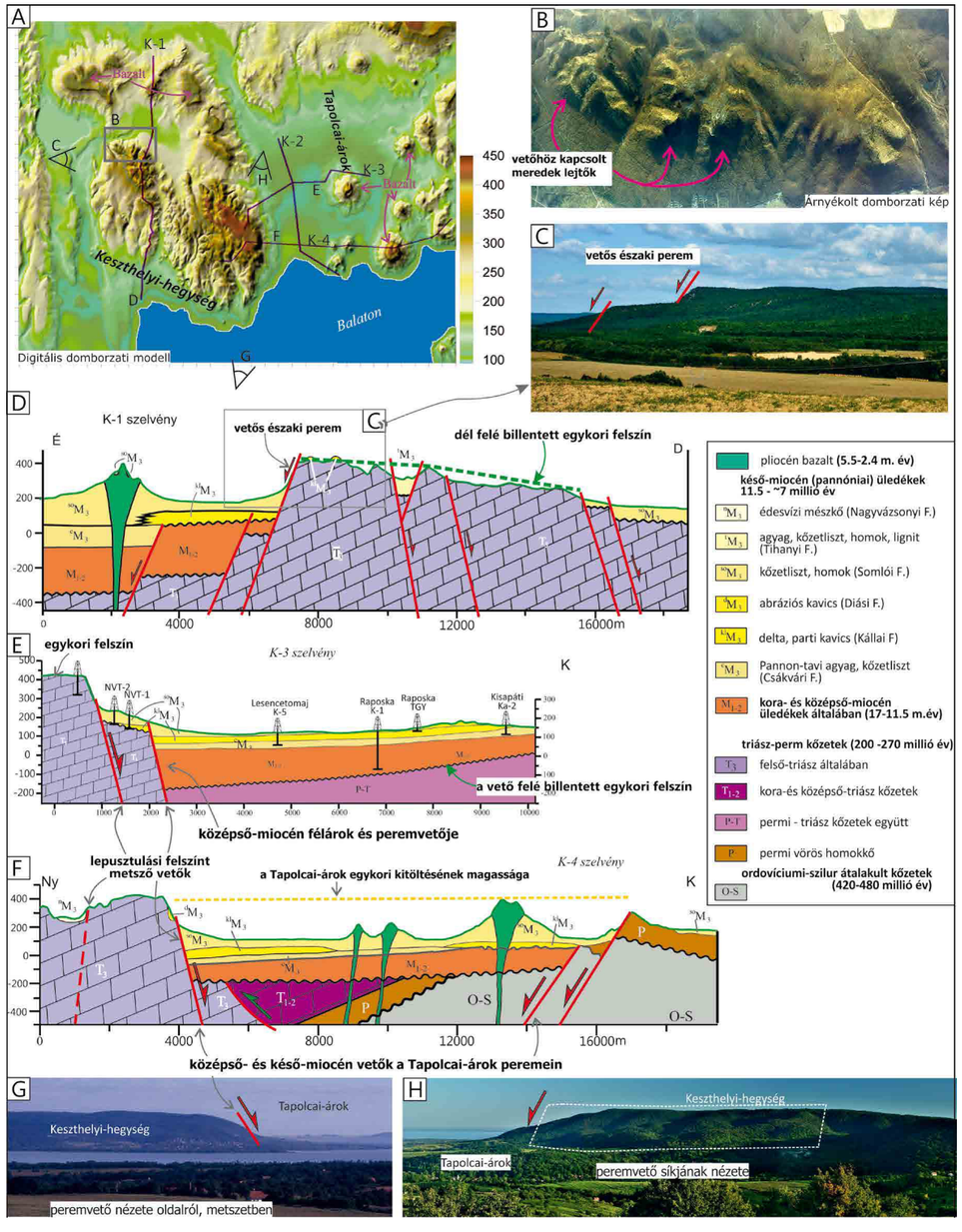
A hasonlóságok mellett az egyik különbség, hogy a miocén normálvetők jobban láthatók a mai morfológiában, mint a triász vetők, mivel a későbbi folyamatok inkább kiemelték, mint eltüntették azokat. Így a riftesedéshez köthető vetők szépen fejlett formáját láthatjuk a Keszthelyi-hegység minden peremén. A fennmaradt blokkban ugyanis a kemény karbonátok vannak, míg a lesüllyedt blokkban a puha árokkitöltő üledékek fordulnak elő. Ez utóbbiakat a fiatal lepusztulási folyamatok mintegy szelektíve elszállították, így kitakarva a vetők zónáit.

A normálvetők árkokat határolnak. A morfológiában is jól felismerhető a Tapocai-árok, hiszen puhább üledékek töltötték ki, amelyek az utolsó 2–4 millió évben könnyebben lepusztultak, mint a kemény triász karbonátkőzetek. A földtani szelvényeken jól láthatjuk az árok helyenként közel szimmetrikus, helyenként aszimmetrikus belső szerkezetét. Az árok üledékeit áttörő bazaltvulkánok mintegy megőrizték az akkori felszín helyzetét.

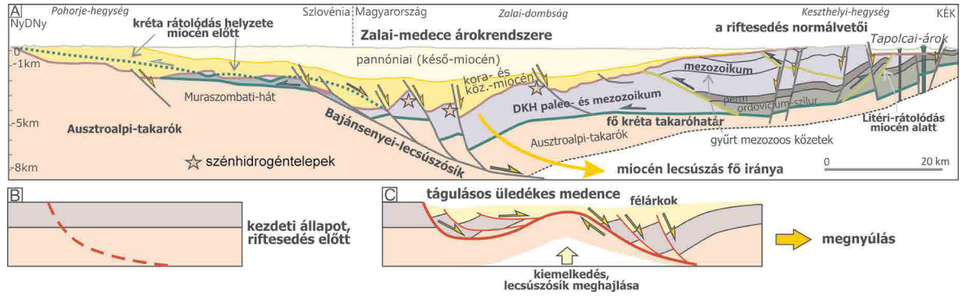
A Keszthelyi-hegység nyugati peremétől nyugatabbra a Zalai-medence árokszerkezetei következnek. Ezek hatása már nem látszik a morfológiában, mivel a normálvetők működése utáni, 8–11 millió éves üledékek már lefedik azokat. A mélybeli adatokból tudjuk, hogy a Keszthelyi-hegységben felszínen lévő kőzetek mintegy 4–4,5 km mélységbe süllyednek, mire megközelítik a magyar–szlovén határt az őrségi Bajánsenye környékén. Ez a süllyedés kapcsolatban van a kréta áttolódási felületek felújulásával: a kis dőlésű felületek mentén, a takarócsomagban mélyre került kőzetegységek a felszín közelébe, vagy az akkori felszínre kerültek. Mint a bevezetőben láttuk, ilyen laposszögű normálvetők a riftesedés szükséges elemei. A Dunántúli-középhegység körül mind a Kőszegi-hegység, mind Szlovénia felé találunk ilyeneket. A Balaton-felvidék e nagy lecsúszó-

síkok feletti kőzetblokkban foglalt helyet és a mozgás során kissé a tenger alá süllyedt. Ez a süllyedés a szomszédos Zalai-medencében gazdasági szempontból nagyon jelentős, mivel több szénhidrogén-felhalmozódás ennek köszönheti létrejöttét: a süllyedés során a korábban betemetett szerves anyag jelentős hőfluxust kapott és szénhidrogénné alakult.

Érdemes megemlíteni, hogy a riftesedés során különleges szerkezetek is létrejöttek,



A Pannon-medence kialakulásával egyidős Tapolcai-árok és keszthelyi-hegységi peremének szerkezete és morfológiája. A) Digitális domborzati modell. B) A Keszthelyi-hegység északi peremvetőinek képe északról, és C) nyugatról nézve (Karmacs). D), E), F) A Tapolcai-árok felépítését mutató földtani szelvények. G) a Keszthelyi-hegység keleti peremvetőjének látványa délről és H) északról. (fotók: Csillag Gábor)



A) Laposszögű lecsúszósík a Zalai-medence alatt. B), C) Modell a lecsúszósík létrejöttére. A Keszthelyi-hegység a lecsúszósík feletti tömb része

amelyek a Dunántúli-középhegység és a Balaton-felvidék jellegzetes képéhez is hozzájárultak. Ezek pedig olyan, közel kelet–nyugati irányú eltolódások, amelyeket több kutató – így például Mészáros József az 1980-as évektől – mutatott ki a térképek elemzésével. Az eltolódások sora a Cseszneki-zónától kezdve, a Várpalotánál húzódó Telegdi-Roth-vonalon keresztül, a Herend–Márkói-, a Padrag(kút)i- és Petri-eltolódásig húzódik. Korábbi vélemények alapján inkább a miocén működést hangsúlyozták, nagyjából 11–12 millió évek között, míg ma úgy látjuk, hogy ezek a szerkezetek (legalább részben) már a krétában is működhettek. A Balaton-felvidék szempontjából a Padragi-eltolódás talán a legfontosabb, amely úgy tűnik, elveti a korábban említett fő rátolódást, a Litéri-rátolódást (lásd 78. oldal térkép).

Összetett kérdés, mikor és hogyan emelkedett a felszínre a Balaton-felvidék és milyen nyomai vannak ennek a területen? Ami egyértelmű, hogy a Dunántúli-középhegység lassan kiemelkedett, amely folyamat kezdete talán 6 millió évvel ezelőttre tehető. Ennek oka többrétű: egyrészt megváltoztak a Pannon-medence környezetének főbb lemeztektonikai jellemzői. A Kárpátok íve alatt megszűnik vagy lényegesen lecsökken az Európai-lemez alábukása. Ugyanakkor, délről az Adriai-lemez – Afrika által tolva – egyre jobban nyomja az előtte levő Pannon-medence területét. Mindezen okok miatt a Pannon-medence riftesedési folyamata megszakad, és ismét rövidülés kezdi jellemezni. Ez jelenleg még nem nagymértékű (1 mm/év körül lehet), így nem pusztító földrengések révén jelentkezik, hanem középhegységeink lassú kiemelkedése lesz a következménye. Ha ez a változás nem következett volna be, akkor a Dunántúli-középhegység – és benne a Balaton-felvidék is – talán az Alföldre emlékeztető síkvidék képét mutatná – amit talán a kissé kiemelkedő bazaltvulkánok tarkítanának.

Ajánlott irodalom

Budai, T., Császár, G., Csillag, G., Dudko, A., Koloszár, L., Majoros, Gy. 1999a: A Balaton-felvidék földtana. Magyarázó a Balaton-felvidék földtani térképéhez, 1:50 000. – Földtani Intézet Alkalmi Kiadványa 197, 257 p.

Budai, T., Csillag, G., Dudko, A., Koloszár, L. 1999b: A Balaton-felvidék földtani térképe, 1:50.000. – Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.

Fodor L., Uhrin A., Palotás K., Selmeczi I., Tóthné Makk Á., Riznar, I., Trajanova, M., Rifelj, H., Jelen, B., Budai T., Muráti J., Koroknai B., Mozetič, S., Nádor A., Lapanje, A. 2013: A Mura–Zala-medence vízföldtani elemzést szolgáló földtani-szerkezetföldtani modellje. – Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése, 2011, 47–91.

Héja G., Kövér, Sz., Németh, A., Csillag, G., Fodor, L. 2018: Evidences for pre-orogenic passive-margin extension in a Cretaceous fold-and-thrust belt on the basis of combined seismic and field data, (western Transdanubian Range, Hungary). – International Journal of Earth Sciences 107 (8), 2955–2973.

Mészáros J. 1982: Nagyméretű vízszintes eltolódás a Bakony nyugati részén és szerepe a nyersanyagkutatásban. – MÁFI Évi Jelentése 1980-ról, 517–536.

Tari G., Horváth F. 2010: A Dunántúli-középhegység helyzete és eoalpi fejlődéstörténete a Keleti-Alpok takarós rendszerében: egy másfél évtizedes modell időszerűsége. – Földtani Közlöny 140 (4), 483–510.



Lima lóczyi

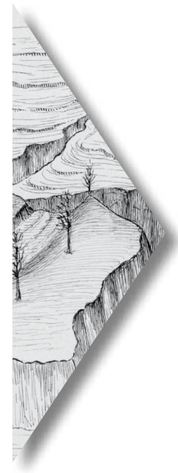
MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

Visnovitz Ferenc, †Horváth Ferenc

4

Törésrendszer a Balaton alatt

A Balatonnál nyaralva, hosszabb-rövidebb kirándulások keretében lehetőségünk nyílhat a Balaton-felvidék, vagy akár a somogyi dombok változatos tájainak megismerésére. E két, arculatában és földtani felépítésében is merőben különböző tájegység fogja közre azt az ÉK–DNy-i irányban elnyúló hosszúkás medencét, melyben a Balaton található. De vajon hogyan kerül ide ez a mélyedés? A mélyedés, ami jól láthatóan végigfut a többnyire kemény és idős kőzetekből felépülő Dunántúli-középhegység előterében. E kérdés megválaszolásán többek között olyan neves tudósok dolgoztak, mint Lóczy Lajos vagy Cholnoky Jenő, akik életük jelentős részét áldozták a Balaton geológiájának tanulmányozására. Megfigyeléseik és következtetéseik mindmáig meghatározzák a térségről alkotott földtani képünket, és nemcsak tudományos körökben, hanem a köztudatban is. E fejezetben részletesen megismerkedhetünk a száz évvel ezelőtti elképzelések mellett a legújabb vizsgálati módszerekkel, melyek segítségével „lelátunk” a Balaton alá.

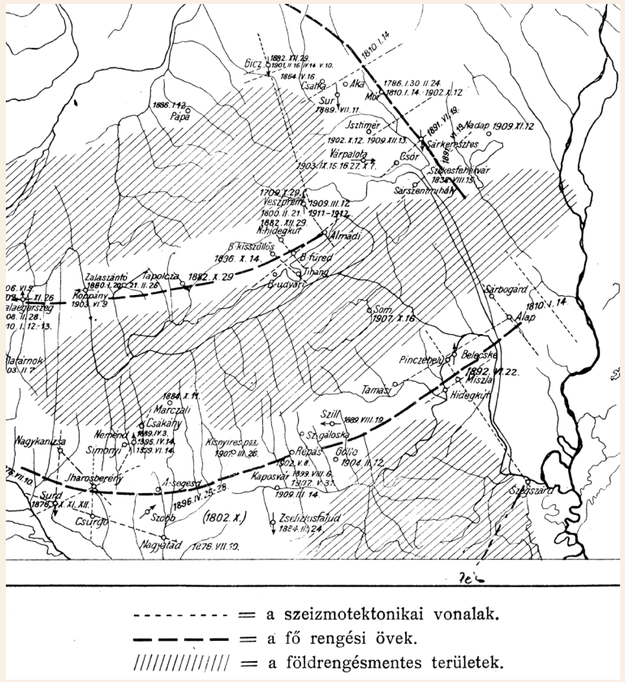


A Balaton környékének földrengési viszonyai

A Balaton környékén volt földrengéseket több csoportba oszthatjuk. Az első csoportba tartoznak azok, a melyek közvetlen a tó mellékén kipattant földrengések, ilyen azonban a rendelkezésre álló megfigyelések szerint csak egy volt, még pedig 1896 szeptember 14.-én. A második csoportba már azok a földrengések tartoznak, a melyeknek eredőhelye ugyan nincs közvetlen a Balaton mellett, hanem annak környékén és pedig kisebb vagy nagyobb távolságban attól, de tekintve a szerkezeti jelleget, mint balatonmelléki földrengések tárgyalandók.

A megfigyelési anyag 1881-ig csakis egyes eseteknek elvétve történt feljegyzéséből maradt reánk — kivéve a móri földrengés adatait — ezentúl azonban már a Magyarhoni Földtani Társulat Földrengési Bizottságának gyűjtéséből eredő anyag az, a melyik feldolgozás alá került; 1900-tól kezdődőleg pedig a Meteorologiai Intézet gyűjtötte anyagból vettem át a közölt megfigyeléseket. …

A Balaton környékének földrengési viszonyait az egyes földrengési esetek kapcsán az eddigiekben egyenként részletesen tárgyaltam. Az összes megállapított epiczentrumok és törésvonalak a mellékelt térképen vannak feltüntetve. Három olyan terület tünik ki, mint a melyeken gyakori a földrengési tevékenység.



▶ *A Balaton környékének földrengési térképe*



◀ *A móri földrengés pleisztoszeizta területe Kitaibel és Tomtsányi szerint*

lentkezik az 1891 június 19.-i földrengés alkalmával is. Ugyanis utóbbinak főtengelyét keresztező haránttörés ugyanaz, mint a melyiket a móri földrengés legdélibb haránttöréseként lehetett kimutatnom.

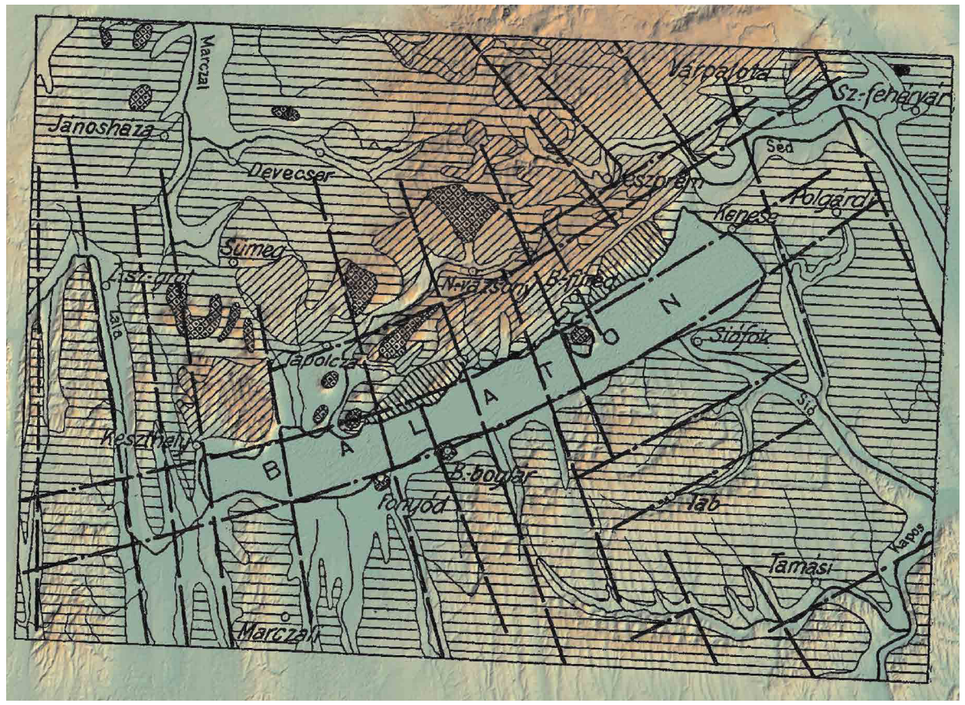
A második szeizmikus terület a Bakony déli lábainál van és a nyugati előhegyekig terjed. Veszprémtől Zalaegerszegig helyezkednek el a kisebb rengési központok, a melyek közül a legnagyobb tevékenységet maga Veszprém mutatja fel, a hol úgy kisebb lökések, mint újabb időkben erős földalatti morajok gyakran figyeltettek meg. Nagyobb földrengés csakis 1896 szeptember 14.-én volt a Balaton partján és ez volt az egyetlen, a melyik a Bakony délkeleti peremén pattant ki. Keletről nyugati irányban Tapolcza, Zalaszántó, Zalakoppány, Zalaegerszeg úgyszólván egy vonalon helyezkednek el, a melyik vonal kettéválasztja az alább tárgyalandó két földrengésmentes területet.

A harmadik rengési terület főbb vonásaiban párvonalasan halad a Bakony aljában lévő rengési övvel, illetve rengési epiczentrumok gyöngysorával. Tolna vármegyétől huzódik végig Somogy vármegye déli felén át Zala vármegye határáig. Szeizmikus középpont ebben az övben is csak kettő adódott, először működött az 1876. év július és október havában a Surd környéki epiczentrum, míg újabban 1892 június 22.-én Tolna vármegyében volt közepes erősségi földrengés. A két terület között Kaposvár környékén aránylag gyakran — 8 esetben — voltak kisebb földrengések, a melyeknél azonban mindig csak egy, esetleg két helyről érkezett be jelentés.

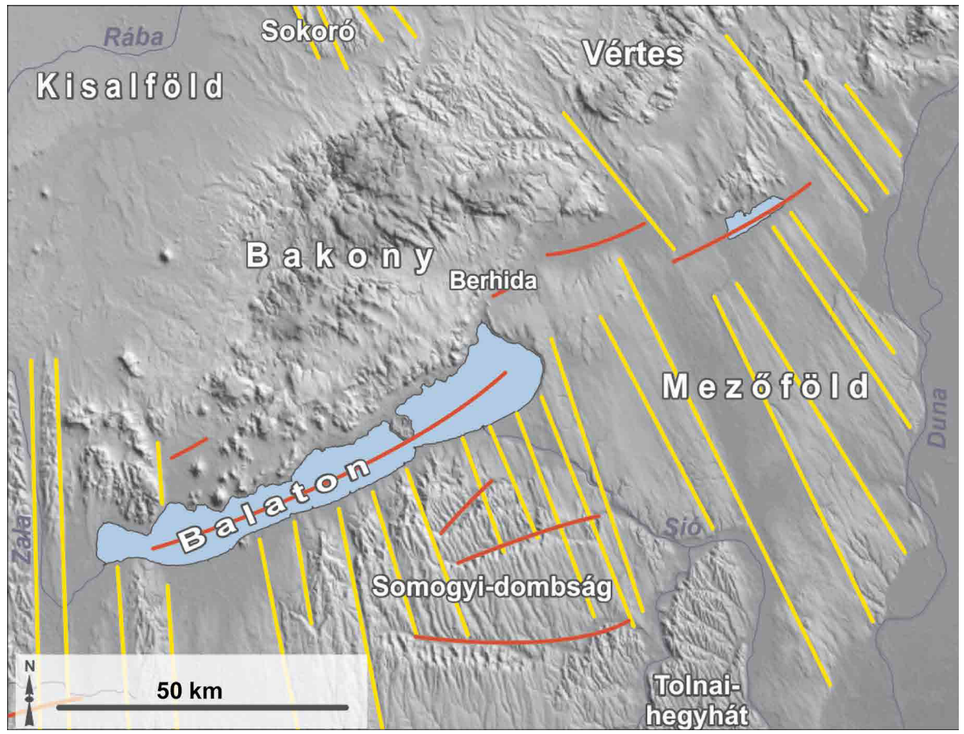
Részlet Réthly Antal A Balatonnak és környékének fizikai földrajza *című könyvének Geofizikai függelékéből*

A Balaton medencéje viszonylag hirtelen, különösebb átmenet nélkül szakítja meg a környező dombságokat, mindössze egy-egy keskeny parti sávot hagyva a tó déli és északi oldalán. A Lóczytól és Cholnokytól származó klasszikus magyarázatok éppen a domborzat ilyen jellegzetességeit, vagy – ahogy a mai szaknyelvben hívják – geomorfológiai változásait vették figyelembe, amikor megpróbálták megmagyarázni a mélyedés eredetét. Ennek az az alapja, hogy a felszín hirtelen változása gyakran a mélyben fekvő kőzetblokkok relatív helyzetét tükrözi, amely a szomszédos tájegységek, illetve az alattuk elhelyezkedő kőzetblokkok egymáshoz viszonyított elmozdulásának (kiemelkedésének vagy lesüllyedésének, illetve elcsúszásának) a függvénye.

Elődeink a Dunántúl domborzatában két olyan jellemző völgytípust ismertek fel, amelyek hosszan elnyúló mélyedései alatt felszín alatti töréseket véltek felfedezni. Ezek közül az egyik, durván ÉÉNy–DDK-i lefutású, enyhén széttartó völgyekből áll. A sugaras, legyező jellegű geometriájuk miatt ezeket a völgyeket sugárirányú vagy meridionális (délköröknek megfelelő irányú) völgyhálózatnak nevezték el. A másik rendszer erre közel merőleges, és NyDNy–KÉK-i irányítottságú völgyekből és hosszúkás medencékből áll. Ezt a rendszert hosszanti, idegen szóval longitudinális völgyhálózatnak keresztelték el. A Balaton árka az utóbbi, vagyis a hosszanti völgyhálózatba illeszkedik. A kutatók arra jutottak, hogy ezeknek a mélyedéseknek a kialakulásában a völgyekkel párhuzamos törésvonalak (kőzetblokk határok) meghatározó szerepet játszottak, és épp ezért a tavat magába foglaló mélyedést is tektonikusan meghatározottnak

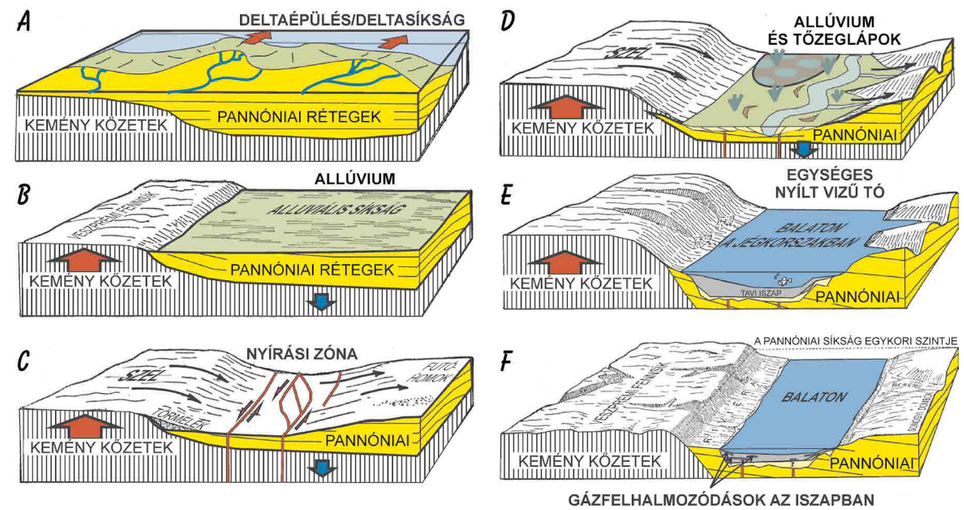


A Közép-Dunántúl jellegzetes völgyhálózata. Lóczy Lajos vázlata a Balaton térségében futó hosszanti és harántirányú törésrendszerekről



Bada Gábor és szerzőtársai térképe: a sárga vonalak a meridionális/sugaras völgyrendszer, a piros vonalak a longitudinális/hosszanti irányú völgyrendszer elemeit mutatják

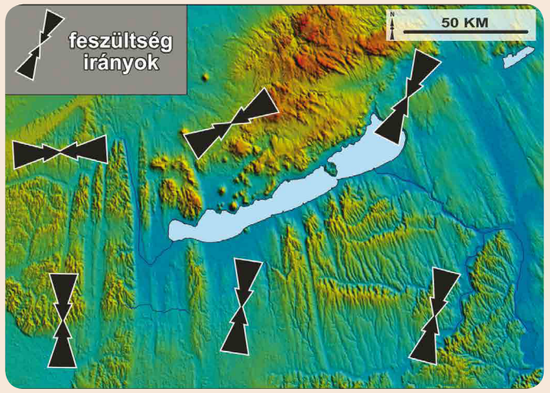
vélték. A klasszikus elmélet szerint a Balaton medencéje két, a tó északi és déli partja mentén futó törés között beszakadt kőzetblokk lesüllyedésével jött létre. Tudományos megfogalmazással a tó tehát egy normálvetők által kontrollált szerkezeti árokban foglal helyet.



A Balaton kialakulása 6 lépcsőben. Cholnoky Jenő klasszikus ábrája Visnovitz Ferenc átdolgozásában

Nyomástér

Mérések alapján a Balatonfő közelében ÉK–DNy-i irányú nyomófeszültségek feltételezhetők. Ez a nyomástér a hazánk alatt található kőzetlemezek lassú mozgásának és forgásának a következménye. A nyomástér a Balaton zónájában haladva fokozatosan elfordul, és a tótól nyugatra, a Zala folyó vidékén K–Ny-i, míg a Balatontól délre, a Somogyi-dombság területén É–D-i irányúvá válik. Ez a feszültségmező az, ami meghatározza a tó alatt és annak környezetében található egykori és a jelenkori vetők lehetséges aktivitását, lefutását és elmozdulásait.



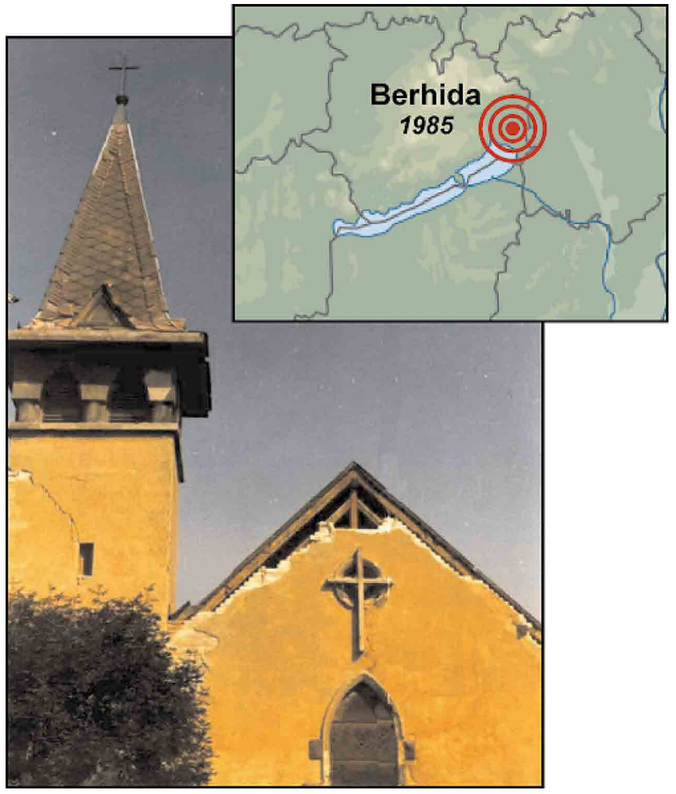
Később nyilvánvalóvá vált, hogy a tómedence kialakulása nem értelmezhető ilyen egyszerűen, és nem tekinthető egyetlen lezökkenő kőzetblokk helyén kialakult medencének.

A korai modellt előbb Marosi Sándor és Szilárd Jenő, majd a XX. század második felében még sokan mások finomították tovább. Ennek a kutatássorozatnak az eredményeként a tavat magába foglaló mélyedés, és a környezetében lévő mélyebben fekvő területek keletkezését ma már nem egyetlen tektonikai eseménnyel magyarázzák, hanem egy több fázisban zajló süllyedéssel kialakult, a víz és a szél felszínalakító munkája által átformált medencét írnak le (részletesen lásd a kötet 8. fejezetében). Mai tudásunk alapján tehát a medence kialakulása több tényezőre vezethető vissza. Ezek közül csak egyik a kőzetek eltörésével és elmozdulásával járó tektonika. A törések által szabdalt és meggyengült kőzeteket később az ÉNy felől érkező szelek erodálták tovább, majd a szél által formált mélyedésben egykor egy nagyobb folyó is folyhatott. Végül, durván 10–15 000 évvel ezelőtt, fokozatosan teret hódított a víz, mely kezdetben kisebb tavak formájában, majd a vízszint emelkedésének és a partok fokozatos elmosásának (abrázió) köszönhetően kialakulhatott az egységes víztükör, vagyis a mai értelemben vett Balaton.

A Balaton alatti törésvonal: honnan ered, és meddig tart?

A Balaton kialakulásáról fentebb vázolt kép rendkívül tetszetős és egyszerű. Éppen ezért nem tudományos körökben mind a mai napig tartja magát a tó partjainál futó törésvonalak modellje. A térség növekvő idegenforgalma, beépítettsége és az ezzel együtt járó fokozott földtani kockázat ugyanakkor megkívánta a régi elméletek felülvizsgálatát, finomítását, hogy jobban megérthessük a Balaton környezetében futó törésvonalakat.

A kőzetekben kialakuló törések oka a bennük ható nyomó-, húzó- vagy nyíróerők miatt felgyülemlő feszültség. Ha ez a feszültség egy adott szintet meghalad, akkor az a kőzet eltörését és elmozdulását eredményezi. Ilyenkor a kőzetben felhalmozott energia felszabadul, amit mi kisebb-nagyobb földrengések formájában észlelünk. Ilyen földrengés volt a Balatonhoz közeli Berhidánál 1985-ben, amely 72 épületben javíthatatlan károkat, számos további lakó- és nyaralóépületben pedig jelentős károkat okozott, még a Berhidától több 10 km-rel távolabb található Balaton környéki településeken is. Ez a földrengés, valamint a hozzá hasonló, de a hétköznapi ember által észre sem vehető, jóval kisebb, de gyakoribb felszínmozgások arra hívják fel a figyelmet, hogy a lábunk alatt lévő föld – ha kis mértékben is – mind a mai napig „háborog”.



Az 1985-ös földrengés során a berhidai templomban keletkezett épületkárok (forrás: http://www.foldrenges.hu)

A földrengések és a környéken lemélyített fúrások geofizikai vizsgálata, valamint a felszínmozgások modern GPS-es monitorozása alapján arra lehetett következtetni, hogy a Balatonfő közelében levő Berhida térségében kipattanó földrengések a kőzetekben fellépő ÉK–DNy-i irányú nyomófeszültségekkel hozhatók összefüggésbe. A Balaton északi és déli partjával párhuzamos, a klasszikus magyarázatokban szereplő normálvetők mozgásait ez az összenyomásos feszültségmező nem magyarázza, hiszen a medence lezökkenéséhez egy ÉÉNy–DDK-i irányú széthúzásra lenne szükség. Ilyen húzóerő az elmúlt 6–8 millió évben már láthatóan nem volt, vagyis a térségben a „közelmúltban” zajló úgynevezett neotektonikus eseményeknek más típusú töréseket, vetődéseket kellett eredményeznie.

A Balaton medencéjének érdekessége, hogy a XX. század földtani kutatásai során mélyült, néhányszor 100 méteres mélységű parti kutatófúrások alapján kiderült, hogy a tó alatt is található egy törésvonal. Ez a vető különböző minőségű idős (úgynevezett prekainozoos) kőzeteket választ el egymástól, és a tó középvonalától valamivel délre, annak hossztengelyével közel párhuzamosan halad. Haas János és munkatársai ezt a kiemelt fontosságú vetőt ipari szeizmikus szelvények és parti fúrások alapján térképezték, és a nyugati országhatártól egészen Székesfehérvárig meghosszabbították. Ez a törésvonal a Balatonfő-vonal.

Hogyan mutathatunk ki egy vetőzónát a Balaton alatt?

A Balaton alatti vetőzóna részletes megismerését a XX. század végétől használt szeizmo-akusztikus, illetve vízi szeizmikus mérések tették lehetővé. Vízi geofizikai adatokon alapuló szerkezeti térképezést az 1980-as évek végén elsőként Cserny Tibor és Ru-

Vízi szeizmikus mérések

A vízi szeizmikus szelvények földtani léptékben egy nagyon nagy felbontású ultrahangképként képzelhetők el, és leginkább az orvosi röntgenfelvételhez hasonlíthatók. Az ilyen felvételek lehetővé teszik számunkra, hogy belássunk a földfelszín alá, és megvizsgálhassuk a víz alatt található kőzetrétegeket. A szelvényeken látszanak az egykori kőzetfelszínek és az azokat ért deformációk, gyűrődések és törések is. A föld alatt húzódó kőzetfelszínek megszakadása a vetők mentén olyasmi, mint az orvosi röntgenen a csonttörés képe. A különbség az, hogy a kőzetekben futó törések sokkal hosszabbak, és emiatt egyetlen felvétellel nem tudjuk teljes hosszukban vizsgálni őket. Ehelyett több különböző helyen végzünk méréseket, hogy a vetőt teljes hosszában és finom részleteiben is meg tudjuk ismerni.

ben Corrada végeztek, majd a stafétabotot előbb egy olasz–magyar együttműködés keretében, később pedig a Geomega Földtani és Környezetvédelmi Kutató–Szolgáltató Kft. és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Geofizikai Tanszékének kooperációjában Horváth Ferenc professzor és munkatársai vették át.

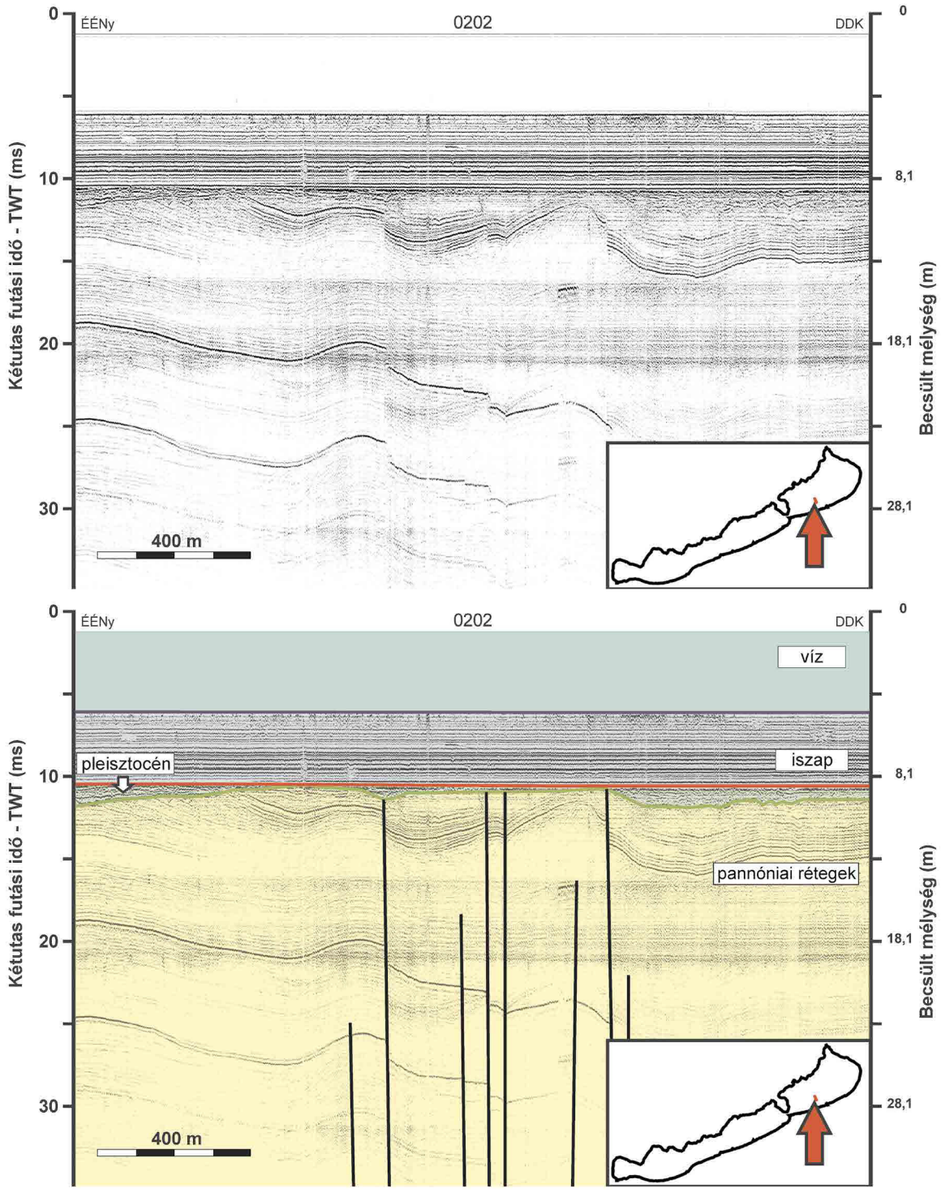
A vízi mérések tanúsága alapján a Balaton medre alatt számos kisebb-nagyobb törés figyelhető meg. Ezek azokban a tó alatti és a tavat körülvevő, 8–9 millió éves, pannóniai üledékekben jelentkeznek, melyek a hazánk területét egykor beborító Pannon-tó partközeli, néhányszor 10 méter mély vizű zónájában rakódtak le (részletesen lásd jelen kötet 5. fejezetét).

A szeizmikus felvételeken a fekete–szürke vonalak a földtani rétegek határait jelölik, melyek megszakadásánál találhatjuk a vetőket. A túloldali ábrán felülről lefelé haladva elsőként a réteghatároktól mentes vizet látjuk. Ez alatt található a tavi iszap, mely finom, közel vízszintes rétegzettséget mutat. Az iszap talpát egy viszonylag egyenletes, legyalult felszín adja, mely legtöbb esetben a Pannon-tó sokmillió éves üledékeinek a teteje. Sokszor előfordul azonban, hogy a balatoni és a pannon-tavi üledékek között még találunk egy harmadik, egyelőre nem igazán ismert, pleisztocén korú üledékcsomagot is.

A törések szinte kizárólag a pannóniai üledékekben jelennek meg, és jellemzően pár 10 cm-től néhány méterig terjedő, függőleges elmozdulásokat mutatnak. A réteghatároknál tapasztalható legnagyobb elmozdulások a tó keleti medencéjében legfeljebb 5–8 méteresek, míg a nyugati oldalon akár 10–15 méteres (3–5 emeletnyi!) ugrások is megfigyelhetők. Hogy jól láthassuk ezeket a szelvények több kilométeres hosszához képest meglehetősen kisméretű szakadásokat, a felvett képet vízszintes irányban igen erősen össze kellett nyomnunk. Így a bemutatott képen a törések dőlésszöge és a rétegek geometriája is igencsak csalóka, hiszen ahhoz, hogy a kép ráférjen a lapra, a szelvényt 50–100-szorosan túlmagasítottuk. Ilyen túlmagasítás mellett a törésvonalak közel függőlegesnek tűnnek, de a szelvény által megjelenített metszetekben a vetők torzítatlan dőlése általában csak 40–80°.

A vetőket és a képen feltüntetett méretskálát jobban szemügyre véve arra lehetünk figyelmesek, hogy a törések csak a szelvény bizonyos szakaszain jelennek meg, és egy néhányszor 100 méteres sávban sűrűsödnek. A vetőket jelölő „pálcikák” geometriája olyan, mintha a mélység növekedésével kissé egymás felé tartanának. A szakadási felületet felfelé többnyire a tavi iszap talpáig tudjuk követni, az iszapon belül a törések már nem folytatódnak. Ez tudományos szempontból érdekes megfigyelés, hiszen az iszap rétegei a földtani közelmúltat képviselik, így ezeknek a rétegeknek az elszakadása vagy el nem szakadása felvilágosítást adhatna a tekintetben, hogy vajon működött-e a vető a tó keletkezése óta, az elmúlt durván 15 000 évben? Sajnos azonban az iszap túl puha ahhoz, hogy az esetleges elmozdulásokat felvegye és megőrizze, emiatt egyelőre nem tudtuk egyértelműen megválaszolni azt a kérdést, hogy van-e a tó alatti vetőknek jelenkori aktivitása.

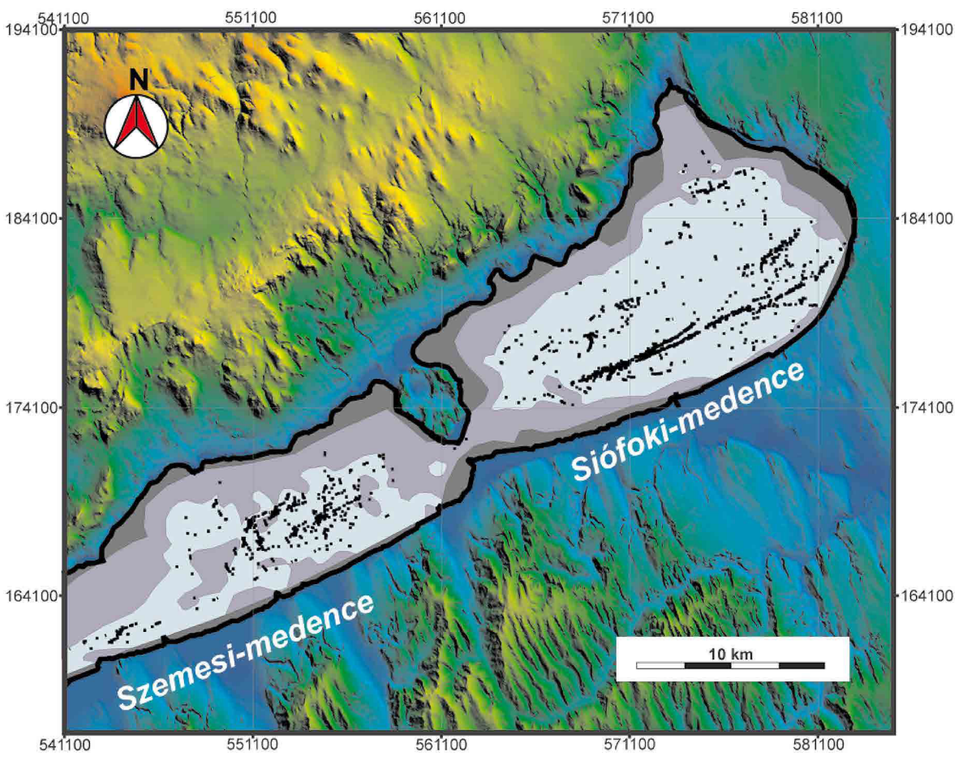
A törések egymáshoz való közeledése annak a biztos jele, hogy a seprűszerűen széttartó vetőknek a mélyben egy közös gyökerük van. Vagyis minden egyes törés egy olyan, mélyben húzódó törésvonalból ágazik ki, amely a keményebb kőzetekből álló aljzati képződmé-



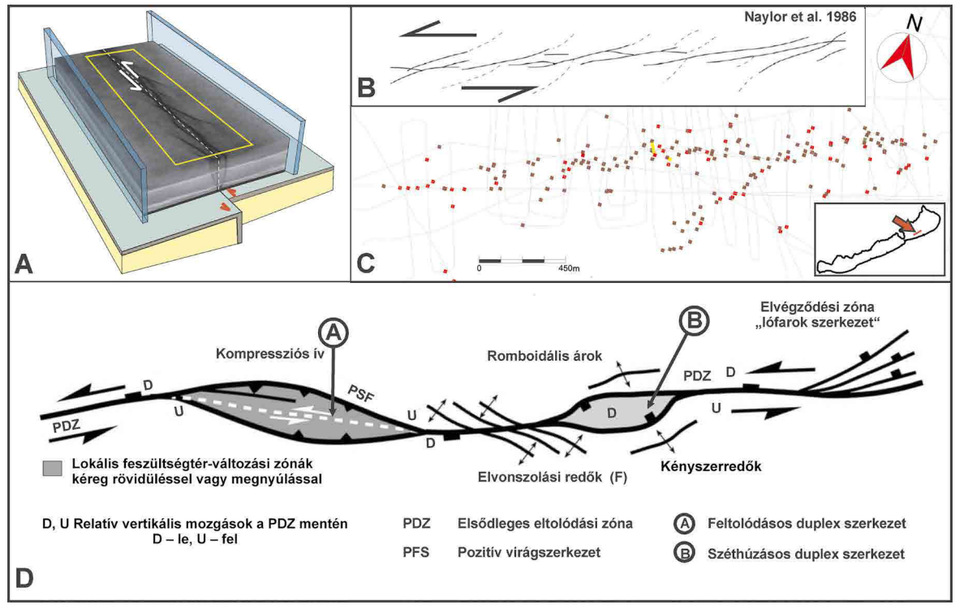
Vízi szeizmikus szelvény a Siófoktól északra futó törésvonalon keresztül. Felül: szeizmikus felvétel. Alul: földtani értelmezés. A fekete „pálcikák” a vetőket, a színes vonalak a fontosabb réteghatárokat (eróziós felszíneket), a színes tartományok a főbb kőzettartományokat jelölik. A szelvény 40-szeresen túlmagasított képet mutat!

nyeket tagolja. A Balaton esetében ez a mélyben húzódó törésvonal a Balatonfő-vonal. Ennek az aljzati törésnek a mozgása hozza létre a Balaton alatti kicsiny vetőket a tó alatt található agyagos-homokos anyagban. A törések tehát a mélyben húzódó szerkezet felett alakultak ki, melynek két oldala különböző irányba mozog, ezáltal deformálva a felette található puhább kőzetanyagot. Az aljzati blokkok mozgása oldaleltolódásos jellegű, mégpedig úgy, hogy a törésvonalra állva a bal oldali blokk felénk közeledő, a jobb oldali pedig tőlünk távolodó mozgást végez. A szerkezetföldtanban ezt a fajta mozgást balos oldaleltolódásnak nevezzük (lásd a 2. fejezetet).

A rengeteg vízi szeizmikus mérésnek hála a Balaton alatti kőzetek nyíródásával összefüggő törésvonalak térképe mára már elég jól ismert. A néhány ezer kilométernyi felvételt végigbogarászva és a rajtuk látható vetők helyének azonosítása után, modern térinformatikai szoftverek segítségével már pillanatok alatt térképre rajzolhatjuk a vetőket. Az eredmény olyasmi, mint a rejtvényújságban az összekötős feladványok, azzal a különbséggel, hogy itt a pontok sorrendje nincs megszámozva, és az egymást követő pontok távolsága közel sem azonos. Bár bizonyos helyeken az összekötés kézenfekvő, a terület nagy részén a nem elegendően sűrű szelvényháló miatt a helyes összekötés messze nem egyértelmű! Sőt, első ránézésre a pontok tetszőlegesen összeköthetőnek tűnhetnek. Épp ezért a pontsereg kibogozásához a kutatóknak földtani ismeretekre,



A Balatonon mért szeizmikus szelvényeken észlelt vetők térképi elhelyezkedése. Az észlelt vetők helyzetét a fekete pontok jelölik

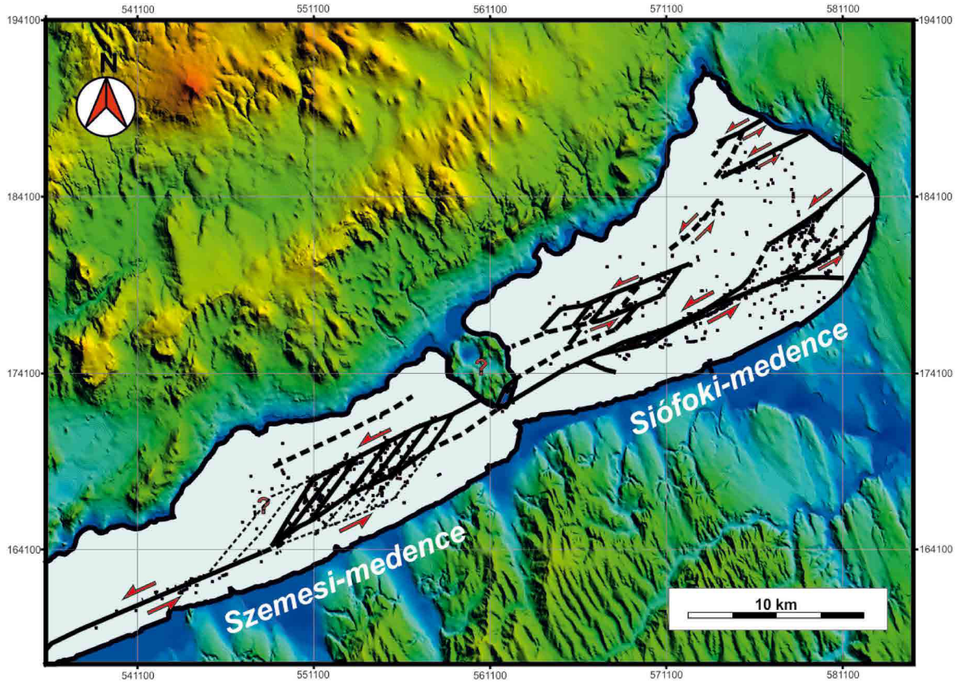


A vetőpontok szerkezeti zónákba való rendelésének alapjai. A) Analóg modellkísérlet kialakítása. B) A kísérleti eredmények rajza és C) ezek összehasonlítása a balatoni vetőpont-mintázattal. D) Az eltolódásos zónák általános szerkezeti modellje, az ilyen törésrendszerekre jellemző vető- és redőmintázatok feltüntetésével

fizikai kísérletek eredményeire és számítógépes szimulációkra is támaszkodniuk kell. Ebből lehet megsejteni azt, hogy nagyjából hogyan is nézhet ki a végeredmény. Olyan ez, mintha az összekötős feladványban a sok pontról megsejtenénk, hogy összességében egy lovacskát ábrázol, és ennek fényében találnánk ki a pontok összekötésének sorrendjét.

A Balaton esetében a térképünk keretét első közelítésben a vízfelület határa adja, mivel ez az a terület, ahol lehetőségünk van a geofizikai „ultrahang készülékünkkel" a felszín alá belátni. Az előző oldali térképen látható szürke területek a fel nem mért partközeli sávokat jelzik. Sajnos azonban a műszerünk nem mindenhol működik jól, mivel – az orvosi ultrahanghoz hasonlóan – vizsgálatunkat a felszín alatt rejtőző „gázbuborékok" megzavarják. A Balaton esetében sok helyen tapasztaljuk azt, hogy a tavi iszapban, vagy annak talpánál aprócska gázbuborékok találhatóak. (A jelenségről bővebben a kötet 12. fejezetében olvashatnak.) Ezek a buborékocskák szétszórják, visszaverik, esetenként teljesen elnyelik a szeizmikus műszer által kibocsátott ultrahangjelet, és emiatt gátolják a mélyebb zónák részletes megismerését. Ezt nevezik szeizmo-akusztikus árnyékoló hatásnak. Ezeket a területeket a 100. oldali térképen a lilával színezett zónák jelzik. A Balatonnál ez a hatás elsősorban a partközeli 1–2 km-es sávban jellemző, de a tó nyugati felében, egy keskeny déli parti sáv kivételével mindenütt általános jelenség. Épp emiatt szerkezeti térképünket csak a Zánka–Balatonboglár vonaltól keletre eső területekre tudtuk elkészíteni (lásd a 102. oldalon).

Ha a sok pontból térképet szeretnénk szerkeszteni, először meg kell fejtenünk a területre jellemző törésirányokat, majd össze kell azokat vetnünk a földrengésvizsgálatokból és a fúrólyukakban végzett mérésekből meghatározott kőzetfeszültség-adatokkal. A feszültségmező és a törésirányok alapján alkotható meg a térségre jellemző szerkezeti modell, amelyben a



A Balaton alatt futó nyírási zóna szerkezeti térképe. A kis pöttyök a térképezett vetőket, a fekete vonalak a törészónákat mutatják. A tó hossztengelyével párhuzamos nyírási övek között több helyen átkötő törések alakulnak ki

törések jellemző geometriája alapján, az azok mentén bekövetkező kőzetmozgások jellege is megérthető. Hogy egy adott tektonikai helyzetben pontosan hogyan is néz ki a szerkezeti kép, azt korábbi tapasztalatainkból, laboratóriumi kísérletekből és a fizikai egyenletek mentén végzett számítógépes szimulációkból tudjuk. A Balaton esetében a vetők egy balos nyírási zónához tartoznak, melyen belül a törések több, egymással és a tó hossztengelyével párhuzamos pásztába rendeződnek. Ennek nagyfelbontású képe igen hasonlít a laboratóriumi homokon és agyagon végzett nyírási kísérletek alapján vázolt képhez, melyen belül a vetők egymás mellé hajló, úgynevezett kulisszás geometriát mutatnak. A nyírás során a kezdetben különálló vetők a törészóna fejlődése folyamán összekapcsolódnak, egy bonyolult vetőkből és gyűrődésekből álló törésrendszert hozva létre. A mérések eredményei, a feszültségmező és a kőzetanyag ismeretében összekötési szabályokat kapunk a vetőket kijelölő, kaotikusnak tűnő pontjainkra.

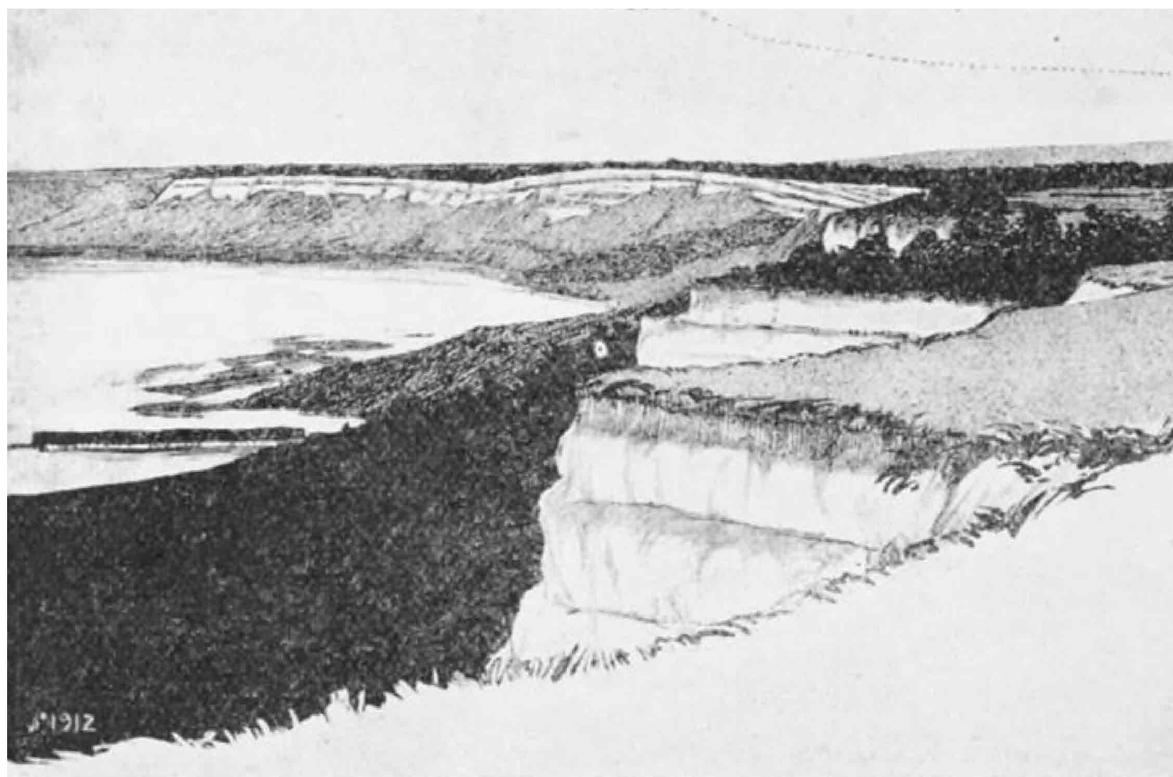
A Balaton esetében, a Siófoktól körülbelül 2 km-re északra húzódó pontsorozat az a szakasz, ami az aljzati törés felett fut, és a Balatonfő-vonal fiatal nyírási övként való felújulásának a következménye. Több helyen felismerhetünk még ezzel párhuzamos töréseket is, igaz csak rövidebb szakaszokban. Ezeket a szakaszokat segédtörések kapcsolják össze, melyek azonban nem mindenhol láthatóak jól.

Tektonikai szempontból igen kemény diót jelent a Tihanyi-félszigettől nyugatra eső Szemesi-részmedence felépítésének értelmezése. A sok-sok törési pont között itt elsőre szinte lehetetlennek tűnik rendet rakni. A keleti medencében tanult jellemző irányok és az eltolódásos zónák geometriáját ismerve azonban megfejthető a káosz. A tó ezen részén egy, az általános szerkezeti modellben is feltüntetett, romboidális árok ismerhető fel, melyen belül számos keresztirányú törés fut. Mindez egy úgynevezett pull-apart (széthúzásos) medencécskét hozott létre.

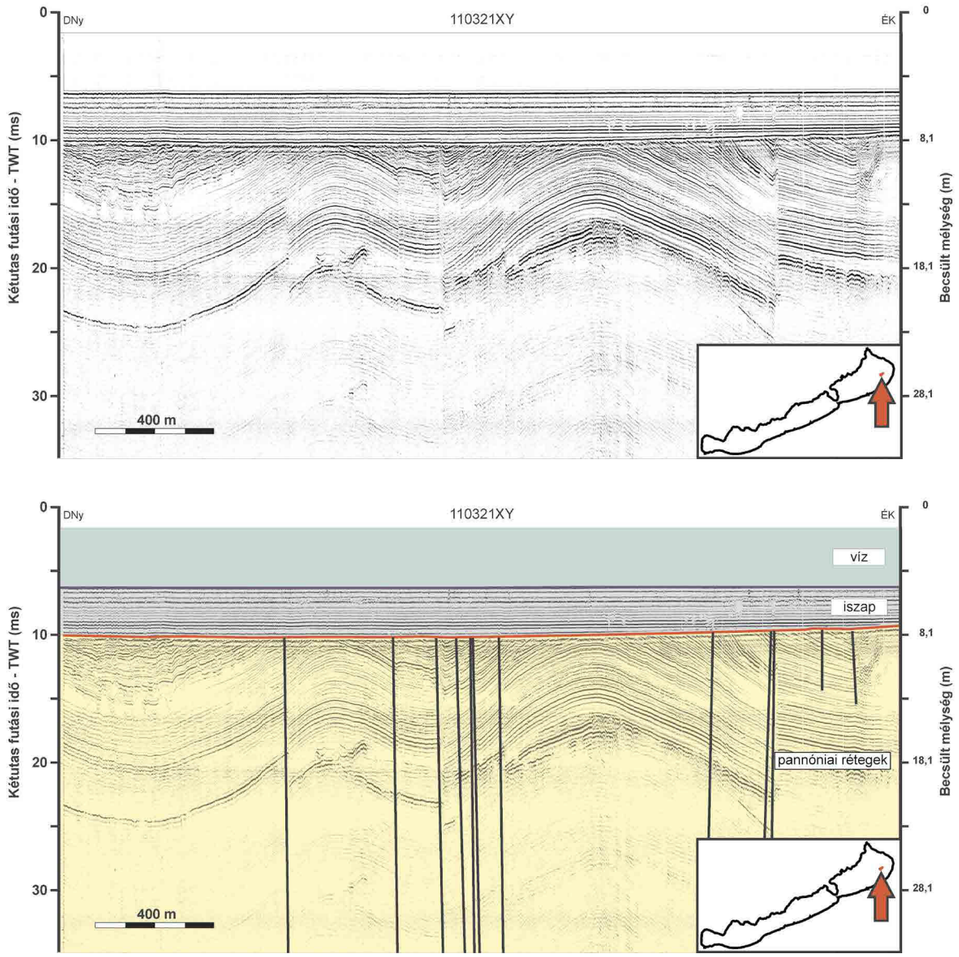
Hogyan gyűrődnek a kőzetek a nyírás hatására?

A pannóniai rétegekben felismerhető vetőkhöz gyakran kapcsolódnak szintén tektonikus eredetű, gyűrődéses szerkezetek is, melyeket redőknek nevezünk. Ezeknek a magassága (amplitúdója) általában mindössze néhány méter, hullámhossza azonban a pár száz métertől a néhány kilométerig is terjedhet. A rétegek nagyon lapos és elnyújtott hullámzásáról van itt szó, épp ezért ezt a finom meggyűrődést szabad szemmel nem igazán lehet látni. A néhány fokos dőléseket egy bánya feltárásában, vagy a balatoni magaspartokon nem könnyen veszi észre az ember. Lóczy Lajos azonban tudta, hogy mit kell keresnie, és *A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei* című könyvében be is számol arról a pannóniai rétegekben megfigyelt redőről, melyet a balatonakaratyai magasparton tudott megfigyelni.

A vízi szeizmikus szelvények birtokában Lóczyhoz képest mi nagyon szerencsés helyzetben vagyunk, hiszen a szeizmikusan leképezett földtani metszeteket számítógépes szoftverekkel tetszőlegesen tudjuk torzítani. Ha a metszeteket hosszirányban hasonlóan összenyomjuk, mint tettük azt a vetők tér-



Redő a balatonakarattyai magasparton, Lóczy Lajos ábrázolásában



Redők egy 40-szeresen túlmagasított, balatoni vízi szeizmikus szelvényen. Felül: szeizmikus felvétel. Alul: földtani értelmezés

képezésénél – a nagy vertikális torzításnak hála –, a kőzetrétegekben meglévő enyhe hullámzás látványossá válik, és kiválóan tanulmányozható. Ilyen túlmagasított redőket mutat a fenti ábra, ahol jól látszik, hogy a gyűrődéseket gyakran vetők is tördelik. Találunk homorú redőket (szinklinálisokat) és domború redőket (antiklinálisokat) is szép számmal, melyek többnyire párokban jönnek létre, és egymást váltogatva hullámvonalat alkotnak.

A szeizmikus szelvényeken különböző hullámhosszú és magasságú redők figyelhetők meg. A legnagyobb redők az idős aljzat lefutását követik, és kilométeres nagyságrendű hullámhosszukhoz néhány 10 méteres magasság tartozik. A gyűrt formák az 1–2°-os D–DNy-i dőlésű rétegekre tevődnek rá és általában ÉNy–DK/Ny–K irányítottságúak, ami összhangban van a területre jellemző jelenlegi feszültségirányokkal. A kisebb skálájú gyűrődések orientációja ugyanakkor már jóval nagyobb változékonyságot mutat. Ezek a gyűrt formák már nem mindig követik az aljzat lefutását. Sokszor az aljzattól függetlenül, vagy a nagyobb redőkön, vagy azok tengelyével szöget bezárva jelentkeznek.

Létezik-e „balatoni Szent András-vonal”?

A geofizikai kutatások alapján végül egy néhány kilométer széles nyírási övet tudtunk azonosítani, mely több, egymással párhuzamos vetőzónát hozott létre a Balaton alatt. A tó alatti vetők egy oldaleltolódásos rendszer részei, amelynek északi oldala a déli részekhez képest nyugat felé, azaz balos irányban mozog. Ez a vetőtípus hazánkban nem csak a Balaton alatt fordul elő, hanem az elmúlt 6–8 millió évben az egész Pannon-medencében uralkodó szerkezeti stílus. A Balaton alatti vetőzónát épp ez teszi különlegesen érdekessé. Lefutásában és jellegében éppen olyan, mint a legtöbb fiatal hazai törésrendszer, ugyanakkor a Balaton vízfelületének és a vízi szeizmikus kutatómódszernek hála nagyon nagy felbontásban tanulmányozható.

Mindez a sok-sok törés a jól ismert Szent András-törésvonalhoz hasonló módon működik, azzal a különbséggel, hogy az itt bekövetkező legnagyobb földrengések és elmozdulások nagyságrendekkel elmaradnak a híres amerikai törésvonalnál tapasztalt mozgásoktól. A hazánk alatt mozgó lemezek a földtörténet során ugyan több 100 km-eket is utaztak, de a ma is zajló balos elmozdulások már nem jellemezhetők nagy mozgási sebességekkel. A lemezek mozgása nagyon lassú, mindössze a 0,1 mm/év nagyságrendbe esik. Ez az elmúlt körülbelül 10 millió évben durván 1 km-es horizontális elmozdulást okozott. Sőt, a szeizmikus értelmezések alapján, a Balaton esetében ez az elmozdulás az elmúlt közel 8 millió év során nem lehetett sokkal nagyobb, mint 100–200 méter. Mind a vetők, mind a redők és a horizontális elmozdulások méretei messze elmaradnak a Szent András-törésvonalnál tapasztaltakhoz képest.

Mindez azt jelenti, hogy nem kell attól rettegnünk, hogy a Balatonnál ma-holnap egy olyan hatalmas földrengés pattan majd ki, amely a nyaralónkat vagy épp a Balatonnál futó 7-es, illetve 71-es főutak valamelyikét méterekkel odébb tolja. A szolid földmozgásokhoz kötődő kicsiny vetők és gyűrődések hátterében egy átlagosan 0,1 mm/év nagyságrendű kőzetmozgás áll, melyhez kisebb földrengések ugyan tartozhatnak, de igazán komoly földtani kockázatot nem jelentenek a Balatonnál nyaralók számára.

Ajánlott irodalom

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 Közlöny 140 (4), 367–390.

Cholnoky J. 1937: Balaton. – Franklin Társulat, Budapest, 191 p.

Cholnoky J. 1936: Magyarország földrajza. – A Föld és élete, VI. kötet. Franklin és Társa Kiadó, Budapest, 530 p.

Cserny T., Corrada R. 1990: A Balaton aljzatának szedimentológiai térképe. – Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1988, 169–176.

Dooley T. P., Schreus G. 2012: Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. – Tectonophysics 574–575, 1–71.

Haas J., Budai T., Csontos L., Fodor L., Konrád Gy. 2010: Magyarország pre-kainozoos földtani térképe, 1:500 000. – Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.

Horváth F., Dombrád E. 2010: A magyar tektonikai gondolkodás fejlődése a Balaton és környéke kutatásának tükrében. – Földtani Közlöny 140 (4), 335–354.

Horváth F., Sacchi M., Dombrádi E. 2010: A Pannon-medence üledékeinek szeizmikus sztratigráfiai és tektonikai vizsgálata a Dél-Dunántúl és a Balaton területén. – Földtani Közlöny 140 (4), 391–418.

Lóczy L. 1913a: A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése. – In: Lóczy L. (ed): A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. I. kötet, 1. rész, 1. szakasz, Kilián F. Bizománya, Budapest, 617 p.

Marosi S., Szilárd J. 1981: A Balaton kialakulása. – Földrajzi Közlemények 29 (1), 1–30.

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.

Visnovitz F., Horváth F., Fekete N., Spiess V. 2015: Strike-slip tectonics in the Pannonian basin based on seismic surveys at Lake Balaton. – International Journal of Earth Sciences (Geol. Rundsch.) 104 (8), 2273–2285. DOI: 10.1007/S00531-015-1179.x.



Viviparus lóczyi

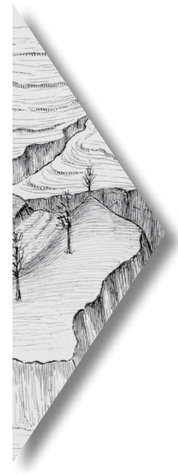
MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

Sztanó Orsolya, Magyar Imre, Katona Lajos

A Pannon-tó és a Balaton

5

A Balaton eredetével kapcsolatban széles körben elterjedt az a nézet, hogy a tó az egykor az egész Kárpát-medencét kitöltő „Pannon-tenger” maradványa. Ma már nehéz lenne megállapítani, hogy honnan ered ez a feltételezés. Talán szerepet játszhatott benne a „balatoni kecskeköröm” nevű kagyló, amelyet a Balaton iszapjából gyűjtöttek ugyan a helyi gyerekek, de amely régóta tudottan a miocén – körülbelül 8,5 millió éves – rétegekből került a tóba. Akárhonnan is pattant ki az ötlet, ismeretterjesztő előadásokban, brosúrákban, újságcikkekben, sőt olykor útikönyvekben is gyakran találkozhatunk ezzel a téves megállapítással. A „Pannon-tenger” kifejezés – amelyet a földtörténettel foglalkozó szakemberek egyébként nem is használnak – ezekben az írásokban változóan hol a kora-oligocéntől a középső -miocénig (33–11,6 millió év között) létező Paratethys tenger kárpát-medencei részére, hol pedig az erről a tengerről a Kárpátok emelkedésével lefűződött Pannon-tóra vonatkozik. Tegyünk most rendet a fejekben és nézzük meg, mi a valódi kapcsolat a Pannon-tó és a Balaton között!

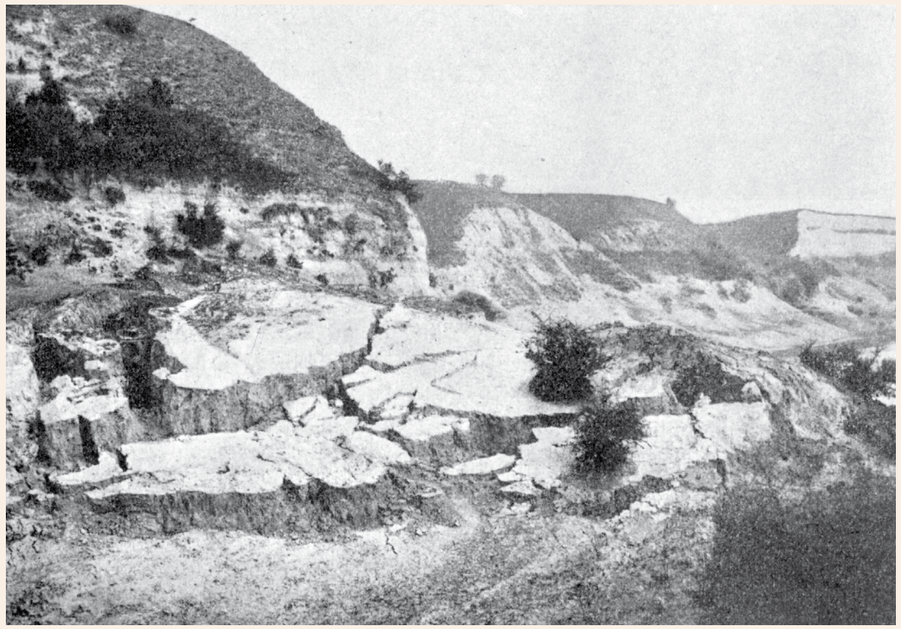


A Balaton-tó medenczéjének helyzete és felépítése

… Az Alpok, a Kárpátok, a dinári és balkáni hegylánczok veszik körül a magyarországi, nagy, fiatal harmadkori medenczét, amelyhez az erdélyi medenczét, valamint a stájerországi halomvidéket Zala és Vas vármegyék határain túl még hozzászámítjuk. Ezt a medenczét a Földtörténet utolsó időszakában a pontusi-pannóniai édesvizű plioczén-tenger foglalta el. Kongéria-kagylók népesítették a nagy állóvíz partjait; ehhez a kagylónemhez tartozott a Congeria ungula caprae is, amelynek a tihanyi–óvári szőlők magas partfalából kimosott és a tó hullámverésétől koptatott maradványait hasonlóságuknál fogva kecskekörmöknek nevezi és árulja a tihanyi gyereksereg és szép regét mesél róla, amíg a visszhang felé vezeti a látogatót. Ennek a tengernek 300 m tengerszintfeletti magasságban vannak partvonalai, a belőle kiemelkedő régi hegységek oldalain. Erdélyben és Stájerországban újabb hegyemelkedés tolta őket nagyobb magasságokba. …

Hosszú évek vizsgálódásaiból és tapasztalataiból azt a nézetemet közölhetem a magyar pontusi-pannóniai medenczének régibb történetéről, hogy az édesvízi nagy beltó a harmadkor utolsó szakaszában a földkéreg nagy hegyközti lesűlyedése helyén támadt és folytonos ingadozásokkal változtatta tükrét.

Ezekkel kapcsolatosan benne sikérvízi és szárazföldi agyag, homok, kavics, édesvízi mészkő és tőzeges lignitszéntelepekből álló lerakódások váltották fel egymást a Kárpátok gyűrűjén belül fekvő nagy medenczében.



Az 1908 április 19-iki akarattyai partrogyás hasadékai



A Balaton környék pannoniai faunája

Ezután is történtek sűlyedések, amelyek a külső vizektől elrekesztették a magyar medenczét lefolyástalan teknővé; ebben felszikkadt a pontusi kor állóvize és szárazföldi, sőt sivatagbeli állapotnak adott helyet, amelynek nyomaival, a szél pusztításaival az Alföld kerületén, különösen pedig a Balaton körül, sűrűn találkozunk. …

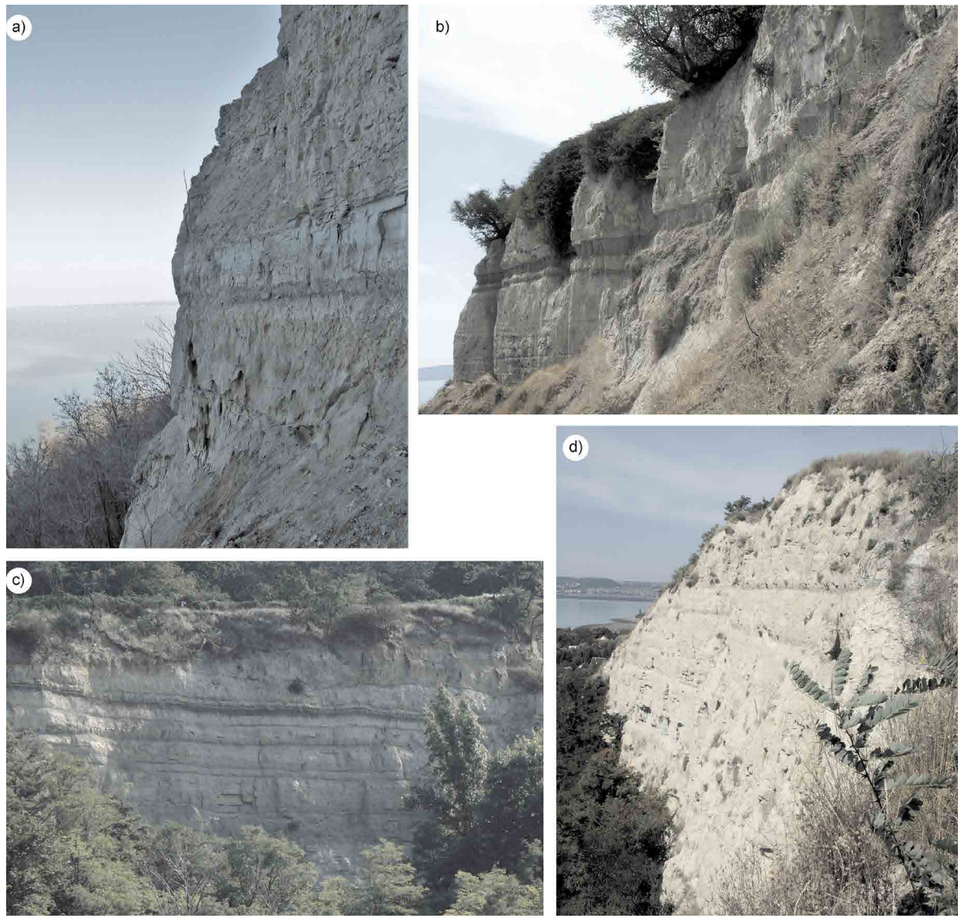
A Balaton környékének tüzetes vizsgálata bizonyítékokkal szolgált ahhoz, hogy a kongériás, fiatal harmadkori, pontusi-pannóniai rétegek általában vízszintes telepedésben körülbelül 300 m tengerszintfeletti magasságig körülveszik a Bakonyt és a pécsi hegységet. Összefüggő állóvíz lerakódásai ezek, amely az Alpok keleti aljától, a sopron–vasvár-megyei hegyektől, az Alföld keleti és északi hegykeretéig, délnek pedig messzire be a balkáni völgyöblözetekbe terjedt. A balatonkenesei magas part falain, Tihany félsziget kerületén, a Zala-folyó mellékén és Somogy-vármegyében sok helyt láthatjuk a kongériás rétegek vízszintes vonalait. Az a nagy partrogyás, amely Balatonkenesétől északra a Fancséroldal belsejét meredek falban tárta fel az 1912. évben, a tarka színezetű rétegek változatos egymásrakövetkezése Dobos-tortára emlékezető módon ad itt betekintést a kongériás rétegekből álló alföldi altalajba. Agyag, homok, vékony tőzeges lignittelepecskék, veres és sárga konkrécziós iszap váltakoznak ebben a falban. Ezekről leolvashatjuk, hogy nyugodt és mozgó víz, kiszáradó mocsaras fenék hányszor váltakoztak ezen a helyen. Hasonló feltárásokat adott az 1908.-i akarattyai nagy partomlás is. …

Részlet Lóczy Lajos A Balaton földrajzi és társadalmi állapotainak leírása *című könyvéből*

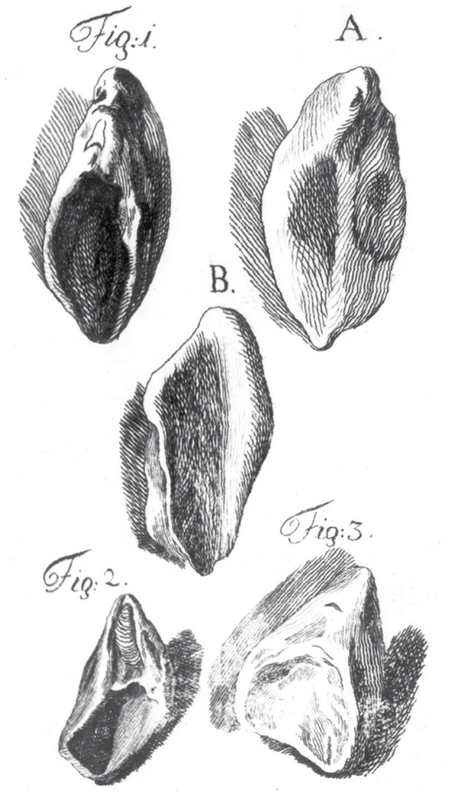
A Pannon-tó különleges víztömege a pannóniai korszakban, a késő-miocéntől a pliocén elejéig (11,6–4 millió év között) hullámzott a Kárpát-medencében. Más tengerekkel összehasonlítva nagyon jelentéktelen lett volna, viszont a földtörténet egyik legnagyobb és leghosszabb történetű tava volt, amely nem mellékesen páratlanul izgalmas evolúciójú élővilágnak adott otthont. Nagysága, mélysége, sótartalma, élővilága tekintetében erősen hasonlított a mai Kaszpi-tóhoz, és semmilyen közös vonása nem volt a Balatonnal. A hatalmas területű, ezer méternél mélyebb, csökkent sós vizű és bennszülött (endemikus) élővilággal rendelkező Pannon-tó medre a késő-miocén és a kora-pliocén során feltöltődött üledékekkel, és a helyét folyóvízi síkságok és árterek foglalták el. A Balaton medrét a legutolsó eljegesedés után, 15–8 ezer éve, a Dévényi-kapu felől érkező, a Bakonyon átcsapó, erős hideg szelek örvényei mélyítették, akárcsak a Velencei-tóét. A Pannon-tó megszűnése és a Balaton kialakulása között tehát millió évek teltek el, így a Balaton semmiképpen nem tekinthető a „Pannon-tenger" maradványának.

Mindezek ellenére igen szoros kapcsolat fűzi össze a távoli földtörténeti múltban létezett Pannon-tavat és a pleisztocén legvégén kialakult Balatont. A Balaton medre ugyanis a Pannon-tó homokból, kőzetlisztből, agyagból álló, laza üledékeibe mélyült. A földkéreg óriási mérleghintája ezt a hatalmas vastagságban felhalmozódó anyagot, mely az emelkedő Alpok és Kárpátok lepusztulásával érkezett a Pannon-tóba, több kilométeres mélységbe süllyesztette a Kisalföldön, ugyanakkor a Dunántúli-középhegység kiemelkedésével annak peremén felszínre, felszínközelbe emelte. Így tehát a Balaton által alámosott, meredek partok Tihanynál, Balatonfűzfőnél, Balatonkenesénél, Balatonakarattyánál, Balatonvilágosnál, Balatonföldvárnál, Fonyódnál mind-mind a Pannon-tó késő-miocén üledékeit tárják fel, és túlnyomórészt ugyanezek képezik a tó fenekét is, a mindössze pár ezer éves balatoni iszap alatt.

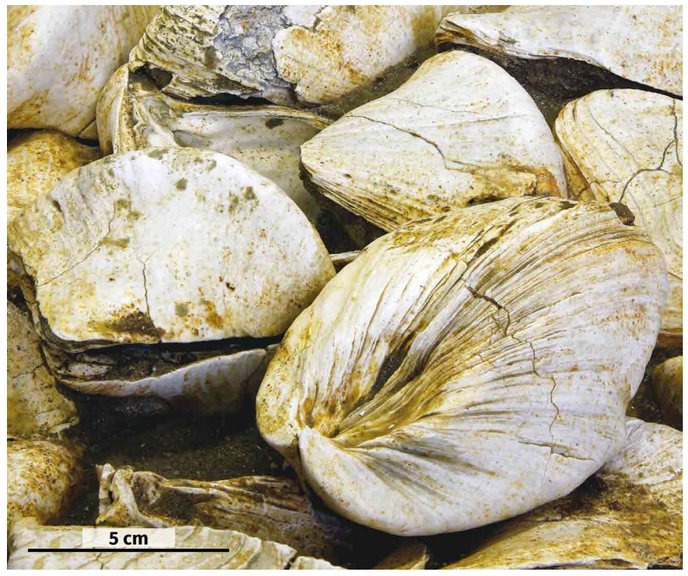
A Balaton medrét kivájó szél, majd a tó hullámverése mintegy ablakot nyitott a régvolt Pannon-tó üledékeibe, amelyen keresztül bepillantást nyerhetünk a késő-miocén tóban zajló üledékképződés menetére, a tó akkori endemikus élővilágára, és a táj arculatát formáló ősföldrajzi változásokra. Így válik érthetővé, hogy a Pannon-tó endemikus kagyló- és csigafaunájának tudományos leírása a XIX. század első felében a Balaton mellől indult, megelőzve ezzel a szintén pannóniai rétegekre épült nagyvárosok, mint Bécs, Pozsony, Budapest, Zágráb vagy Belgrád környékét. A kecskeköröm ábrázolására már a



A balatoni magaspartok: a) Tihany, b) Akarattya, c) Fonyód, d) Kenese



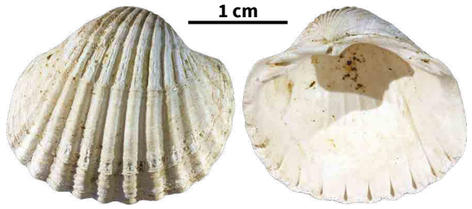
Kecskeköröm ábrázolása a XVIII. századból



Congeria ungulacaprae *Dobáról. Ennek a fajnak a lekoptatott búbja a „kecskeköröm"*

XVIII. századból is találunk példát; tudományos rendszertani helyének meghatározása azonban csak akkor történt meg, amikor a bécsi Paul Partsch, az udvari természettudományi múzeum kurátora két balatoni és két bécsi faj alapján felállította a *Congeria* nemzetséget 1836-ban. Egy évvel később a német Georg zu Münster leírta és ábrázolta a Pannon-tó első szívkagylófaját is, a *Lymnocardium apertum*ot, amely a kecskeköröm mellett a tihanyi gyerekek másik kedvenc kereskedelmi árucikke volt „úri főkötő” vagy „menyasszonyi főkötő” néven.

Az egyik legkorábban leírt pannóniai puhatestű fauna a tihanyi volt: Theodor Fuch bécsi paleontológus 1870-ben 42 fajt azonosított innen, amelyből 17-et a tudományra nézve új fajként írt le. A tihanyi feltárásokat, elsősorban a Fehérpart ma is megtalálható meredek falát, számos kutató vizsgálta az elmúlt 120 évben, és így ez az üledékes rétegsor a fölötte települő vulkanittal együtt nemzetközileg is számon tartott és gyakran hivatkozott rétegtani etalonná vált.



Lymnocardium apertum, *Tihany, Fehérpart*

A Pannon-tó üledékei azonban nemcsak a magaspartokon bukkannak a felszínre. A Somogyi-dombság kisebb homok- és agyagbányái, például a balatonszentgyörgyi „Csillagvár” tövében, Tabon, Szólád és Teleki határában, továbbá az M7-es autósztráda útbevágásai, vagy a Balaton-felvidéki és a Kisalföld peremi bazaltvulkánok szoknyáján, a szőlők között található kis kibukkanások is a tó fejlődésének szakaszairól árulkodnak. A környék feltárásai mellett maga a Balaton is hozzájárult a Pannon-tó rétegeinek megismeréséhez. Az 1980-as évektől kezdődően először a Földtani Intézet geológusai és kubai kollégáik, majd olasz és német kutatókkal együttműködve az ELTE geofizikusainak csapata nagy és ultranagy felbontású vízi szeizmikus méréseket végeztek a tavon (részletesen lásd a kötet 4. fejezetét). A felvételeken a balatoni iszap alatt kirajzolódott a pannóniai üledékes rétegek geometriája, amely alapján több, egymás mellett és fölött települő delta lejtője és az azokat tápláló mederhálózat is felismerhető.

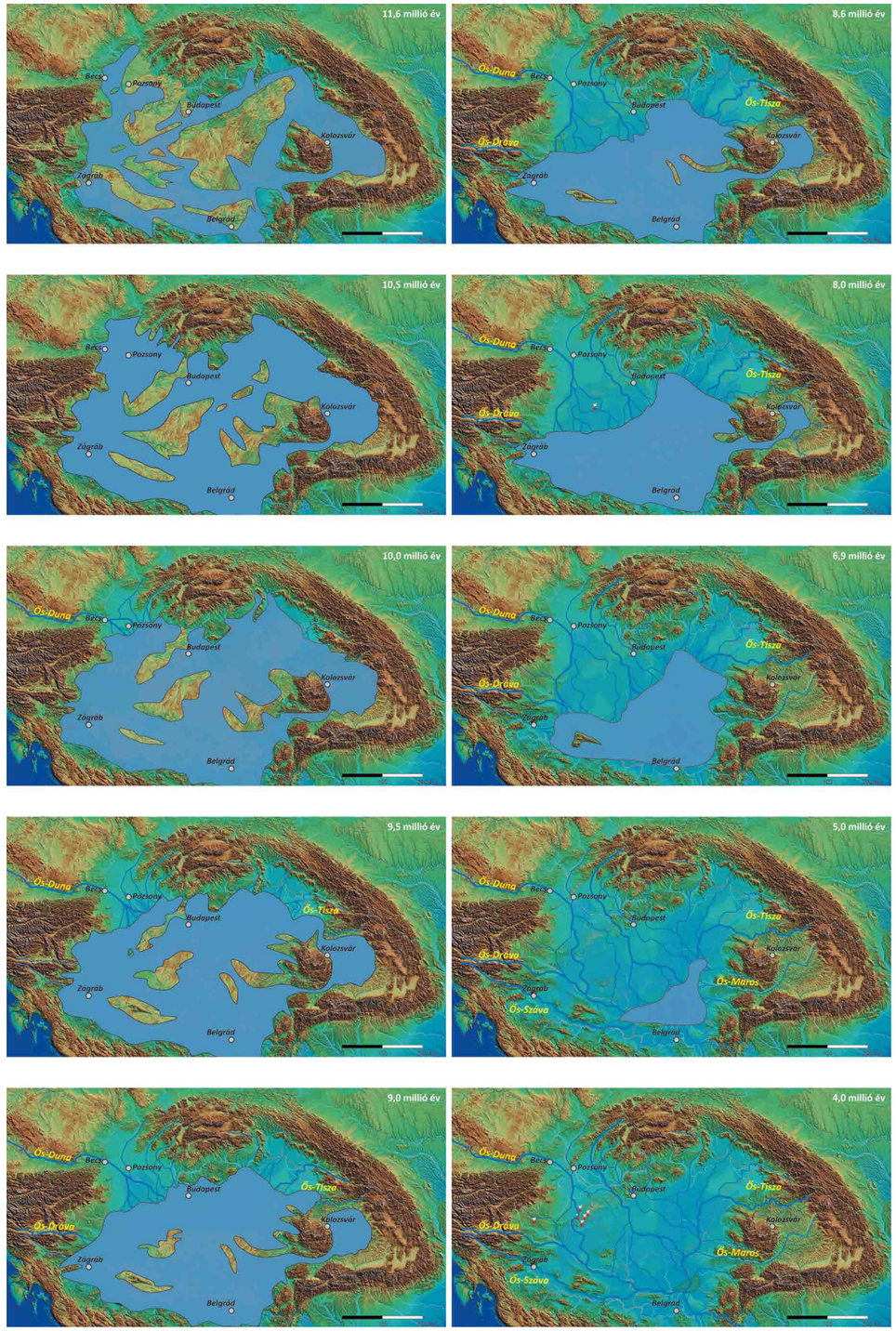
Tekintsünk tehát a Balaton nyitotta ablakra, és nézzük meg, mit árul el nekünk a Balaton és közvetlen környéke a késő-miocén Pannon-tó kialakulásáról, életéről és elmúlásáról!

Elmerülő szigetek partján

A Pannon-tó fejlődésének korai szakaszáról tanúskodó földtani képződmények a Balaton-felvidék nyugati részén, elsősorban a Tapolcai- és Káli-medencékben figyelhetők meg a felszínen.

A Tapolcai-tavasbarlang a Balaton-felvidék egyik legnépszerűbb, legismertebb látnivalója. A barlang a középső-miocén végén, az úgynevezett szarmata korszakban (12,7–11,6 millió éve) képződött mészkőben alakult ki. Ezek a mészkőrétegek tengerben ülepedtek le. Ekkor a Paratethys a Bécsi-medencétől Közép-Ázsiáig nyúló tenger volt, amelynek csak korlátozott kapcsolata lehetett az akkori Földközi-tengerrel.

11,6 millió évvel ezelőtt megkezdődött a Déli- és a Keleti-Kárpátok fokozatos kiemelkedése, emiatt a Kárpátoktól nyugatra eső terület víztömege elzáródott a Paratethystől, vízrajzilag önállóvá vált, és a Kárpát-medencében kialakult a Pannon-tó. Ráadásul nemcsak a Kárpátok íve emelkedett, hanem – meglepő



A Pannon-tó területének ősvízrajzi változásai a késő-miocénben és a pliocénben. Az ábrák hátterének a mai domborzatot választottuk – természetesen maga az Alp-Kárpáti hegykoszorú is változott az évmilliók során

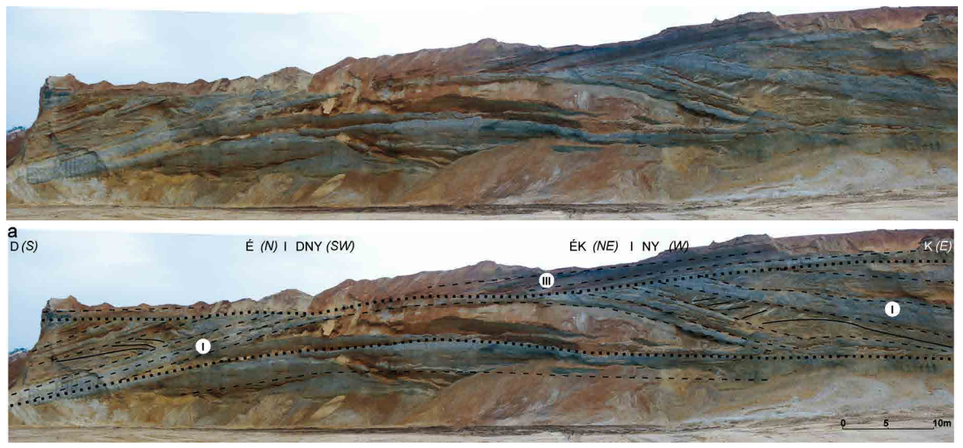
módon – a medence központi része is, ezért madártávlatból nézve kezdetben nem volt mindenütt egybefüggő, nagy vízfelület.

A kora- és középső-miocén lemeztektonikai események örökségeként egyes területek intenzíven süllyedtek, mások a medencén belül is különböző magasságokba emelkedtek. Így a tófenék domborzata és a partvidéke is erősen tagolt volt: sok száz méter mély vizű és nagyon sekély területek váltakoztak nagy, lapos hátú szigetekkel, vagy a peremek felől hosszan benyúló, kiterjedt félszigetekkel. Utóbbiak egyik legnagyobbika éppen a Dunántúli-középhegység volt. De sziget volt ettől délre Paks környéke, a Mecsek vidéke, sőt Szegedtől és Hódmezővásárhelytől keletre is félszigetek emelkedtek a víztükör fölé. A kiemelt szárazulatokon megindult a lepusztulás, és a felszínre került legkülönbözőbb, idősebb kőzetekből származó hordalékot a helyi vízfolyások a tópartra szállították, deltákat építettek, onnan a hullámverés kénye-kedve sodorta, halmozta a homokot a lapos fövenypartokra, de sziklás partszakaszoknak is ismerjük nyomát.



Hullámverés mardosta, sziklás tópart kőzetomladéka, Csór (fotó: Csillag Gábor)

Ezeknek a változatos, valahavolt partvidékeknek a nyoma a Balatontól északra több helyen is megfigyelhető. Akkoriban a Bakony–Budai-félszigeten, az erózió következtében sok helyen felszínre bukkantak azok az oligocén kavicsrétegek, amelyeket évtízmilliókkal korábban, hosszú, az Alpokból induló szállítást és görgetődést követően terítettek szét a folyók, s melyek



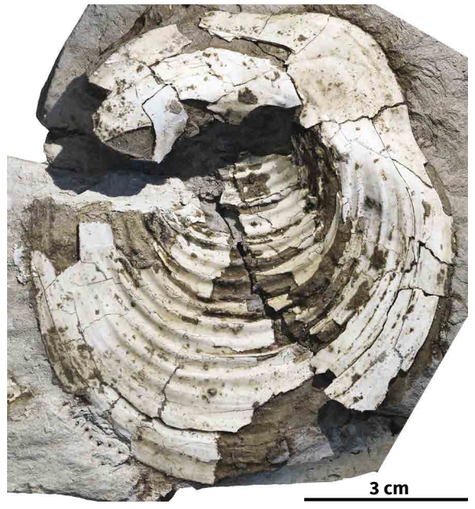
Közel 15 méter magas, kavicsból épülő deltalebenyek metszete a billegei kavicsbányában (Lesenceistvánd)



Meredeken dőlő, cemetált kavicsrétegek is rakódtak le a delták homlokán

utána sokáig a mélyben betemetődve pihentek. Mintegy 10 millió éve ezek az idősebb, koptatott, gömbölyded, főleg nagyon ellenálló kvarcitanyagú kavicsok a kiemelkedés és lepusztulás révén ismét belekerültek a nap ereje által, a víz közvetítésével hajtott körforgásba. A Pannon-tó partjára érkezve meredek frontú, kis kiterjedésű, ám a sekély vízben gyorsan épülő deltákat hoztak létre. Ezeket ma Tapolcától nyugatra több nagy kavicsbányában, és részben a Káli-medence kőtengereiben tanulmányozhatjuk.

A feltárásokban megfigyelhető a 10–20 méter magas delták geometriája, belső szerkezete, mely hűen tükrözi az épüléssel egy időben zajló, néhány méteres vízszintváltozásokat is. A legfelül nagyjából vízszintesen települő homok- és kavicsrétegek valóban az egykori vízszint helyzetét jelzik. Innen futnak 25–30° meredekségű – a kavics szemcseméretének megfelelő természetes rézsűszögben települő – homlokrétegek egészen a delta lábáig. Itt a kavics és a homok lerakódott, de a közöttük megbúvó agyagszemcsék tovalebegtek a tó vizében, hogy nagyobb távolságban



és vízmélységben ülepedjenek csak le. Az így képződött agyagot tégla- és cserépipari alapanyagként több hatalmas fejtőben is termelték, feltártsági helyzete miatt a középhegység északnyugati oldalán, például a Szentgyörgy-hegy oldalában a raposkai téglagyár fejtője dolgozta fel.

Az agyagos aljzaton az intenzív vízmozgást nem kedvelő puhatestű közösségek telepedtek meg. Ezekben, mint a Pannon-tó nyílt vízi puhatestű faunájában általában, vagy mint a Kaszpi-tó faunájában, a vándorkagylók és a szívkagylók családjába tartozó formák uralkodtak. A vándorkagylók családjából a *Congeria* nem maradványait találjuk a leggyakrabban, azon belül pedig a *Congeria czjzeki* fajt, ezért a geológusok gyakran csak „czjzeki-s márga” néven említik a bezáró kőzetet. A szívkagylók közül a nem tengeri (vagy másképpen „csökkent sós vízi”) Lymnocardiinae alcsalád képviselőinek vázai találhatók meg az agyagban. A csigák között leggyakoribbak a jelentős (több tíz méteres) vízmélységhez alkalmazkodott, különleges tüdőscsigák (mocsári csigák és tányércsigák családjai).

Valenciennius sp. Pápateszérről



Az egykoron a partra sebesen kifutó hullám finom lemezes szerkezetű homokot halmozott fel, Hegyesd homokbánya



Melanopsis fuchsi, *amely évmilliókon át megőrizte a színét és mintáját*

A Tapolcai-medencéhez hasonlóan, homokos és kavicsos delták épültek a mai Káli-medence területén is. Az itteni „kőtengerekben”, természetes sziklakibúvásokon – melyek felszínét a jégkorszaki szelek csiszolták fényesre – különösen jól megfigyelhetőek a gyöngyszerű, tejfehér kvarcit és egyéb szürke-fekete kavicsok. Az üledéket csak jóval annak lerakódása után, alig 2 millió éve alakították, cementálták kemény, ellenálló kőzetté a mélyből táplálkozó oldatok, egykori talajvízből fakadó források. A „kőtengerek” hatalmas, helyben tornyosuló vagy éppen széttöredezett tömbjei Szentbékkálla, Mindszentkálla és Kővágóőrs határában azonban nemcsak kavicsból, hanem kiválóan osztályozott, aprószemcsés homokkőből is állhatnak.

A rétegek között egy-egy íves kavicszsinór, vagy finom, párhuzamos, közel vízszintes rajzolat utal arra, hogy egykor itt húzódott egy erős hullámverésnek kitett, fövenyes partszakasz. A hullámtörést követően a partra kifutó, majd onnan visszaáramló sebes áramlás méretük szerint osztályozta a szemcséket, befejezve a homok, kavics egy részének szállítását. Az egykori vízáramlásról tanúskodik a kőzetben több helyen megfigyelhető úgynevezett keresztrétegzés is. Ezt arról ismerhetjük fel, hogy néhány deciméteres – méteres vastagságban, a rétegek határával 15–25°-os szöget zár be a párhuzamos milliméteres rajzolat.

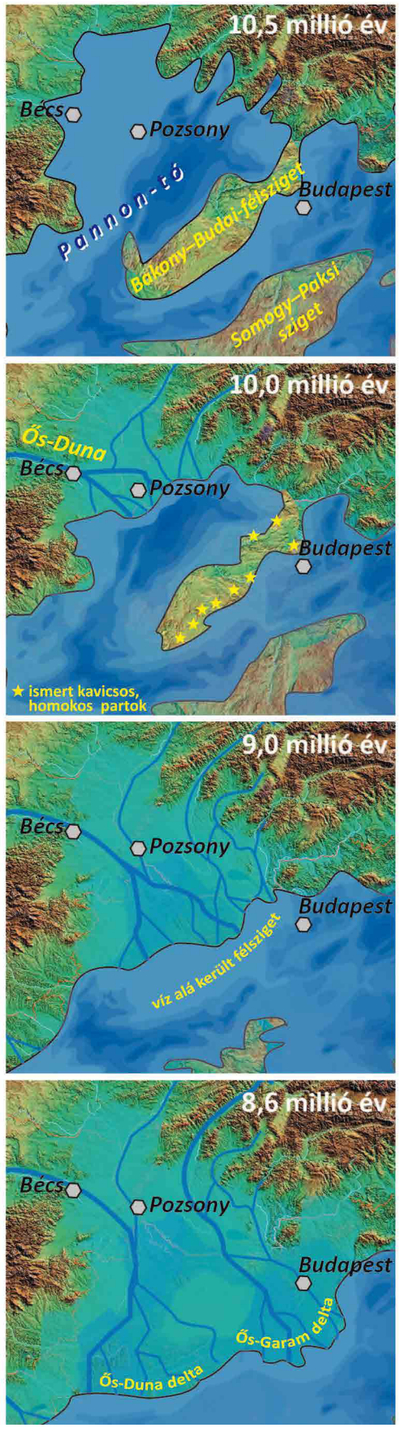
A delták hordalékát a Bakony–Budai-félsziget déli partjával párhuzamos, hullámverés keltette áramlások sodorták messze kelet felé, időnként egy-egy öblöt homokkal feltöltve. Az öblök a feltöltődés után elmocsarasodtak, amit vékony lignitrétegek jelezhetnek. A hosszú szállítás végére a legtöbb ásványszemcse elkopott, és főleg csak a kvarcszemcsék maradtak a homokban, de a mocsarakból származó szerves savak oldó hatásának is szerepe lehetett abban, hogy a homok teljesen megtisztult. Ez a tiszta kvarchomok kiváló üveggyártási nyersanyag, melyet például Salföldön, Kővágóőrsön vagy sokkal keletebbre, Fehérvárcsurgón is bányásztak egykor.

A keményebb, ellenállóbb rétegek érdekes kövületeket rejtenek: kagylók, csigák, levelek és fenyőtobozok lenyomatait. Ezek eredeti szerves vagy meszes anyaga megsemmisült, csak az egykori élőlény „hűlt helye” található meg a kőzetben. Jobb példányokat leginkább az egykor bányászott mindszentkállai kőtenger tömbjeiből ismerünk. A kagylók és csigák a Pannon-tó endemikus faunájának leggyakoribb nemeit képviselik: *Congeria*, *Lymnocardium*, a folyamikagyló-félék családjába tartozó *Unio*, és a szurokcsigák családjába tartozó *Melanopsis* került eddig elő. Az anyagból meghatározott fajok alapján a kőzet körülbelül 10 millió éves, egykori keletkezési környezete pedig – ahogy azt már a kőzetanyagból is láthattuk – a Pannon-tó sekély, erősen mozgatott vizű, parti zónája volt. A növénymaradványok alapján az öböl partjának növényzete nagyon hasonlíthatott a mai Földközi-tenger mentén elterjedt töviscserjés, illatos-olajos bozótos növényzetre, a macchiára. A kőzetből előkerült örökzöld viaszcserje (*Myrica*) és benge (*Rhamnus*)-félék, illetve az aleppói fenyő mind arra utalnak, hogy 15–18 °C lehetett az évi középhőmérséklet, és valószínűleg télen sem fagyott be a tó.



Lignitrétegek a fehérvárcsurgói homokbányában

A Pannon-tó történetének első fejezetében oly fontos szigetek és félszigetek végül elmerültek a tó vizében. Némelyik, mint a bakony–budai és a paksi 9 millió, míg a délebbre elterülő mecseki, algyői vagy battonyai magaslatok 8 millió évvel ezelőtt. Ennek az volt az oka, hogy a Kárpát-medence belseje alatt ezidőtájt meglehetősen gyorsan süllyedt a földkéreg, és ehhez kezdetben csapadékos éghajlat társult, folyamatosan biztosítva a süllyedő területeken a víz térfogatának gyarapodását. Eközben a tó elérte legnagyobb kiterjedését; a korábbi szárazulatok felett ugyan csak 100–200 méter mély lehetett, másutt azonban a vízmélység meghaladta az 1000 métert is. Hatalmas víztükrével és tengernyi mélységével a Pannon-tó bátran pályázhatott a föld legnagyobb és legmélyebb tava címre.



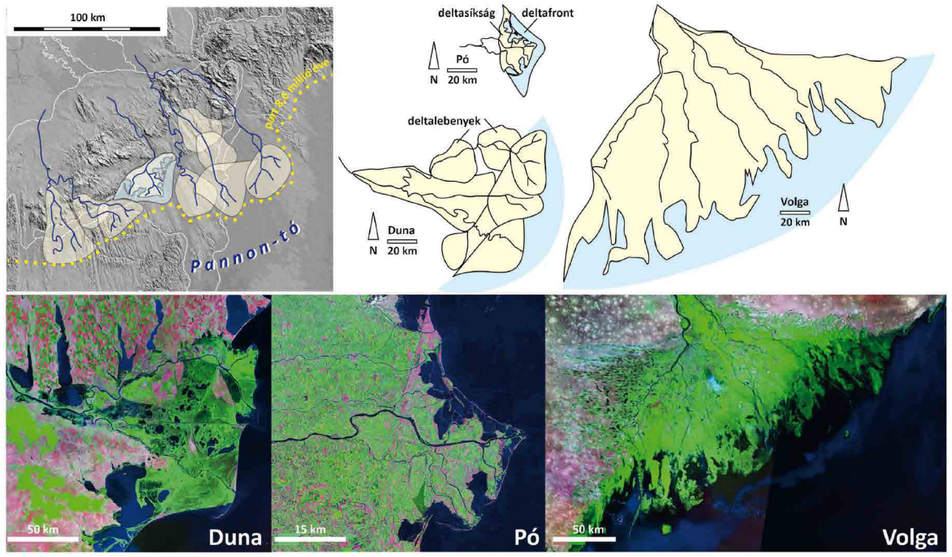
A Pannon-tó és szigetei ősföldrajzi története a Dunántúlon

Az Alpok és a Kárpátok homokja

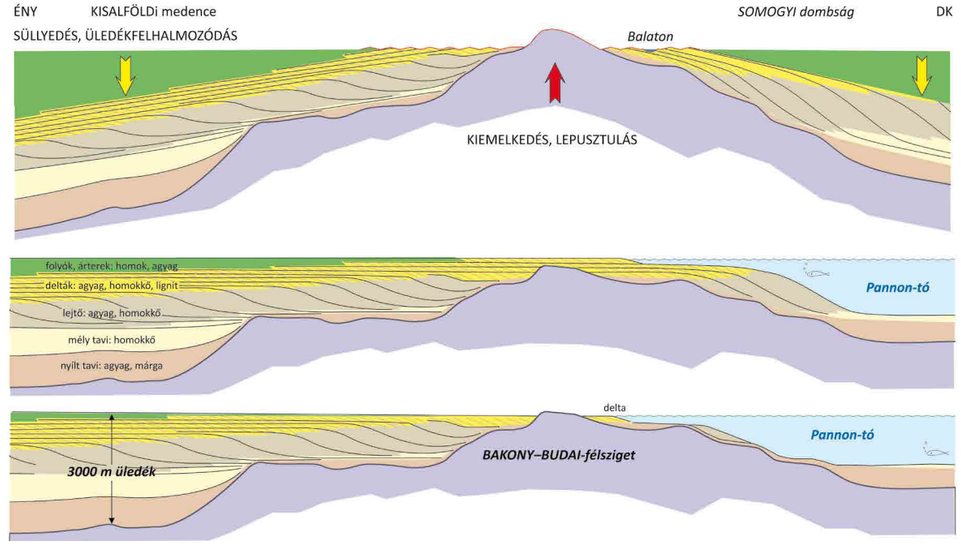
Miközben a Pannon-tó egyre újabb és újabb területeket hódított el a szárazföldtől a süllyedő Kárpát-medence középső és déli részein, északnyugat és északkelet felől – a lassan, de fokozatosan emelkedő Alpok és Kárpátok irányából – megkezdődött a hatalmas tómeder feltöltése, és ezzel a tó történetének második fejezete. Az emelkedő hegységkeret szikláinak kaviccsá, majd homokká és agyaggá morzsolt törmelékét hegyi patakok juttatták le az Ős-Duna, az Ős-Tisza és mellékfolyóik szélesebb völgyeibe, majd ezek a folyók szállították tovább a hordalékot a Pannon-tó partjára, ahol széles deltákat építettek belőlük. A korábbi félszigetek kavicsdeltái eltörpültek volna ezen homokból és agyagból álló, hatalmas folyódelták mellett, melyek nagyon hasonlóak a mai Pó, vagy akár a mai Duna deltájához.

A Dunántúlon az Alpokból és a Nyugati-Kárpátokból érkező hordalékszállítás mintegy 10 millió évvel ezelőttől követhető nyomon. Miközben a Kisalföld sok száz méter mély medencéje feltöltődött üledékkel, addig a Bakony–Budai-félsziget fokozatosan víz alá került. A feltöltődés során a tó partvidéke fokozatosan egyre délebbre tolódott: a delták körülbelül 9 millió éve elérték északnyugat felől a Dunántúli-középhegységet, és fél millió évvel később már messze a Balatontól délre épültek.

A medencék üledékes feltöltődése azonban összetett folyamat. A földkéreg süllyedése, a lerakódott laza üledékek tömörödése, a folyómedrek természetes áthelyeződése, és mindenekelőtt az éghajlat változásai miatt az egyszer már feltöltött, lapos térszínek újra és újra víz alá kerülhetnek. Ezen partmenti területeken a vízmélység növekedése ritkán lehetett nagyobb, mint 50 méter, miközben a partvidék 50 km-t is hátrálhatott egy-egy elárasztás során. A folyódelták épülése pedig újrakezdődött. Az ismétlődő elöntések, a feltöltődés és a szárazulattá válás folyamata akár több tucatszor is lejátszódhatott ugyanazon a helyen, mielőtt a vidék örökre szárazulattá vált volna. Így történt ez a Balaton környékén



A Pannon-tó egykori deltáinak mérete mai folyódeltákhoz viszonyítva

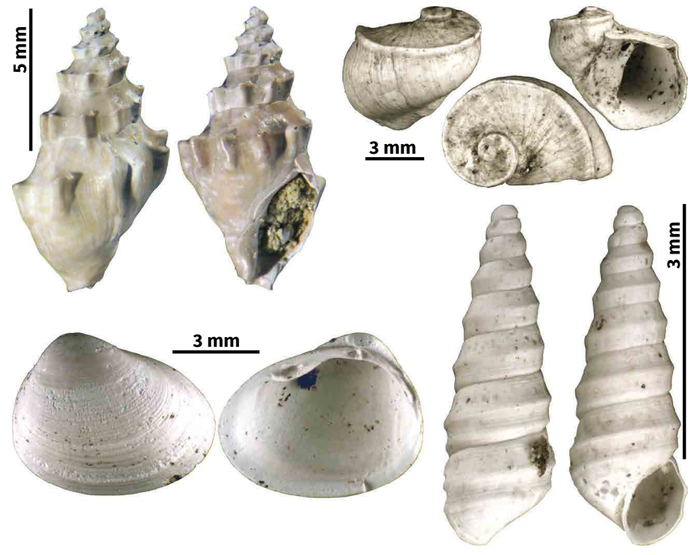


A Bakony–Budai-félsziget és a Pannon-tavi deltarendszer metszete 9–8 millió éve és a mai, szerkezeti mozgásokkal kialakított helyzetben

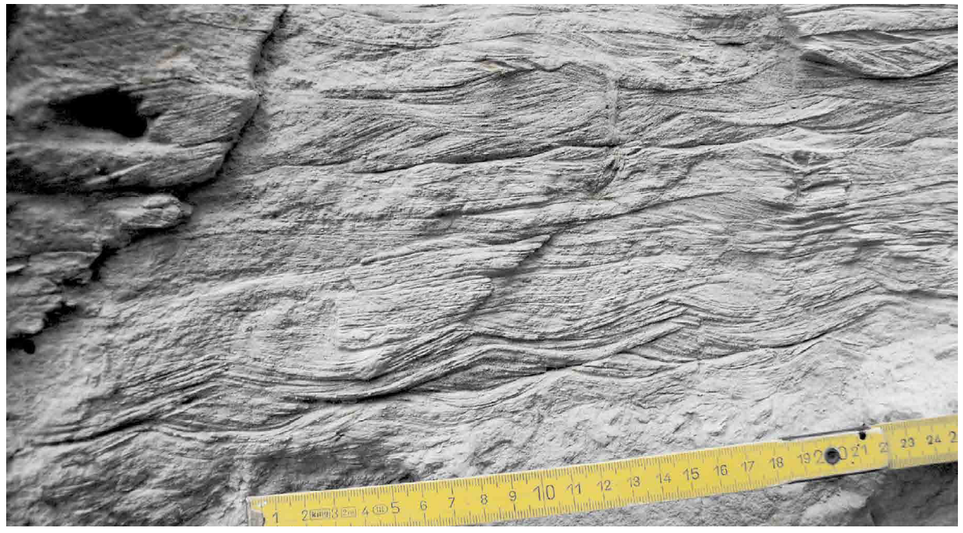
is. A folyamatot és az így kialakuló, ismétlődő rétegsorokat a Balaton hullámverése által kialakított magaspartokon, egyéb környékbeli feltárásokban (például a Balatonfűzfő és Papkeszi között fekvő Papvásár-hegyen) és a tó területén mért ultranagy felbontású szeizmikus szelvények segítségével tanulmányozhatjuk.

A magaspartokat változatos szerkezetű, apró-szemcsés homok, kékesszürke, kissé meszes és szürke-tarka, szervesanyagdús agyagrétegek alkotják. Utóbbiak jellegzetes, közel vízszintes, sötét sávoknak látszanak a távolból. Az üledék szemcsemérete és a kapcsolódó szerkezetek 4–8 méter vastagságban ismétlődnek. A ciklusok alján, az agyagban néhány centiméteres homoklencsék, ritkán kagylóhéjtörmelékből álló rétegek találhatók. Nagyon gyakoriak a *Melanopsis*-félék és olyan *Lymnocardium*ok, melyek a Pannon-tó sekély, partközeli vizeiben éltek, és viharok kiváltotta hullámmozgás mosta össze és halmozta fel őket a parttól távolabbi, néhány méter mély vízben.

A rétegsorokban felfelé haladva finom, milliméteres vastagságú lemezes szerkezetű homokot találunk, melynek kötegei szélesebb sávokban, íves felszínek mentén, helyenként centiméteres, kifejezetten hullámos formákba



Ősmaradványok a tihanyi Fehérpartról



Hullámzás alakította keresztlemezes szerkezet homokkőben Balatonkenesén

rendeződnek. Ezek a geometriai jegyek segítenek annak meghatározásában, hogy hullámzás vagy áramlás hatására ülepedett-e le a homok a sekély, partközeli vízben. A kenesei Tatárliknál, a barlang bejárata feletti réteglapok őrizték meg a hullámfodrozta felszíneket. Az is gyakori, hogy a homok lemezessége néhol ferdén vagy függőlegesen megszakad, az ujjnyi vastag rést eltérő üledék tölti ki. Ezeket olyan aprócska élőlények – kagylók, rákok vagy férgek – ásták, amelyek védelmet kerestek az erős vízmozgástól és a ragadozóktól. Másutt a lemezességet gömbölyded örvénylő formába torzította a laza üledékből heves lökéshullámmal távozó pórusvíz.

Az üledékciklusokat parányi növényi törmeléktől szürke, ritkán szénült fadarabokat is tartalmazó, kissé szenes agyag zárja, melyben kizárólag édesvízi puhatestűek, például bödöncsiga (*Theodoxus*), festőkagyló (*Unio*), tavikagyló (*Anodonta*), tányércsiga (*Planorbarius*) fordulnak elő. Ezek a rétegek a partmenti, gazdag növényzetű mocsarakban halmozódtak fel. Időnként a mocsári rétegeket áramlásról tanúskodó, keresztrétegzett homokok helyettesítették, melyek kisebb sekély medrek kanyargásának és feltöltődésének a termékei.

A feltárások sajnos nem elég nagyok ahhoz, hogy a kőzettestek nagyobb léptékű szerkezetét vagy kapcsolódásait is megfigyelhessük, ami pedig szükséges lenne az őskörnyezet rekonstruálásához. Szerencsére azonban a magaspartokon kibukkanó kőzetek a Balaton alatt is folytatódnak, ahol mesterségesen keltett hullámok visszaverődéseit rögzítő geofizikai módszerekkel leképezhető az előbb említett nagyobb architektúra. A felvételek alapján két különböző léptékben is világosan látszik, hogy az üledék nem egy dobostorta felépítését követi, hanem valójában 5–6°-os dőléssel épülő rétegek sorozata jött létre.



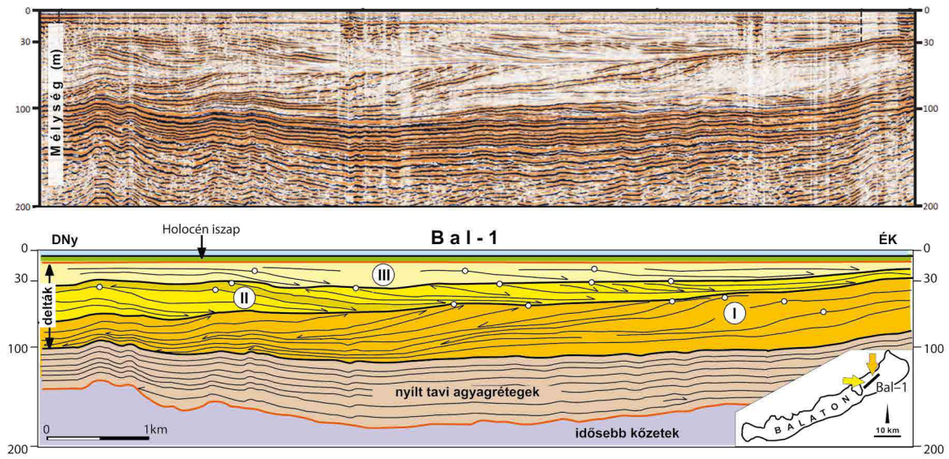
Szénült uszadékfa Fonyódról, melyet a tóban élő fúrószervezetek előzőleg kilyuggattak, majd a fadarab betemetődésével a lyukakat üledék töltötte ki

A Tihanyi-félszigettől nyugatra, a Balaton jelenkori iszapja alatt 50–80 méter magas lejtőkkel kelet, délkelet felé épülő delták szerkezete ismerhető meg. Tihanytól keletre hasonlóan nagy formák találkozása rajzolódik ki az alábbi szelvényen: egy délnyugatra épülő lejtőre (I.) egy keletre tartó (II.) telepszik rá, mindkét deltalebenyt ferde metszetben mutatja a szelvény. Siófok partjainál az előbbieknél kissé fiatalabb üledékek szerkezete tárul elénk. Itt a feltárásokból ismert, csökkenő vízmélységet jelző üledékciklusokhoz hasonlóan, csupán 5–8 méter vízmélységben terültek szét a lebenyek, melyek tetején még a kis medrek is kirajzolódnak. Ezek mintázata több helyen kitérképezhető, szövedékesen egymásba kapcsolódó, majd újra szétágazó vízhálózatot alkot, mely sok jelenkori delta síkságán megfigyelhető. Más esetekben nagyobb, kanyargós medrek mutatkoztak a felszín alatt, melyek szintén gyakori elemei a mai deltáknak.

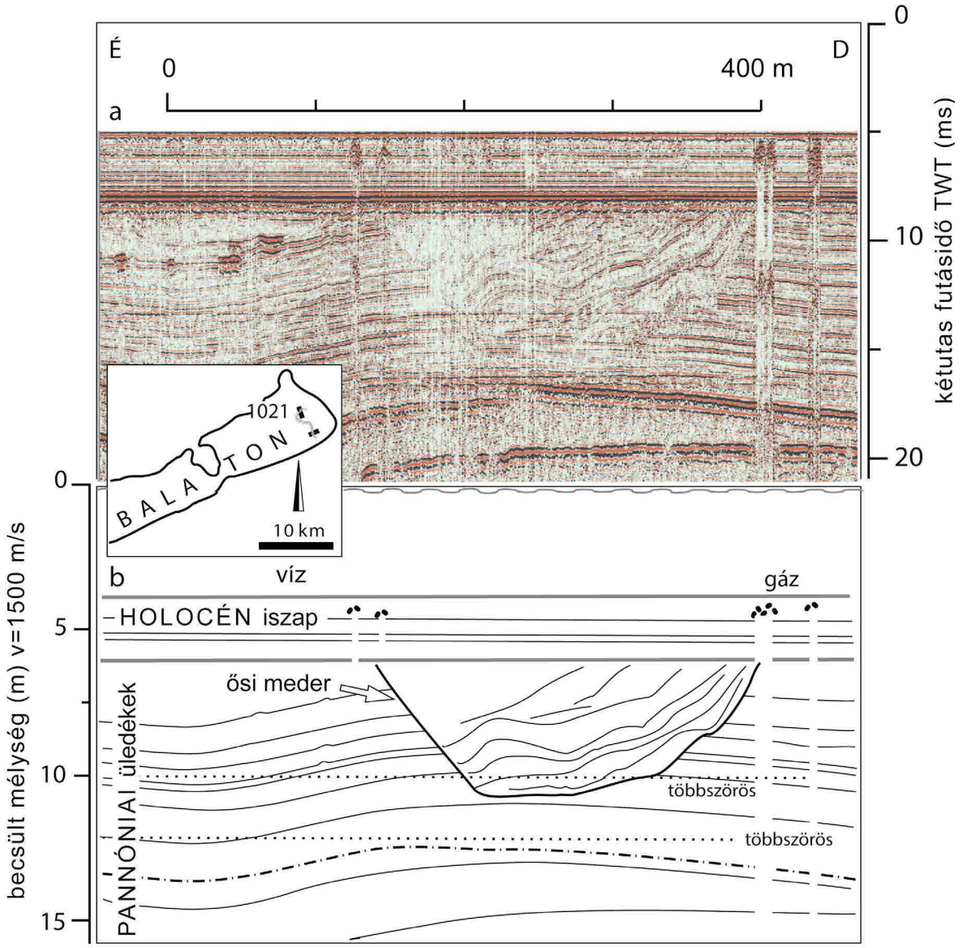
Mind a magaspartokon kibukkanó, mind a Balaton alatt körülbelül 100–120 méter mélységig leképezhető kőzetek a késő-miocén Pannon-tó sekély, hullámveréses vizében, csendesebb öbleiben, a part közelében kialakult medrekben és mocsarakban rakódtak le, melyek együttesen a tóba ömlő folyók deltalebenyeit alkották. A viszonylag sekély vízben a nagy mennyiségű behordott üledék a delta gyors előrenyomulását eredményezte.

A rétegsorok üledékciklusai a tó vízszintjének ingadozásával jöttek létre. A fokozatosan sekélyebb vízben lerakódott rétegek ismétlődései bizonyítják, hogy a Pannon-tó vízszintje időnként pár métert megemelkedett, ezzel visszaállította a nyílt, sekélyvízi körülményeket, majd az így nyert helyet a partra érkező nagy mennyiségű hordalék ismételten feltöltötte. Arra is találunk példát a magaspartokon – például Fonyódnál –, hogy az üledékciklusok vastagságát jócskán meghaladó, 15–20 méter mély bevágódást jelző felszínek felett durva keresztrétegzett homok található, a korábban lerakódott agyagrétegek felszaggatott tömbjeivel váltakozva. Ennek képződése a Pannon-tó szintjének legalább ekkora mértékű eséséhez kapcsolható.

Az éghajlatváltozások vezérelte vízszintingadozások, a kéreg süllyedése és az üledékfelhalmozódás versenyét végül az utóbbi nyerte. A Balaton környékén rekonstruált partvidék és deltaépülés apró lépésekkel dél, délkelet felé haladt, végül a vidék tartósan szárazulattá vált,



Deltalebenyek találkozása nagy felbontású szeizmikus szelvényen, a Füredi-öbölben



Egy nagyobb, körülbelül 5 m mély, oldalazó, deltasíksági folyómeder szeizmikus képe és értelmezett szelvénye

a delták helyét kiterjedt alföld és az azt behálózó folyóvizek és árterek foglalták el.

A Pannon-tó után

Mikor a Pannon-tó Balaton környéki története a végéhez közeledett, még utoljára drámai események zajlottak az elmocsarasodott, időnként vízzel borított, feltöltött deltasíkságon. Hatalmas robbanások rázták meg a vidéket és néhány száz méter átmérőjű, tölcsér alakú kráterek-kürtők mélyültek. Ezek peremén gyűrű alakban vulkáni hamu és salak halmozódott fel, míg a kirobbant kőzettörmelék egy része visszahullt a kráterbe. Az ismétlődő robbanások – amelyekhez a mélyből feltörő láva és a víz keveredésével képződő gőz együttes hatása kellett – egyre mélyítették ezeket a vulkáni tölcséreket, és ezzel a korábban lerakódott, egyre idősebb – pannóniai, sőt triász, perm és szilur korú – kőzetek darabjait hozták a felszínre a vulkáni eredetű szemcsék mellett. Ezeket az idős kőzeteket több helyen megfigyelhetjük eredeti rétegsorrendjükben a Balaton-felvidéken vagy a Balatonfő területén, így pontosan beazonosíthatók.



Feltépett agyagtömbök és keresztrétegzett homok Fonyódon

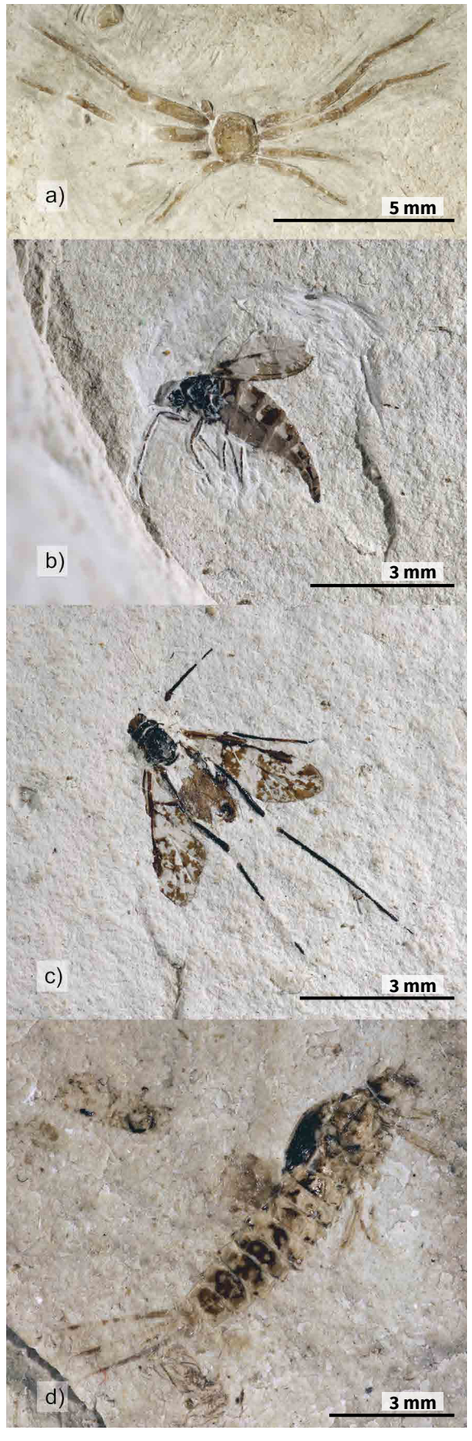
A tavi képződményekre települő, vulkáni porból, homok méretű szemcsékből, és több deciméter átmérőjű bombákból lerakódott vulkáni üledékes kőzeteket ma Tihany környékén tanulmányozhatjuk. A barátlakások fülkéinek falán a rétegek rajzolata iszonyú sebességgel kavargó, forró vulkáni hamuárak nyomát, azokból épülő buckák alakját mutatja. A puha hamuba a robbanások által magasba röpített bombák csapódtak be, melyek bemélyedései szintén jól kivehetők. A bazaltos vulkáni kőzetdarabkákban megbúvó ásványszemcsék radiometrikus korának meghatározásával azt is tudjuk, hogy ez a vulkán körülbelül 7,9 millió éve volt aktív.

Ezt követően már csak a mélyben felmelegedett és sok oldott ásványi anyagot szállító víz tört a felszínre, gejzírek formájában. A hévforrások helyét a Tihanyi-félsziget gejzírkúpjai, az elfolyó vízből kialakuló, meleg vízű tavakat többek közt Papkeszi környékének táblás, csengő hangú, igen kemény és ellenálló kovás mészköve jelzik. Utóbbi növényi szárak, levelek, a tóban élő mikrobák és csigák nyomát is őrzi.

A vidéken megszülető kis vulkáni mező a Pannon-medencét alkotó földkéreg elvékonyodását jelzi, és az alatta elterülő, képlékeny földköpeny áramlásairól közvetít üzenetet. Egy-egy ilyen vulkán a megelőző 2–2,5 millió évben is ki-kirobbant a medencében távolabb, akár a Pannon-tó vize alatt is – például a mai Duna–Tisza közén, Kecel, vagy még délebbre Ruzsa környékén –, miközben némelyik több lávát is ontott. Ezeket a korai kitöréseket követően a vulkáni működés kissé elcsitult. No nem véglegesen, hiszen a köpenyt és a kérget alakító lemeztektonikai folyamatok a mélyben nem álltak le. 4–2,5 millió évvel ezelőtt a forró köpenyanyag gyors feláramlása miatt újrakezdődött a vulkáni tűzijáték. Ekkor alakultak ki a Balaton-felvidék és a Káli-medence képét ma meghatározó vulkánok (részletesen lásd a kötet 6. fejezetét).



Perm korú vörös homokkő bomba Tihanyban



A pulai alginitbányából előkerült ősi „rovargyűjtemény”: a) pók, b–c) légy és d) kérész lárva

Idővel olyan kis vulkáni kráterek is létrejöttek, melyben a rövid ideig tartó vulkáni működés után meredek falú, apró, de viszonylag mély tavak maradtak vissza. Ilyen egykori krátertó maradványát találhatjuk Nagyvázsonytól nem messze, Pula határában. A tavacskák vizében buján tenyészett az alga, és ezért gyakran pangó, oxigénszegény víz alakult ki, főképpen a tó aljzatán. Ilyenkor a mélyben halmozódó üledék régi, kissé málló újságkötegekhez hasonló szerkezetű maradt, hiszen nem éltek ott az iszapban turkáló vagy oda beásó élőlények sem. Az elpusztult algák szerves anyaga – például a lebegést biztosító olajcseppecskék – oxigén hiányában nem bomlott le, hanem megőrződött. Meglepő, de az így létrejövő „kőzet” (alginit) lemezkéit gyufával meg lehet gyújtani.

A furcsa üledék másik vonzó tulajdonsága, hogy képes volt páratlan részletgazdagsággal megőrizni a legkülönfélébb, a tóba került vagy a vízben élő állatok vagy levelek lenyomatát. Szenzációs a kövült rovargyűjtemény: a több millió éves szúnyogok, legyek, pókok, vízi lárvák részletei – a hártyás szárny rajzolata, a szemek szerkezete vagy a szőr a lábakon – kísértetiesen hasonlítanak a ma élő társaikéhoz. A tó azonban nem csak aprócska állatok temetője volt. A part, valószínűleg, mint itatóhely, nagy testű gerinceseket is vonzott. Némelyik pórult járt és belecsúszott a tóba, ahonnan a meredek és omladékony part miatt nem tudott kimászni. Ezen szerencsétlen jószágok leghíresebbje a pulai orrszarvú, melynek meglepően épen megőrződött maradványait ma Zircen, az MTM Bakonyi Természettudományi Múzeumában csodálhatjuk meg.

A Dunántúli-középhegység területének süllyedésével a delták, a különös vulkánok, és a feltöltött krátertavak is apránként eltemetődtek, vastagabb-vékonyabb folyóvízi üledék takarta be őket. Az Ős-Duna és mellékfolyói sokáig kanyarogtak a Kisalföld felől Zalán és Somogyon át a Dráva vidéke vagy a mai Duna–Tisza köze felé.

A Pannon-medence kéregfejlődésének következő szakaszában, amikor megindult a korábban süllyedő medence egyes részeinek, így a Dunántúli-középhegységnek a máig tartó emelkedése, a laza fedő üledékek lepusztulása során ismét a napvilágra kerültek a vulkánok és a Pannon-tó parti képződményei is. Ekkor a Duna már a mai nyomvonalára tért, de más folyók továbbra is követték a régi utat. Medrük kanyarulatai most is felismerhetők a Balaton alatt és a tótól délre a tőzegvastagság-térképeken, vagy éppen a már sokat emlegetett, nagy felbontású szeizmikus felvételeken. Az erre járó folyók és a jégkorszak során fúvó erős szelek elszállították a felszínre kerülő laza homok javát, a hegységen átbukó szélörvények kimélyítették a Balaton medrét. Ahol a tavi üledék keményre cementálódott, mint a Káli-medence kőtengereinél, ahol a lávakőzetek közelsége vagy a gejzírekből táplálkozó tavak kemény kovás mészkőrétegei megvédték, ott több maradt belőle.



A Balatontól délre a kiemelkedés – és így a lepusztulás – mértéke gyorsan csökkent, sőt egyes területeken a süllyedés és a felhalmozódás folytatódott. Víz- és kőolajkutató fúrásokban és a mély szeizmika „röntgenképein” követhetjük a Balaton vidékén felszínen levő tavi üledék déli folytatását. Hála a felszínt és a mélyt alakító sokféle földtani folyamatnak, a természetes és mesterséges kibúvásoknak, és nem utolsósorban a Balaton által a múltba nyitott ablaknak, a Pannon-tó történetének ma már sok részletét ismerjük. A múlt kíváncsi kutatói ezt nem szűnő hévvel nyomozzák tovább.

A szép balatoni tájon járva gondoljon a kedves Olvasó arra is, hogy az egykor itt hullámzó hatalmas Pannon-tó rétegei rejtik ivóvizünk, kőolaj- és földgázkészletünk egy jelentős részét, a tóban ülepedett kavicsot és homokot betonba és útalapba keverjük, a homokból megolvasztva üveget nyerünk, de ez a rétegsor adja az agyagot is, amelyből házunk téglája és a tetejét fedő cserép készül. Nem utolsósorban pedig a múlt környezetváltozásaiból nyert tapasztalatot, tudást használhatjuk a jelen megértésére és környezetünk jövőbeli megóvására is.

A pulai orrszarvú

Ajánlott irodalom

Müller P. 2010: Az újabb neogén. In: Karátson D. (szerk.): Pannon enciklopédia: Magyarország földje kitekintéssel a Kárpát-medence egészére, Urbis kiadó, Bp. 137–139.

Magyar I., Sztanó O. 2010: Káli-medence, Mindszentkálla, Szentbékálla, Balatonfelvidék: a kőtengerek titkai. In : Haas J. (szerk.) A múlt ösvényein – Szemelvények Magyarország földjének történetéből, MFT, 150–154.

Sztanó O., Magyar I. 2010: Balatoni magaspartok: Tihany, Balatonkenese, Fonyód: folyótorkolatok és mocsarak a Pannon-tó partján. In : Haas J. (szerk.): A múlt ösvényein – Szemelvények Magyarország földjének történetéből, MFT, 156–159.



Lecanites lóczyi

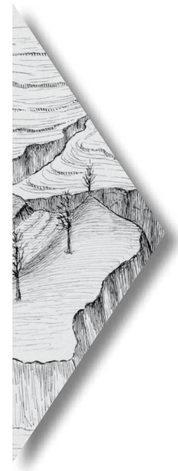
MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

Németh Károly, Harangi Szabolcs, Csillag Gábor, Karátson Dávid

A Balaton-felvidék alkálibazalt-vulkanizmusa

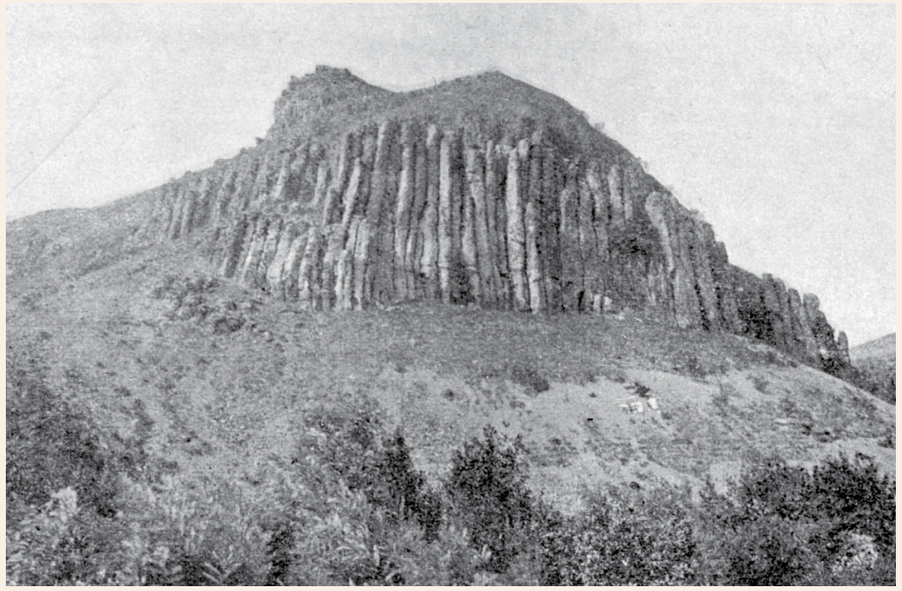
6

Valószínűleg nincs olyan magyar ember, aki ne ismerné fel bárhol, bármikor a Badacsony sziluettjét. A Balaton partján sétálva, vagy egy hajó fedélzetéről nézve mindenki százszor, sőt ezerszer megcsodálta már a Balaton-felvidék bazaltvulkánjainak jól ismert, jellegzetes formáit. Nincs ezzel másképp a kutató sem: a környék első természettudományos érdeklődésű utazóitól máig mindenkit megragad e látvány. Már az első földtani képződményeket jelző térképeken megjelentek a kis „bazaltvakondtúrások" a Balatontól északra. Tudományos tanulmányozásuk az 1800-as évek közepén, Hofmann Károly vizsgálataival kezdődött, de a részletes kutatás id. Lóczy Lajos nevéhez fűződik. A Balaton monográfiában ismertetett eredmények és nyitva hagyott kérdések máig hatással vannak a kutatásokra. Az elmúlt száz év eredményei, ezek közül is elsősorban az 1990-es években indult, modern vulkanológiai szemléletű kutatások a Balaton-felvidéket nemzetközi szinten is a monogenetikus vulkáni mezők egy mintaterületévé tették.

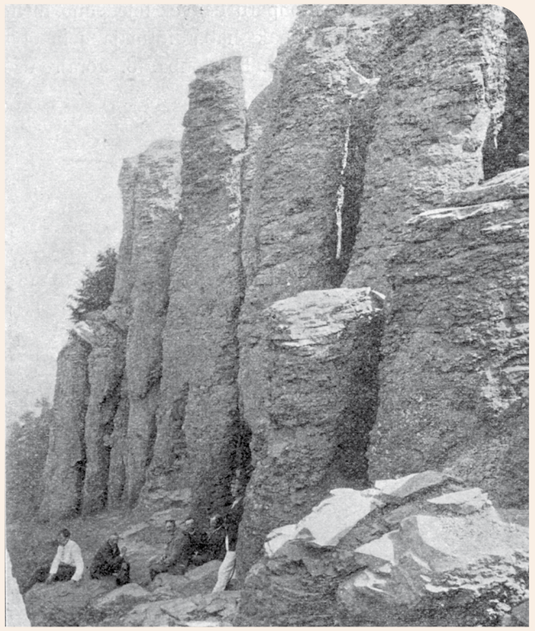


Szentgyörgyhegy

A Szentgyörgyhegy a Balatonvidék egyik legérdekesebb hegye, Tapolcától délre, Hegymagos, Raposka és Kisapáti községek között emelkedik ki minden oldalról szabadon álló hegyszigetként a tapolczai öblözet 108—110 m. magas, alluviális takarójából. Az említett községek maguk a hegy lankás padkáján feküsznek, a mely lapos csonkakúp palástjaként szelíden emelkedik mintegy 140 m. magasságig, a szőlőkertek aljáig. Erre mintegy 190 m. magasságig meredekebb lejtőjű csonkakúppalást következik, a melynek az alján még laza homok, felsőbb részén meg már a bazalttufa és a kompakt bazalt murvája van túlsúlyban. E palást talaján köröskörül szőlőkertek vannak néhány kövületes feltárással, a melyekben egy helyen t. i. a Hegymagos községből a vörös kereszt felé a Tókúthoz és a Szentgyörgyhegy tetejére vezető mélyút falában, m e. 160 m. magasságban fedezte fel Lóczy L. azt a lelőhelyet, a honnan Vivipara Semseyi-t, Dreissensia auricularis-t, Melanopsis decollata-t és cylindrica-t, Limnocardium, Unio és Valvata sp.-t gyűjtöttem. A kövületek tanusága szerint a Szentgyörgyhegy dereka a pontusi korszak képződménye. E pontusi korú csonkakúp felső részén 270—290 m. magasságban a hegy észak-északkeleti, nyugati és keleti oldalán Tapolcza, Raposka és Apáti felől, bazalttufa látható több (4—5) m. vastagságban. Legösszefüggőbb tömegben látni a bazalttufát a hegy Tapolcza felőli oldalán. Itt a bazalttufa délnek, a hegy felé, dől lankásan 30—35° alatt. Raposka felett 3 – 4 m. magas tömbökben, Apáti község felett pedig a kipusztult szőlő első dűlőjében csak foszlányokban lelhető már.



A Szentgyörgyhegy északnyugati oldalának kelet felőli bazaltoszlopai



A «Kőzsákok»: a Szent György-hegy bazaltoszlopai az északkeletről felvezető ösvény felett

Ezek a bazalttufa kibukkanások kisebb-nagyobb vastagságú részei annak, az egészben nem nagy tömegű bazalttufa gyűrűnek, mely az oszlopos bazalt alatt a pontusi rétegekre telepszik.

E bazalttufa-gyűrű felett közvetetlenül bazaltomladék, ródara, „törött kő" fekszik, helyenkint egész kőtengert alkotva s ezekből emelkednek ki a 4. ábrán ábrázolt hatalmas bazaltoszlopok, a melyek olyan impozáns külsőt kölcsönöznek a Szentgyörgyhegynek. Különösen a hegy észak-északkeleti oldalán csoportosulnak szépen az e vidéken „Kőzsákok"-nak nevezett alakulatok és már Tapolcza környékéről szembetűnnek. Itt a kőkapunál ugyanis 20—25 m. magasak. Keresztmetszetük ellipszishez közeledő sokszög. Hosszabb, 1—1,2 m.-es átmérőjükkel a hegy felé fordulnak. Néhány oszlop azonban ijesztően szabadon áll s kissé északkelet felé, kifelé dől. Az oszlopok közötti feljáró ösvényen, ott a hol az a kőfolyásról a bazaltoszlopok alá ér, éles határokkal látszik az elpusztult oszlopok szabálytalanul hatszögletű körvonala. Ezen sokszög mentén 5—6 cm. vastag mállott réteg van. A hatalmas oszlopoknak elliptikus körvonalai és tompított éléi tehát nyilvánvalóan az elmállásnak eredményei.

Impozánsak a hegy északnyugati oldalán a mogyorósi „kűzsákok" is, valamint délnyugaton a Hegymagos felőli pillércsoport és az Apáti hegy oszlopcsoportja, a melyben 25—30 m. magas oszlopok is vannak.

Egyébiránt a hegy oldalain másutt is, köröskörül, előbukkannak a bazaltoszlopok függőleges állásukkal jelezve, hogy az egykori láva vízszintesen terült el lepény módjára a bazalttufán.

Az átlag 22—23 m. magas oszlopok alsó része kevésbbé, a felső erősebben elbontott sötétszürke, apró szemcsés, itt-ott hólyagos anamezitszerű bazalt. Az oszlopok fejein vízszintesen poliëdrikus lapokra válik szét ez a kőzet s a szélső oszlopok fejeiről az oszlopok lábához hullanak le a lapok, a már említett „törött követ" illetőleg kisebb-nagyobb kőtengereket alkotva és táplálva. Különösen szépen látni ezt a folyamatot a hegy délnyugati oldalán, Hegymagos felett. …

Részlet Vitális István A Balatonvidéki bazaltok *című művéből*

A Balaton-felvidék fiatal bazaltvulkanizmusának tanulmányozása Lóczy Lajos munkásságának egyik fontos eleme volt. Lóczy a Balaton-felvidék földtani leírásában részletesen ismertette a bazaltvulkáni képződmények földtani, települési viszonyait. Munkássága nagyban meghatározta az őt követő évtizedek kőzettani, vulkanológiai és ásványtani vizsgálatait. A *Balaton monográfia* függelékeiben megjelent, bazaltvulkanizmushoz kapcsolódó munkák közül ki kell emelni Vitális István *A balatonvidéki bazaltok* címen megjelent, részletes összefoglaló ismertetését. Vitális a bazaltminták részletes vizsgálatát a selmecbányai ásványtan–földtani tanszéken végezte, és pontos megfigyelései, leírásai maradandó alapmunkaként fontos kiindulást jelentenek mind a mai napig.

A mikroszkópos megfigyelésen alapuló kőzettani vizsgálatok az 1850-es években indultak meg. Böckh János Hofmann Károlyt kérte meg, hogy végezze el a modern petrográfiai elemzéseket, aki „*készséggel engedett a felszólításnak s nyomban mikroszkópi vizsgálat alá vetette*” a Balaton-felvidék bazaltjait. Lóczy munkája a Balaton-felvidéki vulkanizmus megértésében jelentős részben Hofmann Károly 1875–78-as monumentális munkáján alapul, amely *A déli Bakony bazaltkőzetei* címmel a Magyar Királyi Földtani Intézet Évkönyvének III. kötetében jelent meg. Ezt Lóczy is többször említi a köteteiben, hasonlóan Böckh János 1872–1874-ben, *A Bakony déli részének földtani viszonyai* címmel megjelent munkájához.

Lóczy munkásságának hatása napjainkig érezhető, hisz több olyan tudományos kérdést is felvetett, amelyek megválaszolása máig foglalkoztatja a szakembereket. A terület vulkánjainak megismerésében Lóczy szerepe elsősorban a vulkánok lepusztulási folyamatára adott válaszaiban, és részben azok kitörésmechanizmusára adott első ötleteiben foglalható össze. Lóczy munkássága jelentős hatást gyakorolt Jugovics Lajos vulkanológiai kutatásaira is, aki majd 50 éven át meghatározó alakja volt a terület bazaltvulkánjai vizsgálatának. Jugovics több tucat tudományos műben, módszeresen, lépésről lépésre, vulkánról vulkánra dolgozta fel a Balaton-felvidék szinte minden egyes vulkáni területét a Keszthelyi-hegységtől a Tapolcai-medencén át a Tihanyi-félszigetig. Így jutott arra a következtetésre, hogy a vulkáni felépítmények jelentősen lepusztultak. Mi több, a Sümegprága környékén kibukkanó kőzettelérek mio-pliocén üledékekbe nyomult és idővel kipreparálódott maradványait is felismerte. A modern vulkanológiai szemléletű kutatások az 1990-es évek közepétől indultak, és a tudományos eredmények e térséget nemzetközi szinten is a monogenetikus vulkáni mezők egyik mintaterületévé tették, különösen a magma és a víz kölcsönhatása következtében zajló hidrovulkáni működés tekintetében.

Lóczynak az őslénytani és kőzetrétegtani vizsgálatokon alapuló eredményei jelentősen segítették az üledékes képződmények kialakulásának megértését is. A vulkáni rétegek és az üledékes képződmények kapcsolatának felismerése azonban csak az 1980-as évekre tehető, a K–Ar kormeghatározásoknak köszönhetően.

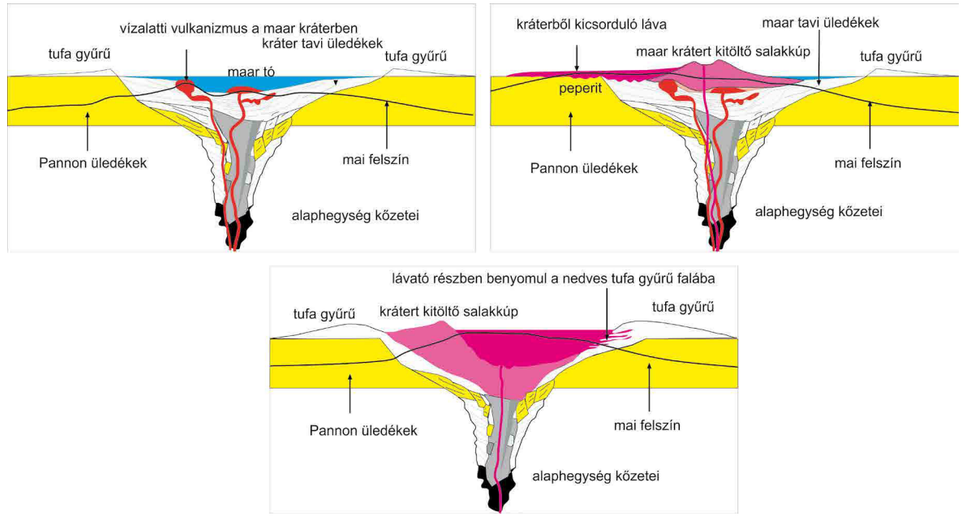
Monogenetikus bazaltvulkanizmus

A bazaltos magmákhoz kapcsolódó vulkáni működés legnagyobb térfogatot képviselő felszíni formái a szélesen elterülő pajzsvulkánok (például Mauna Loa, Mauna Kea, Galápagos-szigetek), azonban gyakoribb, hogy a bazaltos magma kis térfogatú (<1 km^3) tűzhányókat épít, amelyek rövid életűek és általában nem működnek újra. Ez utóbbiak, melyek rendszerint csoportosan jönnek létre, vulkáni területeket (avagy vulkáni mezőket) képeznek. Ezek nagysága akár több száz vagy ezer km^2 is lehet, és elszórtan akár több száz egyedi kitörési központot, kisebb-nagyobb vulkánt is tartalmazhatnak.

A bazaltvulkáni mezőkön a kitörések rövid ideig tartanak (néhány nap, maximum egy év-



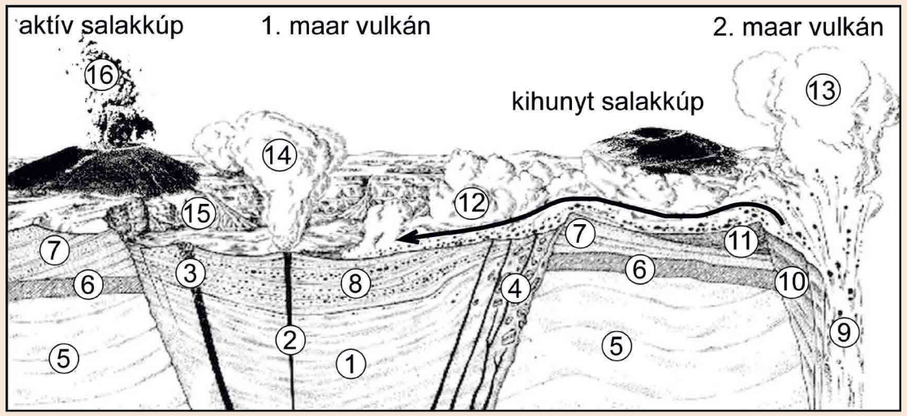
A Bakony–Balaton-felvidék monogenetikus bazalt vulkáni mezője



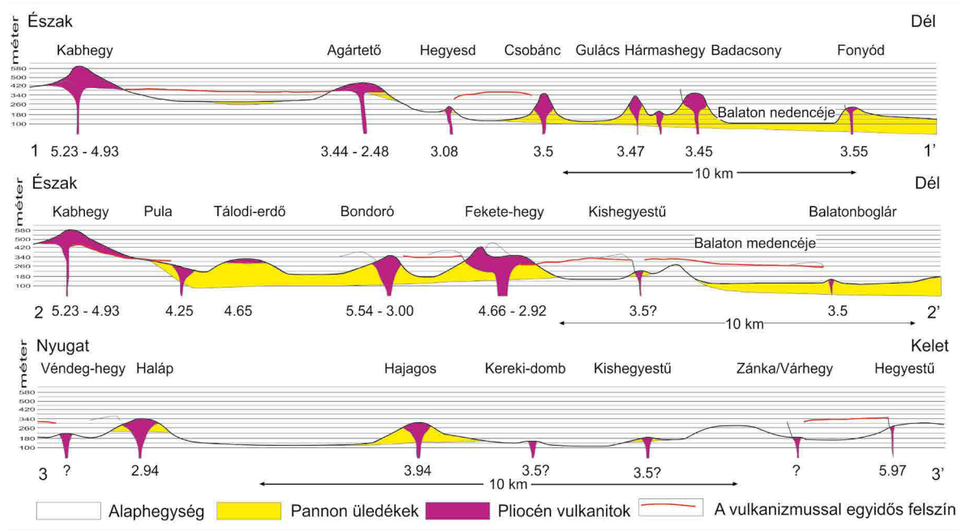
A monogenetikus bazaltvulkanizmus jellegzetes vulkáni formái

A vulkáni mezők vulkánjai

A vulkáni mezőket alkotó, kis térfogatú vulkánok többfélék lehetnek annak függvényében, hogy milyen módon alakultak ki, azaz hogyan játszódtak le a kitörések. Ebben különösen fontos tényező, hogy mennyire volt robbanásos a vulkáni működés, illetve ezen belül, milyen szerepe volt a külső víz és a magma kölcsönhatásának. A csupán a magma belső gáztartalmának hatására visszavezethető robbanásos kitörések során erősen hólyagüreges bazaltdarabokból álló salakkúpok alakulnak ki. Ha a bazaltmagma feláramlása gyors, a felhabzó magmatest magasra felcsapó lávaszökőkút formájában tör a felszínre. Ekkor lávafröccskúpok, lávasáncok jönnek létre, a lávacafatok akár össze is heggedhetnek és nem ritka, hogy a kitörés előrehaladtával végül lávaöntés történik és a kúp körül egy lávamező alakul ki. Amennyiben a magma mozgása lassabb, akkor a gázbuborékok hamarabb felszínre juthatnak és a néhány kilométer mélységben lévő magmatározóból olvadékkal teli, nyílt kürtőn keresztül feláramló méretes gázbuborékok ismétlődő lávatűzijáték kitöréseket okoznak, amelyek végül salakkúpokat hoznak létre. A felfelé nyomuló magma gyakran találkozik víztartó, vagy vízzel átitatott rétegekkel. A magma és a víz (illetve vizes üledék) keveredése heves robbanásos kitörést okoz, amit hidrovulkáni működésnek nevezünk. Ha a felszínre robbanó anyagban jelentős mértékben (legalább a teljes térfogat 10%-a) szerepelnek a szétrobbanó magma foszlányai, szemcsései, akkor freatomagmásnak nevezzük a kitörést. Ha a robbanás elsősorban a mellékkőzetet aprózza fel és dobja a felszínre, akkor a kitörés típusa freatikus. Abban az esetben, ha a magma felszínközeli rétegvízzel, vízzel telített üledékkel vagy sekély tavak, folyók vagy sekélytenger csekély mennyiségű vizével keveredik, a keletkező heves gőzrobbanás hatására finomszemcsés vulkáni hamu keletkezik, és tufagyűrűk születnek, amelyek általában sekély, de széles krátert vesznek körbe. Ha a magma jelentősebb mennyiségű felszín alatti vagy felszíni vízzel lép kölcsönhatásba, akkor vízgőzben gazdag kitörési felhő keletkezik és meredekebb oldalú, kisebb kráterrel jellemzett tufakúpok alakulnak ki. Ha a magma és a víz kölcsönhatása nagyobb mélységben történik, akkor a robbanások mély, akár több száz méter mélyre húzódó vulkáni kürtőt hoznak létre, amit a felszakított mellékkőzet kisebb-nagyobb darabjai töltenek ki. Ezeket diatrémának nevezik, a vulkáni felépítmény pedig a maar. A maar vulkáni kitörések során mély kráterű, kis vastagságú vulkáni gyűrűk jönnek létre, amelyekben az aljzatkőzet darabjai sokkal nagyobb mennyiségben vannak jelen, mint a magma szemcsései. Egy vulkáni mezőn mindezek a különböző tűzhányó típusok együtt is előfordulhatnak. A vulkánok morfológiája, a vulkánokat felépítő képződmények fontos tanúi az egykor zajlott kitörések történetének.



1 Diatrémát kitöltő piroklasztit kőzetek
2 Maar vulkáni kitörést követően kialakult, aktív kürtőcsatorna
3 Már nem aktív kürtőcsatorna
4 Maar kráter peremről beszakadt kőzettömegek
5 Idős alaphegység kőzetei
6 Pannon üledékes kőzetek
7 Az első kitörések során kialakult tufagyűrű rétegei
8 Maar kráterben felhalmozódott üledékes kőzetek
9 Aktív maar vulkán születő diatrémája
10 Kráterperemről beszakadó rétegek
11 Az aktív maar kráter körül kialakult tufa gyűrű rétegei
12 Az aktív maar kitörése során kialakult alapi torlóár
13 Freatomagmás kitörési felhő, amelyben akkréciós lapilli alakulhat ki
14 Freatomagmás kitörési felhő
15 Mély maar kráter peremén kialakuló törmelékkúpok
16 Salakkúpot építő lávatűzijáték kitörés



A Bakony és a Balaton-felvidék bazaltvulkánjainak jelenlegi morfológiája (a számok a bazalt korát jelzik millió évben)

tized), és sok esetben egy kitörés egyetlen vulkáni felépítményt hoz létre, ahol aztán később nem újul fel a vulkáni működés. Ezért ezeket monogenetikus vulkánoknak nevezik. A tipikus monogenetikus vulkáni mezők esetében a kitörések rendre új helyen történnek. A tűzhányók gyakran a földkéreg gyengeségi zónáit követve, szerkezeti vonalakhoz köthetők, vagy pedig a vulkánok eloszlását a földkéreg alatti olvadékforrás alakja határozza meg, úgynevezett vulkáncsoportokat létrehozva. Összességében egy vulkáni mező élete jóval hosszabb – gyakran millió években mérhető –, mint egy összetett tűzhányóé. A Bakony–Balaton-felvidék legalább 35 monogenetikus vulkánja, vulkáni felépítménye a 8 és 2,3 millió évvel ezelőtti időszakban, tehát csaknem 6 millió év alatt született. Fontos azt is megjegyezni, hogy az aktív fázisok között olykor több százezer év is eltelt, sőt a kezdeti kitörések (Tihany, Hegyestű) után, jelen ismeretünk szerint, több mint 2 millió év telt el kitörés nélkül, majd kezdődött egy újabb aktív szakasz!

A monogenetikus vulkáni mezők működése kiismerhetetlen: nem lehet tudni, mikor és hol lesz újabb vulkánkitörés és még az sem mondható meg biztosan, hogy az miképpen fog lezajlani. A Bakony–Balaton-felvidék vulkáni mező és a kisalföldi (vagy Kemenesalja) vulkáni mező egymáshoz legközelebbi vulkáni előfordulásai között közel akkora távolság van, mint a két vulkánmező belső vulkánjainak távolsága. Így térben nehéz az elkülönítés, időben pedig még nehezebb, hisz a kisalföldi vulkánok közel azonos időtartományban voltak aktívak, mint a Bakony–Balaton-felvidék vulkánjai. Az egyetlen különbség, hogy a kisalföldi vulkánmező aktivitásának csúcsa valamivel korábbra tehető (úgy 5–6 millió év között).

A Bakony és a Balaton-felvidék területén több millió éven keresztül zajló, aktív és hosszú szunnyadási időszakokkal jellemzett vulkánosság során a kitörések változó környezetben folytak, szárazulaton, részben sekély víz alatt. Ez a keletkező vulkántípusok igen nagy változatosságát eredményezte.

A monogenetikus vulkanizmus modellje Smith és Németh (2018) alapján. Ilyen lehetett a Fekete-hegy, Tihany vagy éppen a Bondoró, Pula, Tálodi-erdő vidéke

Monogenetikus bazaltvulkáni mezők kialakulása

A monogenetikus vulkáni működés kutatásában Lóczynak és munkatársainak munkássága mérföldkőnek tekinthető, hisz először ők tanulmányozták részletesen a Balaton-felvidék bazaltvulkanizmusát. Kutatásaik rávilágítottak arra, hogy a Balaton-felvidéki vulkánok döntően az eróziós maradványai olyan kis méretű vulkánoknak, amelyek robbanásos kitörések során születtek, míg némelyikük jelentősebb térfogatú lávatakarót is létrehozott.

Az utóbbi években fontos fejlődés történt a vulkáni mezők alatti magmás folyamatok megismerése terén is. A Bakony és a Balaton-felvidék térsége ebből a szempontból is egyfajta természeti laboratóriumnak tekinthető. Ez már egy újfajta kutatási filozófia: egy vulkán, egy vulkáni mező működésének megismerése a „forrástól a felszínig", azaz a magmaképződéstől, a magmatározó folyamatokon keresztül egészen a vulkánkitörések mechanizmusáig.

Többek között a Balaton-felvidéki bazaltok tanulmányozása során merült fel annak lehetősége, hogy rétegtanilag jól megfogható mintavételezéssel lehetőség nyílik a monogenetikus vulkánt tápláló magmák kémiai változatosságának dokumentálására. Ilyen vizsgálatok történtek Tihanyban, a Bondorón, a Fekete-hegyen, a Füzes-tónál, illetve a kisalföldi Kissomlyón. A Balaton-felvidéki vulkánok kicsik lehettek, azokat csak nagyon csekély térfogatú magma szülte, azonban a kitöréseket bonyolult magmás folyamatok során létrejött, összetett magmaforrások táplálhatták. Ezeken a helyeken különleges formájú vulkáni bombák is előkerültek a bazaltsalak-rétegekbe ágyazva, vagy önállóan. Ezek általában orsó alakúak, íves formájúak, a külső részük olykor felrepedezett és kenyérhéjra emlékeztető megjelenést mutat. Belsejükben gyakran található kisebb-nagyobb méretű, olivinben gazdag, zöld színű kőzet. Ezek a korábban „olivinbombának" nevezett peridotitok, amelyek a földköpenyből származnak. Nemzetközileg is híres lelőhely a Bondoró, Szentbékkálla és a Füzes-tó, az innen származó kőzetzárványok kutatása alapján jól ismerjük a litoszféra alsó, földköpeny részét. Ezeket a kőzetdarabokat a gyorsan felnyomuló bazaltos magma sodorta magával a felszínre.

Az 1990-es évek elejétől zajló, modern szemléletű vulkanológiai kutatások a Balaton-felvidéki vulkáni mezőt globális kutatási területté alakították és nemzetközi szinten is segítették az ilyen típusú vulkáni működés jobb megértését. Az integrált, egyre mélyebb részletekbe menő kutatásoknak köszönhetően kiderült például, hogy felül kell vizsgálni a működés monogenetikus jelzőjét is. Hagyományos értelemben a monogenetikus vulkán annyit jelent, hogy egy adott bazaltos magmacsomag által táplált, rövid ideig tartó kitöréssorozat során keletkezett és annak befejeződése után később nem újult fel a működése. A nagy felbontású kőzettani és geokémiai vizsgálatok azonban igazolták, hogy még kis térfogatú tűzhányók esetében is változhat időben a kitörést tápláló magma összetétele. A vulkánrétegtani elemzések alapján pedig egyre gyakrabban olyan következtetésre juthatunk, miszerint a szigorúan monogenetikus vulkánok is jól elkülöníthető kitörési fázisokban növekedtek, és az egyes fázisok között jelentősebb időintervallumok – órák, napok, sőt hetek vagy hónapok – is eltelhettek. Ezek nyomai, mint diszkordancia-felületek láthatóak a monogenetikus vulkánok rétegsorában. Ilyeneket a Balaton-felvidéken is dokumentáltak (például a Bondorón). Ezek a geológiai értelemben rövid időtartamok hosszabbak annál, mint ami ahhoz kell, hogy egy kürtőben a feláramló magma megdermedjen. Ez azt jelenti, hogy egy monogenetikus vulkán növekedése során sem egy, hanem akár több magmaforrás és/vagy egy hosszú életű, összetett magmatározóból kiinduló magmacsomag több elkülöníthető tápcsatornán keresztül működtethette az adott vulkánt. Azaz a korábban monogenetikusnak vélt bazaltos tűzhányók sok esetben valójában polimagmásak (eltérő összetételű magmák által tápláltak), sőt akár policiklikusak (ismétlődő, rövidebb-hosszabb szünetekkel elválasztott kitörési események során felépülők) lehetnek. Erre kitűnő példa a Bondoró és a Fekete-hegy.





Bazaltbombák a Bondorón ◀



A Tapolcai-medence bazaltvulkánjainak eróziós formái a Halápról (balról jobbra): Halyagos, Csobánc, Tóti-hegy, Gulács, Badacsony, Szent György-hegy ▼



Korszerű elméletek a monogenetikus vulkáni mezőkről

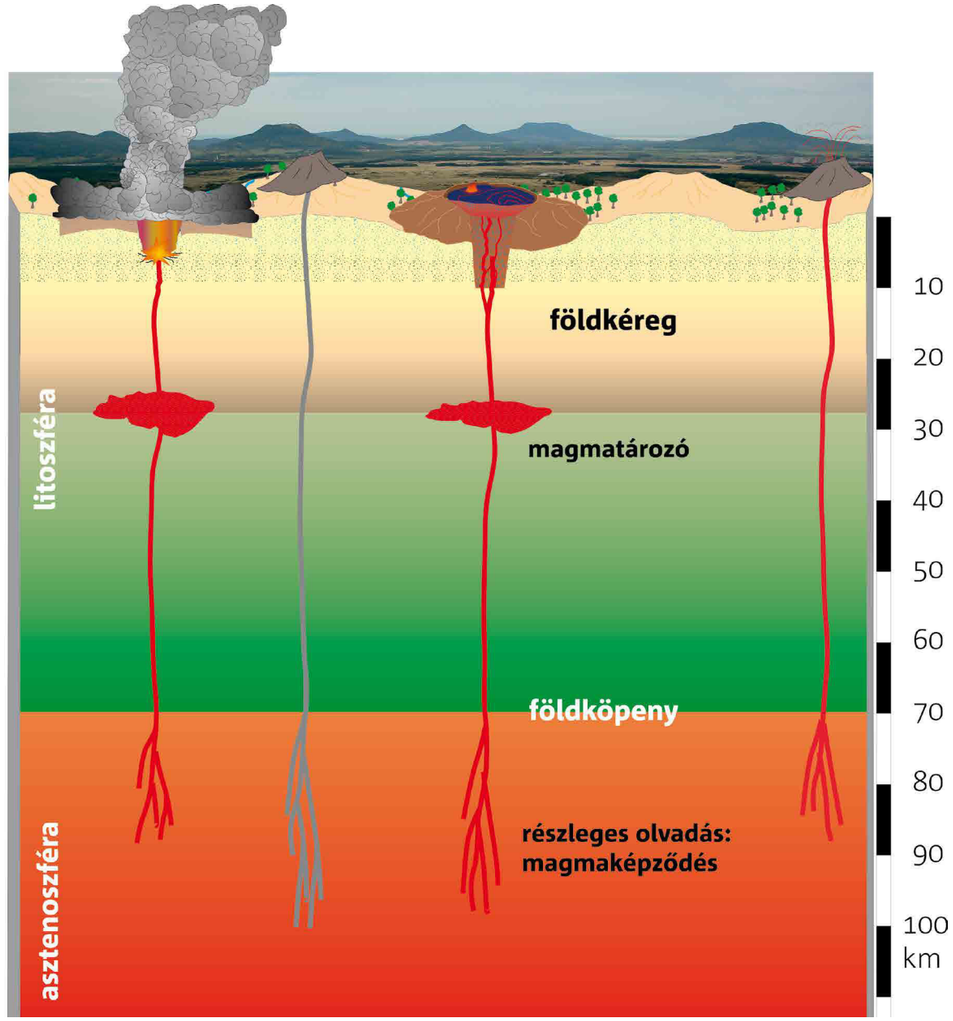
A monogenetikus vulkanizmust az intenzív kutatások eredményeképpen többen is újraértelmezték az utóbbi években. Ezek között az egyik legrészletesebb összefoglaló tanulmány Ian Smith és Németh Károly tollából, a *The Geological Society of London Special Publications – Monogenetic Volcanism* kötetben jelent meg 2017-ben. A szerzők által tárgyalt „régi, új" értelmezésnek a lényege, hogy a monogenetikus vulkáni tevékenységet a vulkanizmus egyik végpontjának tekintik, mely fokozatos átmenetet mutat a poligenetikus vulkanizmus felé. Az átmenetben egy természetesen meghatározott határ jelölheti ki a monogenetikus vulkanizmus tág definícióját.

Az új meghatározások alapvetően közösek abban, hogy a monogenetikus vulkanizmus rövid életű, és tipikusan nem működik néhány évnél tovább, de valójában csak a néhány órán, esetleg néhány napon át működő vulkánokat tekintjük igazán monogenetikus vulkánoknak. Ugyanígy, illetve a fenti definícióból kiindulva, a tipikus monogenetikus vulkán magma produktivitása kicsi, messze az 1 km^3 tömör kőzet egyenérték alatti. Sőt, a legtöbb monogenetikus vulkán teljes magma produktivitása a 0,001 és 0,05 km^3 tömör kőzet egyenértékkel fejezhető ki. Ez nagyon kicsi érték, a Mt. St. Helens 1980-as kitörése során például több mint 1 km^3 vulkáni anyag jutott a felszínre.

Ugyancsak az új meghatározások szerint a monogenetikus vulkánok egyszerű vulkáni felépítményt hoznak létre, amelyek egy olyan vulkáni törmelékes üledéksorból állnak, melyekben nem találhatók jelentős kitörési szünetre utaló eróziós üledékhiányok. Mindez persze nem jelenti azt, hogy egy monogenetikus vulkán rétegsora nem lehet bonyolult. Erre kitűnő példa akár a Fekete-hegy, Tihany vagy Bondoró rétegsora, ahol finomszemcsés vulkáni hamu, lapillitufa vagy akár tufabreccsa rétegei váltakoznak, gyakran valamilyen rendszert követve, vagy akár teljesen véletlenszerű módon. E változatosság mind azt jelzi, hogy a vulkánkitöréseket igen sokféle hatás befolyásolhatta. A bonyolultság viszont alapvetően a magma és a víz robbanásos kölcsönhatása során bekövetkező, úgynevezett hidrovulkáni kitörések és a magmás robbanásos kitörések állandó, gyakran nem szisztematikus változékonyságaira vezethetők vissza.

Ugyancsak fontos elem a monogenetikus vulkanizmus új definícióiban, hogy az minden esetben a vulkán tápcsatornájából egy vagy csak néhány független kőzettelér benyomulásának eredménye alapján született vulkáni képződmények összességét tekinthetjük szűkebb értelemben véve monogenetikus vulkánnak. Mindez azt jelenti, hogy egy tipikus monogenetikus vulkán legtöbb esetben egyetlen felnyomuló magmacsomagból táplálkozik. Ez a kritérium azonban ritkán teljesül, hisz geokémiai és kőzettani vizsgálatok egyértelműen azt mutatják, hogy ezeket a kis térfogatú tűzhányókat is akár eltérő összetételű, azaz eltérő eredetű magmák táplálhatják.

A „forrástól a felszínig" irányú kutatások – többek között az MTA-ELTE Vulkanológiai Kutatócsoport munkatársainak vizsgálatai a Bakony és a Balaton-felvidék területén – azt mutatják, hogy a monogenetikus vulkanizmus szigorúan véve valójában nem a „földköpeny tükre", azaz nem egyedi, a földköpeny egy adott mélységében, részleges olvadással keletkezett egyedi magma produktuma, hanem e mögött jóval bonyolultabb magmás történet rejtőzik. Ez fontos felismerés a vulkáni kitörések előrejelzésében is.



Monogenetikus vulkáni mező elvi szelvénye

Vulkánkitörésekhez vezető magmás folyamatok

A „forrástól a felszínig" szemléletű kutatásokban jelentős szerep jut a vulkáni kőzetek vizsgálatának, amelyeken keresztül le lehet látni a tűzhányók alá, és feltárhatók a kitöréseket megelőző, több kilométer mélységben zajló folyamatok. A bazaltok leggyakrabban zöld színű olivineket tartalmaznak, esetenként piroxének tűnnek fel a sötét alapanyagban, ami – az olivinen és piroxénen kívül – plagioklászból, vas-titán oxidokból, apatitból, ritkán földpátpótlókból épül fel. Ezek alkotják a bazaltos kőzetet, amiről alapesetben azt gondoljuk, hogy összességében egy olyan magmából keletkezett, ami vagy közvetlenül a felső földköpeny uralkodó kőzetének, a peridotitnak a részleges megolvadása során jött létre és összetétele azóta nem változott lényegesen (ezeket primitív bazaltoknak nevezik), vagy több-kevesebb kristály kiválása után alakult ki (ezeket differenciált bazaltoknak nevezik). Az alapveté-

sünk tehát az, hogy a teljes kőzet kémiai összetétele megegyezik egy olyan magma összetételével, amit vagy a megolvadás vagy a kristályosodás körülményei alakítottak ki. A kémiai összetételből tehát kiolvasható, hogy milyen mélységben, hogyan zajlott a magmaképződés és milyen további folyamatok zajlottak a vulkánkitörés előtt.

A Balaton-felvidéki bazaltok vizsgálata kőzettani szempontból világviszonylatban is meghatározó eredményeket hozott. Lóczy és Vitális monográfiája, majd Mauritz Béla és Jugovics Lajos munkái kiemelték a leíró kőzettan fontosságát a vulkánokat tápláló magmák azonosításában. Ezt az alapvetést mind a mai napig megőrizte, továbbfejlesztette, és később a numerikus geokémiai módszerekkel elegyítette a magyar kőzettan és geokémia tudománya.

A földköpeny felső részén történő olvadás elsődleges oka a peridotit kőzet olvadáspontjának a megváltozása, ami a nyomás csökkenésére vezethető vissza. Ez azt jelenti, hogy a földköpeny kőzete mozgásban kell, hogy legyen, és egyre sekélyebb mélységbe kell jutnia. A felemelkedés során csökken a felette lévő kőzettest vastagsága, azaz csökken a litosztatikai nyomás. Az olvadás, azaz a magmaképződés folyamata tehát egy dinamikus esemény. Szükséges egy felfelé mozgó kőzetanyag, ami egy adott mélységben – ahol az olvadáspontja a környező hőmérséklet alá kerül – elkezd megolvadni. Mozgó kőzetanyag a felső földköpenyben alapvetően az asztenoszférában lehetséges. A litoszféra alsó része merev, mozgásra nem képes. A litoszféra és asztenoszféra határa tehát egy reológiai határ, ami egy felső korlátot jelent az anyagáramlásnak.

Mindezt figyelembe véve, a bazaltos magma kialakulásának elsődleges helyszíne az asztenoszféra, aminek kőzetanyaga lassú mozgásra képes. Egy másik fontos következmény, hogy a magmaképződés nem egy statikus folyamat, nem egy meghatározott mélységben zajlik, hanem egy mélységintervallumban, egy úgynevezett olvadási oszlopban. Alsó határát a földköpeny anyagának olvadáspontja jelöli ki, felső határa pedig a reológiai litoszféra-asztenoszféra határ. A bazaltok kémiai összetétele alapján ma már sok mindent elmondhatunk a magma kialakulásáról, akár számszerűsíthetjük a részleges olvadás mértékét, körülményeit és a magma fejlődésének mozzanatait. A Bakony és a Balaton-felvidék térségében előforduló bazaltok többsége – kémiai összetételük alapján – csak kismértékű magmás differenciáción esett át, ezért modellezhető a magmaképződés körülménye. A petrogenetikai modellszámítások alapján a bazaltos magma 80–90 km mélységben kezdett megolvadni, azaz a gránát-peridotit csupán néhány százalékos olvadásával jöttek létre az elsődleges alkáli bazalt magmák.

A kőzetekben lévő ásványfázisok megjelenése és kémiai összetétele lehetőséget ad egyfajta vulkándetektív munkára, ebből rakható össze az, hogy mi történik a mélyben. Vannak esetek, amikor a bazaltos magma néhány nap alatt átörheti a földkéreg kőzettestét, és a földköpenyből a felszínre jut. Máskor évszázadokig vagy évezredekig a földkéreg és földköpeny határán reked meg, és onnan szabadulhatnak ki kisebb magmacsomagok, amik kis térfogatú bazaltvulkánokat építenek. Az MTA–ELTE Vulkanológiai Kutatócsoport kutatásai arra is rámutattak, hogy a térségünk alatti asztenoszféra földköpeny mélységében a környezet közel áll ahhoz, hogy magma keletkezhessen, erre a lehetőség tehát még mindig adott. Azonban az kulcskérdés, hogy ez vajon bekövetkezik-e, és ha igen, akkor vajon a magma mennyisége elegendő lesz-e ahhoz, hogy a felszínre törjön vagy megakad a földköpenyben és nem éri el a felszínt.

A vulkánkitörés mechanizmusa

A vulkánkitörés mechanizmusát a bazaltos magma kémiai és fizikai tulajdonságai, valamint a külső környezet határozza meg. A kis viszkozitású magmában a feláramlás közben az illók könnyen ki tudnak válni (buborékosodás), és méretük is növekedhet kis ellenállás mellett. A gázbuborékok csökkentik a magma sűrűségét, és ezzel elősegítik felnyomulását. A gyorsabban mozgó gázbuborékok a magmatest felső részén koncentrálódnak, és nagyobb mélységben jelentős túlnyomást okoznak, ami elősegíti a kőzettestek repesztését. A felszín közelébe érve azonban a gázfázis akár könnyen meg is szökhet a repedések mentén, aminek eredményeképpen már egy kigázosodott magma jut a felszínre. Ezzel magyarázható, hogy a bazaltos magmák kitörése gyakrabban jár lávaöntéssel, mint robbanással.

A Balaton-felvidéken számos lávamező ismert, de vannak olyan vulkánok is, ahol a láva egy egykori széles krátert töltött ki, azaz lávató alakult ki. Legszebb példái a Szent György-hegy és a Badacsony. A lávatavak, illetve kürtőcsatornákban megakadt bazaltos olvadék kihűlt, oszlopos elválású kőzeteit (például Hegyestű) – melyek a terület különleges természeti értékei – az erózió tárja fel.

Sok esetben tapasztaljuk azt, hogy kezdetben robbanásos kitöréssel jut a bazaltos magma a felszínre, majd később lávaöntéssel folytatódik. Ebben az esetben is az a magyarázat, hogy a gázbuborékok a kis viszkozitású magmában gyorsan mozogva elérik a felszínt a kitörés elején, majd a már kigázosodott magma ömlik ki, miközben a vulkáni gázok szabadon áramlanak ki a légkörbe. A felszínre törő magma, annak folyóssága (viszkozitása) függvényében mozog a felszínen, és különböző formákat ölthet.

A hígan folyós láva szétterül, a felszíne bőrszerűen megdermed, de még jó ideig képes képlékeny alakváltozásra. Így egy összetett ráncolattal, összegyűrt felszínnel, gyakran kötélszerű formákkal fedett lávafelszín alakul ki, melyet polinéz nyelven pahoehoe lávának neveznek (Hawaii vagy Szamoa szigetein ilyen lávafolyások a tájkép meghatározó elemei). A Balaton-felvidéken, a vulkáni működés néhány millió éves kora miatt ezek a lávafelszínformák már nehezen azonosíthatóak. Azonban – kis keresgéléssel a fűben – a Fekete-hegy, a Bondoró, az Agártető vagy a Kab-hegy területén találhatunk olyan bazalt lávakőzetdarabokat, amelyek felszínén felismerhetőek az üvegesen megdermedt, kékes, feketés, jellegzetesen gyűrt formák, jelezvén, hogy e területeken valószínűleg pahoehoe típusú lávák folyhattak.

A friss lávautánpótlás a még plasztikus alakváltozásra képes, de lassan megdermedő felszíni

Bazaltoszlopok

A bazaltmagma a megszilárdulása során kb. 3% térfogat-zsugorodást szenved, ami miatt a már megszilárdulófélben lévő bazalttesben, a hűlési felszínre merőlegesen hosszanti repedések alakulnak ki. A repedéshálózat a felszínre kerülő bazaltban, főleg a hőmérsékletváltozás miatt egyre tágul, a kőzettömbök e mentén válnak el, így alakulnak ki a szabályos, hosszú bazaltoszlopok. Ezek többnyire ötszög vagy hatszög átmetszetűek. Minél vastagabbak az oszlopok, annál lassabban történt a hűlés. A hűtő felület felé pedig gyakran az oszlopok vékonyodását lehet észrevenni, mint ahogy ez a Hegyestűn szépen látszik. A Badacsony és a Szent György-hegy esetében a vastag kőzsákok (oszlopok) mind azt jelzik, hogy az egykori lávató anyaga lassan hűlt le. A 2018-ban felújított vulkanológiai tanösvények bepillantást nyújtanak ezek kialakulásába. Előfordulnak elhajló oszlopok is, amik arra utalhatnak, hogy a bazaltos olvadék egy egykori völgyben, vagy egy kráter „edényszerű” mélyedésében hűlt ki. Erre kitűnő példákat látunk a Haláp, a Hegyestű és a Hajagos felhagyott kőbányáiban.



réteg alá folyik, azt megemeli. A jól szigetelő felszíni réteg alatt kialakuló magmacsatornákban a láva több kilométert megtehet anélkül, hogy hőmérséklete csökkenne és ezzel a mechanizmussal hosszú lávafolyamok alakulhatnak ki. Amint lecsökken a magmautánpótlás, a lávacsatornákból kifolyik a kőzetolvadék és hosszanti üregek, lávabarlangok maradnak vissza. A Balaton-felvidéken, a Kab-hegy területén (pl. Pulai-bazaltbarlang) ismerünk néhány kisebb barlangot a bazaltban, ám azok eredete sokkal inkább másodlagos (például eróziós omlással, vagy törések menti hasadék-kiszélesedéssel jöttek létre), mintsem a magma hűlésekor keletkezett gázbuborékokkal, vagy lávacsatornák kiürülésével kapcsolatos.

A kissé sűrűbben folyó (viszkózusabb) láva a pahoehoe típusú lávafelszínhez képest más felszínt alakít ki. A lassabban mozgó láva felszíne megszilárdul, majd blokkokra töredezik. A kisebb-nagyobb salakos kőzetblokkok a lávafronton gördülnek le. A lávafolyam, mint egy lánctalp görgeti a gyorsan hűlő lávadarabokat. Az ilyen típusú lávákból álló mezők éles tömbökkel fedett, építkezési törmeléktelephez hasonló, nehezen átjárható vidékek lesznek. Néhány polinéz szigeten, főleg Tongán az ilyen lávafolyások gyakoriak, a helyiek minden mezítlábas átkelés után gyakran kiálthatták, hogy *„ahhh… ahhh... ahhh...”*, így az ilyen típusú lávafelszíneket a'a típusúnak nevezzük. Magyar turisták közelebbi helyszíneken, a Kanári-szigeteken, például Lanzarotén sétálhatnak hasonlón. A Balaton-felvidéken szinte biztosan vannak ilyen lávamezők. A több millió éves felszínformáló erők hatása ellenére is felismerhetők izometrikus, tömör lávatömbök, amelyek éles sarkokkal, gyakran kristályosabb szövettel rendelkeznek.

A Bakony–Balaton-felvidék vulkáni mező területén is azonosítható a felszínre törő magma tulajdonságaiban lévő különbségekből adódó változó vulkánkitörési mechanizmus. Jellemzőek voltak a kezdeti robbanásos kitörések, amit helyenként lávaöntő működés követett. A jelentős térfogatú lávaöntéssel járó vulkáni működés pajzsvulkánokat hozott létre, aminek legszebb példája a Kab-hegy, de így keletkezett az Agár-tető, és számottevő bazalt lávafolyás alakította ki a Bondorót, valamint a Fekete-hegy területét. A bazaltos magmában lévő gázbuborékok okozta robbanásos kitörések sokszor a lávaöntő kitörésekhez kapcsolódtak, amikor lávaszökőkutak emelkedtek a magasba, mint például a Badacsony és a Szent György-hegy tűzhányójának kitörése során. Ezt a magma gyors felemelkedése okozhatta, amikor a gázbuborékok nem tudtak elkülönülni, elszökni az olvadéktól, és a magmás test felső része a felszín alatt szinte felhabzott. A Balaton-felvidéken számos ilyen lávafröccsökből álló kúp, vagy azok maradványa ismert. A Fekete-hegy nyugati oldalában található Boncsos-tető felhagyott kőbányájában



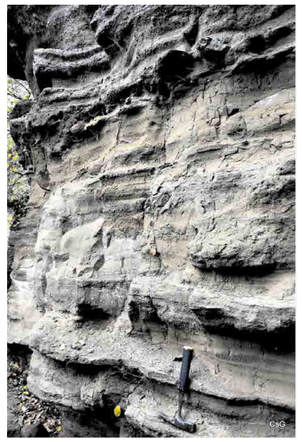


Lávaszökőkút és lávatűzijáték kitörésével létrejött piroklasztitok a Balaton-felvidéken: Boncsos-tető és Badacsony

tárul fel legszebben a vöröses, sötétszínű, gyakran kilapított lepényre emlékeztető fröccsszerű kőzet, amely lapított hólyagokat tartalmaz, időnként sötétebb színű, tömör bazaltsávokkal tarkítva. Ezek a kőzetek annak a hírmondói, hogy ezen a helyen a kitörés lávaszökőkutakkal kezdődött. Hasonló lávafröccskúpok tarkítják a Tihanyi-félsziget nyakánál húzódó gödrösi és diósi lankákat, bár itt többnyire csak a szántásból kiforgatott, gyakran méteres lávafröccs-példányokat láthatjuk.

Amennyiben a gázbuborékok nagyobb gázhólyaggá állnak össze a lassabban felfelé áramló magmában, a felszínre érve szétpattannak, és szétvetik a kisebb gázbuborékokat tartalmazó magmatestet is. Ezek a lávatűzijáték kitörések, amit az olaszországi Stromboli vulkánon megfigyelhető kitörésekre utalva Stromboli-típusú kitöréseknek nevezünk. Jellemzői a likacsos, a hőhatásra lejátszódó oxidáció miatt gyakran vörös színű, salakos bazaltdarabok, az orsó alakú, kötélszerű vagy gömbölyded kőzetbombák. A Balaton-felvidéken több helyen figyelhetők meg ilyen képződmények, így a Badacsony bazaltbányáiban, de több helyen a Fekete-hegyen is.

A robbanásos vulkánkitörések másik okozója a magma-víz kölcsönhatás. A feláramló magma és a felszín alatti vagy a felszíni vizek, vizes üledékek érintkezése hatalmas energia-felszabadulásához vezet – ez az úgynevezett gőzrobbanás. A felszabaduló energia a magma és a víz érintkezési zónájából, az üvegesen megdermedő magmából üvegszilánkokat hasít le és azokat a hirtelen kitáguló gőz robbantja ki, üveges, finomszemcsés vulkáni hamut létrehozva. Az ilyen úgynevezett freatomagmás kitörések jellegzetes rétegsort hoznak létre, melyekben a finomszemcsés hamu döntő mennyisége lesz az egyik legszembeötlőbb és a terepen is felismerhető tulajdonsága a rétegeknek. Ezek gyakran tartalmaznak a mélyből feltépett kőzetzárványokat is. Ha a robbanás a felszín alatt következik be, a felszín alatti rétegeket feltépi a robbanás energiája, és azokat, mint egy ágyúgolyó repíti ki a kitörés. A feltépett kőzetdarabok, hajítási pályát követve landolnak a frissen lerakott, nedves, így képlékeny hamurétegekre, ahol kisebb-nagyobb becsapódási krátert hoznak létre. Oldalról tekintve, ezek a kráterek, mint a rétegek bezsákolódásai ismerhetők fel. Ennek legszebb példái a tihanyi Barátlakások sziklafalain figyelhetők meg. A Barátlakások falában jól kivehetők a permi vörös homokkő, a szilur agyagpala, és néhány triász mészkő becsapódási kráterei. A pannó-





Jellegzetes hidrovulkáni robbanásos kitörésekkel, piroklaszt szórással és alapi torlóárral létrejött vulkáni rétegsorok: Tihany, Barátlakások





Repített kőzetblokkok alatt kialakult beszákolódások a tihanyi Barátlakások szelvényében

niai rétegek agyag és homokbombái, mivel azok nem voltak cementált kőzetek a vulkanizmus idején, gyakran „szétfröccsentek” a becsapódás során, így azok csak kis mélységű bezsákolódást hoztak létre, szemben a permi vörös homokkőtömbök kráterei vel. Kis gyakorlattal, még az eredeti hajítási irány is megadható, amelyek gondos vizsgálat után a kitörési központ helyét is kiadhatják, mint azt a tihanyi vizsgálatok során már Hoffer András is említette az 1940-es évek kutatásaiban.

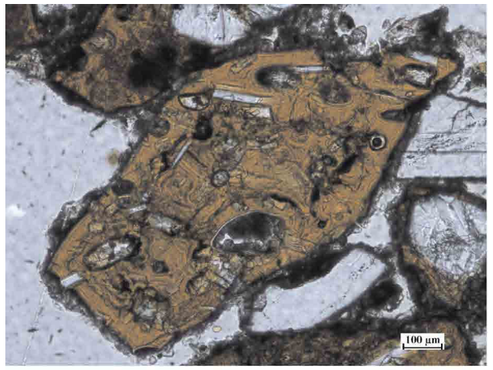
A térség vulkánjainak kialakulása sok esetben úgy értelmezhető, hogy először hidrovulkáni kitörések történtek. A robbanásos kitörések által kialakított tufagyűrűk, maar vulkánok laza vulkáni törmelékes anyaga azonban később könnyen lepusztult, így ezekről a kitörésekről van a

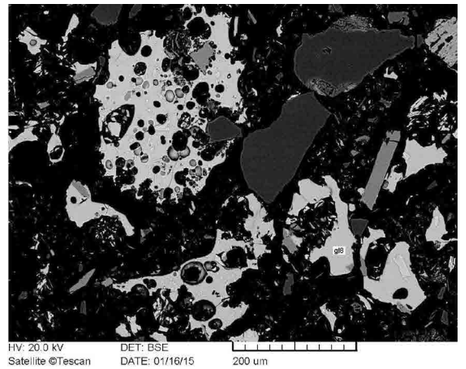


Egy maar vulkáni kitörés jellemző piroklasztitja: figyeljük meg a kőzetdarabok nagy változatosságát (Szentbékkálla)

legkevesebb emlék, megmaradó képződmény. A forró magma és hideg víz vagy vizes üledék keveredésének tanúi az apró kőzetüvegszilánkok, amelyek tufa- és lapillitufa-rétegekben fordulnak elő és csak mikroszkóppal ismerhetők fel. Az olvadék a vízzel való kontaktus következtében hirtelen dermed meg, ezért barnás kőzetüveg, úgynevezett szideromelán keletkezik. Ezzel szemben a magmában lévő gázok okozta, úgynevezett magmás robbanásos kitörések során többnyire lassabb a hűlés, és emiatt eltérő megjelenésű, sok piciny kristályt tartalmazó kőzetüveg, a tachylit jön létre. A lávaszökőkutak peremi részein szintén kialakulhat szideromelán kőzetüveg, de abban sok kerekded üreg figyelhető meg, utalva az olvadékban lévő egykori gázbuborékokra. A Bakony és a Balaton-felvidék vulkánjainak robbanásos kitörések során létrejött képződményeiben sok esetben látjuk azt, hogy szögletes és üreges szideromelán kőzetüveg egyaránt előfordul, ami arra utal, hogy már egy „felhabzott” magma találkozott felszín alatti vízzel és okozta végül a hidrovulkáni robbanásos kitörést. A magma és víz kölcsönhatása robbanásmentes kimenetelű is lehet, ekkor a magma és vizes üledékek különböző formában keverednek egymással, ami úgynevezett peperit képződéséhez vezet. Erre számos példát találunk a Balaton-felvidéken, pl. a Halyagoson vagy Sümegprágán.

A bazaltos robbanásos kitörések rétegeinek jellemzői, a szemcseméret, az osztályozottság, a piroklasztok típusa alapján elkülöníthetők a magmás és freatomagmás kitörési események. Felépíthető a kitörés története, rekonstruálhatók a vulkáni működés során kialakult morfológiai





Szideromelán kőzetüveg szilánk optikai mikroszkópos és visszaszórt elektronsugaras képe

formák (salakkúp, fröccskúp vagy tufagyűrű, tufakúp, maar stb). Azonban jóval kevesebbet tudunk a bazaltos magmákhoz kötődő, nagyobb robbanásos vulkáni eseményekről, olyanokról, amelyek jelentős területen okoztak hamuhullást, sőt piroklaszt-árakat. A Fekete-hegy nyugati oldalában azonban piroklaszt-ár üledékekhez hasonló mátrixgazdag, kaotikus szövetű lapillitufa és tufabreccsa rétegek ismertek. Ezek egy igazi piroklaszt-ár üledéktől abban különböznek, hogy nagy mennyiségű freatomagmás robbanásokra utaló üveges juvenilis piroklasztok és feltépett kőzetzárványok (ezeket nevezhetjük hidroklasztnak) dominálnak bennük. Ezeket a speciális üledékeket eredetük alapján hidroklaszt-áraknak írhatjuk le, amik nemzetközi szinten is ritka képződmények.

A Balaton-felvidéken eddig nem sikerült olyan rétegeket találni, amelyek nagy területet egyenletesen befedő erőteljes szubpliniuszi tí-

pusú kitörésről árulkodnának. A disztális, azaz a vulkánkitörés helyétől távol lerakódott tefrarétegek (robbanásos kitörések üledéke) megtalálása sokszor nem egyszerű. Szárazföldi területeken ezek hamar lepusztulnak, vízi környezetek üledékei esetében pedig fúrásos kutatások szükségesek, hacsak a későbbi erózió következtében nem tárulnak fel ezek a képződmények. Előfordulhat, hogy adott területeken teljesen eltörlődik az ilyen vulkáni események nyoma. Felismerésük azonban nagy fontosságú, különösen a még mindig aktív bazaltvulkáni mezők veszélyességének felmérésében. A kitörési mechanizmus rekonstruálása, azaz a klasszikus fizikai vulkanológiai munka eredményei, ötvözve azokat a kvantitatív becslési modellekkel és modern távérzékelési eszközökkel, a társadalmat, az embereket közvetlenül érintő információvá válnak. A vulkáni veszély felméréséhez azonban szükséges azt is tudni, hogy az adott terület mennyire van kitéve nagyobb





Egy különleges vulkáni képződmény a Balaton-felvidéken: hidroklaszt-ár üledéke Szentbékkállán. A jobboldali ábrán gőzkilépési csatornák láthatók.

robbanásos kitörésekhez kapcsolódó hamuhullásnak. A Bakonyban és a Balaton-felvidéken eddig nem voltak ismertek ilyen képződmények, jóllehet a maar vulkánokban felhalmozódott tavi üledékekben potenciálisan megőrződhettek. A pulai maar alginitrétegsorában azonban olyan üledékes közbetelepülést sikerült azonosítani, amelyben legalább 37 tefralamina különíthető el. Az előzetes geokémiai elemzések szerint ezek különböző összetételű bazaltos magmákhoz kapcsolódnak, és elképzelhető, hogy a Bakony–Balaton-felvidék vulkáni mező heves robbanásos kitörésekkel jellemzett eseményeit rögzítik.

A környezet hatása: hidrovulkáni kitörések

A Balaton-felvidék vulkánjainak működése során a magma és víz kölcsönhatásából származó freatomagmás robbanásos kitörések alapvető fontosságúak voltak. Az ilyen kitörések úgynevezett maar-típusú vulkáni krátereket eredményeznek. Már a korábbi vizsgálatokban is voltak utalások a jellegzetes, üveges piroklasztot tartalmazó kőzettípusok jelenlétére, de eredetükre igazi magyarázat nem volt. Lóczy munkájában megjelent, különösen a tihanyi vulkáni kőzetek keletkezését illetően, hogy azok iszapszerű árakból ülepedhettek le. Erre Hoffer András is utalt a tihanyi vulkanizmust leíró, 1943-as munkájában. Az 1990-es években a tihanyi vulkanizmus vizsgálata, melyet Németh Károly és munkatársai végeztek, az első integrált kutatásként szisztematikusan áttekintette Tihany vulkanitjainak kőzetszöveti képét, és megállapította, hogy azokban az üveges piroklasztitok jelenléte dominál, a tihanyi vulkánok tehát elsősorban freatomagmás kitörések nyomán születtek. Hasonló vizsgálatok ez időtől kezdve a Balaton-felvidék minden egyes vulkáni területén történtek, egyértelműen igazolva, hogy a hidrovulkáni robbanásos események szinte mindenhol meghatározó elemei voltak legalább a kezdeti robbanásos kitöréseknek. Tihany, különösen a Barátlakások és a Kiserdő-tető, a szigligeti Várhegy vagy a fekete-hegyi Vaskapu-szurdok feltárásaiban a finomszemcsés, vajszínű hamurétegekben, gondos vizsgálat során néhány milliméterestől akár centiméteres nagyságú tufagalacsinokat fedezhetünk fel. Ezek a kerekded tufagalacsinok, avagy tufagyöngyök meghatározott rétegekben jelennek meg (tudományos nevük akkréciós lapilli). Ezek akkor születnek, amikor a finomszemcsés vulkáni hamufelhő hőmérséklete a víz forráspontja alá kerül, a hamufelhőben kicsapódik a gőz, és az apró vízcseppek elektrosztatikusan magukhoz vonzzák a hamufelhő piciny szemcséit. Mivel egy freatomagmás robbanásos kitörés rengeteg vízgőzt pumpál a kitörési felhőbe, az annak kondenzációja során keletkező akkréciós lapilli-rétegek fontos (indirekt) bizonyítékot jelenthetnek a freatomagmás típusú kitörésekre.

A meghatározóan freatomagmás robbanásos kitörési folyamatok jelenléte alól csak néhány, elsősorban a terület magasabb, a Déli-Bakonyban található egykori vulkán, mint az Agár-tető vagy Kab-hegy tekinthető kivételnek. A freatomagmás törmelékes kőzetek között találunk olyanokat, melyek jelentős része vulkáni üvegből áll (például Kis-Hegyestű). Gyakoribbak azonban azok, melyekben a nem vulkáni eredetű, aljzatból feltépett más kőzetdarabok dominálnak (pl. Tihany), jelezvén, hogy a vulkáni robbanások a felszín alatt, elzárt kürtőkben következtek be. Az egyszerű szöveti elemzés számos esetben arra engedett következtetni, hogy a Balaton-felvidék bazaltvulkánjainak nagy része kezdetben ún. maar vulkán lehetett.

Az üveges piroklasztok és a feltépett egyéb kőzetzárványok aránya alapján kirajzolódott, hogy a Balaton-felvidéki vulkánok alapvetően mélyen a felszín alatt (100 méternél is mélyebben), a bezáró kőzetoszlopban történt robbanások nyomán jöttek létre. Aszerint, hogy milyen rétegek alkották a felszín alatti kőzeteket, és azoknak milyen vízföldtani adottságai voltak, a hidrovulkáni kitörés különbözőképpen mehetett végbe. Ha a felszín alatti kőzetoszlop alapvetően pórusvízben gazdag rétegekből állt, a feláramló magma az abból származó vízzel lépett kölcsönhatásba. Mivel az ilyen kőzettípusok (gyakran homok és agyag üledékek) permeabilitása eltérő, és vízzel való újratöltődésük bizonyos időt vett igénybe, gyorsan feláramló magma esetén a kezdeti freatomagmás kitörések gyorsan átválthattak pusztán a magma gáztartalma által meghatározott kitörésekbe. Így a vulkán alapját freatomagmás eredetű vékony piroklasztit-összlet alkothatta, melyre vastag, magmás eredetű robbanásokból származó rétegsor, pl. bazaltsalak települt (például a Tapolcai-medence tanúhegyei esetében).

Olyan esetben viszont, ahol a magma mélyebben fekvő mezozoikumi karbonátos kőzetekkel, elsősorban különböző karsztos és hasadékvizet tároló képződményekkel lépett



Tefralaminák a pulai alginit rétegsorában: távoli nagy vulkáni kitörések finomszemcsés üledékei



Akkréciós lapilliben gazdag réteg a tihanyi Kiserdő-tető sziklafalában

kölcsönhatásba, az volt a döntő tényező, hogy e víztározók szinte kimeríthetetlen és gyors vízutánpótlással rendelkeztek. A freatomagmás robbanások ilyenkor hosszantartóak voltak, és mélyből feltépett kőzettöredékekben gazdag, vastag tefraréteget raktak le. Ennek egyik legszebb példái a Tihanyi-félszigeten láthatók.

A Balaton-felvidék bazalt vulkáni mezője a világ egyik legjobban tanulmányozott, tudományos mintaterülete lett, ezzel olyan vulkáni mezők között említett régió, mint a német Eifel-vulkánmező, az új-zélandi Auckland-vulkánmező, a katalán Garrotxa-vulkánmező, a francia Chaîne des Puys vulkánmező vagy az ausztrál



Mélyről feltépett kőzetdarabok (főleg permi vörös homokkő) a tihanyi Barátlakások maar-vulkáni robbanásos kitöréssel létrejött vulkáni képződményében

Victoria állambeli Newer vulkánmező. A Balaton-felvidék azonban nem csak a freatomagmás robbanásos vulkanizmusa miatt került a nemzetközi vulkanológiai kutatások középpontjába, hanem annak komplex fejlődéstörténetével, az itt leírt vulkántípusok különlegességével, és a vulkanizmusnak a környezetre ható jelenségeivel is.

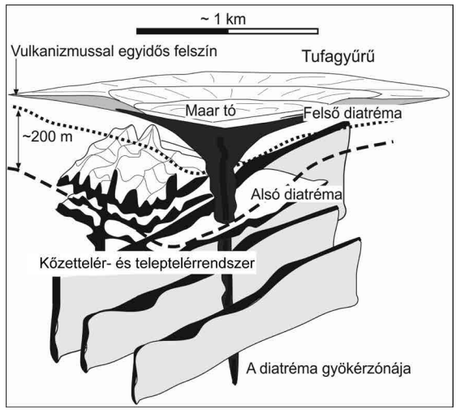
A Balaton-felvidéken a terület 8 millió évvel ezelőtti születésétől számítva a legfiatalabb, alig 2,3 millió éves kitörésekig a létrejött vulkáni formák a terület éghajlatváltozásait is tükrözik. Azokban a periódusokban, amikor a terület éghajlata kissé szárazabb volt, a vulkanizmus egyértelműen a magmás gázok által befolyásolt módon zajlott: robbanásos kitörésekből született salakkúpok kialakulásával volt jellemezhető. Nedvesebb időszakban viszont nagyobb méretű freatomagmás vulkánok születtek. Ugyan a korreláció gyenge, mégis elmondható, hogy a Balaton-felvidéki kutatások indították el a klíma és a vulkáni felszínformák közötti kapcsolatot firtató kutatásokat, mint az Auckland vulkánmező vagy a mexikói felföldön lévő területek esetében. Jelenleg ez a téma a vulkanológia tudományának egyik legizgalmasabb területe.

A Bakony–Balaton-felvidék a monogenetikus vulkanizmus típusterülete

A Balaton-felvidék jellemzően freatomagmás monogenetikus vulkáni mezőként egy egykori folyóvízi–tavi–mocsári üledékgyűjtő medencében, azzal együtt fejlődve született. A vulkánkitörések idejét K–Ar izotópos módszerrel határozták meg, amiben elévülhetetlen szerepe volt Balogh Kadosának, a debreceni MTA Atomki fizikusának. A térségben elsőként épített olyan tömegspektrométert, amivel lehetővé vált argonizotópok mérése, és ez megteremtette a lehetőségét a kőzetek kormeghatározásának. Balogh Kadosa nagy odafigyeléssel hozott kormeghatározási eredményeit később a nagy pontosságú Ar–Ar koradatok is alátámasztották. A vulkanizmus az egykori Pannon-tó parti síkságán kialakult nedves, mocsári területen indult meg úgy 8 millió éve, a mai Tihany területén. Idős, 8 millió év körüli vulkánok Tihanytól ÉNy-ra is ismertek, mint például a Hegyestű, bár ezek erősen lekoptatott állapotban, nehezen értelmezhető helyzetben találhatók. A vulkánmező legtöbb vulkánja jóval később, a 4,5 és 3 millió év közötti időszakban született, és a vulkanizmus központja enyhén nyugatra tolódott, míg a legfiatalabb (3–2 millió évvel ezelőtti) vulkánok (pl. Bondoró, Füzes-tó) a terület középső részén jöttek létre.

A mélyfészkű hidrovulkáni robbanások nyomán kialakult maarok kráterében különböző típusú tavi üledékek rakódhattak le. A pulai maar esetében részben turbidit jellegű áramlatok jellegzetes mélyvízi (akár 100 méter mély) üledékei halmozódtak fel. A pulai maar esetében bebizonyosodott, hogy a krátertó több mint 100 ezer éven át „működhetett". A maar kráter kezdeti mélysége elérhette a 100 métert, ami átlagosnak nevezhető a világ ma ismert maar kráterei között. Míg Pula esetében a maar kráter jelenlétét mélyfúrásokkal és komplex geofizikai kutatásokkal lehetett bizonyítani, más helyeken az eredeti maar kráter létének bizonyítása problémákba ütközött. Több helyen is csupán egy kisméretű, piroklasztitokból álló eróziós csonk maradt meg az egykori vulkánból, általában paleozoos és mezozoos kőzetek alkotta felszínen (pl. zánkai Vár-hegy, barnagi Kő-hegy, Ragonya). Az egykori felszín, amelyen a freatomagmás robbanások a vulkáni szerkezetet kialakították, a ma ismert vulkánroncs felett volt. Ezeket a területeket egykor 100–200 m vastag laza homok- és agyagrétegek, a Pannon-tó üledékei fedték. Ezen a felszínen alakult ki a maar kráter. Az elmúlt évmilliók során ezek a rétegek a vulkán felső részével együtt lepusztultak, így ma az egykori vulkáni szerkezeteknek sok helyen csak a mélyebb részei ismertek. Ahol a maar kráterében nagy vastagságú lávaösszlet halmozódott fel, ott az erózió csak a környező laza üledéket pusztította le. Ezekre a legszebb példák a Tapolcai-medence tanúhegyei. A bazaltvulkánok eróziós maradványait szelvényrajzaikon már Hofmann Károly és Lóczy Lajos is kráter- vagy kürtőkitöltésként ábrázolta. Ez az értelemzés tehát napjainkban is megállja a helyét. Ez a gondolat jól követhető Jugovics Lajos munkáiban is. Jugovics a *Tapolca-környéki bazalttufa-előfordulások* című cikkében a szigligeti Várhegy meredeken települő tufarétegeire azt írja, hogy a „*helyenként 20-40 m magas tufafalai, elliptikus alakja valószínűleg az egykori kráter alakját, esetleg méreteit rögzitik*". Ugyanebben a munkában a szigligeti dombok, a Badacsony, Gulács, Öregerdő, Hármas-hegy és a Tóti-hegy is hasonlóan lett ábrázolva. Ezt a gondolatot tovább fűzve, különösen a szórványosan előforduló, igen kis térfogatú bazalttufa-előfordulásokkal kapcsolatban, azok kőzettani jellegére alapozva Németh Károly, Ulrike Martin és Csillag Gábor arra a következtetésre jutott, hogy ezek nem mások, mint egykori freatomagmás vulkánok kürtőroncsai, vagyis kipreparálódott diatrémák. A vulkáni és a vulkanizmusnál idősebb kőzetek települési viszonyai alapján számos újabb munka született hasonló eszmefuttatást követve, és a Balaton-felvidéki kürtőroncsokat a nógrád–gömöri diatrémákhoz hasonló előfordulásokként értelmezték.

A kérdést Jugovics Lajos is több munkájában részletesen taglalta. Ő a kutatásainak első évtizedeiben egyértelműen a kürtőkitöltő (pl. diatréma) modellel magyarázta a legtöbb bazalttufa-előfordulás eredetét. Ez a gondolat különösen erős volt a Hármas-hegyről alkotott nézeteiben, ahol így írt: „*Ezekután felmerül az a sokat vitatott és még eldöntetlen kérdés, mi az oka, hogy a dunántúli bazaltvulkánosság térszíni megjelenésében, az egymáshoz egész közel fekvő és önálló vulkánoknál is, oly nagy magasságkülönbségek adódnak. Az ezzel kapcsolatos hosszú és régi viták egyik gyakran emlegetett példája éppen a Hármoshegy tufagerince, mely mint láttuk, a 180 m-es pontusi térszinből emelkedik ki, és csak 211 m magas, míg mellette a 438 m-re emelkedő Badacsony-hegyen a pontusi képződményekre átlag csak 300 m-en települ a bazalttufa.*" A fenti ellentmondás feloldható: a bazalttufák nagy része kürtőkitöltés, és azok a „*pontusi*" (=Pannon-tavi) rétegekbe vágva keskeny kürtőcsatornákat, krátereket töltenek ki, így azok lepusztulásával a



Maar-diatréma vulkán elvi rajza

„pontusi" és bazalttufa képződmények magassága a lepusztulás mértékével változó érték lesz.

A fenti nézetet alátámasztani látszik az a felismerés, hogy a legtöbb piroklasztit-összlet legalább 30%-ban tartalmaz feltépett kőzetzárványokat, ami arra utal, hogy a robbanások jelentős mennyiségű kőzetanyagot apróztak fel, ami tipikus maar kráterek kialakulásához vezetett. Ezek mélysége több tíz, de akár 100 méternél is nagyobb lehetett, attól függően, hogy miből is állt a vulkán alatti rétegsor. Olyan területek is ismertek, ahol a feltépett kőzetzárványok mennyisége a 90%-ot is eléri. Ez arra utal, hogy a robbanás fészke igen mély volt (több 100 méter).

A világ számos területén folyó kutatások alapján a maar kráterek alatt kialakuló diatrémák szerkezetéről a XX. század végére világos ismereteink lettek. Bár megújuló viták folynak róla, a diatréma olyan, a freatomagmás robbanásos kitörések során létrejövő és folyamatosan szélesedő kürtő, amit a kitépett és felhalmozódott piroklasztanyag tölt ki. Egy maar krátere alatt található diatréma – a maar tó feltöltődését követően, majd a térszín lepusztulása után – mint kipreparálódott diatrémaroncs maradhat meg. A Balaton-felvidéken több ilyen (térképi nézetben) kisméretű diatrémaroncs ismert. Ezek jelenléte tehát azt jelzi, hogy az eredeti maar vulkán, az annak krátere körül kialakult tufagyűrű, és az egykori kráterkitöltés jelentős része már lepusztult. A számítások szerint e helyeken akár száz métert is meghaladó mértékű lepusztulás történt. A maar kráterek azonban sokszor nem vízzel töltődnek fel. Vagy közvetlenül a maar születése után, vagy hosszabb idő elteltével, a kráterek belsejében lávatavak is létrejöhetnek, sőt, a krátert kisebb salakkúpok és azokból kiinduló lávamezők tölthetik ki, amelyek a maar kráter belsejét mintegy kibélelik, eróziónak igen ellenálló képződményekkel. Ezek a maar kráterkitöltések azonban az eredeti térszín alatt képződtek, tetejük nagyjából az eredeti térszín helyzetét, magasságát jelezheti. Ez a gondolat indította el az 1990-es évek végétől a terület bazaltvulkánjainak geomorfológiai célú vizsgálatait, melyek arra a következtetésre jutottak, hogy a legtöbb Balaton-felvidéki kitörési központ jelentős lepusztuláson esett át, és a ma látható legmagasabb pontok, ahol diatréma jelenlétére utaló képződmények ismertek, az egykori térszín alatti, de ahhoz közeli magasságokat jelölnek.

Záró gondolatok

A XXI. századba lépve a bazaltok kutatása is új kihívásokat hozott a vulkanológusok számára. A pusztán tudományos megismerés által vezérelt, a bazaltos vulkanizmust feltáró, a tűzhányók működésének jobb megértését segítő munkák mellett egyre inkább jelentkezik a társadalmi igény a vulkánkitörés-veszélyeztetettség irányából is. Ehhez jó keretet ad a forrástól, azaz a magmaképződés körülményeinek lokális és regionális rekonstruálásától a felszínig, azaz a vulkán kitörésmechanizmusáig terjedő folyamatsort elemző kutatási szemlélet. Ebben nagy szerepet kaphatnak az olyan új kutatási módszerek is, mint például a kőzettani vulkanológia, ami a kőzetek nagy felbontású, integrált ásványszöveti és -kémiai elemzésén keresztül igyekszik választ adni a bazaltos tűzhányók működési mechanizmusára. A vulkáni működés veszélyeit elemző kutatások mellett egyre nagyobb teret kap a földtani örökségvédelem is, ami a vulkáni működés megmaradt különleges formáit, képződményeit igyekszik bevonni az oktatásba, a tudomány népszerűsítésébe és a turizmusba. A Balaton-felvidék bazaltvulkáni területe ebben is kulcsszerepet játszik. A gazdag vulkáni örökségre építve, azt kiegészítve a földtani múlt változatos képződményeivel létesült a Bakony–Balaton Geopark, ami geotúra-vezető tanfolyamokkal, rendszeres ismeretterjesztő programokkal igyekszik minél jobban bevonni a helyi lakosokat, megismertetve velük a közvetlen környezetükben előforduló természeti értékeket. A fejlesztési támogatások lehetővé tették, hogy 31 megállópontos vulkanológiai tanösvények létesüljenek és a tihanyi Levendula Ház mellett a hegyestűi kiállítás is méltó keretet adjon a vulkáni működés szakszerű bemutatására.

A bazaltok több mint egy évszázadot felölelő intenzív kutatása a XXI. században sem marad új, felfrissítő perspektívák nélkül. A Kárpát–Pannon térség ebben továbbra is fontos természeti laboratóriumot nyújthat, ahol a bazaltok kutatása szép hagyományokra tekint vissza – Lóczy Lajos szellemi hagyatékát Mauritz Béla, Jugovics Lajos, majd Embey-Isztin Antal, Dobosi Gábor örökölte, majd rábízta annak megőrzését és továbbvitelét a következő kutatói nemzedékre.

Ajánlott irodalom

Budai T., Csillag G. (szerk.) 1999: A Balaton-felvidék földtana: magyarázó a Balaton-felvidék földtani térképéhez, 1:50 000. – Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 257 p.

Falus Gy., Szabó Cs. 2004: Felsőköpeny eredetű xenolitok Tihanyról: nyomonkövethető litoszféra-fejlődés a Bakony–Balaton-felvidék vulkáni területen? – Földtani Közlöny 134 (4), 499–520.

Harangi Sz., Lukács R. 2019: A Kárpát-Pannon térség neogén-kvarter vulkanizmusa és geodinamikai kapcsolata. – Földtani Közlöny 149 (3–4), 197–232.

Harangi Sz., Jankovics M. É., Taracsák Z., Németh K., Sági T., Kiss B., Soós I., Lukács R., Zemeny A., Pál-Molnár E., Ntaflos, T. 2015: Bazaltok: a magmaképződéstől a vulkánkitörésig – új eredmények és perspektívák. – In: Pál-Molnár E., Raucsik B., Varga A., (szerk.) Meddig ér a takarónk? A magmaképződéstől a regionális litoszféra formáló folyamatokig. 6. Kőzettani és geokémiai vándorgyűlés Szeged, 9–21.

Hencz M., Karátson D., Németh K., Biró T. 2017: A Badacsony freatomagmás piroklasztit-sorozata: következtetések a monogenetikus bazaltvulkáni működés folyamataira és formáira. – Földtani Közlöny, 147 (3), 297–310.

Jugovics L. 1948: Adatok Tátika-Prága-Sarvaly-hegyek vulkanológiai felépítéséhez. – Földtani Közlöny 78, 196–205.

Jugovics L. 1969: A dunantúli bazalt és bazalttufa területek. – A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1967-ről, 75–82.

Jugovics L. 1971: A Balaton-felvidék és a Tapolcai-medence bazaltterületeinek felépítése. – A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése 1968-ról, 223–244.

Jugovics L. 1971: Kabhegy és a körülötte települő bazaltterületek (kabhegyi bazaltcsoport). – A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése1968-ról, 245–255.

Kereszturi G., Németh K. 2012: Monogenetic basaltic volcanoes: genetic classification, growth, geomorphology and degradation. – In: Németh K. (ed.). Updates in Volcanology – New Advances in Understanding Volcanic Systems. inTech Open, Rijeka, Croatia, 3–88 [http://dx.doi.org/10.5772/51387]

Lexa, J., Seghedi, I., Németh, K., Szakács, A., Konečny, V., Pécskay, Z., Fülöp, A., Kovacs, M. 2010: Neogene–Quaternary volcanic forms in the Carpathian–Pannonian Region: a review. – Central European Journal of Geosciences 2 (3), 207–270.

Martin, U., Németh, K. 2004: Mio/Pliocene phreatomagmatic volcanism in the western Pannonian Basin. – eologica Hungarica series Geologica 26, 192 p.

Németh K., Cronin, S. J., Haller, M. J., Brenna, M., Csillag, G. 2010: Modern analogues for Miocene to Pleistocene alkali basaltic phreatomagmatic fields in the Pannonian Basin: „soft-substrate" to „combined" aquifer controlled phreatomagmatism in intraplate volcanic fields. – Central European Journal of Geosciences 2 (3), 339–361.

Németh K., Martin, U., Csillag G. 2003: Lepusztult maar/diatrema szerkezetek a Bakony–Balaton-felvidék vulkáni területről. – A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése a 2000. évről, 83–99.

Németh, K., Kósik, Sz. 2020: Review of Explosive Hydrovolcanism. – Geosciences 10 (2), 44. [https://www.mdpi.com/2076-3263/10/2/44]

Vitális I. 1911: A balatonvidéki bazaltok. In: Lóczy L. id. (szerk.): A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. I/I. (Geol. függ. II.), 169p.



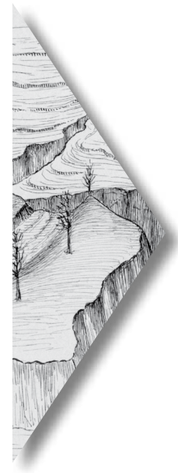
Aquilofusus loczyi

MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

Csillag Gábor

A Balaton környékének geomorfológiája

A geomorfológia a földfelszín formáit vizsgáló tudomány. A felszín formáinak jelentős része a földtörténeti közelmúltban, az elmúlt 1–2 millió évben nyerte el mai alakját. Ezért a földtörténet legfiatalabb időszakának, a mintegy 2,5 millió éve kezdődött negyedidőszaknak a kutatása sok szempontból elválaszthatatlan a felszínalaktantól, a geomorfológiától. Jelen fejezet is ebben a megközelítésben mutatja be a Balaton környékének domborzatát, képződményeit. A sort a legöregebb felszínmaradványok, a több százmillió évvel ezelőtt karsztosodott meszes üledékfelszínek nyitják, melyek megismerése a bányászatnak köszönhető. Ilyen trópusi tönkfelszínek a földtörténet több időszakában keletkeztek a térségben. A geológiai közelmúltban már a Pannon-tó és a vulkanizmus formálta a tájat. Napjaink felszínének kialakításában pedig a víz, a szél, a lejtőmozgások játszották a főszerepet. A fejezet végén pedig arra is fény derül, hogy miért is okoznak olyan sok bosszúságot a balatoni magaspartok mind a mai napig.

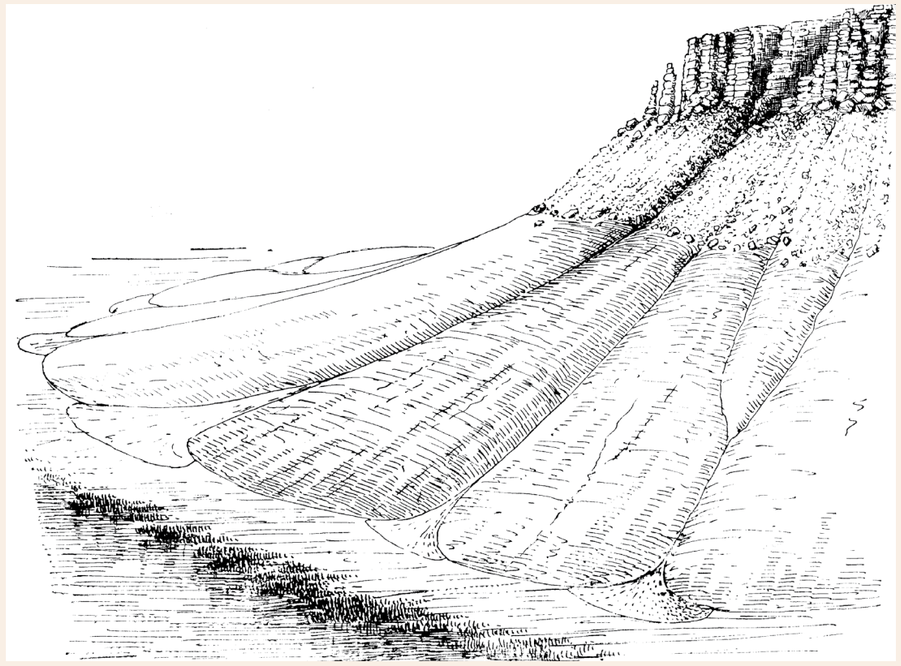


Aszófőtől Badacsonyig

Nagyon csínos, jól elhatárolt kis félmedencze nyílik a tóra Badacsonytomajnál. Messze földön ritkítja párját ez a völgykaréj sajátságos alakulásával. Keleten az Örsihegy festői meredekséggel koronázott, lankásabb alsó lejtője, hátul a Tóti-hegy és a Gulács pompás bazaltkúpjai, nyugaton az alacsony szinten álló Hármas-hegy és a Balaton legszebb dísze, a Badacsony határolják. Nagyon kevés víz jön itt össze, a hegyek lábánál fakad néhány jelentéktelen forrás, némelyik ásványos vizet hoz fel. A tomaji öböl mindenesetre sokkal mélyebben benyúlt hajdan, mint ma, de széles deltalapályt hordtak össze a hegyekből lejövő vízmosások.

A Badacsonynak egész délkeleti lejtőjét ehhez a vízterülethez vettem, mert sem a tomaji amfitheatrumból, sem erről a lejtőről nem jut állandó patak a tóba.

A Badacsony egymagában már egész morfológiai tanulmány tárgya lehet. A hegy aránylag lapos tetejéről sekély mélyedésekben indul meg a víz, aztán meredek peremű bevágódás következik, igazi rováték a bazaltsziklák fantasztikusan kimállott oszlopai, sajtalakú elválás-darabjai közt. Sebesen rohan itt alá a vadvíz, elérkezik a sziklák lábához s apró törmelékkel borítja el a sziklafalak lábát környező kőfolyásokat, úgy hogy a víz itt részben a kövek fölött, részben a kövek közt szalad alább s megint mind előbukik a kőfolyások alján. Ilyenféle eredete van a híres Kisfaludi-forrásnak is. De mivel a hegy lankás lejtőjű, alsó része pannóniai homok- és agyagrétegek váltakozásából áll, természetes, hogy a homokrétegekből mindig törhet elő forrás. Mivel a hegy déli lejtőjén sokkal több ilyen kis forrás van, mint az északi lejtőn, ebből az következik, hogy a pannóniai rétegek igen lankásan dőlnek dél felé s az északi oldalon esetleg a homokban eltünik a víz, a délin meg kicsurog belőle.



A badacsonyi patakok bevágódásának idealizált tömbszelvénye



A Badacsony észak-északkeleti oldala a Kőkapu sziklával

A pannóniai rétegek közt természetesen a patakocskáknak normális, V alakú bevágódása van, a hegy lábánál pedig törmelékkúpja. …

A Badacsony leírásakor Lóczy már reámutatott arra, hogy milyen erős az északi szél hatása a hegy N oldalán. A pannóniai lejtő is rövidebb, termelésre alkalmatlan az északi oldalon. Ezt Korkoványnak hívják, állítólag a sváb (német) borkereskedők szavajárása után (Gar ka' Wein!). Annyi bizonyos, hogy ez az oldal száraz, szeles és az északra néző lejtő nem alkalmas szőllőmívelésre. Szántóföldekkel próbálkoztak itt, de a szél elhordja a termőföldet.

A déli oldalon is a lejövő patakok annyira megfogyatkoznak az alacsonyabb, lankásabb térszínen, hogy nyiltan alig jut víz a tóba s mérni lehetetlen.

Itt van helyén felemlítenem azt a sajátságos dolgot, hogy a Balaton-felvidéki patakok völgyeiben nem találunk terraszokat. Magyarország többi hegyvidékének minden patakja rendesen két jól kifejlett terraszszal lépcsőzött völgyben fut. Ennek az okát abban leljük, hogy az Északnyugati-Felvidék és Erdély stb. folyóinak erózióbázisa az Alföld s ennek három ízben, szakaszosan történt tektonikus sűlyedése okozta a három megifjodást és bevágódást. A Bakony és a Balaton-Felvidék patakjainak erózió-bázisa azonban a denudáczióval lepusztult, pannóniai rétegekkel fedett síkság. Ennek lepusztulása nem volt szakaszos, hanem folytonos, azért az erózióbázis sűlyedése is folytonos volt, a völgybevágódások tehát pihenés nélkül fejlődtek. A szél-denudáczió hatalmas, regionális elterjedésének mindenesetre igen fontos bizonyítéka a terraszok hiánya, szemben az Alföldre támaszkodó folyóvölgyekkel.

Részlet Cholnoky Jenő A Balaton hidrografiája *című könyvéből*

A Balaton környékén jellegében, kialakulásának korában is élesen elválik két terület. A Balaton-felvidék és a Bakony felszínét alkotó kőzetek jelentős hányada a paleozoikumban és a mezozoikumban keletkezett. Ezeknek a rétegeknek a felszínre kerülése, a domborzat kialakulása több szakaszban, részben már ezekben a periódusokban elkezdődött. A somogyi, zalai, Kisalföld peremi területek felszínét viszont a Pannon-tóban lerakódott laza üledékek alkotják. Ezeken a felszín kialakulása csupán néhány millió éve, a tó fokozatos feltöltődését követően kezdődött meg. Ugyanakkor egy laza, homok, kőzetliszt, agyag alkotta felszín sokkal gyorsabban pusztul, más jellegű formák alakulnak ki rajta, mint a kemény, sok esetben karsztosodó, idős kőzetek felszínén.

A legöregebb felszínmaradványok

A Balaton környékének domborzata hosszú idő, sok tízmillió év során formálódott, míg a ma ismert felszín kialakult. A Bakony és a Balaton-felvidék sok százmillió éves paleozoos és mezozoos kőzetei uralkodóan tengerekben rakódtak le. A tengeri üledékképződés azonban időközönként megszakadt, néhány millió éves szakaszokban szárazföldek alakultak ki. A klíma jellemzően trópusi volt, a meleg nedves környezetben a kőzetek mállása, intenzív karsztosodása volt a jellemző. Ilyen körülmények között vastag málladéktakaró, a karsztos felszíneken karsztbauxittelepek kialakulása a jellemző. Az így kialakuló felszínek a trópusi tönkfelszínek, etchplainek.

Az újabb tengerelöntések ezeket a felszíneket befedték, gyakran sok száz méter vastag rétegsorok rakódtak föléjük. A terület változatos, szerkezeti vonalak mentén történt részleges kiemelkedése és ezzel járó eróziója részben újra feltárta ezeket a felszíneket, részben ma is a felszín alatt találhatóak. A trópusi tönkfelszínek jellemző képződménye, a bauxit is változatos helyzetben

Karsztbauxittelep a darvastói bányában ▼





Az úrkúti mangánbányában feltárt paleokarszt ◀

található. Számos helyen külszíni fejtésekben bányászták, míg másutt mélyen a felszín alatt található telepek szolgáltattak jó minőségű nyersanyagot az alumíniumipar számára.

Napjainkban ezek az idős trópusi tönkmaradványok viszonylag kis területen, a fiatal hatásoktól változó mértékben átalakítva, mozaikszerűen vannak jelen a felszínen. Ezek között található a hazánkban jelenleg ismert legidősebb felszínmaradvány is. A perm időszakban lezajlott mállási folyamatok több tíz méter vastag málladéktakarót alakítottak ki a paleozoos agyagpala alkotta felszínen. Erre a perm vörös homokkövet létrehozó folyóvízi összlet több száz méter vastag rétegsora rakódott le. A felszín a vastag homokkőtakaró alól csak kis területen bukkant a felszínre Kővágóörs mellett, többi előfordulása csak a felszín alatt, fúrásokból ismert.

A kréta időszak volt a Kárpát-medence területén az egyik legjelentősebb trópusi tönkösödési időszak, és ezzel együtt járt természetesen az egyik legjelentősebb karsztbauxit-képződés is. Az ekkor kialakult felszínek maradványai sok helyen megtalálhatóak a Dunántúli-középhegységben. A mai felszínen nehéz egyértelműen azonosítani ennek a kréta felszínalakulásnak a maradványait, azonban a bauxitbányászat során, számos helyen feltárultak az egykori felszín nyomai. A leglátványosabb karsztformák az iharkúti bányában kerültek napvilágra. A bánya rekultivációja során ezeket a trópusi kúpkarsztokat, kanyonokat nem őrizték meg, ma csak fotók tanúsítják az egykori formákat.

Nagyobb felszíni elterjedésben ismertek az eocén domborzat maradványai. Ezeken fordul elő a legtöbb bauxittelep. Ezzel kapcsolatban érdemes megemlíteni Bulla Béla és Szabó Pál Zoltán geomorfológusok nevét. Bulla a nemzetközi szakirodalomban is az elsők között ismerte fel és írta le a trópusi tönkösödés folyamatát, jelentőségét. Munkája kiemelkedő, mert szemben a hasonló eredményeket közlő

A trópusi tönkfelszínek osztályozása

A felszíneket Pécsi Márton geomorfológus az 1960-as években feltártságuk alapján osztályozta. Megkülönböztette az ismételten felszínre került „exhumált”, a többé-kevésbé felszínre bukkant „szemiexhumált” és a mélyen a felszín alatt maradt, úgynevezett eltemetett felszíneket. Ez az osztályozás a felszínek mai helyzetét pontosan leírja, azonban nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy akár ugyanannak az egykori, egységes tönkfelszínnek az egyes részletei is lehetnek a fent leírt három különböző helyzetben napjainkban.

kutatókkal, nem a mai trópusi területeken dolgozva jutott erre a felismerésre, hanem a hazai területek paleofelszíneinek vizsgálata, értelmezése vezette erre a jelentős következtetésre. Szabó Pál Zoltán a karbonátos kőzeteken kialakult trópusi tönköket vizsgálta, és írta le az úrkúti Csárda-hegyen a mangánbányászat során feltárt karsztos formákat, mint trópusi felszínen kialakult kúpkarszt maradványait.

Hazánk területén a miocén eleje, közepe volt az utolsó olyan időszak, amelynek során a trópusi tönkösödéshez szükséges meleg, nedves klíma uralkodott. Korábban kialakult, eltemetődött, majd ismét kitakaródott felszínek alakultak át jelentős mértékben. Ezért lehet új felszínről beszélni ebben az esetben is. Ekkor alakult ki a Nagyvázsonyi-fennsík, a Veszprémi-fennsík domborzata is. Nagyméretű, viszonylag sekély karsztmélyedések alakultak ki ezen a területen a triász időszakban keletkezett dolomiton. Azonban kivételesen – feltehetően szerkezeti mozgások hatására – Nagyvázsony környékén közel 100 méter vastag vörösagyag összlet települ helyenként a karsztos térszínre.

A legnagyobb kiterjedésű töbrök ugyancsak Nagyvázsony környékén találhatók. Leglátványosabb ilyen mélyedés a Vízvörös-tó és környéke. A mélyedést kitöltő agyagon csapadékos időszakokban időszakos tó is kialakul. A mélyedéseket helyenként sok bauxit- és vaskéregtörmeléket tartalmazó kaolinites vörösagyag tölti ki. A töbröket kitöltő üledék jelentős hányada az idősebb bauxittelepek áthalmozott anyaga. A vörösagyag felhalmozódásával egy időben lezajlott vulkánkitörésekből származó, a vörösagyagban felhalmozott cirkonásványokon mért korok alapján a töbröket kitöltő anyag a miocénben, nagyjából 20 és 10 millió év közötti időszakban rakódott le. Lóczy Lajos és Cholnoky Jenő a XX. század elején a fennsíkok kialakulását a középső-miocén tenger abrázió-



A Vízvörös-tó és környéke 2015 márciusában

jának tulajdonították. A kort nagyjából helyesen állapították meg, azonban a kialakulás igazi folyamata eltérő az általuk feltételezettől.

A Keszthelyi-hegységben és Tapolca közelében, az Uzsai-erdőben más jellegű formák alakultak ki ebben az időszakban. Kis átmérőjű (5–30 méter körüli), függőleges falú, mély töbrök keletkeztek az általában rendkívül nehezen karsztosodó dolomitban. A Keszthelyi-hegységben 50 métert megközelítő, az Uzsai-erdőben a 100 métert is meghaladó az ismert mélysége ezeknek a mélyedéseknek. A töbröket ezen a területen tűzálló agyag minőségű kaolinit tölti ki. A Keszthely melletti Cserszegtomaj töbreinek bányászata az 1950-es évektől közel 20 éven keresztül folyt. Az agyagtest kitermelésével napvilágra kerültek a tönkfelszínen kialakult karsztüregek is. Sajnos napjainkra ezeket szeméttel töltötték fel, ezzel is veszélyeztetve a rendkívül érzékeny felszín alatti karsztvízrendszert. A töbröket kitöltő kaolinites agyag kora körülbelül 20 millió és 15 millió év közé tehető. Ez az időszak részben egybeesik az úgynevezett miocén klímaoptimummal, ami a Kárpát-medence területén a trópusi tönkösödésnek kedvező utolsó időszak volt. A cserszegtomaji töbröket kitöltő anyag – ellentétben a többi töbör kitöltésével – nem az idősebb bauxittelepek áthalmozásából, hanem jelentős részben a levegőből hullott vulkáni porból, a trópusi körülmények között lezajlott mállási folyamatok eredményeként alakult ki.



A Pajtika-tető utolsó nyitott töbre 1982-ben (Cserszegtomaj)

Körülbelül 11 és 8 millió év között, a Bakony és a Balaton-felvidék területének legnagyobb részét elborította a Pannon-tó. Mindössze a Bakony, a Keszthelyi-hegység és a Balaton-felvidék néhány területe állt ki szigetként a tó legnagyobb elöntése idején. Ennek az időszaknak a mai domborzatban nem őrződtek meg az emlékei. Azonban a Pannon-tó üledékeinek minősége, elterjedése sok helyen mutatja az erre az időszakra kialakult domborzat jellegét. A Balaton-felvidéken és a Keszthelyi-hegységben sok helyen találkozhatunk nagyon jól kerekített, a helyi kőzet anyagából keletkezett kavicsokkal. Ezek a parti hullámverés eredményeként keletkezett abráziós kavicsok az egykori sziklás partokra utalnak. A hullámverés kes-



Triász dolomit hullámveréssel formált szikla-felszíne, rajta a helyi dolomitból keletkezett, jól kerekített abráziós kavicsokkal

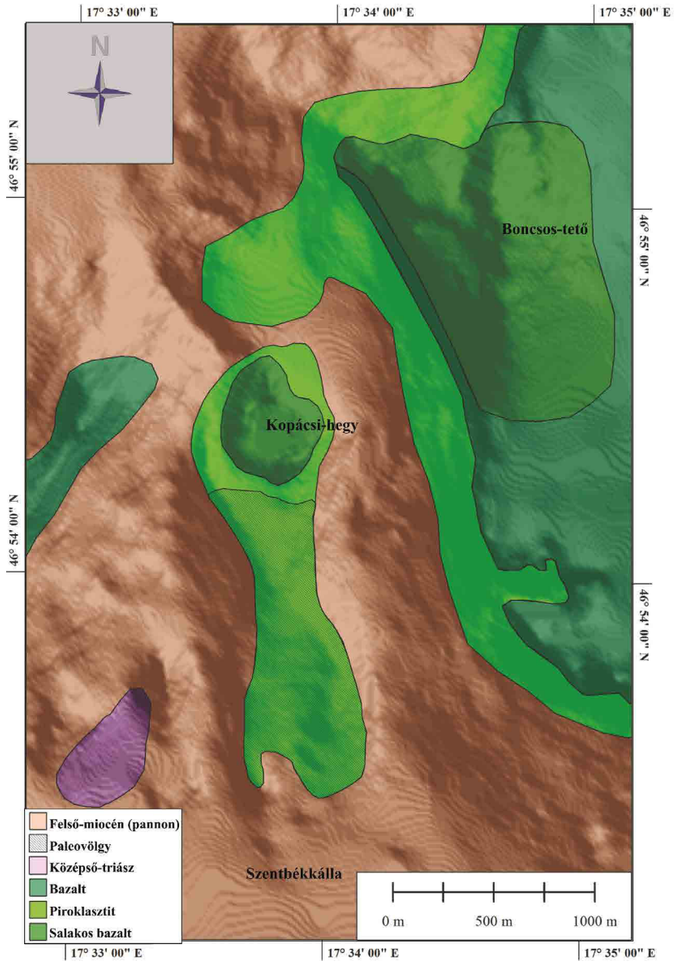
keny, néhány méteres, úgynevezett abráziós teraszokat, színlőket vésett a meredek, sziklás partokba. Helyenként ezeknek a színlőknek a maradványai felismerhetők, nem csupán a kavicsok, hanem a hullámverés formálta sziklák felszíne is megőrződött napjainkig.

A Keszthelyi-hegységbe mélyen benyúló völgyekben helyenként a Pannon-tóban keletkezett lignitrétegek, valamint édesvízi mészkő található. Ez bizonyítja, hogy ekkorra a korábban kialakult tönkfelszín feldarabolódott, mély völgyek tagolták a hegységet, amelyekbe benyomult a tó vize. A partoktól távoli, hullámverésmentes, sekély vízben rakódtak le az ott ma a felszínen található rétegek.

A Pannon-tó után, a vulkánok története

A Pannon-tó körülbelül 8 millió éve töltődött fel a Balaton-felvidéken és közvetlen környékén. Tőle délre még létezett a tó, de néhány százezer, esetleg egy-két millió év alatt a somogyi vidék is szárazulattá vált. A lassan visszahúzódó, feltöltődő tó sík vidéket hagyott hátra, amin az Alpok és a Nyugati-Kárpátok felől érkező, a tavat feltöltő folyók vették át az uralmat. Az egykori folyók hordaléka helyenként vastag homok- és agyagösszlet formájában rakódott le. Ezek nyoma – jelenlegi ismereteink szerint – a Dunántúli-középhegység területén nem található meg. Feltehetően a folyók megkerülték a középhegységet, nem folytak át rajta. A Tapolcai-medence az egyik valószínűsíthető nyomvonal, bár az egykori folyó üledékeit eddig nem lehetett kimutatni ezen a területen sem.

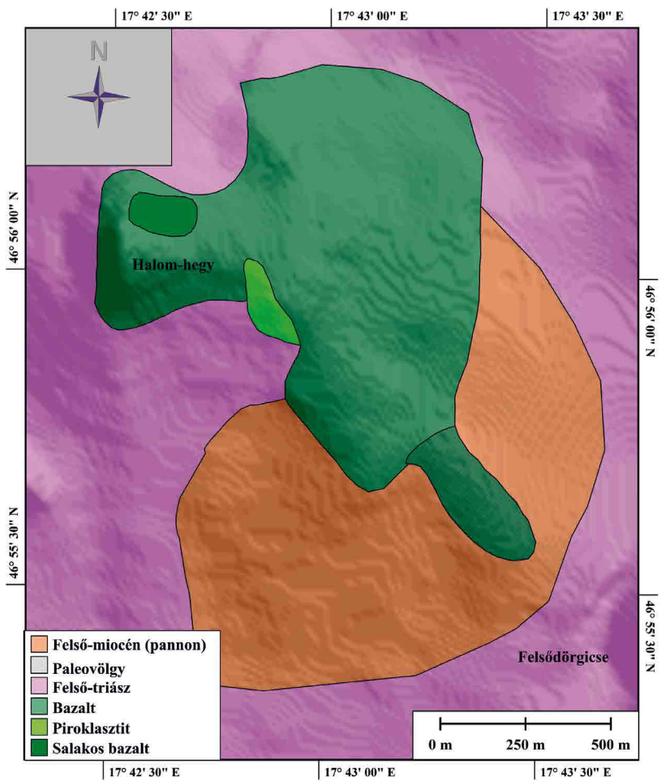
A Dunántúli-középhegységben tehát ebben az időszakban két jelentős változás történt. A terület egésze szárazulattá vált, megindult a szárazföldi felszínformálódás, valamint még egy felszínalakító hatás is megjelent: 8 millió éve Tihanyban megkezdődött a Bakony és a Balaton-felvidék területén több mint 5 és fél millió éven át ismétlődő bazaltvulkáni tevékenység.



A Kopácsi-hegy kráterétől Szentbékkálla felé tartó paleovölgyet kitöltő piroklasztár a mai domborzatban gerinc formájában jelenik meg (geomorfológiai inverzió)

A sík, alig tagolt domborzat hosszú időn át, de csak lassan formálódott. Az egyre tagoltabbá váló domborzat nyomát a vulkáni folyamatok segítettek megőrizni. Két nagy lávatakaró alakult ki. A Kab-hegy takarója az 5 millió év körül kialakult felszínt fedte le. Az Agár-tető ennél fiatalabb, 3 millió év körül alakult ki a lávatakarója. A lassan formálódó felszínbe dél felé lejtő völgyek vágódtak be. Néhány vulkánkitörés anyaga ilyen völgyeket töltött ki. Az egyik legfiatalabb kitörés Monostorapáti mellett, a Kopácsi-hegy salakvulkáni kráterét hozta létre. Az innen lezúduló piroklaszt-ár által kitöltött egykori völgy a Kopácsi-hegytől dél felé, egészen Szentbékkálláig nyomozható.

A Mencshely melletti Halom-hegy kitörése során az egyik lávafolyás egy körülbelül 600 méter hosszú, sekély völgyet töltött ki, ami a bazalttörmelék elterjedése alapján, dél felé Dörgicse közeléig követhető a mai felszínen. Ezek, a nagyjából 4 millió és 2,6 millió év közötti egykori völgyek a Pannon-tó laza üledékein alakultak ki. Az elmúlt évmilliók során a laza üledékek lepusztultak, az egykori völgyeket kitöltő, a környezetüknél keményebb, ellenállóbb vulkáni kőzetek ma kiemelkednek környezetükből. A domborzat tehát megfordult, az egykori mélyedésből lett a mai kiemeltebb, környezeténél magasabb domborzat. A földtudományok ezt geomorfológiai inverziónak nevezik.



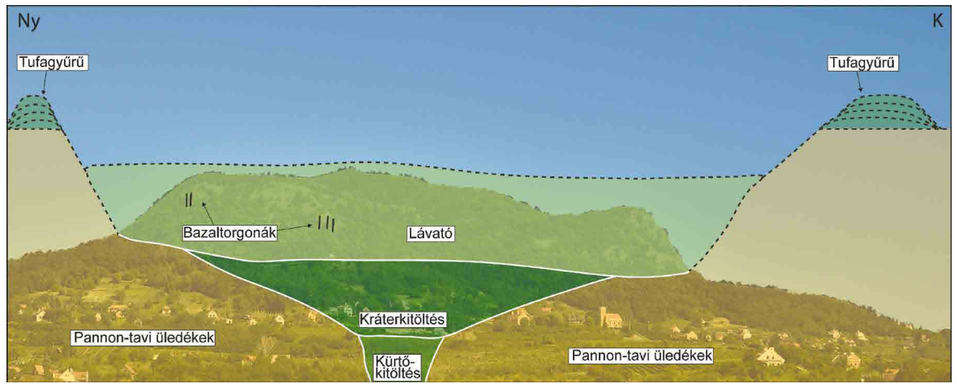
A Halom-hegyről kiindult, a paleovölgyet kitöltő lávafolyás elterjedése

Ami a vulkánokból megmaradt

Gyakran felmerül két kérdés: mi őrződött meg az egykori vulkáni formákból és vajon a Tapolcai-medence tanúhegyei egykori vulkáni hegyek maradványai-e? A válasz az előbbire: kevés, az utóbbira: nem. Érdemes azonban ennél részletesebben válaszolni a két felvetésre.

A tanúhegyek bazaltja maarkráterek belsejében halmozódott fel. A Badacsony, a Szent György-hegy bazaltösszletének vastagsága helyenként a száz métert is meghaladja. Mit je-

lent tehát ez? 3–4 millió éve, a vulkánkitörés hatalmas robbanással, 100 métert meghaladó mélységű krátert alakított ki a Pannon-tóban több millió évvel korábban lerakódott homok, kőzetliszt, agyag összetételű rétegeken kialakult szárazföldi térszínen. A robbanás a kráter körül létrehozott egy tufagyűrűt a felszínre dobott vulkáni porból, lapillikből, vulkáni bombákból, valamint az áttört, kirobbantott üledékes kőzetekből. A kráter belsejét láva töltötte ki. Az elmúlt évmilliók során a Tapolcai-medencét kialakító külső erők (víz, szél, tömegmozgások) a Pannon-tó laza üledékeit elszállították. Így az egykori kráterek belseje kipreparálódott, majd az eróziós folyamatoknak köszönhetően, a



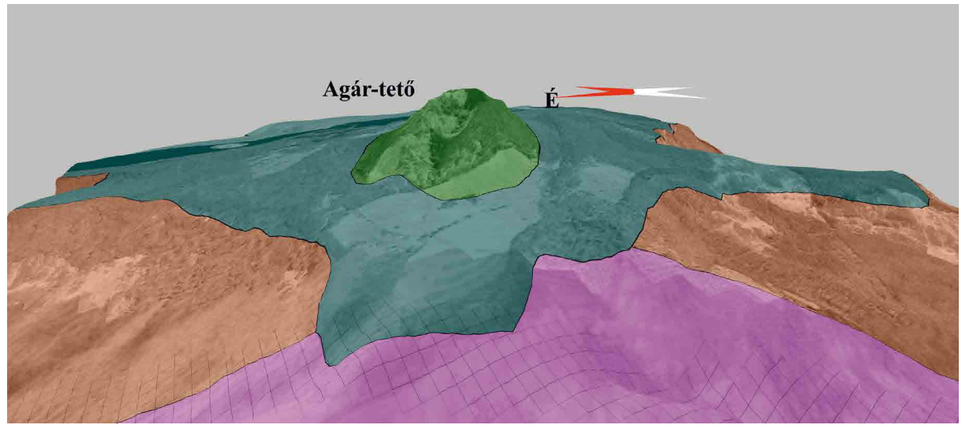
A Szent György-hegy panorámaképe, a pliocén maarkráter lepusztult és máig megőrződött környezeteinek feltüntetésével

környezeténél sokkal jobban ellenálló „bazaltsapka” az egyre jobban pusztuló, alacsonyodó környezetből fokozatosan egyre inkább kimagasodott. Hasonlóan a vulkáni képződményekkel kitöltött völgyekhez, ebben az esetben is geomorfológiai inverzió történt.

A Tapolcai-medence tanúhegyei tehát nem vulkáni hegyek maradványai! Ezek a bazalttestek eredeti helyzetükben a korabeli felszínnél mélyebb helyzetben keletkeztek, a maarok belsejében. Mi őrződött meg akkor az egykori vulkáni formákból? A kevésnél bővebb válasz úgy adható meg, hogy erodálódott, többé-kevésbé lepusztult, elsődleges vulkáni képződmények azonosíthatók a Bakonyban és a Balaton-felvidéken. Az Agár-tetőn, a Fekete-hegyen környezetük fölé emelkedő bazalthátak egykori lávafolyások maradványai. Az erősen megnyúlt hólyagüregek részletes mérésével feltehetően a folyásirány is megállapítható lenne. A Fekete-hegy fennsíkjának tavai (Bika-tó, Monostori-tó, Kálomis-tó stb.) az egykori lávafolyások által elgátolt mélyedéseket töltik ki napjainkban.

Látványosabb, nagyobb vulkáni maradványformák is megőrződtek azonban. A legtöbb vulkáni területen az utolsó kitörések salakvulkáni kúpokat építettek fel. A Badacsony, a Szent György-hegy és néhány más bazalthegy tetején ezek teljesen lepusztultak, csak néhány kis sziklafeltárás és a felszínen található vulkáni salak törmeléke bizonyítja létezésüket. Azonban a Fekete-hegy fennsíkjának északnyugati részén a Boncsos-tető 70–80 méterrel magasodik a környezete fölé. A hegyet teljes egészében bazaltsalak építi fel. A hegy az egykori salakvulkán máig megőrződött déli fele, a hegy északi része mára lepusztult.

Az Agár-tető csúcsa 50–60 méterrel emelkedik ki a platóból. Alakja első ránézésre igen furcsa.

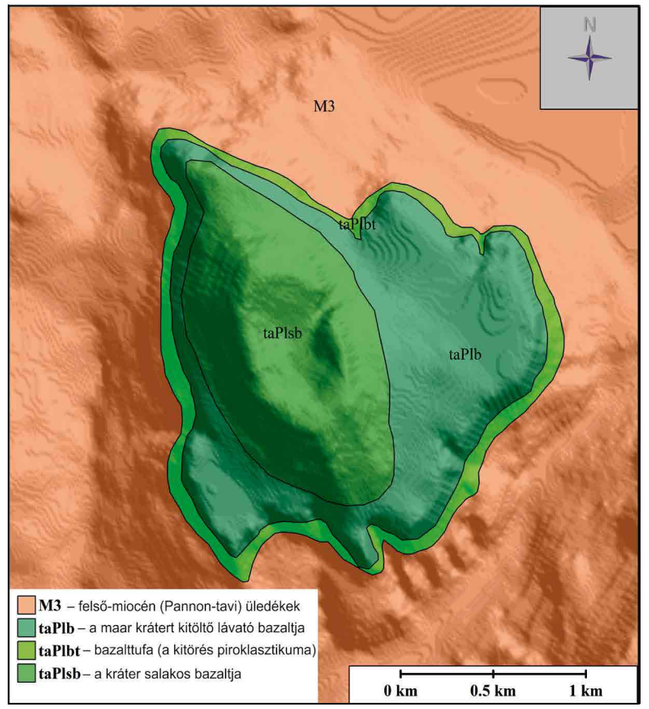


Az Agár-tető salakvulkáni kúpja

Gerince keskeny, meredek, északnyugat felé nyitott ellipszist alkot, amit bazaltsalak épített fel. A gerinc az egykori kráterperem, amit északnyugat felől az erózió átvágott a kráter belsejéig hatolva. Az egykori kráter környezetében számos egykori lávafolyás őrződött meg többé-kevésbé erodált, keskeny, hosszú dombsorok formájában.

Hasonlóan salakkúp őrizte meg a formáját az Agár-tetőtől keletre, a Bondorón. Ezt a krátert is elérte egy völgy bevágódása. A völgy két oldalán feltárt kőzetek arra utalnak, hogy a Bondoró kúpjának kialakulásában a salakvulkáni működés mellett kisebb lávafolyások, lávafröccsök is jelentős szerepet játszottak. Talán ezek a keményebb alkotók is hozzájárultak a vulkáni kúp viszonylag kismértékű eróziójához.

Az egyik legépebben megőrződött vulkáni forma a szentbékkállai piroklaszt-ár leírásánál már megemlített Kopácsi-hegy salakvulkánja. Ennek mérete sokkal kisebb az előbb leírtaknál, az egykori kráter körül mindössze egy néhány méter magas, bazaltsalak anyagú gyűrű alakult ki. A gyűrű kelet felé nyitott. Ebben az esetben felmerül annak lehetősége is, hogy ez a nyílás már a kitörés során kialakult, mivel előterében egy kis bazalttufa



A Bondoró krátere

domb emelkedik. Lehetséges, hogy ez egy kisebb piroklaszt-ár felhalmozódásával keletkezett, ami ezen a nyíláson hagyta el a krátert.

A viszonylag épségben megőrződött vulkáni formák 3,3 és 2,6 millió év között keletkeztek. Jelenleg nincs válasz arra a kérdésre, hogy miért erodálódtak szinte teljes mértékben egyes – feltehetően idősebb – salakvulkáni kúpok és miért őrződtek meg viszonylag épségben a pliocén legvégén kialakult salakvulkánok.

A mai felszín kialakulásának első lépései

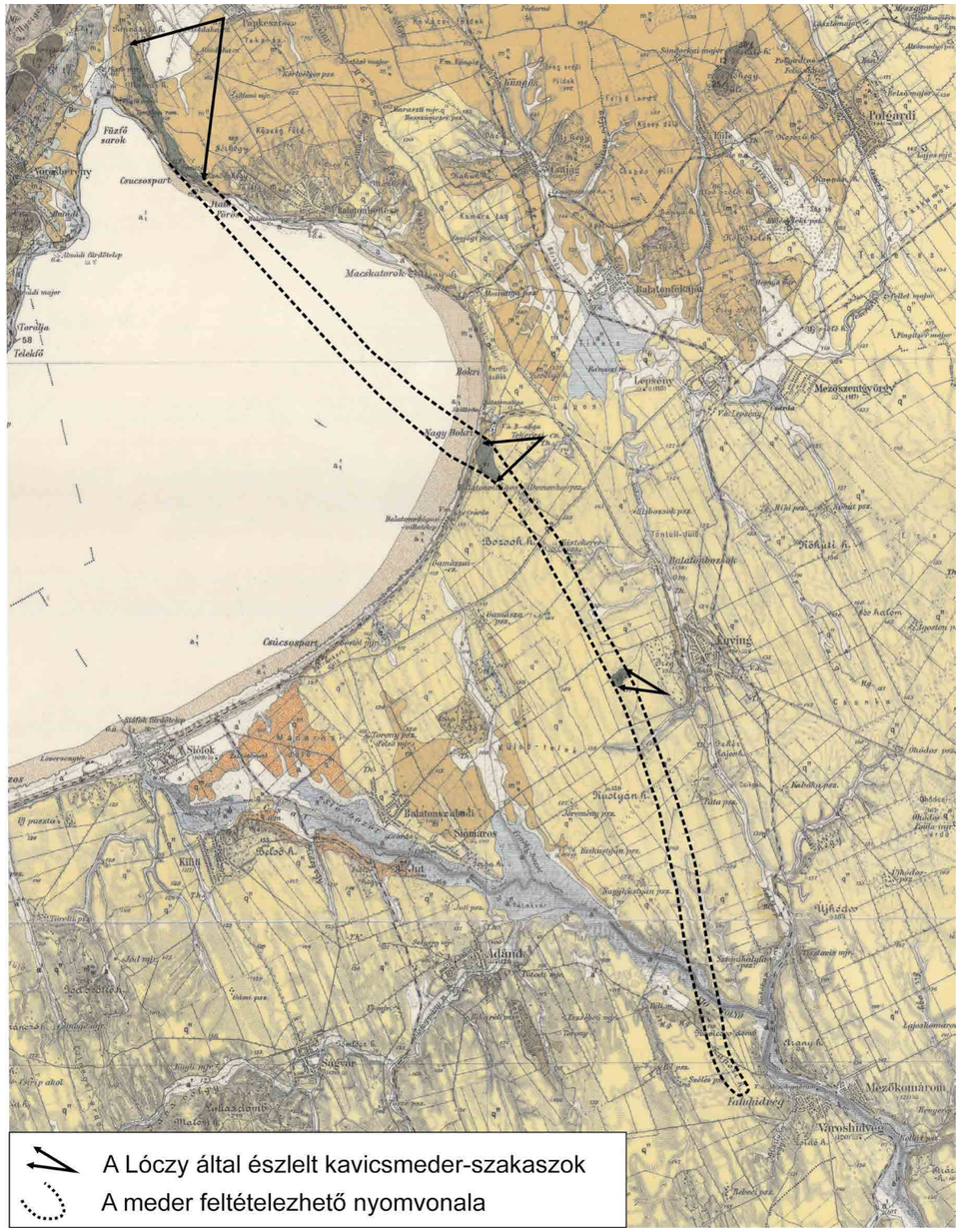
A Balaton és környékének mai felszíne a negyedidőszakban alakult ki. A negyedidőszak első, hosszabbik szakasza a pleisztocén volt. A mintegy 2,5 millió éve kezdődött kort a holocén, vagyis a jelenkor követte, alig több mint 10 000 éve. A pleisztocénben történt meg a nagy fordulat. Addig a domborzat változásának legtöbb eseménye a Balaton-felvidék és a Bakony szilárd kőzeteiből álló felszínein történt. Ettől kezdve azonban jelentős változáson ment át a mai Somogyi- és Zalai-dombság, valamint a Mezőföld laza üledékekből felépült területe.

A Somogyi-dombság területe nagyon kevéssé ismert. Lóczy munkáján kívül átfogó feldolgozás kevés született. A legjelentősebb munka Erdélyi Mihály kétrészes cikke volt, ami 1960-ban jelent meg. Geomorfológiai kutatásokat pedig csupán Szilárd Jenő és Marosi Sándor végzett az 1950-es és 1960-as években Somogy területén.

A pleisztocén elején a Balaton-felvidékről lefutó patakok a somogyi területen keresztül tartottak a Kapos völgye felé. Erről a legmagasabb tetőkön ritkán megőrződött, dolomit, mészkő, perm vöröshomokkő anyagú kavicsok tanúskodnak. Másutt vastag vörösagyagos talaj képződött, ami alatt vastag mészfelhalmozódási szint alakult ki. Ebben az időszakban tehát a mai Balaton felé tartó somogyi lejtők még nem léteztek, a terület egységesen, enyhén dél felé lejthetett. Ez a domborzat már a pliocénben sőt, feltehetően már a miocén végén kialakulhatott. A kora-pleisztocén során azonban elkezdődtek a változások.

A vulkáni működés megszűnése és a mai felszín kialakulásának kezdete közel egy időre tehető. A Balatonnak még ekkor sem volt nyoma. Ennek látványos bizonyítékát szolgáltatta Lóczy Lajos földtani térképe. Az ábrán sötétzölddel jelölt képződmény egy hajdani folyómeder kavics, homok anyagának maradványa. Jól látható, hogy az egykori meder keresztezte a mai Balatont. A balatonkenesei magaspart tetején, közel 70 méterrel a tó vízszintje felett találhatóak ezek a kavicsrétegek. Az egykori folyó a térképen ábrázoltnál is hosszabban követhető ma már. Ismerjük előfordulását Szabadhídvég (Lóczy korában Városhídvég) mellett is. Az egykori folyó maradványai több mint 30 km hosszan követhetőek. A kenese–szabadhídvégi meder a Duna felé tartó dunántúli folyórendszer része volt. Ekkor azonban a Duna is másutt járt, a mai medertől keletre, így ez az egykori, a Balaton-felvidék és a Bakony keleti részének vizeit összegyűjtő folyó is a mai Sárvíznél hosszabb utat kellett megtegyen a dunai torkolatáig, ami akkoriban valahol Baja és Szeged között lehetett.

A folyóvízi kavics geomorfológiai jelentőségét Lóczy Lajos ismerte fel. Az előkerült molluszkák és elefánt-félék (*Elephas meridionalis/antiquus*, napjainkban *Mammuthus meridionalis* néven említik) maradványai már a XX. század elején világossá tették, hogy a folyóvíz – Lóczy szerint az ős-Séd – a kora-pleisztocénben, a negyedidőszak elején alakította ki ezt a medret. Az elmúlt években Virág Attila dolgozta fel az elefánt-félék hazai leleteit. Vizsgálatai szerint a szabadhídvégi maradványok kora mintegy 2,2–2,0 millió évre



A Lóczy-térkép részlete a Kenese–Városhídvég melletti meder maradványaival

tehető. A Balatonföldvár melletti Köröshegy régi téglagyárában mutattak ki hasonló korú folyóvízi üledéket. Noha Köröshegy környékén csak egyetlen ponton ismerünk ilyen korú folyóra utaló nyomokat, úgy tűnik, hogy ez a folyó már nem keresztezte a Somogyi-dombságot, hanem annak tövében, a Balaton déli partján, 170 méter körüli magasságban, közel 70 méterrel a mai tó szintje felett, vagy a kenese–városhídvégi meder felé, vagy Fonyód felé tarthatott.



A csajági mamut (fotó: Katona Lajos)

Marosi Sándor és Szilárd Jenő az 1980-as évek elején hívta fel a figyelmet arra, hogy meg kell különböztetni a Balaton tómedencéjét a Balaton-felvidék és a Somogyi-dombság között a pleisztocén során kialakult, fokozatosan alacsonyodó területtől, amit „Balatoni-medence" néven írtak le. A tómedence legmagasabb szintje 112 méter körül lehetett a legmagasabb vízállás idején. A „Balatoni-medence" szintjei e fölött alakultak ki a pleisztocén során, anélkül, hogy a Balaton valamiféle elődje kialakult volna a területén. A köröshegyi molluszka és gerinces leletek kora Krolopp Endre és Kretzoi Miklós paleontológusok szerint nagyjából egyidősnek tekinthető a szabadhídvégi faunával. Tehát a „Balatoni-medence" a Balaton-felvidék és Somogy között ebben a 170 méter körüli szintben körülbelül 2 millió éve már megjelent a domborzatban.

Miért ilyen a mai felszín?

Az elmúlt kétmillió év során a külső erők alakították ki a Balaton környékének mai domborzatát. Melyek ezek a „külső erők"? Hogyan hatottak, alakították a felszínt? Ezekre a kérdésekre válaszolva ismerhető meg annak a domborzatnak a kialakulása, amit ma a Balatonon egy hajóról körbenézve, repülőgépen a vidék fölött elrepülve láthatunk.

A víz, a szél, a gravitáció közvetlen hatásai azok az úgynevezett külső erők, amelyek a felszínt alakítják, helyenként azt letarolva, másutt lerakva az elszállított anyagot. Ebben a fejezetben csupán a vízről és a gravitációs tömegmozgásokról lesz szó, a szél felszínalakító munkájáról a következő fejezetben olvashatnak.

A felsorolt külső erők aránya azonban a klímától függően mindenkor változott. A negyedidőszakban a Kárpát-medence klímája is sokszor megváltozott. Az északi féltekén négy jelentős lehűlés, eljegesedés történt, amelyeket glaciálisoknak neveznek. Hazánk területén szárazföldi jégtakaró soha nem alakult ki, azonban a hideg időszakokban úgynevezett periglaciális, jégtakaró környéki, mainál sokkal hidegebb klíma uralkodott. A lehűlések közötti, úgynevezett interglaciális időszakokban pedig felmelegedés történt, egyes időszakokban a mainál is jelentősen melegebb volt az éghajlat. A hideg, száraz időszakokban a szél eróziós és üledékfelhalmozó tevékenysége, a meleg szakaszokban a folyóvízi erózió volt a legjelentősebb felszínformáló tényező.

A víz felszínformáló szerepe

A felszínre hulló csapadék egy része elpárolog, egy része beszivárog a felszín alá, egy része lefolyik. A felszín formálódására az elpárolgó víznek természetesen nincs hatása. A felszín alá



A Balaton és környéke 26 532 méter magasról (a Bakonyi Csillagászati Egyesület űrbatyujának felvétele)

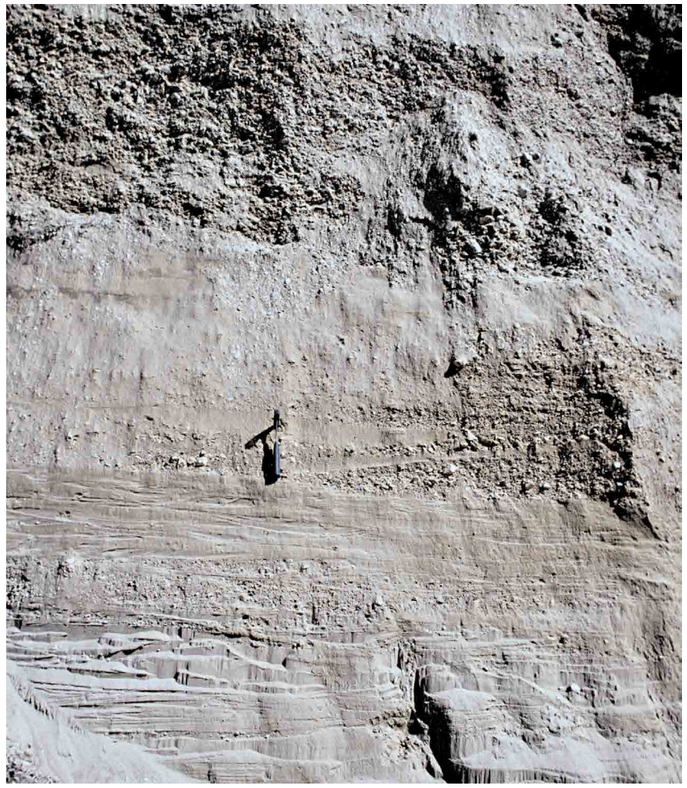
beszivárgó víz a mészkő és dolomit alkotta területeken, a felszínen kisebb-nagyobb karsztformákat alakított ki a Bakony és a Balaton-felvidék területén is. Szép karr formákkal sok helyen találkozni mészkő és dolomit felszíneken egyaránt. A beszivárgó víz, karbonátos kőzet esetén, a felszín alatt fejti ki felszínformáló hatását (barlangképződés), de a felszín alatti hatás befolyásolhatja a felszíni domborzatot is (dolina).

A felszíni vizek szerepe azonban sokkal jelentősebb volt. Ezek nem csupán a mai völgyeket alakították ki, hanem a lejtők felszínén lefolyva is hozzájárultak a domborzat formálódásához. Kialakult a mai völgyhálózat. Helyenként mély szurdokvölgyek alakultak ki. Ezek szép példái a Keszthelyi-hegységben a Szent Miklós-völgy, Kígyós-völgy, a Balaton-felvidéken a Nosztori-völgy, a Bakonyban az Eger-patak völgye.

A hegyek közül kiérkező völgyek előterében változatos méretű hordalékkúpok képződtek. A legnagyobb ilyen formák a dolomitterületek lábánál találhatók. A hideg periódusokban, a fagyaprózódás hatására nagy mennyiségű törmelék keletkezett. A dolomit a többi kőzetnél jobban aprózódik, így a dolomitfelszíneken több törmelék keletkezett. A száraz időszakokra jellemző epizodikus, ritkán bekövetkező, hirtelen lezúduló, nagy csapadékmennyiség hatására kialakuló áradások változatos, a homoktól a hatalmas blokkokig terjedő szemcseméretű, több méter vastag hordalékkúpokat építettek fel.



Durvatörmelékes hordalékkúp a Keszthelyi-hegységben. Késő-pleisztocén hordalékkúpot (1) átvágó, annak előterében lerakódó késő-pleisztocén–holocén hordalékkúp (2) a hegység nyugati peremén a Gyöngyösi Csárda mellett 1982-ben



Dolomitkavics és -homokrétegek a Vári-völgyet kitöltő hordalékkúpban (Keszthelyi-hegység)

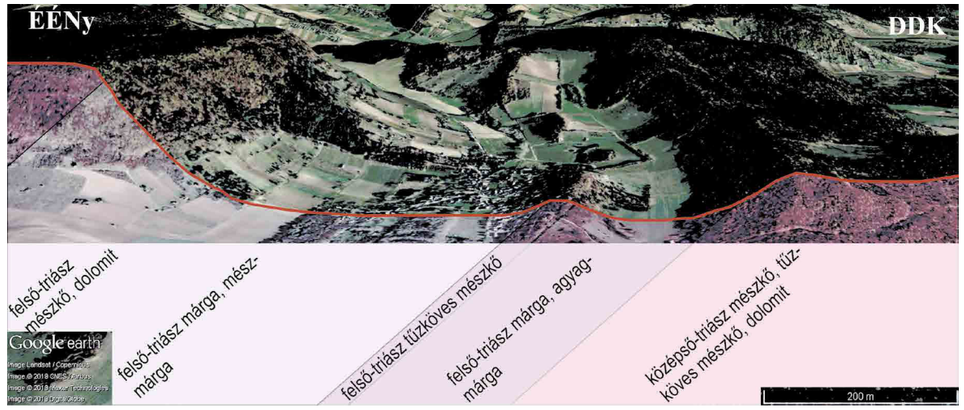
A Balaton-felvidéken az eróziós völgyek kialakulása hozzájárult a mai domborzatot meghatározó, úgynevezett márgamedencék létrejöttéhez is. A felszínt felépítő, uralkodóan enyhén északnyugat felé dőlő triász rétegsor változatos képződményekből áll. A kemény mészkő- és dolomitrétegek között egy, a felszínen több kilométer széles zónát alkotó, körülbelül 500 méter vastag, erősen agyagos, a mészkőnél és a dolomitnál sokkal puhább kőzetösszlet települ (Veszprémi Márga, lásd a 2. fejezetet). Ezen a márgaösszleten alakultak ki a Balaton-felvidék középső és keleti részének medencéi. A legnagyobb ezek közül a Pécselyi-medence.

Ezek a medencék a geomorfológiában szelektív lepusztulásnak nevezett folyamatnak köszönhetik kialakulásukat. A bevágódó völgyek eróziója a puha kőzeteket sokkal könnyebben szállítja el. A lejtők lepusztulása is gyorsabb folyamat puha, agyagos kőzetek, mint a kemény mészkő- és dolomitrétegek esetében. Így alakulnak ki az enyhén hullámos felületű medencék, széles, vizenyős, mocsaras völgytalpakkal, míg a medencék fölötti és alatti völgyszakaszok sokkal szűkebbek, gyakoriak a szurdokvölgyek.

A Pécselyi-medence vizeit több völgy vezeti le a Balatonba. Az Örvényesi-séd hosszan kanyarog a medence déli peremén Vászolytól kelet felé, amíg megtalálja a kijáratát Pécselytől délre, ahonnan a Körtvélyes és Ágas-magas dombjai közötti szűk völgyben, áttörve a triász mészkő- és dolomitrétegek vonulatát eljut a Balatonba. Az Örvényesi-séd mellett még két másik séd vezeti le a medence vizeit, amelyeknek hasonló a morfológiája. A medencék belső területének domborzata is látványos példája a kőzetminőség-különbség hatásának. A több száz méter vastag puha márgaösszletet egy mindössze 10 méter vastagságú kemény, tűzköves mészkő osztja ketté. A környezetükből az erózió által kipreparált keskeny mészkőgerincek a műholdak képein is felismerhetők.

Gravitációs tömegmozgások

A szilárd kőzetek formálódásában a pleisztocén hideg szakaszaiban az aprózódás volt a legjelentősebb tényező. Ennek leglátványosabb emlékei a bazalthegyek meredek peremein kialakult úgynevezett törtlejtők. A lejtő felső szakaszát a függőleges, 90 fokos sziklafelszínek, sok esetben a híres bazaltorgonák alkotják. Ezek alatt a szétfagyott sziklák törmeléke alkot 30 fok körüli felszínű lejtőt, amit kizárólag durva, 5–50 cm-es, kerekítetlen bazalttörmelék alkot. Ezek az úgynevezett periglaciális kőfolyások, amelyek megtalálhatóak a Tapolcai-medence tanúhegyein, de néhány más bazalthegy lejtőin is.



A felső-triász (karni) márgán kialakult monoszlói medence

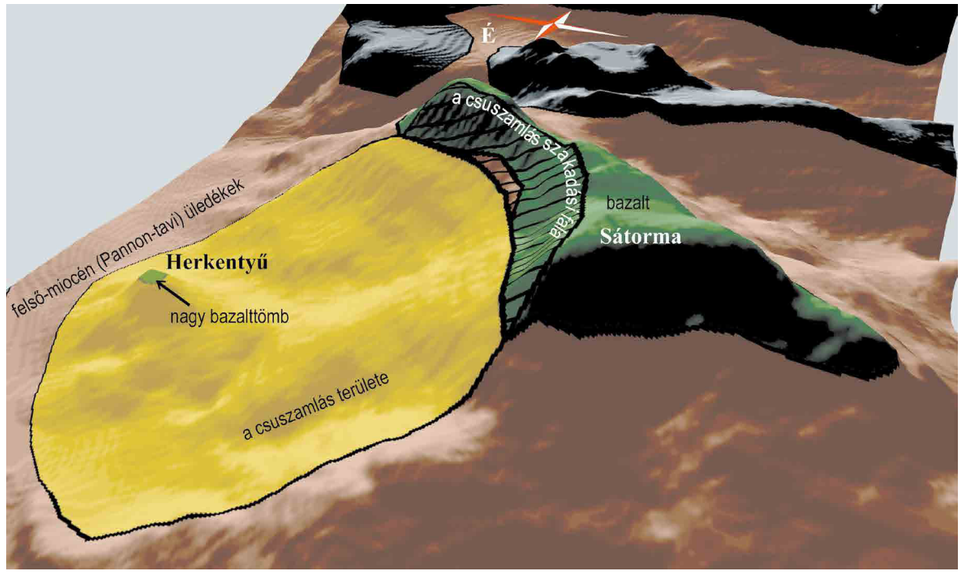
A lejtőkön kisebb-nagyobb mozgások sok helyen előfordulnak. Azonban jelentős, nagy területet, nagy kőzettömeget érintő mozgásokkal a Balaton környékén csupán a bazalthegyek lejtőin és a Balaton magaspartjain találkozunk. A legnagyobb méretű mozgások földcsuszamlások voltak, az omlások általában kisebb kiterjedésűek.

A bazalthegyek lejtőinek mozgása korábbi időszakokban játszódott le. (Az elmúlt 150 év során csak a Tihanyi-félszigeten történtek nagyobb méretű csuszamlások, azonban ezeknek a mozgásoknak a kiváltója a Balaton volt, így ezek a mozgások a magaspartok csuszamlásaihoz sorolhatók.) A lávatakarók, lávatavakkal kitöltött egykori kráterek oldalában kialakuló csuszamlások kiváltó oka a fekü laza üledékek teherbíró képességének változása. Ez bekövetkezhet egy csapadékos periódus során, a rétegek képlékenyebbé válása következtében, vagy az eróziós folyamatok hatására, amikor az elszállított anyagtömeg hiánya miatt a lejtő instabillá válik. Ilyen csuszamlások eredményeként találhatóak napjainkban a Szent György-hegy, a Csobánc oldalában olyan nagy tömegű, mai helyzetükbe tömegmozgással került hatalmas bazalttestek, amelyekben régebben kőbányák is működtek. A domborzatban karéjosan ívelt szakadási falak, alattuk hullámos, zavart domborzat utal az egykori csuszamlásokra, például az Agár-tető, vagy a Sátorma oldalában.

A Kovácsi-hegyek úgynevezett bazaltutcáját sok túrázó ismeri. Ennek kialakulása

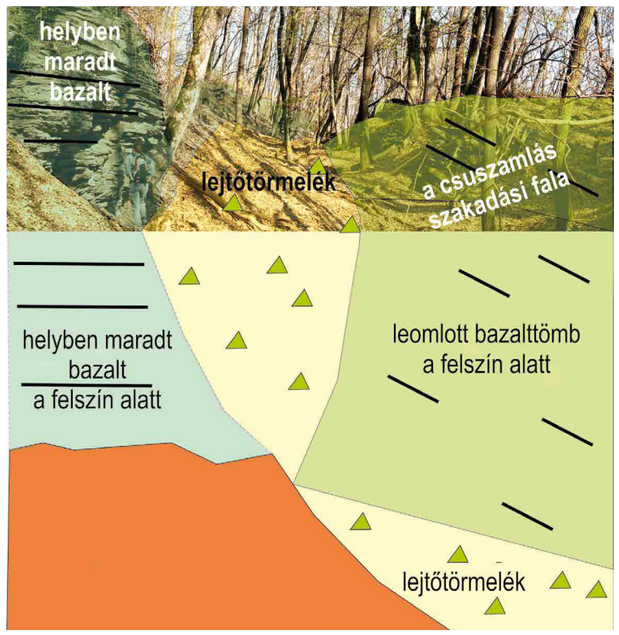


Bazalttörmelék



Csuszamlással mélyebb helyzetbe került bazalttest a Sátorma É-i oldalában (Herkentyű-domb)

vagy kisebb méretű csuszamlással történhetett, vagy a meredek perem bazaltsziklái omlottak le, és alakult ki az eredeti helyzetben marad sziklák és a hatalmas, leomlott tömbök között, a sziklaperemmel párhuzamos mélyedés, a bazaltutca. Hasonló folyamatok más bazalttestek peremén is lejátszódtak.



Omlással, esetleg kisebb csuszamlással a sziklafalról leszakadt bazalttömbök és a sziklafal közötti „bazalt utca" az Agár-tető peremén

A Balaton meredek partjainak csuszamlásai napjainkban sem ritkák. A tó hullámverése alámossa a partot, a tó felé áramló talajvíz, rétegvíz hatására a rétegek képlékennyé válnak, hatalmas csuszamlások alakulnak ki a tó partján. Ez a folyamat gyakran ismétlődve játszódhatott le, amíg a partrendezéssel az emberi tevékenység le nem állította a folyamatot. Bár ez napjainkig sem járt teljes mértékben sikerrel.

Tihanyban az elmúlt 150 évben több nagyobb csuszamlás is történt. A part mentén kiépített út egyben gát is, ami a hullámverés eróziós hatását megállította. Ezzel sikerült viszonylag stabilabbá tenni a lejtőket, noha kisebb csuszamlások a lejtőkön fakadó rétegvíz-források környezetében



Fortepan / Magyar Műszaki és Közlekedési Múzeum / Történeti Fényképek Gyűjteménye

Az 1914 májusában bekövetkezett csuszamlás következményei, a Balatonba sodort szerelvény

ma is előfordulnak. Hasonló a helyzet a fonyódi magasparton is. A hullámverés nem támadja a falat, hiszen attól a vasút és az országút is elválasztja, azonban a földtani értelemben kisebb csuszamlások időnként járhatatlanná teszik a parti közlekedési utakat.

Sokkal több bajt, gondot okozott Balatonaliga, Balatonakarattya, Balatonkenese környékén a magaspart. A balatoni hullámverés miatt alátámasztását vesztett partszakaszok hatalmas csuszamlások formájában szakadtak be a Balatonba. A XX. század elején épült ki az északi parti vasút, amely ezen a mozgásveszélyes szakaszon ereszkedik le a magaspart tetejéről a Balaton partjára. Minden óvintézkedés ellenére a vasúti pálya számos alkalommal súlyosan sérült. Ez nem csupán a múlt században, de az elmúlt években is több alkalommal előfordult. A legsúlyosabb baleset 1914 májusában történt, amikor egy szerelvényt is a Balatonba döntött a csuszamlás.

Zárszó helyett

A Balaton környékének domborzata hosszú idő alatt nyerte el mai formáját. Legidősebb részletei még a földtörténeti ókorban, több mint 250 millió éve keletkeztek. Mozaikokból áll össze a kép: kréta időszaki és eocén karsztfelszínek maradványai, néhány tíz-, esetleg százezer éves völgyek, a Balaton mindössze néhány ezer éves tavi üledékei mellett a lejtőmozgások napjainkban keletkező formái, üledékei együtt alkotják mai élettelen környezetünket, az élővilág változatosságának alapjait biztosítva.

Ám a napjainkban is újra és újra előforduló lejtőmozgások mindenkit figyelmeztetnek: az élettelen természet is folyamatos változásban van, a felszín, a domborzat napjainkban is alakul, amit a társadalom nem hagyhat soha figyelmen kívül.

Ajánlott irodalom

Budai T., Csillag G. (szerk.) 1999: A Balaton-felvidék földtana. Magyarázó a Balaton-felvidék 1:50 000-es földtani térképéhez. – A Magyar Állami Földtani Intézet alkalmi kiadványai 197, 257 p.

Budai T., Csillag G., Dudko A., Koloszár L. 1999: A Balaton-felvidék földtani térképe, M=1:50 000. – Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest.

Cholnoky J. 1918: A Balaton hidrografiája. – In: Lóczy L. id. (szerk.): A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei I/II, 318 p.

Csillag G., Fodor L., Sebe K., Müller P., Ruszkiczay-Rüdiger Zs., Thamóné Bozsó E., Bada G. 2010: A defláció szerepe a Dunántúl hegységi és dombvidéki területeinek felszínfejlődésében. – Földtani Közlöny 140, 463–481.

Lóczy L. id. 1913: A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése. – In: Lóczy L. id. (szerk.): A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei I/I/I, 617 p.



Oppelia lóczyi

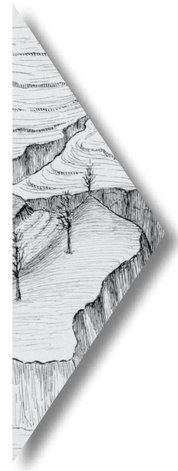
MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

Sebe Krisztina, Ruszkiczay-Rüdiger Zsófia, Csillag Gábor, Fodor László

8

A szél felszínalakító munkája a Balaton környezetében

A szél felszínformáló erejéről elsőként valószínűleg mindenkinek a sivatagok örökké változó homokdűnéinek romantikus világa jut eszébe. Pedig a szél pusztító és építő munkájának eredményei hazánkban is kézzel foghatóak. Lóczy Lajos és Cholnoky Jenő már száz évvel ezelőtt felismerte, hogy a Dunántúl felszíni formakincseinek létrehozásában a szélnek sokkal nagyobb szerepe volt, mint azt korábban gondolták. Sőt, a Balaton monográfiában nem csak a pleisztocén kor jóval szárazabb éghajlatán fújó szelek felszínformáló bizonytékait vették sorra, hanem a jelenkori szélerózió munkájáról is értekeztek. Arra azonban még ők sem gondoltak, amit az elmúlt évtizedek kutatásai alapján ma már tudunk, hogy a Balaton kialakulásában is kiemelkedő szerepe volt a szélnek. Mindennek a bizonyítékai a Balaton-felvidéken és a Somogyi-dombság területén körbevesznek bennünket: a szél alakította völgyek, medencék, a kőtengerek csiszolt sziklafelszínei, az éleskavicsok és a szél által lerakott üledékek, a lösz és a futóhomok.



A Balaton-tó medenczéjének helyzete és felépítése

További tapasztalataink azt bizonyítják, hogy a plioczénkor végén és a pleisztoczén- vagy negyedkor elején száraz, sőt sivatagbeli klima uralkodott a magyar medenczében, ennek a klimának különösen a Balatonfelvidéken és a Kis-Alföldön vannak jellemző maradványai. Felismertük, hogy az akkoriban is uralkodó északi (ÉK—É—ÉN.) száraz szélviharok megtámadták, a száguldó homokkal koptatták, súrolták a Bakonyt, elhordták kerületéről a kiszáradó növényzettől nem védett, laza anyagokat, különösen a homokot. Messze délen, talán a Duna—Tisza közéig hajtotta a vihar a homokot, majd a füves puszták bekövetkezése idején porhullások takarták el vastagon Baranya, Somogy, Tolna és Veszprém vármegyék dombos hátságait 10–20 m vastag termékeny sárgafölddel, a löszszel.

Részlet Lóczy Lajos A Balaton földrajzi és társadalmi állapotainak leírása *című könyvéből*

A Balaton parti képződményei

… Fonyódon a meredek partfal homokos részeit az északi viharok megtámadják s ha valami kis eróziós beréselés barázdálja a fa-

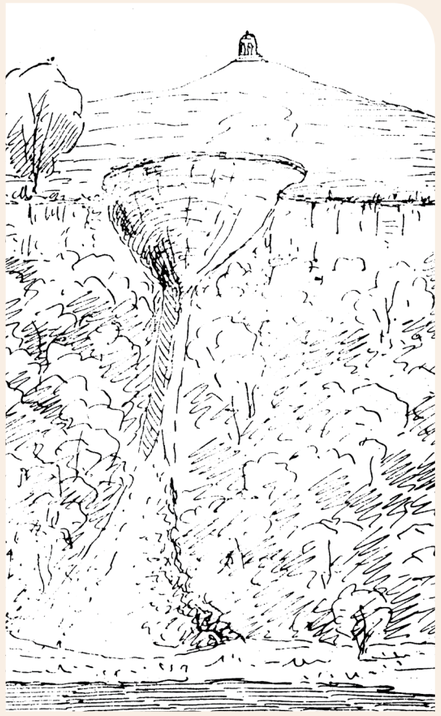


▶ *A fonyódi széltölcsér képe*

lat, ezen a kis barázdán fölkergeti a szél a homokot s fenn, a hegyperemen rakja le, ahol mindig egy kis szélárnyék képződik.

1915 április havában a templom, illetőleg a kis gloriette alatt egy kis barázda következtében a szélnek nevezetes támadó helye keletkezett. Fenn a peremen széles féltölcsér, ez alatt meredek kis rovátka s ez alatt finom homokból és agyagból álló, meredek törmelékgarmada keletkezett. A Spitzbergákon tanulmányozott, hasonló jelenség terminológiáját itt is megtartva, a felső, széles féltölcsért tölcsérnek, a szűk rovátkát garatnak s a törmelékhalmazt törmelékgarmadának neveztük, mert a törmelékkúp a vízzel szállított hordalékból felépített kúpokra már le van foglalva. Itt pedig a garmada szárazan hull össze, még pedig a szél munkájának hatására.

A felső tölcsér szélessége mintegy 15—20 méter, a garat szélessége 3—4 m, a szakadékos fal magassága a tó felett 50—60 méter. … A tölcsér felső peremén a homokos pannóniai rétegek látszanak, vízszintes településben. A homokon keresztülhatoló repedések mentén leszivárgó víz, úgy látszik, egy parányit összeczementezi a homokot, mert a szél finoman kipreparálja ezeket az összevisszamenő ereket, de oly lazák ezek is, hogy tapintással alig vehetnők észre, hogy keményebbek, mint a homokrétegek többi része. Fonyódi tartózkodásom alatt néhányszor néztem meg a töbröt s a szél munkáját szépen lehetett észlelni. Viharban nem lehetett megállni a tölcsér mögött, szembe nézve a tóval, mert annyira hord-



▶ *Deflációs garatrendszer a Fonyódi-hegy oldalán*

ta a homokot, hogy fájdalmat okozott az arczon. Kissé hátrább kifútt fagyökereket lehet látni, ott is garázdálkodik a szél. A homokot aztán a tetőn a füvek és bokrok közt ejti le s ott rendetlen, de jól felismerhető homokbuczkák vannak. A széltől megmozdított homok egy része a garaton keresztül lepereg és ebből épül fel a garmada.

A buczkák metszetét és elhelyezkedését jobban lehetett látni innen nyugatra, a villák előtt, egy nagyobb eróziós bevágódástól feltárva. A futóhomok egészen fiatal eredetét elárulja az a humuszos lösz-réteg, amely a futóhomokot a pannóniai homoktól elválasztja. …

Részlet Cholnoky Jenő A Balaton hidrografiája *című könyvéből*

A szél felszínformáló tevékenységének szerepe a Dunántúl formakincsének létrehozásában a hazai földtudomány régóta vitatott kérdése. Lóczy Lajos és Cholnoky Jenő több mint száz évvel ezelőtt felismerte, hogy korábban a mainál jóval szárazabb éghajlat uralkodott a területen, és a szél pusztító erejének jelentős hatása volt a Közép-Dunántúl felszínének alakításában. A legnagyobb felszínformák kialakulását ugyanakkor szerkezeti mozgásokkal magyarázták: Lóczy szerint a Balaton vize két vető közt bezökkent tektonikus árokban gyűlt fel; a több 10 km hosszú, egyenes somogyi és zalai völgyek vonalában pedig törések mentén gyengült meg a kőzetanyag, amit aztán a légáramlás így el tudott hordani. Az 1970–80-as években Marosi Sándor, Szilárd Jenő és Pécsi Márton a kifúvás hatását kevésbé fontosnak ítélte, a formakincset inkább tektonikus, illetve folyóvízi eredetűnek tekintették. Az utóbbi két évtizedben a szerzők részvételével zajló földtani–geomorfológiai kutatások azt mutatták, hogy a szél szerepe jóval nagyobb a Balaton és környéke felszínformálásában, mint korábban gondolták, sőt, a korábbi elméletekkel ellentétben, köze van a Balaton keletkezéséhez is. A Dunántúl domborzatának és földtani felépítésének számos eleme árulkodik a szél felszínalakító erejéről, legyenek ezek szél által lenyesett síkságok, megcsiszolt kőzetfelszínek, szélvájta völgyek, vagy a kifújt kőzetanyagból felhalmozódott futóhomokmezők.

Ahogyan a folyók, úgy a szél is más-más munkát végez eltérő típusú helyeken. Ha kiemelt területen hozzáférhető, növényzet által nem kötött, laza üledéket talál, azt lepusztítja, erodálja, egy darabig szállítja, végül lerakja. A szél irányát követve, északnyugatról délkelet felé mutatjuk be a Balaton tágabb környezetének szél által kialakított, más néven eolikus felszínformáit. Ezek a formák a mainál szárazabb éghajlatú időszakok folyamán alakultak ki, amikor a gyér növényzet alig védte a felszínt az erős szelektől.

A szél pusztító munkája

Síkságok és medencék

A Dunántúlon jellemző észak-északnyugati szelek az Alpok és a Kárpátok lealacsonyodó vonulatai között, a Bécsi-medence felől érkeznek a területre. A Kisalföld egységes síkságként kezelt tája a felszín alatt több egységre bomlik. Északi fele Magyarország legmélyebb medencéi közé tartozik, ahol az idős (mezozoos) aljzat 6–7 km mélyen húzódik, a folyamatosan süllyedő felszínt pedig a Rába és a Duna vízrendszere töltögeti hordalékával. Míg itt a negyedidőszaki (az utolsó 2,6 millió évben lerakódott) üledékek több száz méter vastagságot is elérnek, dél-délkelet felé ezek egészen elvékonyodnak és helyettük a Pannon-tóban lerakódott felső-miocén (pannóniai) homokos–agyagos kőzetek vannak a felszínen és annak közelében. Ebben a sávban a síksági tájat nem a folyók feltöltő munkája alakította ki, hanem a szél hordta el a laza üledék felső részét. Csak ott maradtak kiemelkedések, ahol olyan keményebb kőzetek védték meg az alattuk fekvő üledéket a kifúvástól, mint a Somló és a Ság-hegy bazaltja vagy a Pannonhalmi-dombok tetejének homokköve.

A Kisalföld felől érkező szél ezután eléri a Dunántúli-középhegységet. A Bakony vagy a Balaton-felvidék kemény kőzeteit szárazabb éghajlatú időszakokban sem tudta érdemben kikezdeni, azonban elég ereje volt ahhoz, hogy pusztítsa fölöttük azt a homokos rétegsort, amit körülbelül 9–8 millió éve a Pannon-tó hagyott maga után. A tavi üledékek a középhegység magasabb részeit vékonyabban fedték, míg az alacsonyabb helyzetben lévő alapkőzet fölött, a mai Tapolcai- és Káli-medencében több száz méteres vastagságot értek el. A tetőkről a homok szinte maradéktalanul lepusztult, már csak kis foltokban találjuk nyomait. Az említett medencékben ellenben válogató (szelektív) lepusztulás zajlott. A pliocén korban, 5–3 millió éve bazaltvulkánok törték át az üledéket, később pedig a homok és kavics bizonyos helyeken kovás oldatok hatására helyenként erősen cementálódott. A negyedidőszak során a laza üledékeket a szél és a víz szinte teljesen eltakarította a területről, csak a bazalttakaróval védett, illetve az ellenállóbb, cementált kőzettestek maradtak meg a teljes területet korábban befedő, homokos üledékekből. A kemény kőzettestek így kipreparálódtak a környezetük laza, könnyebben pusztuló anyagából. Ezen folyamatok alakították ki a tanúhegyek sorát, mint a Badacsonyt, a Szent György-hegyet és számos társukat, és így jöttek létre a Tapolcai- és Ká-





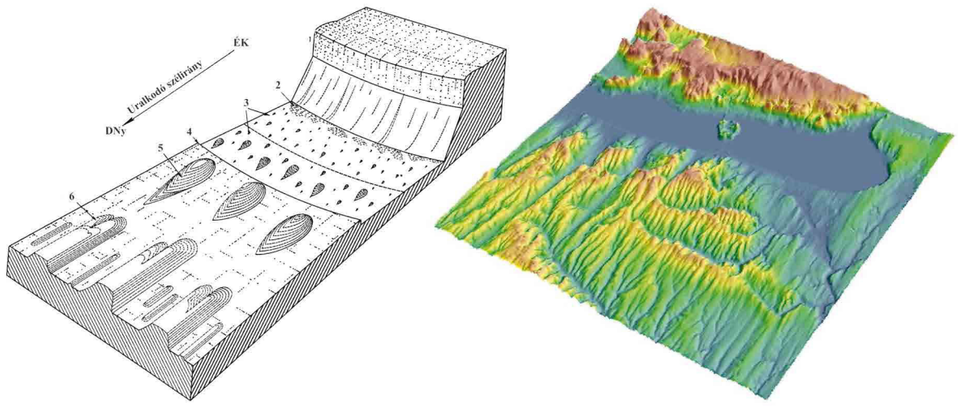
A Kisalföld deflációs síkságából kiemelkedő, bazaltsapkás Ság-hegy és Somló. A háttérben a Bakony vonulata sejlik fel

li-medencében jellemző „kőtengerek” is. A kőtengerek szikláin megfigyelt, szélerózióra utaló bélyegek, mint a szélcsiszolta felszínek és élek, szélvályúk és -rovátkák arra engednek következtetni, hogy a felszín alacsonyodása ezekben a medencékben jelentős részben nem folyóvízi, hanem szélerózió útján történhetett. Ezt támogatja a terület morfológiája is: hiányoznak a bevágódott völgyek, a medencék sík domborzata pedig nem folyóvízi feltöltéssel jött létre, hanem felszínük egyenletes lepusztításával.

Szél alatti deflációs mélyedések

A Dunántúli-középhegység délkeleti oldalán következik a Balaton és attól valamivel északkeletebbre a Velencei-tó mélyedése. A területéhez képest mindkét tó rendkívül sekély: a Balaton 600 km²-es vízfelületéhez mindössze 3–4 m-es átlagos vízmélység tartozik, a Velencei-tó átlagos mélysége pedig másfél méter. Ezek az arányok általában a szélfújta mélyedésekben kialakuló tavakra jellemzőek.

A kifúvásnak, más néven deflációnak Lóczy és Cholnoky már a múlt század elején szerepet tulajdonított a Balaton kialakulásában. A medence létrejöttét ugyanakkor mindketten elsősorban tektonikai mozgásokkal magyarázták, melyek során a középhegység tengelyével párhuzamos vetők közt a Balaton sávja árokszerűen bezökkent volna. A vetők menti besüllyedés elméletét később sokan támogatták (pl. Marosi Sándor és Szilárd Jenő), akik szerint a süllyedés még a holocénben, néhány ezer éve is zajlott. A tópart mentén húzódó feltételezett vetők létét az eddigi földtani térképezések azonban nem tudták igazolni. A régebbi megfigyelések – mint például amit Lóczy tehetett száz évvel ezelőtt – azt mutatják, hogy a negyedidőszaki üledékekben kivételes, és a késő-miocén üledékekben is nagyon ritka a vetődés nyoma. A balatoni vasút bevágásakor általa megfigyelt vetők, vagy más helyen észlelt szerkezetek nem párhuzamosak a „Balaton-árok” feltételezett peremvetőivel, így azokra nem adnak közvetlen bizonyítékot. A peremvetők nyomára rábukkanhatnánk a tó partvonalának meghosszabbításában is, azonban ott sem igazolódtak ilyen szerkezetek, pedig a zalai terület felszín alatti felépítése a kőolajföldtani kutatásoknak köszönhetően elég jól ismert. A nagyon részletes vízi szeizmikus mérésekkel kimutattak egy vetőzónát a Balaton alatt (lásd a 4. fejezetet), ez azonban lényegesen nem járulhatott hozzá a feltételezett árkos szerkezethez, mivel nem a Balaton peremén húzódik és nem



A Balaton környezetének fő felszínformái jól magyarázhatók a szél pusztító hatásával. A Szaharában megfigyelt formaegyüttes jellemző övezetei (balra) megtalálhatók a Balaton környékén is (jobbra).

okozott érdemi függőleges elmozdulást sem. Hozzátehetjük ehhez, hogy a Pannon-medence utolsó néhány millió évében uralkodó összenyomásos feszültségmező jellege és iránya sem kedvez árkok kialakulásának (részletesen lásd a 4. fejezetben). Összegezve tehát: a törészónák a tómeder mélyülésében nem játszhattak döntő szerepet – más megoldást kell tehát keresnünk.

Ha a Balaton medencéjét elsősorban a szél hozta létre, akkor meg kell találnunk ezt a formakincset a sivatagokban. És valóban, a Szahara homokkővidékeinek geomorfológiájáról készült ábrázoláson igen hasonló formaegyüttest látunk, mint a Balatonnál. A kemény kőzetekből álló, kiemelkedő hegyvonulat meredek, szél alatti oldalán a légáramlás hirtelen bukik le, akár vissza is örvénylik, így túlmélyíti a hegy lábánál húzódó sávot. A terepakadály által megkavart szél néhány km-rel távolabb visszanyeri rendezettségét, és mély, egyenes, párhuzamos völgyeket mélyít a felszínbe. Bár a növény- és vízborítás miatt a szél jelenleg nem tudja hatékonyan pusztítani a felszínt, a balatoni hajósok számára ma is jól ismert a hegyekből lecsapó, viharokat hozó „bakonyi főszél”, amelyre a vizet járó ember kellő tisztelettel és óvatossággal tekint.

Az eolikus domborzatformáláshoz szükséges száraz éghajlat a negyedidőszaki eljegesedések során rendelkezésre állt. A lehűlések idején az északi-sarki jégtakaró messze előrenyomult dél felé, így hazánk területe a periglaciális („jégkörüli”) éghajlati övbe esett, amelynek hideg sivatagi viszonyai közt az erős szelek könnyen pusztíthatták a ritkás növényzettel borított tájat. Támogatják ezt az elképzelést a balatoni üledékek korvizsgálatai is. A tavi iszap alatt tőzegtelepek fekszenek, egykori lápos-mocsaras térszínt jelezve a mai tó helyén. A bennük megőrződött pollenek és a radiokarbon kormeghatározás eredményei alapján tudjuk, hogy az első mocsári rétegek a késő-pleisztocénben, mintegy 18–17 ezer évvel ezelőtt kezdtek lerakódni. A tőzeg alatt a tó legnagyobb részén már nincs fiatal (negyedidőszaki) üledék, közvetlenül a felső-miocén pannon-tavi kőzetek következnek, azaz a mocsaraknak helyet adó mélyedésnek nem sokkal a tőzeg lerakódása előtt kellett létrejönnie. Erre kiválóan alkalmas volt az utolsó nagy eljegesedés időszaka, körülbelül 26–18 ezer évvel ezelőtt. Ekkor véshette ki a szél a tó részmedencéit, amelyekben kialakultak a tőzeges mocsarak. Az egységes víztükör aztán a holocén kezdetén, mintegy tízezer éve jött létre, amikor a csapadékosabbá váló éghajlaton megemelkedett a vízszint, kiterjedt a vízfelület, és a részmedencék közti küszöböket a hullámzás is segített elmosni.

Bár a Balaton árkos besüllyedését a szerkezetföldtani vizsgálatok nem támasztották alá, tudjuk, hogy vannak függőleges kéregmozgások a területen. A Balaton északnyugati oldala a délinél jobban emelkedik, évi néhány tized mm-es különbséggel. Ez része annak a nagy kiterjedésű emelkedésnek, ami a Dunántúlt szinte

Yardang

A Belső-Ázsiából származó kifejezés meredek oldalú gerincet jelent, amelyet a szél egy korábbi egységes felszínből vés ki. A szállított homokszemekkel pusztítja a kőzetet, a keletkező törmelékszemcséket elhordja, és így keskeny, hosszú, párhuzamos völgyek sorát mélyíti ki.

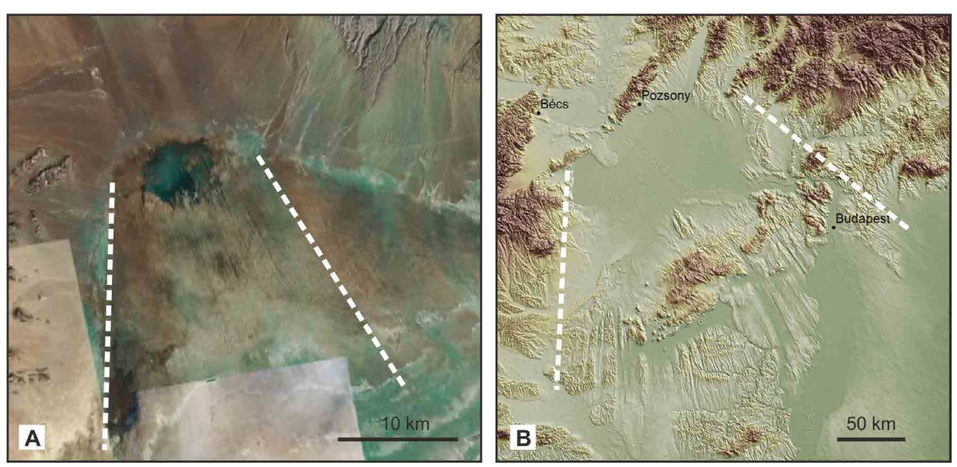


teljes mértékben érinti, és ami nagyobb léptékű a Dunántúli-középhegységben, mint a somogyi és zalai dombok esetében. Ez az eltérő mértékű kiemelkedés nagy szerepet játszott a szélerózió-nak kedvező domborzat kialakításában, hiszen fokozatosan növelte a Bakony és a Balaton-felvidék magasságát a délkeleti előtérhez képest, így növelve a lefutó szelek hatékonyságát.

Sugárirányú völgyek

A Balatontól délre és nyugatra futó hosszú, egyenes völgyek és hátak rendszere már korán felkeltette a földtudósok figyelmét. Ezeket a völgyeket szokták meridionális (a délköröknek megfelelő irányú) völgyekként emlegetni uralkodó észak–délies lefutásuk miatt, vagy sugárirányú völgyekként, mert dél-délkelet felé sugarasan széttartanak. A meridionális völgyeket Lóczy és Cholnoky egyaránt a szélerózióval magyaráztak. Cholnoky a zalai és somogyi völgyeket „szélbarázdaként", a köztük emelkedő hátakat pedig maradékgerincként, vagy a nemzetközi szakirodalomban használt szóval yardangként értelmezte. A szél munkája mellett Lóczyék és hozzájuk hasonlóan Jámbor Áron is fontosnak tartotta a völgyek szerkezeti meghatározottságát, azaz, hogy a völgyek nyomvonalát törések jelölték ki, ezek aprózták fel a kőzetet, amit aztán a szél elszállított (lásd a 4. fejezetet). Más szerzők általában a tektonika szerepét gondolták elsődlegesnek, ahol a vetők mentén létrejött völgyeket a folyóvíz, esetleg a szél formálta tovább.

A közelmúlt geofizikai vizsgálatai azonban azt mutatták, hogy a völgyek alatt nem húzódnak jelentős törések. A „mélybelátó" szeizmikus szelvények 15–20 méternél nagyobb elmozdulást biztosan azonosítanának, de ilyenekre a vizsgálatok során nem bukkantak. A meridionális völgyek Balaton alatti meghosszabbításában még a kisebb vetők létét is kizárhatjuk, hiszen az ottani geofizikai anyag rendkívül részletes (lásd a 4. fejezetet) és nem mutat a völgyek irányában haladó, fél méternél nagyobb elvetésű vetőket. A hosszú, egyenes forma mellett a sugárirányú völgyek egyéb alaki jellemzői is eolikus eredetre utalnak. Völgytalpuk lapos, és ha van is bennük vízfolyás, az aránytalanul kicsi a völgyszélességhez képest. Akár több km hosszú szakaszokon sincs lejtésük. Folyóvízi üledék sok helyen nincs bennük vagy igen vékony, viszont több szakaszon futóhomokbuckák ülnek a völgytalpon. Hasonló megjelenésű völgyek és hátak



Hosszú, egyenes („sugárirányú") völgyek és hátak rendszere A) a sivatagos Cajdam- vagy Qaidam-medencében, Kína belső-ázsiai részén (GoogleEarth műholdkép) és B) a Dunántúlon (domborzatmodell)

rendszere a Föld számos sivatagos területén jött létre, ahol erős és állandó irányú szelek fújnak (a műholdfelvételeket nézegetve könnyen rájuk találhatunk). Nyílt területeken a völgyek párhuzamosak egymással, mint például a Szaharában. Ha viszont a szél hegyek közt tör át és a medencében szétterül, a keletkező völgyek és hátak sugaras elrendeződésűek lesznek, mint Belső-Ázsia hegyvonulatai közt vagy a Kárpát-medencében.

Kisformák: kőtengerek, csiszolt sziklák, éleskavicsok

Ahol a munkaképes szél kemény kőzeteket és szállítható homokot egyaránt talál, változatos kisformákat tud kialakítani. Ezek közül a legfontosabbak a kőtengerek és az éleskavicsok.

A kőtengerek Balaton-felvidéki típusa különleges, Magyarországon csak itt fordul elő. A kőtenger általában olyan területet jelent, amelyet szögletes, aprózódással – például szétfagyással – keletkezett kőtömbök borítanak. A Balaton-melléki kőtengerek azonban más megjelenésűek, és máshogy is keletkeztek. A Kővágóörs vagy Salföld melletti előfordulások fűből kiemelkedő szétszórt, lesimított sziklái valóban emlékeztetnek egy tenger kővé vált hullámaira, ahogy a népnyelv is magyarázta keletkezésüket. Szentbékkálla határában már jóval nagyobb, különleges formájú sziklaalakzatok emelkednek. Másutt egész dombot alkot a homokkő, ilyen a Csobánc lábánál a Papsapka vagy másik nevén Kőmagas. Közös jellemzője ezeknek a helyeknek, hogy a sziklák homokos környezetből emelkednek ki, felszínük pedig sok helyütt sima és fényesen csillogó. Keletkezésüket a szelektív lepusztulásnak és a szél munkájának köszönhetik. A Pannon-tóban lerakódott homokot később foltokban kovás oldatok cementálták homokkővé: a meleg, váltakozva nedves és száraz éghajlaton a talajvízfelszín közelében kova vált ki a homokszemcsék közt és szabálytalan alakú, akár több méter vastag kovakérget hozott létre. Megfelelően száraz időszakban aztán a szél a homokkőtömbök közül



A laza homokból kiemelkedő, kovás kötésű, kemény homokkő sziklák fényesre csiszolt felszíne a szentbékkállai kőtengeren



Szélvéste vályúk egy homokkő tömb felszínén Salföld határában. A szél a képen jobbról balra fújt



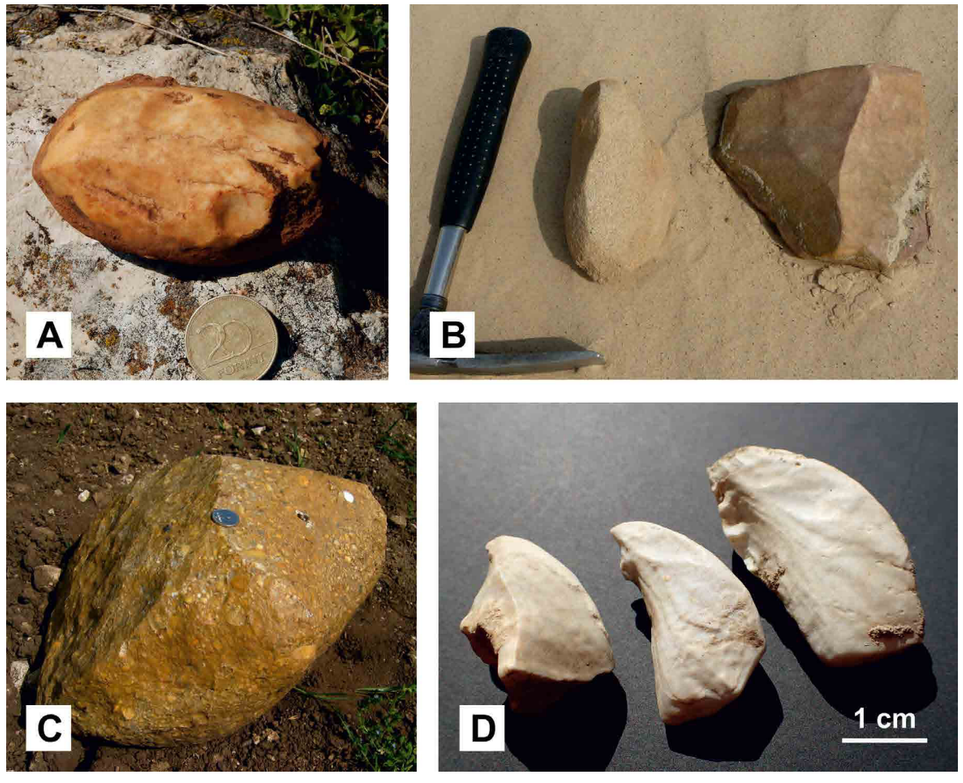
Kőtenger Kővágóörs mellett



A szentbékkállai kőtenger sziklájának felszín a tollal párhuzamos barázdákat a szélhordta homok vájta a kőzetbe, elcsiszolva a kavicsok felső felét

elhordta a laza homokot, és a magával hajtott homokszemcsékkel fényesre is csiszolta a kőtömbök felszínét, éleket és vályúszerű mélyedéseket marva rájuk. A vízszinteshez közeli felszíneken megfigyelhető barázdák és rovátkák pontosan mutatják az egykor uralkodó szél irányát.

A szélhajtotta homok a kisebb kődarabokat is megcsiszolta, ha azok a felszínen hevertek. Ezeket éleskavicsoknak, más néven sarkos kavicsoknak hívják, könnyen felismerhetők határozott éleikről és fényes felületükről. Elterjedésük jóval szélesebb, mint a csiszolt sziklafelszíneké. Anyaguk igen sokféle lehet, bármilyen kőzetből ki tudnak alakulni, ami elég kemény illetve elég finomszemű. A leggyakoribbak a kvarcit és kvarchomokkő anyagúak, de találhatunk éleskavicsot dolomitból, bazaltból, kovás fatörzsből, sőt akár puhatestű héjából is. A képeken is ez a változatosság tűnik szembe: látható itt kvarckavics Hegyesd mellől (A), perm és felső-miocén homokkő a salföldi homokbányából (B), felső-miocén konglomerátum a Majális-völgyből, Tapolcától északra (C), valamint a „balatoni kecskekörömként" ismert *Congeria ungulacaprae* miocén kagylófaj szélcsiszolta búbjai Veszprémvarsány mellől (D).



Különböző méretű és anyagú éleskavicsok a Balaton-felvidékről

Szélhordta üledékek: lösz és futóhomok

Az országban a legelterjedtebb szélfújta üledék a lösz. A laza, porózus, világos, sárgásbarna kőzet anyaga a levegőben szállítódott porból származik. A kiülepedő port a jégkorszakok idejének ritkás, uralkodóan lágyszárú növényzete kötötte meg. A por a magas légkörben nagy távolságokat megtehet, elég, ha csak a manapság nem ritkán előforduló színes esőkre gondolunk, amit a Szaharából származó sivatagi por fest meg. A Balaton környékén különösen Zalában és Külső-Somogyban halmozódott fel a lösz nagy vastagságban és kiterjedésben, és a rajta kifejlődő jó termőtalaj miatt lényeges szerepe van a mezőgazdaságban is. A Balaton-felvidéken és a Bakonyban már szaggatottabb az elterjedése. A hegyek északi és északnyugati, az uralkodó széliránnyal szemben fekvő oldalán rendszerint hiányzik, itt az erős légáramlás miatt nem tudott leülepedni. Hasonlóképpen hiába keressük a kitett fennsíkokon, valamint a hegyek szél alatti előterében, mint például Balatonkenese, Balatonfűzfő és Berhida közt, ahol a Balaton-medencénél leírt módon a lebukó szél pusztította a felszínt. Inkább találkozhatunk lösszel olyan helyzetben, ahol a hegyek szélárnyékos oldalán vagy völgyekben csapdázódva halmozódott fel.



A futóhomok (jobbra) koptatott, gyakran matt homokszemcsékből áll (Mezőföld, Paks), míg a folyóvízi homokot szögletes, fényes szemcsék alkotják (balra)

A másik jellemző eolikus üledék, a futóhomok durvább szemcséjű a lösznél. A homokszemcséket átlagos domborzaton még az erős légáramlás sem képes néhány méternél magasabbra emelni, a homok túlnyomó része a földfelszín fölötti néhány dm-es sávban közlekedik, ugrálva vagy a földön gördülve. Hosszas szállítás esetén a homokszemcsék az ütközésektől lekerekítődnek, felületük matt lesz. E bélyegek alapján a futóhomok jól megkülönböztethető a víz által szállított homoktól. A forrásterülethez közel a futóhomok szemcséinek még nem volt ideje úgy lekoptatódni, mint a nagy sivatagokban az akár több 100 km-es utazásuk során, ilyenkor a homok vegyesen tartalmaz szögletes és jól koptatott, fényes és matt szemcséket is. Ez a megjelenés jellemző a hazai előfordulások egy jelentős részére, így a Dunántúlon Belső-Somogy északi részére vagy a Mezőföldre, ami arra utal, hogy a homok anyaga közelről –



A Tapolcai-medencéből kifújt felső-miocén homok Belső-Somogyban halmozódott fel futóhomokként. Darány mellett borókák nőnek a homokbuckákon.

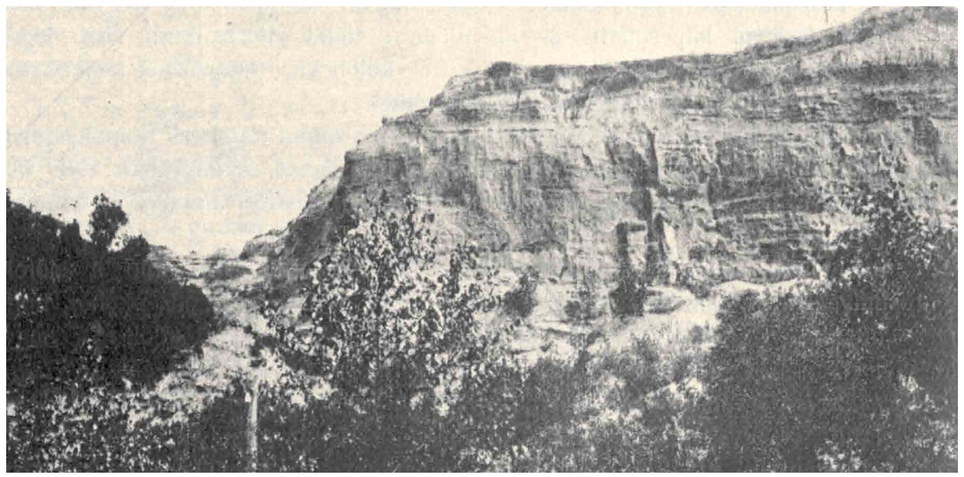


A Látrány melletti homokbánya a látrányi sugárirányú völgy északi részében felhalmozódott futóhomokot tárja fel

a Dunántúli-középhegységen és környezetében lerakódott felső-miocén összletből – származik.

A Balaton-környék legnagyobb futóhomok-területe Belső-Somogy. Az itteni homok északról érkezett mai helyére, erre utal a dél felé csökkenő szemcseméret és a szemcsék növekvő koptatottsága. A homokot Lóczy a Dunántúli-középhegység felső-miocén üledékeiből származtatta, amit elsősorban a Tapolcai-medencéből fújt ki a szél. Később elterjedt egy másik elmélet, amely szerint a Duna őse a Tapolcai-medencén keresztül folyt dél felé, hordalékát Somogyban rakta le, és ezt az üledéket mozgatta át a szél futóhomokká. Azóta már tudjuk, hogy ez a folyórekonstrukció téves adatokon alapult, ugyanis negyedidőszakinak és folyami eredetűnek tekintette a Tapolca környéki Pannon-tavi (felső-miocén) kavicsokat. A Duna mai tudásunk szerint sosem járt erre, így továbbra is elfogadhatjuk Lóczy érvelését.

Kisebb, szintén a középhegység területéről származtatható futóhomokfoltok találhatók a külső-somogyi sugárirányú völgyekben. A völgyek északi szakaszán több méter vastagságban felhalmozódott homokot helyenként bányászszák is. Kisebb buckák és homokleplek formájában messze délre vándorolt a homok a völgyek talpán. A völgyek oldalában váltakozva rakódtak



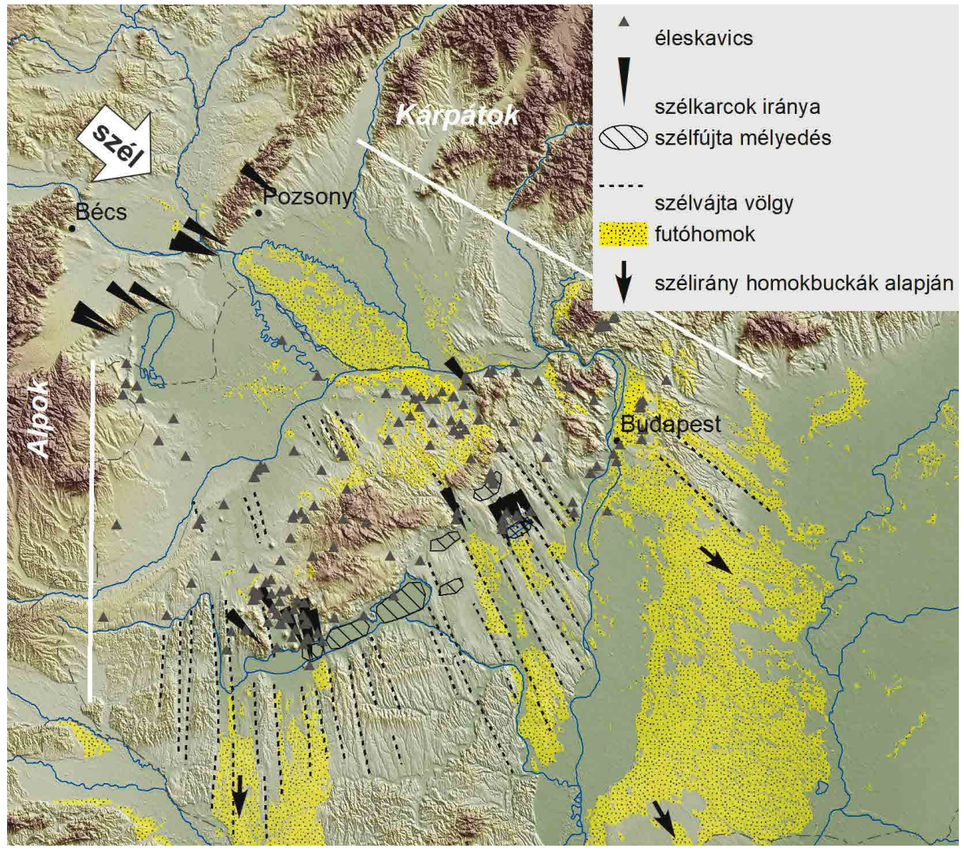
Lóczy felvétele a fonyódi magaspartról

le homok- és löszrétegek. Ez az összefogazódás azt mutatja, hogy a két képződmény egy időben keletkezett: míg a völgyekben a légáramlás összeszorult és felgyorsult, és a végigsüvítő szél a homokot hajtotta a völgytalpon, addig a tágas tetőkön a lassabban áramló levegőből ki tudott hullani a finom por is, lerakva a lösz alapanyagát.

Különleges körülmények között hegytetőkön is halmozódhat fel futóhomok. A fonyódi magaspart tetején lévő homoktestről Lóczy közölt jó fényképet, és számos további előfordulást említett a környékről. E jelenség magyarázata, hogy az uralkodó szél irányába néző – meredek, akár függőleges – lejtők fölött a szél a sík terepen mért sebességének több mint másfélszeresére is felgyorsul, így képes akár cm fölötti szemcséket is felfelé szállítani. A tetőn lévő buckák anyaga rendszerint a szirt falából származik, amire a buckák települnek. A homok a szirt élétől csak kis távolságig szállítódik, emiatt gyakran rosszul osztályozott és szemcséi alig koptatottak.

A negyedidőszaki szélrendszer

A Dunántúlra a hegységkeret legalacsonyabb részén, az Alpok és a Kárpátok közt tudnak betörni a felszínközeli szelek. A viszonylag szűk átjáró után a légáramlás legyezőszerűen szétterülhet, ennek megfelelően változik nyugat–keleti irányban az eolikus völgyek tájolása.



A Kárpát-medence nyugati részének szél alakította formakincse

A sekély, viszonylag zárt mélyedések, mint a Velencei-tó vagy a Balaton részmedencéi a kiemelkedő Dunántúli-középhegység mögött sorakoznak. Mind ezek, mind a sugárirányú völgyek kivéséséhez a szél fel tudta használni az északabbról lepusztított és szállított homokot. A jelentős futóhomok-lerakódások szintén a forrásterületként szolgáló középhegység szél alatti oldalán, de valamivel távolabb – főleg Belső-Somogyban és a Kiskunságban – jöttek létre. A Kárpát-medencén belüli szélirányokat tehát alapvetően a domborzat, azaz a hegységkeret lefutása határozza meg. Ez a hatás még erősebben érvényesülhetett az eljegesedések idején, amikor a felszínközeli szelek a mainál nagyobb sebességűek lehettek.

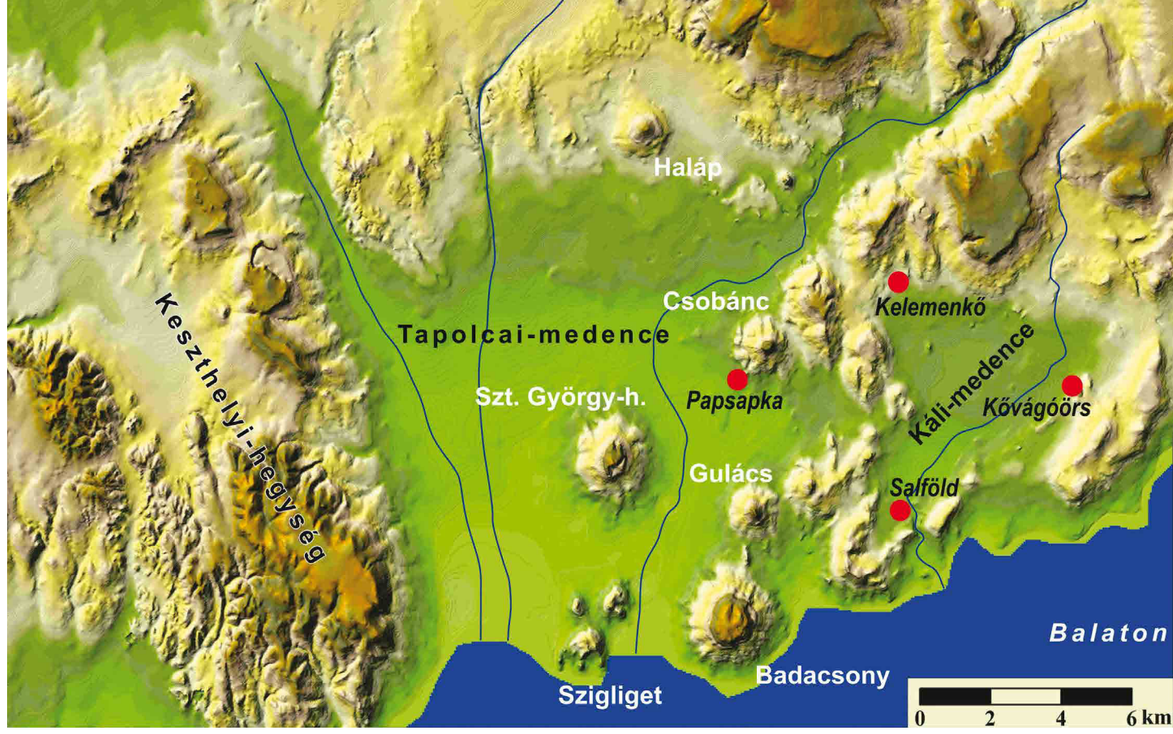
Az eljegesedések idején a szélerózió szerepe megnövekedik a jégtakaró körüli sávban, hiszen a hideg és száraz periglaciális éghajlaton a felszakadozott növényzet nem képes a laza üledékeket megvédeni a lepusztulástól. Ilyen nagy léptékű széleróziós felszínformák kialakulása ugyanakkor nem általános a hideg övön, ehhez a Kárpát-medencében számos körülmény kedvező összejátszása kellett. A hegységkeret csatornázta a felszínközeli szeleket, valamint részleges esőárnyékot okozott a medencén belül. Az utóbbi néhány millió évben zajló tektonikus kiemelkedés miatt pedig kiemelt helyzetbe kerültek a laza, könnyen erodálható kőzetek, elsősorban a Pannon-tó üledékei. Ezek a szél által pusztulnak, szállítódás közben anyagukkal csiszolják a szél útjába eső ellenállóbb kőzeteket, majd valamivel távolabb futóhomokként lerakódnak.

A dunántúli szélerózió kora

Láthattuk, hogy a Balaton medencéjének kialakításában a szél játszhatta a legfontosabb szerepet. Földtörténeti léptékben ez igencsak a közelmúltban, alig több mint tízezer éve történt.

Kicsit tágabb környezetben elsősorban a futóhomok adhat adatot azon időszakok koráról, amelyek során a szél volt az egyik fő felszínformáló erő. Futóhomokból ezekben a sugárirányú völgyekben még nem történt kormeghatározás. A Tapolcai-medence irányából érkezett belső-somogyi futóhomok esetében viszont tudjuk, hogy a formák döntő része a késő-pleisztocén végén, körülbelül 18 és 12 ezer évvel ezelőtt alakult ki, azaz a futóhomok mozgása a Balaton-medence kivésődése alatt, sőt azt követően is tarthatott. Hasonlóan fiatal a Mezőföld futóhomokjainak túlnyomó része is, kisebb részük azonban 140 ezer évesnél is idősebb a kormeghatározási eredmények alapján.

Vajon a szél munkája csak ennyi ideje tart a Balaton tágabb környezetében? A kérdés jogos, hiszen az eddigiekben már olvashattuk, milyen jelentős volt a szél szerepe a Dunántúl felszínének alakításában, mekkora formákat vésett ki a felszínből, márpedig ez időigényes folyamat lehetett. Lóczy és Cholnoky úgy gondolta, hogy a Dunántúl szél általi formálása elsősorban a pliocén kor (5,3–2,6 millió évvel ezelőtt) meleg sivatagi éghajlatán zajlott. Későbbi szerzők, például Pécsi Márton vagy Jámbor Áron már fontos szerepet tulajdonítottak a negyedidőszaki eljegesedések hideg száraz időszakaiban zajló folyamatoknak, többek között az éleskavicsok rétegtani helyzetére alapozva. A szélerózió mértékéről és pontos koráról a közelmúltig igen kevés számszerű adat állt rendelkezésünkre, csakúgy, mint a ma megfigyelhető felszínformák koráról, stabilitásáról és lepusztulási sebességéről. Ez nem is csoda, hiszen az erózió által lepusztított és elszállított anyag már nincs a kezünkben, a „hűlt helyüket" pedig nem egyszerű mérni. Szerencsére modern mérési eljárások segítségével ma már



▲ *A Balaton-felvidék dombortazmodellje a kozmogén ^{10}Be-izotópos mintavételi helyekkel*

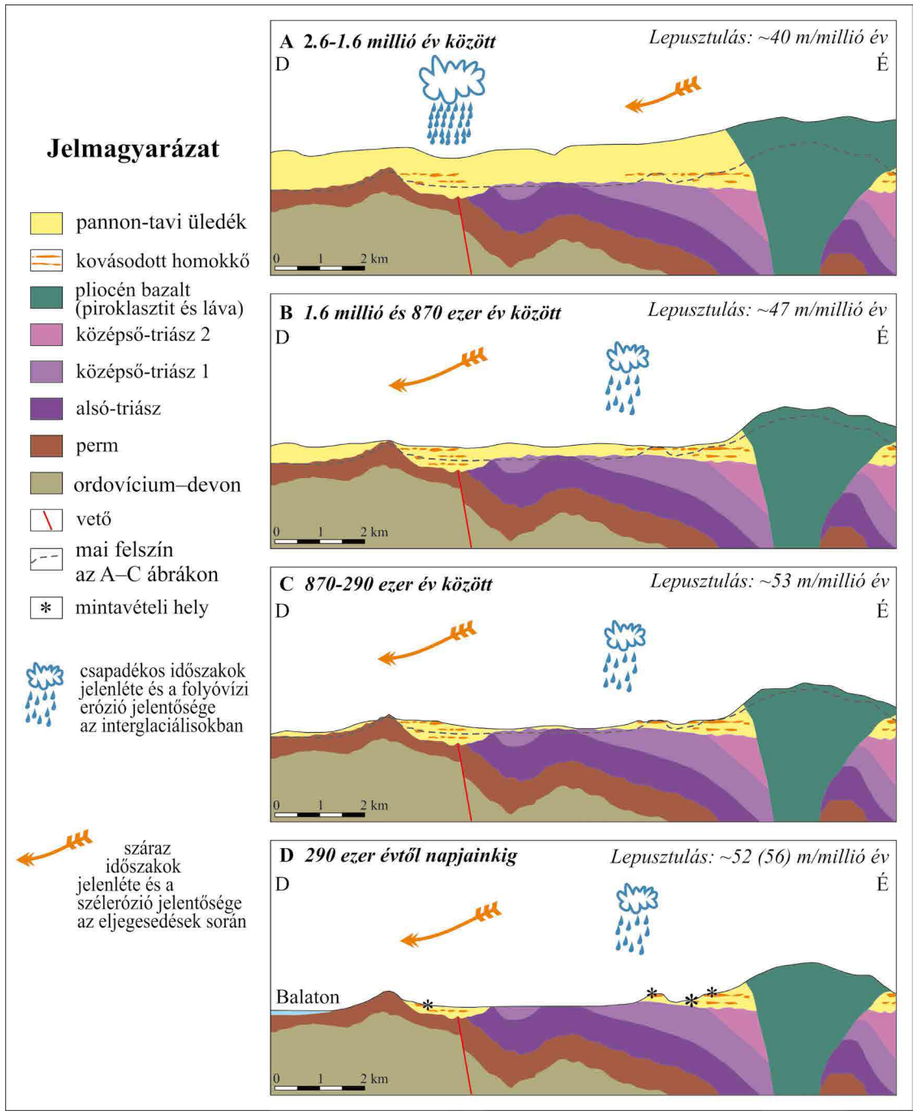
közvetlen információt kaphatunk a szélerózió idejéről. A szél által lecsiszolt kőzetfelszínek korát a helyben keletkező kozmogén (kozmikus sugárzás hatására létrejövő) izotópok koncentrációjának mérésével lehet megállapítani. Így megtudhatjuk, hogy az adott kőzet mióta van a kozmikus sugárzásnak kitett helyzetben, vagyis a vizsgált felszínforma mikor keletkezett.

Helyben keletkező kozmogén ^{10}Be-izotópos vizsgálatok a Tapolcai- és Káli-medence szélcsiszolta kőzetfelszínein, azaz kőtengerein történtek, több eltérő tengerszint feletti magasságú helyszínen. A jól megőrződött mm–cm méretű szélvájta barázdák és vályúk arra utalnak, hogy e felszínek az utolsó széleróziós periódus óta nem szenvedtek lepusztulást, így kitettségi koruk megismerésével a szélerózió általi felszínalakulás idejéről kaphatunk számszerű adatokat.

A kormeghatározás eredményei azt mutatták, hogy a legmagasabban (~200 m tszf. magasságon, a Kelemen-kő körül) fekvő kőtenger akár 1,6 millió éve a felszínen lehet, míg az egyre alacsonyabban fekvő kőtengerek (170 méteren a Papsapka és 140 méteren a Salföld melletti kőtenger) csak később, ~870 ezer, illetve ~290 ezer évvel ezelőtt preparálódhattak ki az őket körülvevő laza üledékrétegek alól. A ^{10}Be-izotópos mérések alapján, a felszín kitettségi korának és lepusztulási ütemének egyidejű modellezésével kiszámítható volt a megmintázott ellenálló kőzetfelszínek alacsonyodása is az adott helyszínen. Ez a helyi lepusztulás igen lassúnak, átlagosan 3–4 m/millió év üteműnek bizonyult, szemben a környező laza homokból álló térszín ~55 m/millió éves lepusztulási rátájával (utóbbi a Kővágóörs melletti homokbányából származó adat).

Az izotópos kormeghatározások segítségével vázolható volt a Tapolcai- és a Káli-medence negyedidőszaki fejlődéstörténete (lásd a következő oldali ábrát). A pliocén közepén (3–4 millió éve), a bazaltvulkánosság csúcspontján a felszín átlagmagassága a mai 260–300 m tszf. körül lehetett, mélyen bevágott völgyek nélkül. A negyedidőszaki klímaváltozás előhírnökeként nedves és száraz periódusok váltakoztak, a folyóvízi és eolikus folyamatok együttesen alakíthatták a felszínt.

A negyedidőszak elején még nagy vastagságban fedték a területet a Pannon-tó és az azt feltöltő folyók üledékei. A klímaingadozások



A Káli-medence felszínfejlődési modellje

ekkor erősebbé váltak: szárazabb–nedvesebb és hűvösebb–melegebb periódusok is előfordultak, így a felszín pusztításában a folyóvízi és a szél általi erózió váltakozva vehetett részt. A kora-pleisztocén második felében (~1,6 millió és ~870 ezer év között) a klíma hidegebbé és szárazabbá válása következtében a szél szerepe egyre jelentősebbé, a folyóvízi erózió pedig egyre alárendeltebbé vált, és ez a pleisztocén végéig jellemző maradt a térségre.

A medencék széleróziós általi alacsonyodása az éghajlat ingadozásainak megfelelően, szakaszosan következhetett be, és a hideg és száraz, erősebb szelekkel jellemzett periódusokban lehetett jelentős, amikor a gyér növényborítás alig védte a felszínt. A defláció és szélmarás eredményeként elsőként a legmagasabb helyzetű kemény homokkő- és konglomerátumrétegek kerülhettek a felszínre. Ez a Kelemen-kőnél kb. 1,56 millió éve, vagyis a kora-pleisztocén közepén történhetett. A pannon-tavi üledékek fokozatos kifúvásával az ellenállóbb vulkáni kőzetek és a cementált üledékek fokozatosan kipreparálódtak, a felszín tovább alacsonyodott. Az alacsonyabb felszín talajvízszintje környékén a megfelelő éghajlatú időszakban megint kovakéreg tudott kialakulni, újabb homokkőlencséket hozva létre. Ezek körül a szél a következő száraz időszakban kifújta a homokot és létrejött a következő kőtenger. A Papsapka szintjét (170 m) a felszínalacsonyodás ~870 ezer éve, míg Salföld környékét (140 m) ~290 ezer éve érte el.

Az adatok alapján az alacsonyodás a területen, a negyedidőszak során nagyjából állandó, 40–60 m/millió éves ütemben zajlott. Ez annyit jelent, hogy az utolsó ~1,6 millió év alatt körülbelül 65–95 m vastagságú laza homok pusztult le a területről, ami a teljes negyedidőszak (2,6 millió év) alatt körülbelül 105–155 m lepusztulást jelent. A szél csak a száraz homok elszállítására képes, azaz csak a mindenkori erózióbázis (praktikusan a talajvízszint) magassága felett számolhatunk jelentős szélerózióval. Ennek értelmében a 40–60 m/millió éves lepusztulási ütem jó közelítéssel megadja a Dunántúli-középhegység délnyugati részének negyedidőszaki kiemelkedési ütemét.

A terepi geomorfológiai megfigyelésekkel együtt a koradatok arra is rámutatnak, hogy egy adott területen a különböző korú felszínformák hasonló szélirányt jeleznek, és ez az irány igen hasonló a mai szélirányokhoz. Az uralkodó szélirány tehát időben meglehetősen állandó. Ennek oka az lehet, hogy az erős szelek irányát a hegységkeret határozza meg, így a Kárpát-medencében stabil szélrendszer tudott fennállni legalább a negyedidőszak folyamán.

A környezetéből kiemelkedni kezdő Dunántúli-középhegység szél alatti oldalán korábbi száraz időszakokban többször is létrejöhettek a Balaton-medencéhez vagy a Velencei-tó medréhez hasonló szélvájta mélyedések. A rákövetkező, a maihoz hasonló enyhe és nedves periódusban aztán ezekben tó gyűlhetett fel. Mivel azonban a Közép-Dunántúl szép lassan emelkedik, a következő száraz időszak alatt a széleróziós kicsit mélyebbre tud hatolni, mint korábban, és eltávolítja az előző tó üledékeit is. Emiatt nem tudhatjuk, hogy hány „Ős-Balatont” élvezhettek előttünk e vidék lakói.

Ajánlott irodalom

Budai T., Császár G., Csillag G. Dudko A., Koloszár L., Majoros Gy. 1999: A Balaton-felvidék földtana. Magyarázó a Balaton-felvidék földtani térképéhez, 1:50 000. – AMagyar Állami Földtani Intézet alkalmi kiadványa 197, 257 p.

Cholnoky J. 1937: Balaton. – Franklin Társulat, Budapest, 191 p.

Cholnoky J. 1918: A Balaton hidrografiája. Lóczy L. id. (szerk.): A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei I/II, 318 p.

Csillag G., Fodor L., Sebe K., Müller P., Ruszkiczay-Rüdiger Zs., Thamóné Bozsó E., Bada G. 2010: A deflációszerepe a Dunántúl hegységi és dombvidéki területeinek felszínfejlődésében. – Földtani Közlöny 140, 463–481.

Jámbor Á. 2002: A magyarországi pleisztocén éleskavics előfordulások és földtani jelentőségük. – Földtani Közlöny 132/különszám, 101–116.

Kiss T., Györgyövics K., Sipos Gy. 2012: Homokformák morfológiai tulajdonságainak és korának vizsgálata Belső-Somogy területén. – Földrajzi Közlemények 136 (4), 361–375.

Lóczy L. id. 1913: A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése In: Lóczy L. id. (szerk.): A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei I/I/I, 617 p.

Ruszkiczay-Rüdiger, Zs., Braucher, R., Csillag, G., Fodor, L., Dunai, T. J., Bada, G., Bourlés, D., Müller, P. 2011: Dating Pleistocene aeolian landforms in Hungary, Central Europe, using in situ produced cosmogenic ^{10}Be. – Quaternary Geochronology, 6, 515-529.

Sebe K., Csillag G., Ruszkiczay-Rüdiger Zs., Fodor L. I., Thamó-Bozsó E., Müller P. M., Braucher, R. 2011: Wind erosion under cold climate: A Pleistocene periglacial mega-yardang system in Central Europe (Western Pannonian Basin, Hungary) and its implications on yardang formation. – Geomorphology 134, 470–482.

Timár G., Csillag G., Székely B., Molnár G., Galambos Cs., Czanik Cs. 2010: A Balaton legnagyobb kiterjedésének rekonstrukciója a függőleges kéregmozgások figyelembevételével. – Földtani Közlöny 140 (4), 455–462.

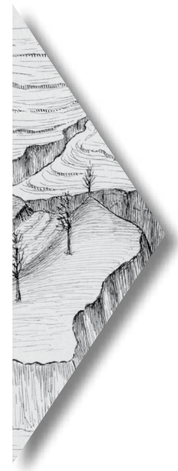


MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

Cserny Tibor, Prónay Zsolt, Nagyné Bodor Elvira,
Szurominé Korecz Andrea, Sárdy Julianna

9 A Balaton földtani kutatása a XX. század végéig

A száz éve megjelent Balaton-monográfia 32 kötete olyan részletes ismereteket tartalmazott a nagyvilág e viszonylag picinyke szegletéről, amire addig, sőt talán azóta sem volt példa. A tudomány azonban folyamatosan fejlődik és az utolsó kötet megjelenése után alig pár évtized elteltével már újra gőzerővel folyt a Balaton kutatása. A tó kialakulásának tisztázását célzó kutatások már az 1940-es évek elején újra fellendültek a Balaton környékén végzett teraszmorfológiai vizsgálatokkal. Az évtized végén újabb sekélyfúrások mélyültek a Balaton iszapjába a Keszthelyi-öbölben. És egy fél évszázad sem telt el, amikor sor került a Balaton újabb komplex földtudományi kutatására, amely a Magyar Állami Földtani Intézetben indult, az 1960-as évek közepétől. E fejezet részletesen összefoglalja mindezen vizsgálatok eredményeit, kezdve a balatoni üledékek fizikai és kémiai tulajdonságaitól, az őslénytani kutatásokon át, a Balaton kialakulásának és fejlődéstörténetének klasszikus magyarázatáig.

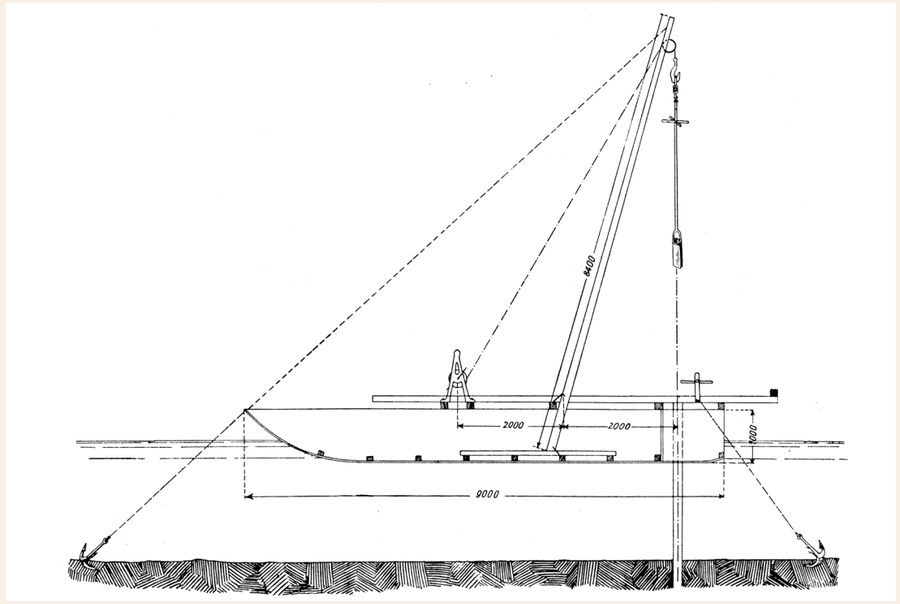


A balatonfenéki lerakodások.

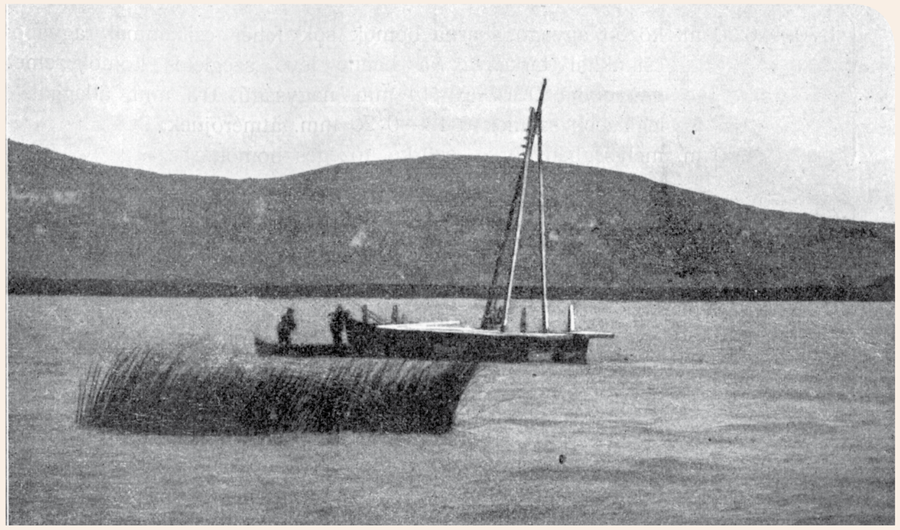
A Balaton fenekének megfúrása a pannoniai-pontusi rétegeknek csekély mélységekben levő helyzetét több ponton kimutatta a tó feneke alatt. A fúrási szelvényekben és a fúrópróbákban azonban inkább a pontusi korra következő fiatalabb plioczén-, pleisztoczén- és holoczén-időbeli lerakodások felismeréséhez volt közelebbi érdeklődésünk kötve, ezektől vártam az adatokat a Balaton tüzetes geologiai történetéhez.

Miként fent láttuk, nem volt könnyű a fúrószelvények kőzettani sajátságaiból a pannoniai-pontusi rétegek és a későbbi lerakodások határvonalát fölismerni; pedig a pontusi altalaj a Balaton lerakodásainak ősi sziklafeneként szolgált. Még bajosabb a fiatalabb lerakodásokat a fúrópróbákban egymástól elválasztani. A határ természetesen nincsen vízszintes színtben, mert már a pontusi altalajt is különböző mélységekben: a somogyi partokban kisebb, a zalai partok alatt sokkal nagyobb mélységekben érte el a fúró. A pleisztoczén és a holoczén üledékek közötti határt mégis elég pontosan tudom a balatonfenéki lerakodások szelvényeiben megvonni. Ennek a határnak megjelölése persze szintén még csak azon a felfogáson alapszik, hogy a jelenkori lerakodás a vízmélység utolsó megnövekedésének kezdetével esik össze. A Balaton-kerületen ugyanis a jelenlegi vízszín alatt 5—7 m. mélységben tőzegtelepeket ért el a fúró; ez a tőzegszint azt az időszakot jelzi, amelyben a Balaton tükre 5—7 m.-el mélyebben volt a jelenleginél és mocsaras tőzeglápok szorították össze nyiltvizét. …

Amikor a Vízépítési Igazgatóság Vízrajzi Osztálya 1894—95-ben a Balaton fenékmélységeit fölmérte, előzetes tapasztalatok alapján arra kértem a munka vezetőjét és létesítőjét, Erdős Ferencz főmérnök, most műszaki tanácsos urat, hogy a víz mélységeinek megállapításán kívül még annak a lágy iszapnak a vastagságát is mérjék, amely a Balaton fenekét a legtöbb helyen elborítja és amelytől a kemény fenék élesen elválik. Minthogy a Balaton vizének mélysége a Tihany és Szántódpuszta közötti szoros kivételével, ahol egy kis területen a 10 m.-t valamivel túlhaladja, 4 méternél nem nagyobb, az iszapnak mélységét egy meghegyezett végű rúd segélyével úgyszólván mindenütt meg lehetett állapítani. Ez az iszap, amelyet a balatoni halásznép «latyak» névvel illet, olyan lágy, hogy a nehéz rúd magától lefelé nyomul benne; és amikor legelőször próbálkoztam a fúrással és egy két méternyi hosszú vasrudat az 1,90 m.-es vízbe beleejtettünk, ez úgy elmerült és elfeküdt a sárban, hogy nem voltunk képesek mégannyi vesződséggel sem többé megkeríteni. Ez a lágy balatoni fenéksár még a fürdőzőkre is veszélyes lehet, ha közel a parthoz fejugrással az iszapba kerülnek.



A fúróhajó hosszszanti metszete. Mérték: 1:100



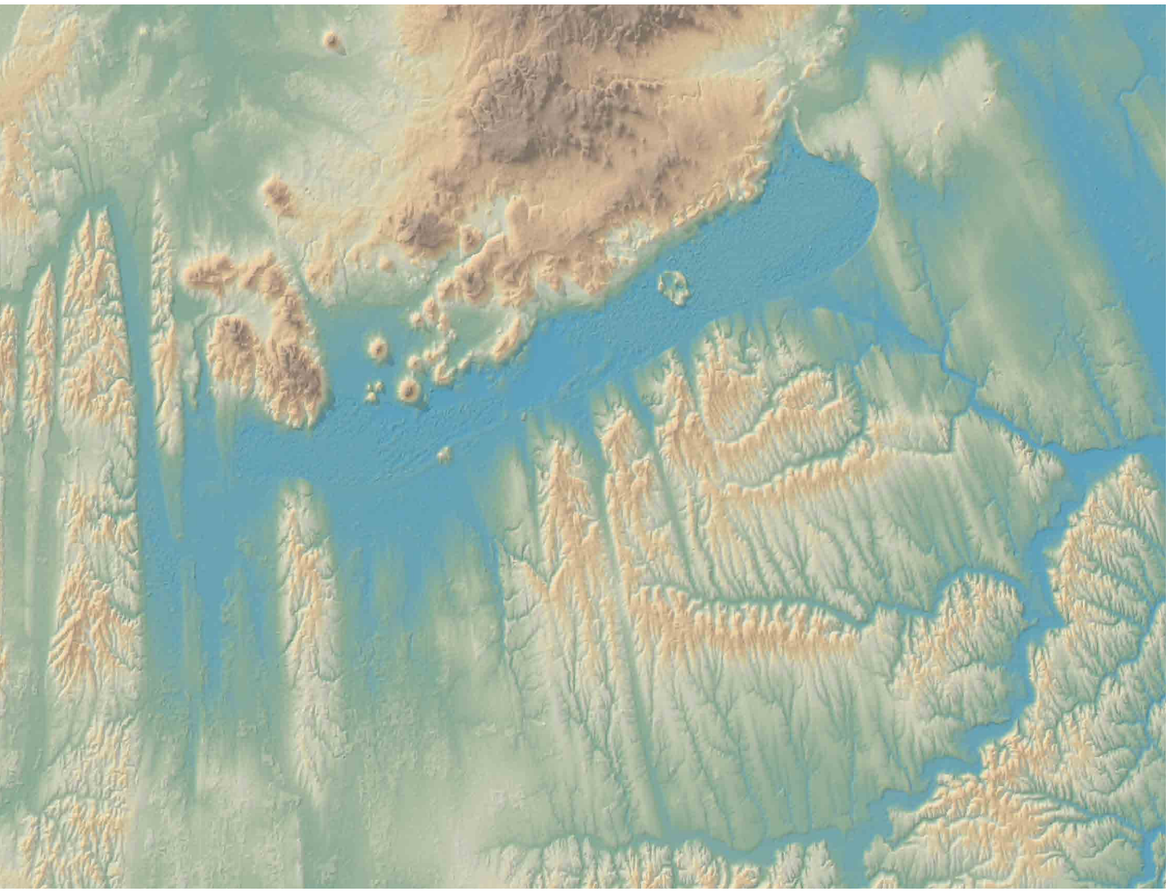
Fúróhajó a csopak-balatonkövesdi Kereked-öbölben

A Kereked-öbölben, Csopak és Balatonkövesd alatt, ahol a fúrórudat az iszapban elvesztettük, 3,90 m. volt az iszap vastagsága; alatta mindjárt tőzeges réteg következett. Az öböl keleti sarkán, a Kuszkó-vonyóban, közel a nád széléhez, az V-ös számú fúrás rudazata és csövezete az 1, 90 méter mély víz alatt szintén magától 1,98 m.-re sülyedt le az iszapban, és a közeli Küszöborr vonyó előtti VI. fúrásban, közel a Kereked-öböl keleti sarkához, de már a nyilt 2,73 m. mély víz alatt 2,10 m. vastag sarat mértünk. Az aszófői sarokban 2,65, vízben 4,50 m-ben volt a sáralja, vagyis 1,85 méternyi vastag iszap volt a kemény fenék felett.

Részlet Lóczy Lajos A Balaton környékének geologiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése *című könyvéből*

A Balaton Közép-Európa legnagyobb, méretéhez képest extrém mértékben sekély vizű tava. Nem véletlenül vonult be a nemzetközi köztudatba „Plattensee” néven. Számokban kifejezve: a jelenlegi Balaton egy hosszan elnyúló, sekélyvízi tó, körülbelül 77 km hosszú, 600 km^2 felületű, átlag 3,35 méter mély, víztömege körülbelül 1,8 km^3. Erősen szabdalt domborzatú vízgyűjtő területe 5775 km^2. De mit is jelentenek ezek a számok? Ha a tavat arányosan lekicsinyítenénk egy 77 méter hosszú mélyedés méretére, abból egyetlen állat sem tudna inni, mert a mélysége mindössze 3 mm lenne!

A Balaton erősen szabdalt domborzatú környezetének DTM képe



A Balaton mederüledékeinek kutatási előzményei

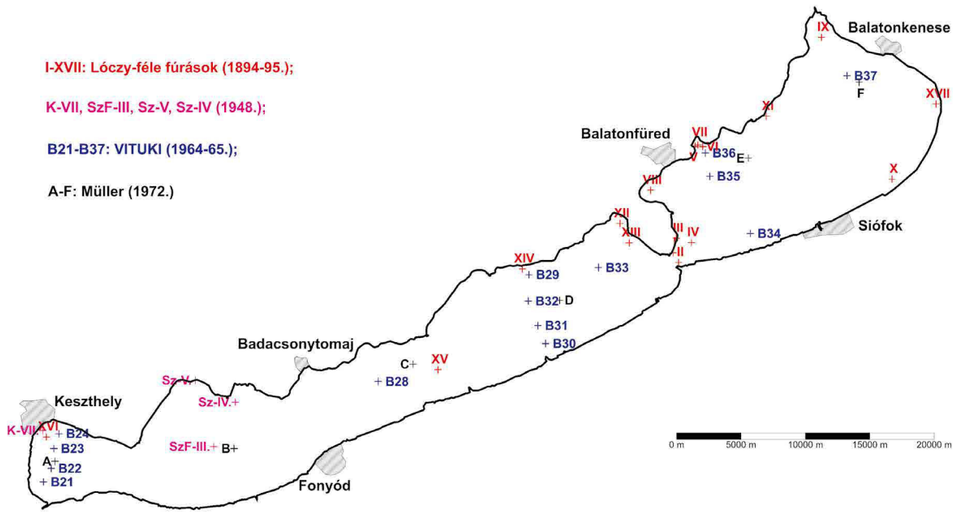
1891-ben id. Lóczy Lajos kezdeményezésére és vezetésével létrejött a Balaton Bizottság, amelynek kutatási eredményeit *A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei* című, 32 kötetes monográfiában adták ki, magyar és német nyelven. Ez a munka nevezhető a tó első, korszerűnek minősülő, komplex természettudományos vizsgálatának.

E kutatás során, 1894–1896 között a Balaton medrében tizenhét darab 8–15 m mélységű tavi fúrás mélyült, elsősorban a tó peremén, de néhány a tó tengelyében: a Tihanyi-szorosban, Balatonboglár és Révfülöp között, valamint a Keszthelyi-öbölben.

A fúrások általában pleisztocén vagy pliocén korú képződményben álltak le. Lóczy megállapítása szerint a tavi üledék elsősorban a szél által a vízbe sodort hullóporból áll, amelynek összetétele megegyezik a Balaton kékesszürke, agyagos iszapjával. A mederfúrások tőzegréteget is harántoltak, amit Lóczy a holocén és a pleisztocén határának tekintett. A tőzegréteg alatt a tó belső részein kavicsos homokot figyelt meg és a kavicsok jellege alapján arra a következtetésre jutott, hogy a kora-pleisztocénben a Balaton-medence időnként száraz fenekére a Balaton-felvidékről az időszakos és állandó vízfolyások törmeléket szállítottak. Véleménye szerint a Balaton vize a késő-pleisztocén posztglaciális (felmelegedő) szakaszában, a löszképződéssel egy időben kezdett összegyűlni, időnkénti vízszint-ingadozásait a tőzegtelepek bizonyítják.

A múlt század harmincas éveiben, a Keszthelyi-öbölben tapasztalt jelentős mértékű feliszapolódás szükségessé tette a Balaton újabb kutatását. 1948-ban a VITUKI öt darab 10–16 m mély fúrást mélyített le Balatonakali és Keszthely között, részben a part mentén, részben a központi területen. Az üledékekben található virágporszemek és spórák első, úgynevezett palinológiai vizsgálatát Zólyomi Bálint végezte el. A mederfúrások rétegsorának pollenvizsgálata alapján kimutatta, hogy a Keszthelyi-öbölben az utolsó évezredekben felgyorsult ütemű (évi 9 mm) feliszapolódás játszódott le, elsősorban a Zala által szállított hordaléknak köszönhetően.

Az 1961-ben, a VITUKI koordinálásával megindult, a Balaton feliszapolódásával kapcsolatos kutatásokban már 22 intézmény vett részt. A kutatások során új szempontok és módszerek szerint dolgozták fel az 1948-ban mélyített fúrásokat (például pollenstatisztikai vizsgálat), majd 1964–65-ben 16 db új mederfúrást mélyítettek le. A kutatások eredményeképpen elkészült a tó üledékképződését meghatározó tényezők mérlege a bejutó és kiszállítódó anya-



A balatoni archív fúrások helyszínrajza

gok összevetésével. Felhívták a figyelmet arra, hogy a tóba került anyagok a vízlengés és a hullámzás hatására viszonylag igen gyorsan és nagymértékben át is rendeződhetnek. Meghatározták a tó átlagos évi mederfeltöltődését és a tó kialakulását a Würm eljegesedési periódus végére tették (15 000–20 000 év BP). A pollenvizsgálatok alapján biosztratigráfiai, azaz életrétegtani skálát készítettek, és a kultúrnövények pollenjeinek felhasználásával egyes rétegek korát a történelmi korokhoz viszonyították.

1969–78 között vizsgálták meg első ízben komplex módon a Balaton karbonátos üledékeit ásványtani, geokémiai és izotóp-geokémiai szempontból. 1972-ben hat helyen vettek mintákat a mederből. A vizsgálatok eredményeiből klímarekonstrukciót végeztek, és arra a következtetésre jutottak, hogy az elmúlt 8000 évben – a klímaváltozások, és az emberi beavatkozás miatt – a víz összetétele és ennek következtében a karbonátüledék ásványtani jellege többször megváltozott. A két legszárazabb időszakot 3000, illetve 5000 évvel ezelőttre tették, amely megegyezik a szubatlantikus–szubboreális és szubboreális–atlantikus határokkal. A fúrások a boreális tetejéig hatoltak.

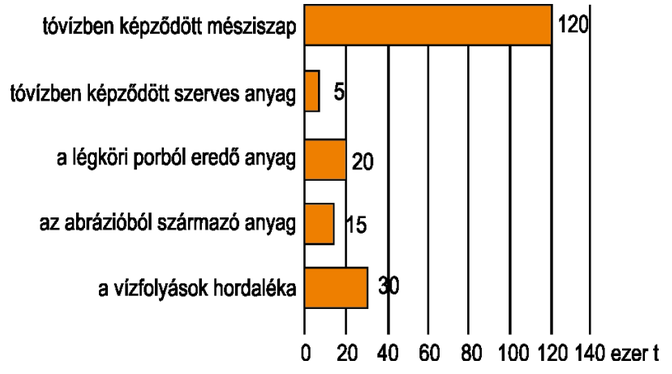
Az első műszeres mérések, a fúrásokhoz hasonlóan még a XX. század elejére nyúlnak vissza: az első geofizikai méréseket a Balaton keleti medencéjében, a tó jegén végezte Eötvös Loránd 1901-ben, saját fejlesztésű torziós ingájával. Ez volt a világon az első geofizikai mérés, melynek célja a mélyebb földtani szerkezetek vizsgálata volt. A 40 mérés eredményéből megállapította, hogy a tó tengelyével párhuzamosan egy törésvonal húzódik.

A tó első teljes műszeres felmérését az 1970-es években a VITUKI végezte: szonárral, azaz hangradarral 78 kereszt- és 287 rövidebb közbülső szelvényt mértek. A felmérés célja a vízmélység és a mederfenék térképezése volt.

Az 1979-ben megjelent Vízügyi Dokumentációs Központ tájékoztatója összegezte a Balaton korábbi évtizedekben végzett részletes hidrológiai és meteorológiai kutatásainak eredményeit. Ebben a kiadványban foglalkoztak többek között a Balaton kialakulásával, a mederfenék ultrahangos felmérésének eredményével és összegezték a partvonalváltozás időbeli alakulását is.

Kor	Korszak		C_{14} kor ezer év B.P.	Régészeti korok (közép-európai)	Vegetációs fázisok		Éghajlat jellege	
							Blytt és Sernander	Nagy Bodor E.
HOLOCÉN	Fiatal	Subatlanti (SA)	0,7–1,2	Újkor	X	mai vegetáció	hűvös, nedves	hűvösebb, szárazabb
	Idős		2,5–2,8	Középkor Római kor	IX	Fagus (F1,F2)		melegebb, nedvesebb hűvösebb, nedvesebb
	Subboreal (SB)		5,1	Vaskor Bronzkor Rézkor	VIII	Quercus-Fagus (Q-F)	meleg, száraz	melegebb, szárazabb hűvösebb, kissé nedves melegebb, kissé nedves hűvösebb, kissé nedves
	Fiatal atlanti (YA)		6,0	Neolitikum	VII	Quercus (Q)	meleg, nedves	legmelegebb, nedves (klíma-optimum)
	Idős atlanti (OA)		7,5		VI			
	Boreal (B)		9,0		V	Corylus (C)	meleg, száraz	meleg, száraz meleg, nedvesebb
	Preboreal (PB)		10,2	Mezolitikum	IV	Pinus-Betula (P-B)		melegebb, nedves
KÉSŐ-PLEISZTOCÉN	POSZTGLACIÁLIS	Fiatal Dryas (Dr–III)	10,8		III		hűvös, száraz	hűvös, száraz
		Allerød (All)	12,0		II		meleg, nedves	melegebb, száraz hűvösebb, nedves melegebb, nedves
		Idős Dryas (Dr–II)	12,4	Felső-Paleolitikum	I	I.c.	hűvös, száraz	hűvös, száraz
		Bølling (Bø)	13,3			I.b.		enyhébb, szárazabb enyhébb, nedvesebb
		Legidősebb Dryas (Dr–I)	18,0–20,0			I.a.		enyhébb, nedvesebb hűvös, száraz
	GLACIÁLIS	Würm–III					hideg, száraz	

A földtani és radiokarbon korok, régészeti kultúrák, valamint a vegetációs fázisok és az éghajlat jellege közötti korreláció



A Balatonban leülepedett évi átlagos üledékmennyiség szárazsúlya ezer tonnában

Az 1976–1995 közötti időszakban Györke Olivér, Muszkalay Ottó és Rákóczi Ferenc részletes kutatásokat végzett a Balaton feliszapolódásával kapcsolatban, amelynek eredményeképpen az üledékképződésben jelentős szerepet játszó tényezők becsült évi átlagos szárazsúly-mennyiségét határozták meg. Figyelembe véve a szárazanyag 1,34 g/cm^3 körüli térfogatsúlyát és azt, hogy az iszappá válás során ehhez kétszerannyi víz járul, legkevesebb 406 ezer m^3 iszap képződhetett a vizsgált időszakban. A tóból a vízleeresztéssel eltávozott 36 ezer m^3 lebegőanyagot leszámítva, a Balaton teljes felületére egyenletesen elosztva 0,62 mm/év vastagságú üledékgyarapodást becsültek. Ez az érték azonban az elmúlt 300 évben nagyobb mértékű volt a Keszthelyi-öbölben (1,3 mm/év) és a magas partfalak közelében (1,5–1,7 mm/év). A partvonal azon szakaszain, ahol emberi beavatkozások történtek (például mólók közelében), ott még ennél is gyorsabb feliszapolódás indult meg.

Ezt a folyamatot támasztotta alá az MTA Tihanyi Biológiai Kutató Intézet által 1962-ben elvégzett kutatás, amely a vándorkagylók héjainak mélységi elhelyezkedése alapján kimutatta, hogy a Keszthelyi-öböl nyílt vizében a megelőző 30 év során 12–15 cm vastag üledékréteg képződött.

1970–1980 között az MTA Balatoni Limnológiai Kutató Intézet 1:10 000 méretarányú részletes iszapfelszín-térképezést végzett a Balaton nyíltvízi területén, az iszap felső körülbelül 10 cm-es rétegéből. A közel ötezer, geodéziailag bemért pontról gyűjtött minta laboratóriumi elemzésének adatai alapján Máté Ferenc térképsorozatot szerkesztett a szemcseszerkezet, a karbonáttartalom, a szervesszén-tartalom, a nitrogén és a könnyen oldható foszfor koncentrációjának térbeli eloszlásáról. Megállapította, hogy az üledék összetétele a tó különböző pontjain nagy eltéréseket mutat, amelyet a vízgyűjtőről érkező vízfolyások, a tó belső áramlásai és a tavi élővilág együttes hatásának tulajdonított.

Jakab Gusztáv, Sümegi Pál és Szántó Zsuzsa a Szigligeti-öbölben lerakódott tavi és lápi üledéksor makrofosszília vizsgálatával rekonstruálták a Balaton késő-glaciális és holocén növényzetének és a tó vízszintjének változásait. 1998-ban és 2005-ben Virág Árpád tollából pedig két hasznos összefoglaló monográfia jelent meg pontos és nagyon részletes hivatkozásokkal a Balaton és vízgyűjtője vízrajzi, meteorológiai, biológiai és földtudományi kutatásainak, valamint a Sió és a Balaton közös történetének témájában.

A Balaton fejlődéstörténetének kutatási előzményei

A Balaton kialakulásának tisztázását célzó geomorfológiai és földtani (rétegtani, őslénytani, nyersanyag- és vízföldtani) kutatások id. Lóczy Lajos vezetésével 1891-ben indultak el. Lóczy felismerte, hogy a Balaton a Dunántúli-közép-

A pleisztocén és a holocén

A pleisztocént jelenleg három nagyobb kronosztratigráfiai egységre tagolják: kora-pleisztocén (2,58–0,773 millió év); középső-pleisztocén (773–126 ezer év) és késő-pleisztocén szakaszokra (126–11,7 ezer év). Szárazföldön négy biztosan elkülöníthető alpi eljegesedési (glaciális) szakasz: a günz, a mindel, a riss és a würm szakasz és az ezeket elválasztó felmelegedési (interglaciális) volt elkülöníthető. Két bizonytalanabb korai eljegesedési szakasz a dunai és a biber is esetenként felismerhető.

A holocén (11,7 ezer évtől–napjainkig) kort rétegtanilag ó- és új-holocénra osztják, de ezen belül több szempontú felosztást is használnak. Jelen fejezetben a klíma, a vegetáció, esetleg radiokarbon kor szerint osztjuk fel a holocént szakaszokra.

hegység ÉK–DNy-i csapásirányával párhuzamosan sorakozó, egymást keresztező vetősíkok között létrejött, szél által kimélyített, de egymástól keskeny földgátakkal elválasztott lokális süllyedékek sorozatában, idősebb pannóniai és pleisztocén korú üledékes képződményekben alakult ki. Később a kisebb medencéket elválasztó földgátakat a tavi abrázió elpusztította, és a mélyedések egységes medencévé alakultak.

Cholnoky Jenő 1913-ban a Balatoni-medencét két párhuzamos ÉK–DNy-i irányban húzódó vetősík között besüllyedt szerkezeti árokként értelmezte. A tó kialakulásának idejét Lóczyhoz hasonlóan, ő is pleisztocén korúnak definiálta.

Kéz Andor és Bulla Béla az 1940-es évek elején, a tó környékén végzett teraszmorfológiai vizsgálatok alapján a Balaton-medence kialakulási idejét a riss–würm interglaciálisra (körülbelül 80–120 ezer év BP) helyezte.

Zólyomi Bálint a mederfúrások mintáinak pollenanalitikai vizsgálata alapján a Balaton kialakulását a würm legvégére (17–18 ezer év BP) tette.

Sümeghy József 1953-ban, a Balatontól délre fekvő magaspartok legfelső löszszerű képződményeit tagoló dolomitmurva-zsinórokat a még ki nem alakult Balaton térszínen át az északi oldalról érkező záporpatakok hordalékaként értelmezve, a medence posztglaciális kori (kevesebb, mint 18 ezer év BP) keletkezése mellett foglalt állást.

Bendefy László részletesen foglalkozott a balatoni színlőkkel, azaz teraszokkal, kialakulásukat a történelmi idők emberi beavatkozásaira vezette vissza. Régi térképek és az azokat kiegészítő levéltári forrásokból származó dokumentumokra alapozva az elmúlt 3000 évre vonatkozóan közölt eredményeket 1968-ban a tó vízszintváltozásairól.

Erdélyi Mihály megállapította, hogy időben különbséget kell tenni a tó medencéjének kialakulása és a medencéket kitöltő víz megjelenése között. Elemezte a holocén klímáját és megállapította, hogy a tó kiterjedését és vízszintjét alapvetően az éghajlat változásai határozták meg. A holocénen belül úgy ítélte meg, hogy a vízszint nem lehetett a jelenlegit 3–4 méterrel meghaladónál magasabb.

Rónai András 1969-ben összegezte a tó keletkezésére vonatkozó földtani és földrajzi adatokat. Megállapította, hogy a tó keleti és nyugati részmedencéje a késő-pleisztocén végén (körülbelül 17–18 ezer év BP), a mainak nagyjából megfelelő egységes tómedence pedig a holocénben (10,3 ezer év BP) jött létre.

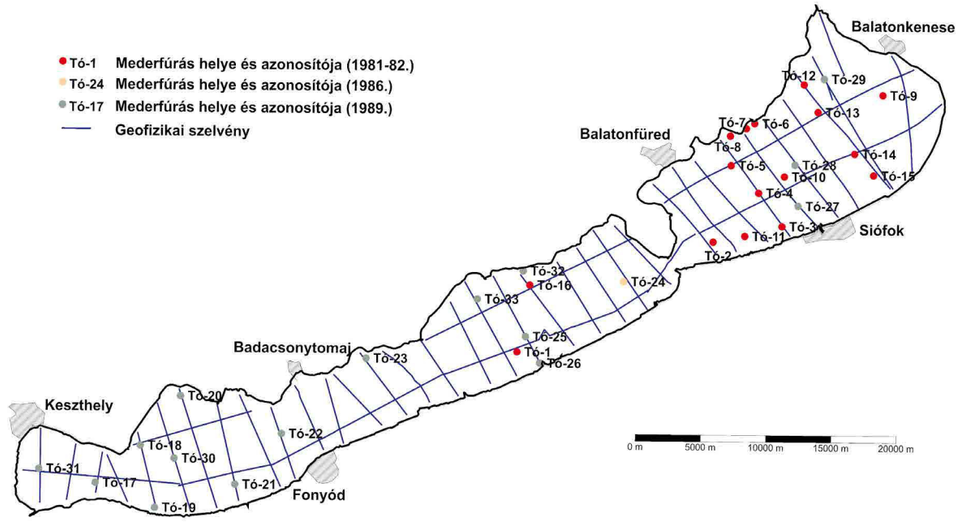
Marosi Sándor és Szilárd Jenő a Balatoni-medence kialakulási idejére és módjára vonatkozó korábbi, egymással szembenálló nézeteket szintetizálta és geomorfológiai vizsgálataikra alapozva megállapította, hogy a Balatoni-medence térben és időben szakaszos süllyedés eredményeként kialakult, poligenetikus, azaz belső és külső földtani erők által létrehozott geomorfológiai forma. A medence egyes részeinek süllyedése már a pleisztocén közepe táján megkezdődött, és ez a szerkezeti mozgás a közép- és új-pleisztocén közötti időszakban egyre nagyobb területen és intenzitással folytatódott. Napjainkra ezek a mozgások csökkent intenzitással és egyre kisebb területekre korlátozódva tovább folytatódnak. A szerzők – geomorfológiai adatokkal alátámasztva – megkülönböztették a balatoni vízelöntéstől mindig mentes Balatoni-medence felszínét; a tó hajdani legmagasabb vízállása idején elborított tómedencét; és a tó vizével ma kitöltött tómedret.

Mike Károly a Balaton környéki lápok tőzegfúrásainak rétegsoraiból sajátos lefutású ős-medernyomokat rekonstruált. Ezek alapján azt a következtetést vonta le, hogy a Balaton medre nem süllyedés, hanem az Ős-Duna eróziós tevékenységének eredménye.

A Balaton újabb komplex földtudományi kutatása

Az 1960-as évek elején a Balaton parti sávjában megkezdett településfejlesztés és a vízgyűjtő területen folyó intenzív mezőgazdasági tevékenység a tó vízminőségében bekövetkezett romlást (eutrofizációt, hínarosodást, algásodást, halpusztulásokat) eredményezett. Ez tette szükségessé, hogy az 1960-as évek közepétől a Magyar Állami Földtani Intézetben (MÁFI) komplex földtudományi kutatások induljanak. A különböző célú, tematikájú és részletességű kutatási projektek keretében az intézet vizsgálta a tavi üledékeket és a tó közvetlen, illetve távolabbi környezetének földtani, geomorfológiai, vízföldtani, építésföldtani és környezetföldtani felépítését. A kutatások során nagy mennyiségű – alapvetően fúrási és laboratóriumi – vizsgálati adat gyűlt össze. A keletkezett adathalmaz feldolgozását követően elkészült a Balaton Földtudományi Adatbázisa.

1981 és 2005 között kiemelt szerepet kapott a Balatonon elvégzett komplex földtudományi, limnogeológiai kutatás. Ennek során geofizikai és földtani terepi, valamint számos laboratóriumi módszer segítségével sikerült a korábban elért eredményeket egyrészt pontosítani, másrészt jelentős mértékben gazdagítani a Balaton és közvetlen környezetének földtani és ökológiai állapotáról, azok fejlődéstörténetéről, különösen az eltelt évszázadokra, évezredekre vonatkoztatva. A limnogeológiai kutatások során elindított balatoni projektek több szakaszban zajlottak.



Az 1981–2005 között végzett limnogeológiai kutatás során mélyült fúrások és mért geofizikai szelvények helyszínrajza

Az 1981–1986 között elvégzett aktuálgeológiai kutatás során 17 darab mederfúrás (Tó–1–16 és Tó–24) mélyült le a Balatonban. A fúrások rétegeinek 3-5–10 centiméterenként begyűjtött mintáin üledékföldtani, talajfizikai, szerves és szervetlen geokémiai, ásvány- és kőzettani, továbbá őslénytani vizsgálatok készültek, amelyek eredményeként a korábbiaknál jóval részletesebben váltak ismertté a jelenkori tavi üledékek legfontosabb tulajdonságai.

1987–1989 között kubai–magyar tudományos együttműködés keretében komplex geofizikai–földtani kutatás folyt. Az akkoriban legmodernebb vízi geofizikai módszernek számító akusztikus és szonár szelvényezés készült a tavon. A mérések 35 darab, egymástól körülbelül 2 km távolságra futó keresztirányú és 4 darab, egymástól körülbelül 4 km-re lévő hosszanti szelvény mentén történtek, összesen mintegy 373 km hosszban, egyenletes hálóban lefedve a Balaton egészét. A szonár a vízmélységet és a laza iszap vastagságát mérte. Az akusztikus módszer – a Balatonon először – 1–2 m lépésközzel, 10 cm körüli felbontással leképezte az iszap vastagságát és az alatta elhelyezkedő fiatal üledékeket is, maximum 50 m mélységig.

Ez nagy előrelépés volt a tó kutatásában, ugyanis előtte csak az egyes fúrások rétegsorait láthattuk, összefüggő, a rétegeket a maguk bonyolult lefutásával bemutató szelvényeket nem. A mérések alapján elkészült a tó laza iszapjának vastagsági térképe, és a tavi aljzat szeizmosztratigráfiai–tektonikai térképe. Az 1:50 000-es méretarányú térképek, és az azokat kiegészítő geofizikai szelvények segítségével képet kaphattunk a tavi üledékek térbeli helyzetéről, az iszap szerkezetéről, továbbá a Balaton aljzatának változatos morfológiájáról, fontosabb tektonikai elemeiről és anyagminőségbeli különbözőségeiről. A mérések jövőbe mutató jelentőségét az adta, hogy bemutatta a módszer alkalmasságát a tavi üledékek részletes leképezésére. Ezzel megalapozta a későbbi vízi méréseket, megmutatva a további kutatásra érdemes földtani jelenségeket, területeket.

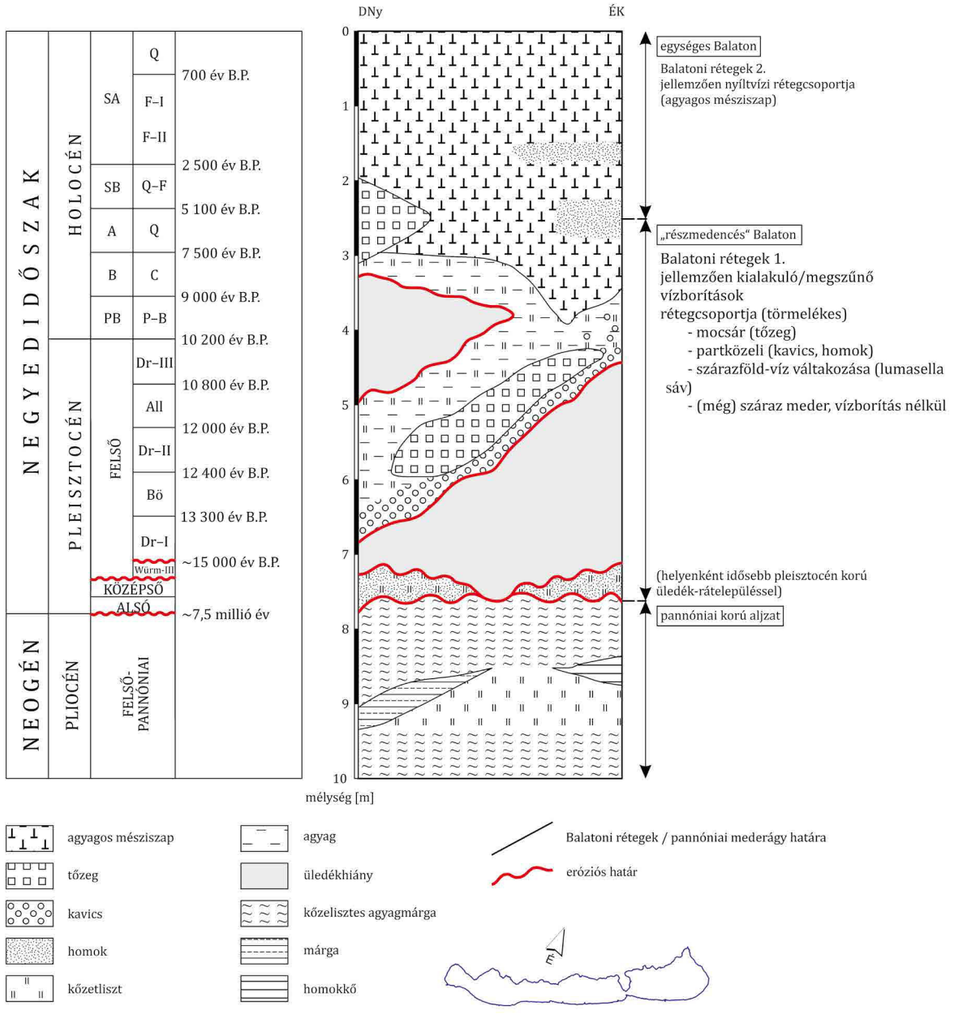
Az 1990–2000 között elvégzett kutatások a Balaton fejlődéstörténetének megismerését, illetve az erre vonatkozó korábbi ismeretek pontosítását tűzték ki. További 16 darab mederfúrás mélyült le a Balatonban, a korábbiaknál mélyebbre hatolva és nagyobb átmérővel. A fúrások rétegsorain a „rutin” anyagvizsgálatokon túl, korszerű izotóp-geokémiai és őslénytani vizsgálatok is készültek. Az eredmények kiértékelését és értelmezését követően kirajzolódott a Balaton tó és közvetlen környezetének paleoökológiai, paleoklimatológiai és paleolimnológiai fejlődéstörténete.

2001 és 2005 között megtörtént a balatoni kutatás hatalmas tényanyagának archiválása, a korábban született geofizikai szelvények újrafeldolgozása és újraértelmezése. Összefoglaló munka készült a Balaton vízszintváltozásai földtudományi adatbázisának térinformatikai feldolgozása témában a korábbi geokémiai, palinológiai és régészeti eredmények kritikus összehasonlításával.

Összefoglalva, a Balaton medrének geofizikai mérésekkel és mederfúrásokkal való feltárása lehetővé tette a mederüledékek szintenkénti településének és térbeli elhelyezkedésének feltérképezését, valamint ennek összegzéseként egy általános érvényű elvi rétegsor felállítását. Ezen felül, a mederüledékek különböző szintjeiből vett minták több szempontú vizsgálatával megismertük az üledékek fizikai, kémiai és üledékföldtani tulajdonságait, továbbá a bennük fellelhető ősmaradványokat. Ezzel megismertük a tó és környezetének részletes fejlődéstörténetét.

A balatoni üledékek fizikai, kémiai, szedimentológiai tulajdonságai

A mederfúrások rétegei szemcseösszetételük, színük, szerkezetük, nedvességtartalmuk és tömörségük alapján élesen szétválnak két üledéktípusra: egy aránylag laza és magas nedvességtartalmú úgynevezett „balatoni rétegekre” és az alattuk települő tömörebb, aljzatot felépítő rétegcsoportra. E két csoportot általában tőzeg, illetve kavicszsinór, esetleg lumasellának nevezett, kagylóhéjtörmelékből álló vékony réteg választja el egymástól. A későbbi őslénytani és radiokarbon vizsgálatok igazolták, hogy ez az élesen kirajzolódó határ jelenti a késő-pleisztocén–holocén korú balatoni üledékek és az aljzat idősebb rétegeit felépítő (középső- és kora-pleisztocén, illetve késő-pannóniai korú) képződmények érintkezését. A későbbi geofizikai méréseknél is ezt a határt tudtuk a



A mederfúrások elvi földtani rétegoszlopa

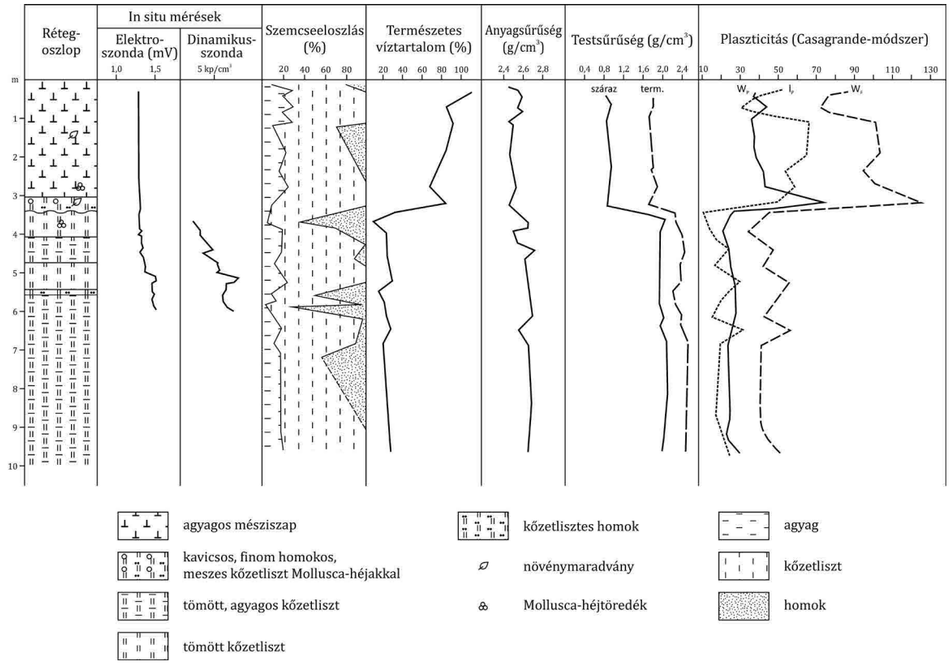
tó egész medrében követni, s így a tavi üledékek térbeli helyzetét is meghatározni.

Őslénytani és radiokarbon módszerrel a „balatoni rétegeken” belül további két rétegcsoportot lehetett megkülönböztetni: a felső-pleisztocén posztglaciális szakaszától a holocén kezdetéig (körülbelül 15–17 000 BP-től 10 200 év BP-ig) képződött törmelékes képződményeket (kavics, durva- és finomszemcsés homok) és a tőzegrétegeket; valamint a holocén elejétől kezdődően napjainkig lerakódó, elsődlegesen kémiai úton kiváló agyagos mésziszapot.

A balatoni üledékek térfogatsúlya a felszíntől a mélység felé fokozatosan nő, az agyagos mésziszap esetében 1,4 g/cm^3-ről 1,8 g/cm^3-re, mésziszapos finomhomoknál 1,7 g/cm^3-ről 2,0 g/cm^3-re. Porozitásuk az iszap felszínén 50% feletti (azaz szuszpenzió), mely érték a szemcseméret és a mélység függvényében 20–30%-ra lecsökken. A balatoni aljzat és a rá települő tavi üledékek legfontosabb fizikai tulajdonságait a Tó–24 fúrás rétegsorán mutatjuk be.

Ásványtani és geokémiai vizsgálatok alapján a holocén tavi üledékek igen nagy elsődleges porozitású mésziszapok, amelyek elsősorban magnéziumtartalmú kalcitból, alárendelten dolomitból és kalcitból, sőt néhol protodolomitból állnak (lásd a 11. fejezetet). Alárendelten ásványtörmelék (kvarc, plagioklász) és agyagásvány is előfordul bennük.

A magas vízkeménységű tavakban (mint például a Balaton) a karbonátásványok túlnyomó része kémiai és biológiai folyamatok során jön létre. A helyben képződött karbonátásványok stabilizotóp ($\delta^{18}O$ és $\delta^{13}C$) összetételének vizsgálata a klíma jellegére vonatkozó következtetések levonására és közvetve a tó vízszintváltozásának nyomon követésére ad lehetőséget. E mérésekkel sikerült bizonyítani, hogy a balatoni üledékek és a késő-pannóniai korú rétegek között az aljzatban idősebb pleisztocén képződmények is találhatók. Ezen idősebb pleisztocén üledékek meglétét az őslénytani vizsgálatok is igazolták.



A Tó–24 fúrás kőzettani szelvénye

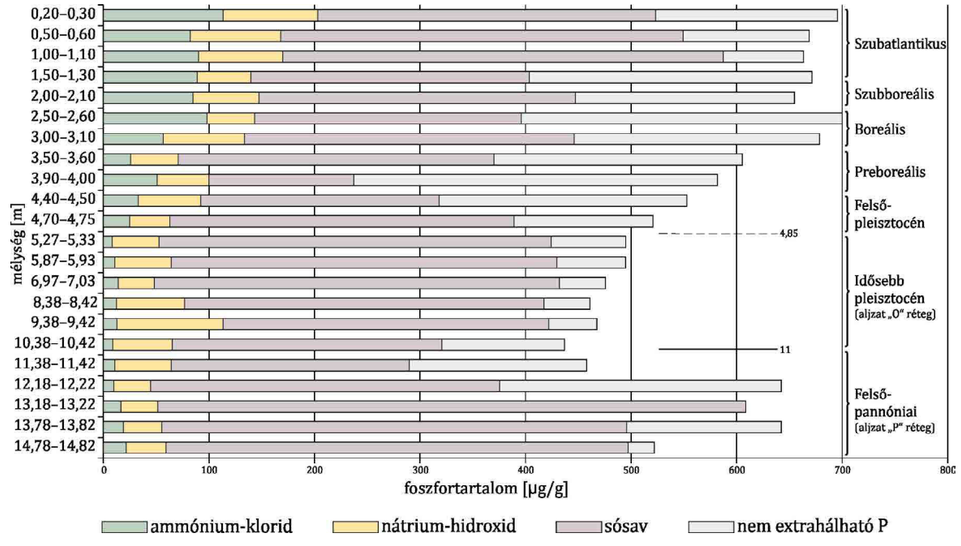
A helyben képződött tavi karbonátok stabilizotóp összetétele a klímarekonstrukció mellett hidrológiai következtetések levonására is alkalmas volt. Eredményeink bizonyították, hogy a Balaton körülbelül 15 000–17 000 évvel ezelőtti kialakulása óta olyan zárt vízrendszert alkot, ahol a vízszint (és a víz minősége) meghatározó mértékben a mindenkori éghajlati viszonyok (hőmérséklet, csapadék, párolgás) függvénye volt.

A mederfúrások felső, úgynevezett „balatoni rétegsorának” alsó harmadában (általában 2,0–3,5 m között) elemikén-kiválás, nagy elemiszén-feldúsulás, sziderit-, pirit- és esetenként gipszkristály is előfordult. Mindez az üledékfelhalmozódás idején uralkodó oxigénszegény környezetre és a víz magas szervesanyag-produktivitására utal.

A karbonátásványok és az éghajlat

A magas vízkeménységű tavakban a karbonátásványok kiválása alapvetően két tényezőtől, a vízben oldott CO_2 mennyiségétől és a hőmérséklettől függ. Száraz, meleg klíma mellett általában nagyobb lesz a párolgás, amelynek eredményeképpen a tóban megemelkedik az oldott ionok (elsősorban a Mg) koncentrációja. Ennek következtében a fitoplankton szervezetek fotoszintézise során kicsapódó karbonátok nagy magnéziumtartalmúak lesznek. Meleg évszakokban a plankton szervezetek tevékenysége általában jelentősebbé válik, így a kicsapódó karbonát mennyisége is nagyobb lesz. Fordított esetben, a Mg/Ca molarány minimum értékei (alacsony magnéziumtartalmú kalcit, kalcit jelenléte) alapján több csapadékot, és általában hűvös(ebb) klímát, és ezzel együtt a tóban magasabb vízszintet feltételezünk. Alapvetően azonban csak azt lehet kijelenteni, hogy a geokémiai és ásványtani elemzések eredményei az éghajlat száraz, illetve nedves jellegéről adnak felvilágosítást.

A Balaton vizének eutrofizációját jelentős mértékben határozza meg a vízben és az üledékekben jelenlévő, és a növények által könnyen felvehető foszfor. A Balaton négy részmedencéjében mélyült egy-egy mederfúrás rétegsorának foszforszelvényei azt mutatják, hogy a maihoz hasonló összfoszfor értékek a Balaton üledékeiben annak kialakulása óta megtalálhatók, sőt az idősebb korú fekü képződményeiben is. Mivel



A Tó–33 fúrás rétegsorának foszfortartalma extrahálhatóság szerinti bontásban

Használati útmutató stabilizotópokhoz

A karbonátok $\delta^{18}O$ értékeinek vizsgálata a Balaton vize egykori párolgásának mértékére, míg a $\delta^{13}C$ adatok a növényi fotoszintézis intenzitására utaltak. Minél magasabb ugyanis a hőmérséklet, annál intenzívebb a tó párolgása, így a víz a nehezebb $\delta^{18}O$ izotópban feldúsul. Melegedéskor ezzel párhuzamosan nő a növényi produktivitás és így a fotoszintézis is. Mivel a fotoszintézis erősödésével a víz szénvegyületeinek $\delta^{13}C$ értékei is nőnek, ezért magasabb hőmérséklet (és általában kisebb vízmélység) mellett a karbonátos üledékekben, általánosságban mind a $\delta^{18}O$, mind pedig a $\delta^{13}C$ értékek megnőnek. Fordítva is igaz, azaz alacsonyabb hőmérsékletnél a $\delta^{18}O$ és $\delta^{13}C$ értékek együtt csökkennek.

a foszfor az üledékekben nem mozgékony, ezért feltételezhető, hogy az egyes rétegek 600 mg/kg körüli átlagértéke a háttérterületek földtani képződményeiből származik. A rétegsorokban helyenként tapasztalható foszfordúsulás a víztömeg csökkenését (kevés csapadék, magas hőmérséklet és intenzív párolgás következtében), a vegetáció pusztulását és a szerves anyag bomlását feltételezi. Ezt támasztja alá például a Tó–33 fúrásban mért foszforszelvény is, ahol az összfoszfor mennyiségének maximumai a holocén boreális szakaszában és az aljzat kora-pleisztocén korú üledékeiben találhatók. Ezen időszakokban – a palinológiai és izotóp-geokémiai adatok tanúsága szerint is – száraz és meleg éghajlat volt jellemző. A rétegsorok foszfortartalmának kémiai megjelenése a balatoni tavi üledékek és az aljzat kora-pleisztocén és pannóniai üledékeiben eltérő képet mutat. A fiatal tavi üledékszemcsékhez lazán adszorbeált, ezért ammónium-kloriddal könnyen kioldható foszfor lényegesen nagyobb arányban fordul elő, mint az aljzatot alkotó kora-pleisztocén és pannóniai korú üledékeknél, ahol a nehezebben oldható vashoz és alumíniumhoz nátrium-hidroxiddal kioldott, illetve a szinte oldhatatlan kalciumhoz kötődő, sósavval oldódó foszfor fordul elő.

A vízi növényzet túlszaporodásakor, amenynyiben a könnyen oldódó foszforban hiány lép fel, a vízi szervezetek tömegesen elhalnak, így az üledékben történő felhalmozódásuk után, a szervezetükbe beépült foszfor miatt az adott üledékréteg relatív foszfortartalma megnőhet.

A mederfúrások alsó szakaszában átfúrt tőzegrétegek nagyon fontos szerepet töltöttek be a Balaton keletkezési időpontjának pontos meghatározásában. A tavi üledékképződés kezdetén képződött tőzeg radiokarbon kora (10 140 ±300 és 12 490 ±300 év BP) azt mutatja, hogy a Balaton területén a tőzegesedés a dryas II-ben indult meg, főként az Allerødben tartott, és a dryas III elején fejeződött be. A tőzegképződés körülbelül 1000–1500 évig tartott. Az őslénytani vizsgálatok alapján a Keszthelyi-medencében a tőzeg enyhén savanyú kémhatású (pH = 5–6) lápban keletkezett, míg a többi részmedence területén semleges, vagy enyhén lúgos (pH = 7–8) lápban halmozódott fel.

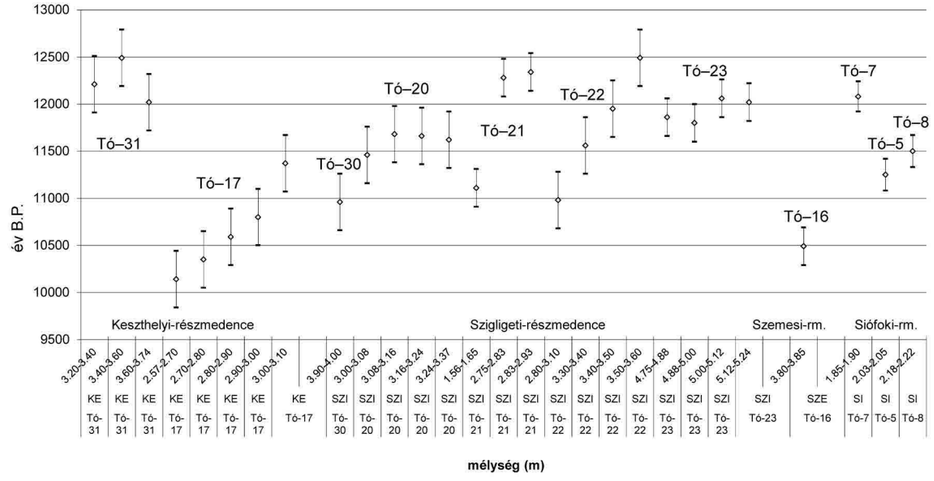
A Keszthelyi- és a Szigligeti-öböl mederfúrásaiban több és vastagabb tőzegréteg található, mint a Szemesi- és a Siófoki-öbölben mélyült fúrásokban. Mivel a tőzeg képződésének idején a mai Balaton helyén még különálló kis tavak voltak, a tőzeg-előfordulásban tapasztalt eltérések a részmedencék közvetlen környezetének domborzati, hidrológiai és klimatológiai körülményeivel magyarázhatók. A ma is jól megfigyelhető különbségek önálló víztestek esetében felerősödve jelentkeztek. Ezek a következők lehettek:

– A nyugati tavacskák felszíni vízgyűjtője lényegesen nagyobb volt, mint a keleti részé.

– A nyugati részen a felszín alatti vízutánpótlás a Keszthelyi-hegység felől jelentősebb volt, mint a Balaton-felvidékről.

– A nyugati vízgyűjtőn a csapadékosabb atlanti klímahatás érvényesült, míg keleten a melegebb és szárazabb kontinentális hatás.

– A nyugati területet széles és lapályos környezet vette körül (Kis-Balaton környezete,



A mederfúrások tőzegrétegeinek radiokarbon kora a mélység függvényében

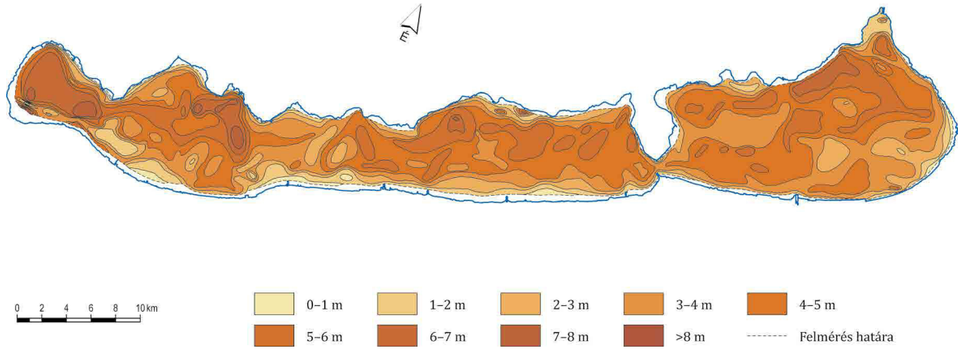
a Tapolcai-medence és a Nagyberek), míg a keleti rész magasabb morfológiai helyzetben lévő területek közé „szorult" be.

A fenti okok miatt nyugaton nagyobb felszíni és felszín alatti vízmennyiség jelentkezett, ez azonban nem tudott lényeges vízszintemelkedést eredményezni a tavakban, legfeljebb nagyobb felületű mocsarak, vizenyős területek jöttek létre. Ezért találunk ma a Keszthelyi- és Szigligeti-öböl mederfúrásaiban és part menti régióiban gyakran tőzeget. A keleti részeken, a kevesebb csapadék és felszíni hozzáfolyás, a relatíve szűkebb térben is elegendőnek bizonyult a sekély mélységű, de többé-kevésbé kiegyensúlyozott hidrológiai rezsimű tavi vagy mocsári környezet fennmaradásához.

A cézium ^{137}Cs és a ^{134}Cs izotópszennyeződés csak az 1951-es évektől, a légköri atomrobbantások óta kísérhető nyomon a légkörben. A rétegsorokban jól látható két maximum, amelyek az 1964-es atomcsend egyezmény előtti év és az 1986-os csernobili baleset eseményeit dokumentálják. Az 1989-ben lemélyített négy mederfúrás felső rétegeiben mért vastagság és a ^{134}Cs izotóp szennyeződés megléte alapján kiszámolható volt egy adott térségben az eltelt körülbelül 40 év feliszapolódásának a sebessége. Az izotópok hiánya a rétegsorban (például a Siófoki-öböl közepén) víz alatti üledékelhordást, míg az átlag feletti mértéke (15–50 mm/év) az átmozgatott üledék akkumulálódását jelezte. A Balaton kialakulása óta mért átlagos üledék-felhalmozódás (0,36 mm/év) és a jelenleg kiülepedő iszap nagyságrendileg eltérő értékei az utóbbi magas nedvességtartalmával és laza, konszolidálatlan szerkezetével magyarázhatók.

A tavi üledékek térbeli helyzete és vastagsági viszonyai

Az eredetileg csak a Balaton iszapvastagságának meghatározását célul kitűző, az egész tófelületen arányos elosztásban elvégzett folyamatos szeizmikus szelvényezés fontos tudományos és gyakorlati eredményeket hozott. A tengeri kutatásoknál már jól bevált módszernek és mérési technikának édesvízi körülményekre történő adaptálását és a terepi méréseket kubai geofizikusok végezték el, ami a több mint 100 éves múlttal rendelkező balatoni kutatások egyik jelentős, új fázisának kezdetét jelentette. Később, a terepi szelvények digitalizálását, újbóli értékelését és az eredmények értelmezését magyar geofizikus kol-



A Balaton üledékeinek vastagságtérképe

légák végezték el. A legfontosabb tudományos eredmények az alábbiakban foglalhatók össze:

(a) A Balatonban lerakódott tavi üledékek felső 10–20 cm-es szakasza lágy iszap. Alatta egyre kompaktabb, de még a holocénben és a késő-pleisztocénben lerakódott képződmények találhatók. Ezek aljzatát kora-pleisztocén és pannóniai korú, jól konszolidálódott rétegek alkotják. A tavi üledékek a tó mederében átlagosan 5 m vastagok, de a fekü egyenetlen felszíne felett vastagságuk változó. A Keszthelyi- és Szigligeti-medencében az átlagos üledékvastagság 6 m, a Szemesiben 5 m, míg a keleti medencében 4 m körüli.

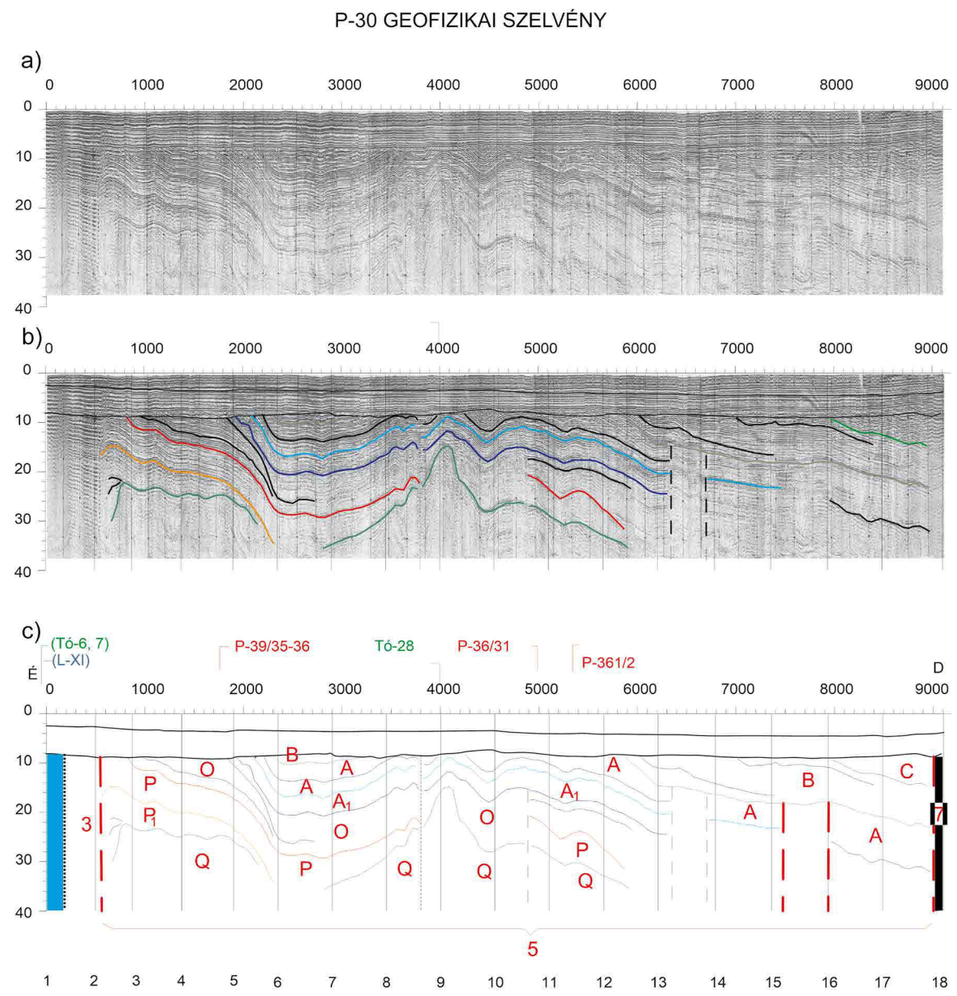
A részmedencéken belül vannak területek, ahol nem halmozódik fel üledék (például a Tihanyi-kútban, a Fonyód előtti térségen), egyes mélyedésekben viszont eléri a 7 m vastagságot is (például a Keszthelyi- és a Szigligeti-öbölben, a Zánka előtti részen). Az iszapvastagsági térkép jól mutatja a negyedidőszak előtti egyenetlenül erodálódott felszínt és azt a tényt, hogy a Balaton több kisebb, egymástól szeparált tavacska láncolatából alakult ki.

(b) A radiokarbon korok és üledékvastagsági adatok tanúsága szerint a feliszapolódás sebességének mértéke a teljes negyedidőszaki szelvényre vonatkoztatva 0,36 mm/év. A kisebb értéket a Siófoki-részmedencében (0,27 mm/év), nagyobbat a Keszthelyi-medencében (0,43 mm/év) tapasztaltuk. Mindez a részmedencékben lévő víztömeg és az egységnyi vízfelületre jutó vízgyűjtő terület nagyságával, valamint a tápláló vízfolyások által szállított üledék mennyiségével magyarázható.

(c) A szeizmikus észlelésekben rejlő földtani többletinformáció lehetővé tette a Balaton laza üledékei alatt lévő fekü földtani szerkezetének részletes vizsgálatát is. A szeizmogramokon a laza, tavi üledékek alatti szilárdabb fekü felső 20–30 m-es szakaszában összesen öt rétegsortípust (arab számokkal jelölve), és az 5. rétegsortípuson belül tíz további rétegfajtát (latin nagy betűkkel jelölve) lehetett kiválasztani. A kijelölt rétegsortípusok eltérő litológiai jelleget vagy települési viszonyokat tükröznek, amelyeket archív és saját mélyítésű parti, illetve mederfúrások segítségével földtanilag részben azonosítani tudtunk.

(d) A mindösszesen 46 db szelvény alapján elkészült a balatoni üledékek feküjének 1:50 000-es méretarányú szeizmotektonikai térképe.

e) A balatoni üledékek feküjében az akusztikus mérésekkel kimutatott képződmények alátámasztották a mederfúrások rétegsoraiban és a minták fizikai és O^{18} és C^{13} izotóp-geokémiai vizsgálataiban tapasztalt feltételezést, amely szerint a jelenlegi Balaton-meder alatt – a balatoni és a pannóniai üledékek között – idősebb pleisztocén korú, időszakos vízborításból vagy folyóvízből kiülepedett rétegek is találhatók.

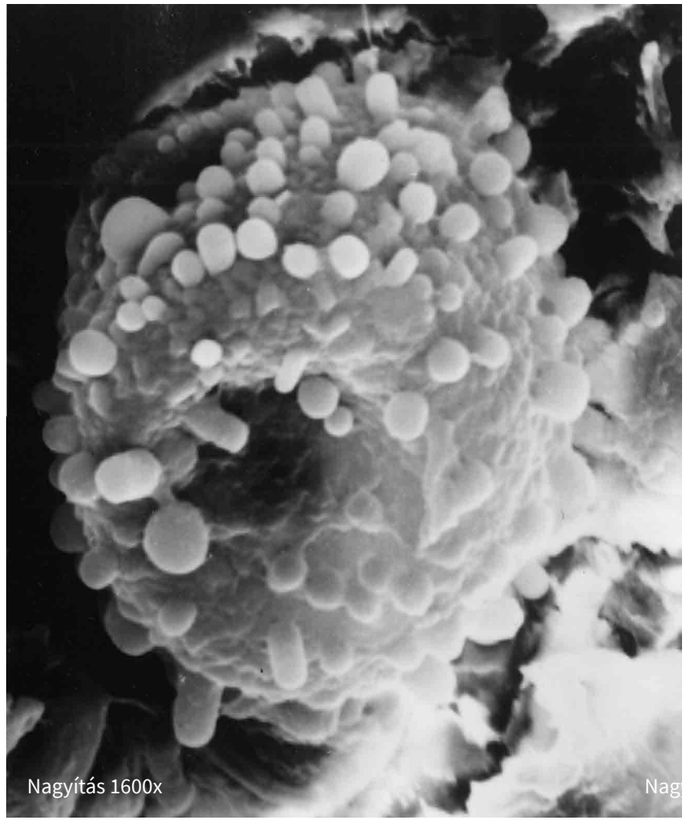


A P–30-as, Alsóörs és Siófok között készült geofizikai szelvény (a) regisztrátuma, (b) elsődleges feldolgozása és (c) értelmezése

Őslénytani vizsgálatok

A balatoni kutatások során kiemelt szerepet kapott a mederüledékek több szempontú őslénytani elemzése, melynek az volt a célja, hogy rekonstruálja a tó fejlődéstörténetét, választ keresve az ökológiai változásokra, így a relatív vízmélységre, a víz trofitására, azaz tápanyaggazdagságára, pH-jára, hőmérsékletére, továbbá a tó környezetében végbement vegetáció és az éghajlat változásaira, továbbá az emberi beavatkozások megjelenésére és hatásaira. Az őslénytani elemzések magukba foglalták a diatoma (kovaalga), a palinológiai (planktonszervezetek, sporomorpha), mollusca (kagylók, csigák) és ostracoda (kagylósrák) vizsgálatokat. Legrészletesebben a Balaton részmedencéinek közepén mélyült 11 fúrás rétegsora került elemzésre, mivel ezek tükrözték leginkább a víz szintjének és ökológiájának változásait.

Az őslénytani vizsgálatokon belül a palinológia (görög palynein: szórni, hinteni szóból) foglalkozik a spóra és pollen (együttesen spo-



Fehér tündérrózsa pollenje a Tó–31-es fúrásból (pásztázó elektronmikroszkópos felvétel)

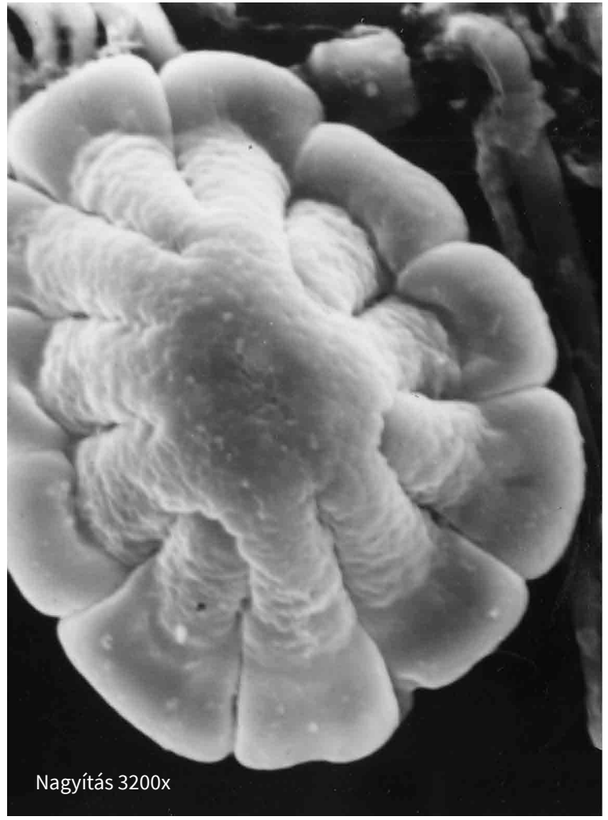
romorpha) vizsgálatával. A növények által termelt virágporszemek pollenjei és a virágtalanok spórái a levegőbe jutnak, majd pollencsapadék formájában a tavak iszapjába, lápok, mocsarak mélyére lesüllyedve csak a belső élő anyaguk (plazma) pusztul el. A külső faluk rendkívül ellenálló, így redukciós közegbe kerülve több százmillió évig is megmaradhatnak. A különböző növényfajok pollenje és spórája különböző formájú és díszítettségű, és jellemző egy adott növényfajra. Minden éghajlatnak és kornak is megvan a sajátos sporomorpha együttese, melynek vizsgálata alapján az egyes korok növénytársulásai jól rekonstruálhatók, és így értékes adatokat szolgáltatnak az üledék koráról és képződési körülményeiről.

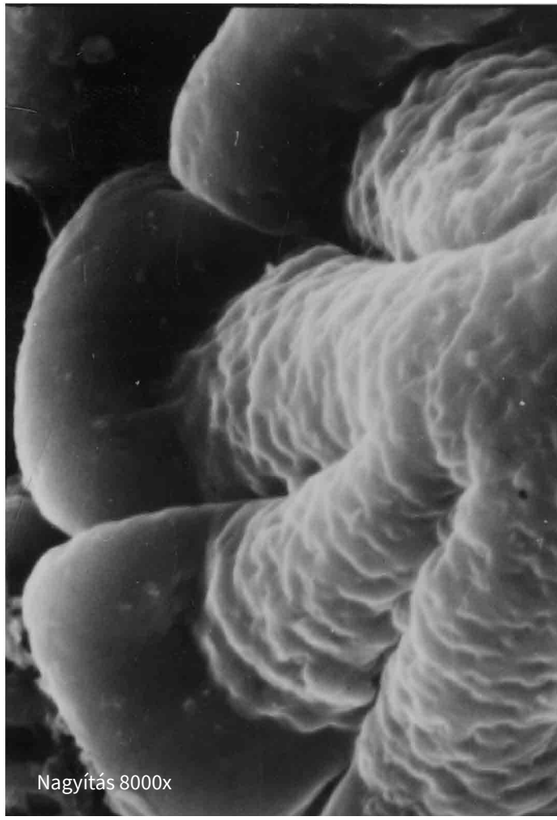
A szárazföldi élettérben élő lágyszárú növények pollenjei (Nonarborpollen, rövidítve NAP) és a fás szárúak pollenjei (Arborpollen, rövidítve AP) hasznos információt adhatnak az egykori morfológiai viszonyokról, az éghajlati változásokról, a vízborítottság és a trofitás mértékéről, továbbá az emberi tevékenység környezetre gyakorolt hatásairól is.

A vízi növények spórái és pollenjei, valamint a vízben élő kovavázú, mikroszkopikus méretű kovaalgák a vízi környezetben bekövetkezett vízborítottságról (relatív vízmélység) és vízminőségről (trofitás, pH, hőmérséklet), valamint a partvonal változásairól, azaz a partközeli és parttávoli kifejlődésekről adnak információt. A kagylósrákok pedig a víztest sótartalmára, trofitására és hőmérsékletére adnak értékes adatokat.

A mikroszkopikus méretű ősmaradványokat (sporomorpha, diatoma, ostracoda) laboratóriumi vegyszeres eljárásokkal nyerik ki a kőzetekből, és preparátumok készítése után vizsgálják. A Balaton fejlődéstörténete során előfordult gazdag flóra- és faunaegyüttesekből most csak azokat emeltük ki, melyek nagyobb változásokat jeleztek.

Az őslénytani vizsgálatok is megerősítették, hogy a Balatonban mélyült mederfúrások három rétegcsoportot harántoltak: (1) a Balaton fiatal, posztglaciális–holocén korú





laza üledékeit; (2) a legtöbbször alattuk települő idősebb pleisztocén korú, kissé kompaktabb; és (3) a fúrások mindegyikében elért pannóniai, tömör képződményeket. A három üledékcsoport között üledékhiány van, ami arra utal, hogy a balatoni üledékek képződését megelőző időszak képződményeinek nagy része lepusztult, vagy nem is képződött. A pannóniai és idősebb pleisztocén képződményekben őslénytani „korolásra” alkalmas, kifejezetten tavi flóra- és faunaegyüttes nem fordult elő. Folyamatos, őslénytanilag is értékelhető üledékek csak a késő-pleisztocén végétől, a posztglaciálisban képződtek, amelyet a fúrásokban harántolt tőzegrétegek radiokarbon kora egyértelműen bizonyított.

A mederfúrások rétegsorait a palinológiai vizsgálatok alapján, a tőzegrétegek radiokarbon korának és az üledék tulajdonságainak figyelembe vételével vegetációs szakaszokba soroltuk. A részletes vizsgálatok során megállapítottuk, hogy gyakorlatilag egyetlen fúrás sem tartalmazott a dryas I-től napjainkig bezárólag folyamatos és hiánytalan rétegsort.

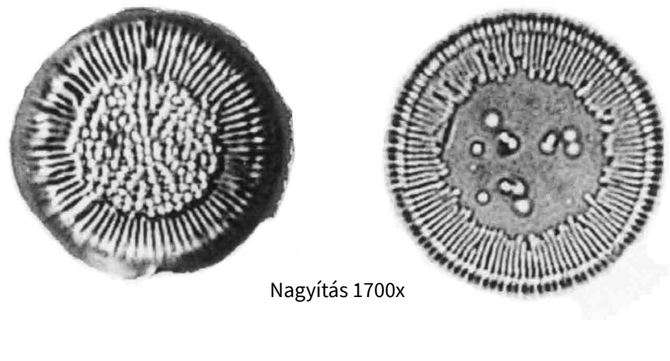
A Keszthelyi- és a Szigligeti-medencében ugyan megtalálhatók a legidősebb posztglaci-



Limnocythere inopinata *a Tó–24-es fúrásból (ostracoda, azaz kagylósrák, a Balatonban ma is él)*

Közönséges rence pollenje különböző nagyításban a Tó–25-ös fúrásból (pásztázó elektronmikroszkópos felvétel)





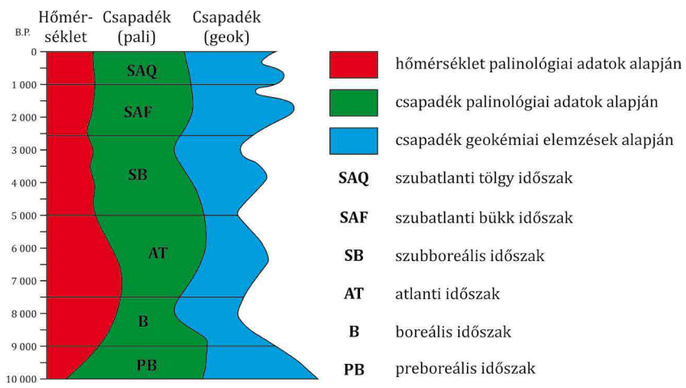
▲ Cyclotella diatoma *vázai a Tó–24-es fúrásból (pásztázó elektronmikroszkópos felvétel)*

ális (dryas I.) üledékek is, viszont a posztglaciális vége (dryas III.) és a holocén kezdete táján (körülbelül 11 000–9000 év BP között) általában üledékhiány volt tapasztalható. Az üledékhiány alatt észlelt tőzeg, a tömeges molluscahéj-felhalmozódás és a vegetációs kép alapján ebben az időszakban a Keszthelyi-medence térségében a tó vízszintjének jelentős csökkenése, és a terület elmocsarasodása, illetve szárazzá válása dokumentálható. A Balaton középső és a keleti részmedencéiben a fúrási rétegsorok folyamatosak ugyan, de az üledékképződés csak a dryas II – allerød (13 000–11 000 BP) között kezdődött el. A medencék vízborítása nyugatról kelet felé időben fokozatosan történt meg, mintegy 2–3000 év alatt. A tőzeg képződésének idején a ma már egységes tavat alkotó medencék még önálló kis tavak voltak.

A fúrások vizsgálata szerint a partok közelében később kezdődött meg az üledék felhalmozódása és azt hosszabb időtartamú szünetek tagolták, mint a tó közepén. Ez is jelzi a viszonylag sekély vízborítást és a vízszintváltozások gyakoriságát. A déli part mentén 11 000–5000 év BP között tapasztalt üledékhiány pedig azt mutatja, hogy ez időtartam alatt üledékképződés nem volt, vagy a tó vize itt nagyon sekély lehetett.

A Kárpát-medencében napjainkban is megfigyelhető éghajlati hatások – a kontinentális, a szubmediterrán és a szubatlantikus – a pleisztocén végétől különböző mértékben érvényesültek. Ezen hatások a Balaton tavi üledékeiben konzerválódott vegetációs képben is jól tükröződnek.

A balatoni mederfúrások közül a Tó–31, Tó–22, Tó–25 és Tó–29 palinológiai vizsgálatait, valamint a radiokarbon kormeghatározásait alapul véve elkészültek a balatoni részmedencék vízzel borítottságának és a víz minőségének diagramjai. A nyíltvízi állapotot és a balatoni részmedencék egyesülését a szubboreálistól számították.



▶ *A Balaton környezetében bekövetkezett éghajlat- (hőmérséklet, csapadék) változásainak tendenciái*

A Balaton kialakulása és fejlődéstörténete: klasszikus magyarázatok

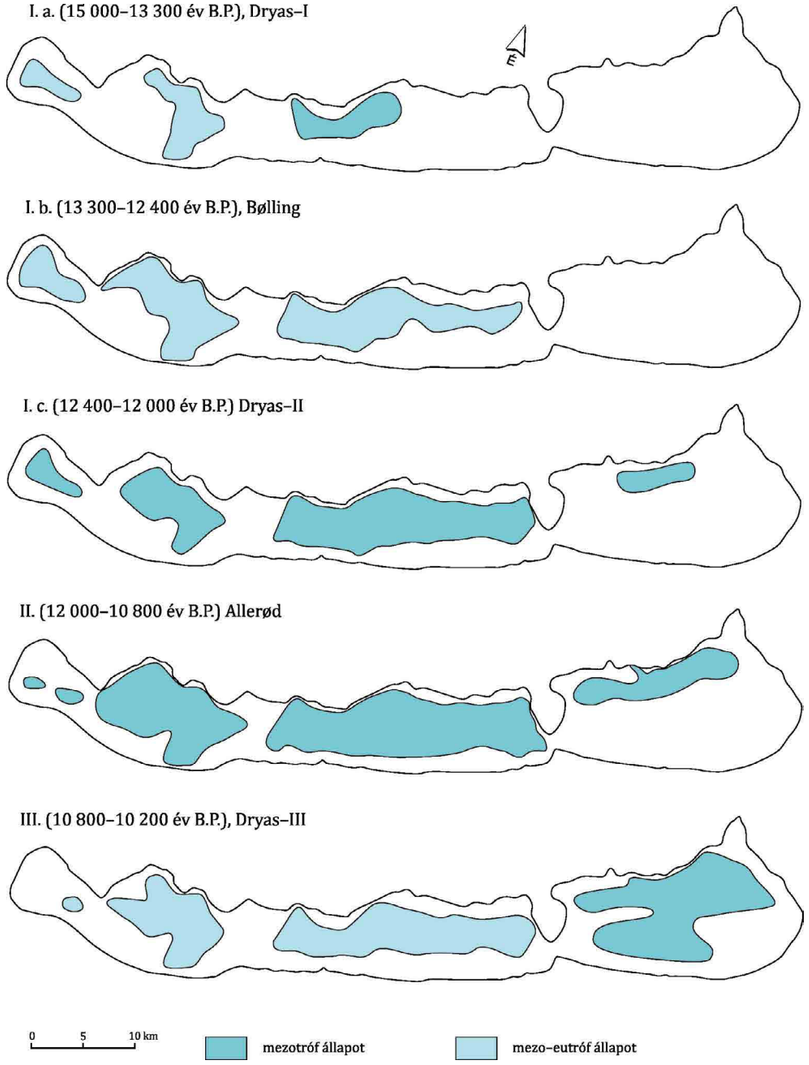
A pleisztocén nagyobb részében a már korábban kialakult, és a pleisztocénben továbbra is aktív, ÉK–DNy-i irányú fő törésvonalak mentén a Balaton környezetének differenciált mértékű emelkedése folytatódott. Legerőteljesebben a Bakony térsége, ennél kevésbé a Balaton-felvidék, még kevésbé Somogy, és a legjobban „lemaradva" a Balaton árka emelkedett.

Az egymáshoz képest különböző gyorsasággal emelkedő blokkok területén tektonikailag preformált relatív süllyedékek, völgyek és deflációs mélyedések egyaránt kialakultak. A lepusztulás az eredeti pannóniai felszíntől minimálisan 100–150 métert ért el. A Balaton-felvidék völgyeiből kilépő időszakos, vagy esetenként hosszabb ideig is tartó vízfolyások – amelyek a Balaton déli partjának meridionális völgyeiben a déli erózióbázis felé törtek – jelentős mennyiségű üledéket is leraktak (ezek elsősorban a déli parton tanulmányozhatók).

A teljes pleisztocén során igen szélsőséges éghajlati viszonyok uralkodtak, hiszen a déli parton ismeretes a meleg éghajlatra utaló, mállás útján helyben képződött vörös agyag, a nedves klímát feltételező folyóvízi kavics és homok, illetve a száraz és hűvös pusztákon lehulló lösz. A térségre jellemző volt – az intenzív külső földtani folyamatok mellett – a neotektonikai mozgás is. A középső-pleisztocén végére, a differenciált szerkezeti mozgások és intenzív denudációs folyamatok következtében a mai tómedencétől délebbre eső rögök kissé megemelkedtek, és a Balaton helyén mélyedések jöttek létre. A hosszú, hideg és száraz würm glaciálisban párhuzamosan folytatódott a térség differenciált emelkedése, a korábban felhalmozott üledékek denudációja, valamint a löszrétegek lerakódása a déli part rögein.

A késő-pleisztocén végi, úgynevezett posztglaciálisban (körülbelül 15 000–10 200 év BP között) a klíma a korábbiaknál csapadékosabbá és melegebbé válása következtében a mai Balaton helyén kis mélységű, tiszta és hideg vizű tavacskák sora alakult ki. A Balaton kialakulásának ebben a kezdeti, még résztavakból álló szakaszában a klíma azonban igen változatos képet mutatott. Az alapvetően hűvös és száraz (dryas I–II–III) periódusok közé enyhébb és melegebb periódusok ékelődtek (Allerød és Bølling), amelyek kezdetben nedves, majd szárazabbá váló tendenciát mutattak. A környező parti régióban a száraz periódusokban gyér vegetáció volt, ami lehetővé tette, hogy intenzív defláció és ritkábban areális erózió menjen végbe. Eredményeképpen a résztavak medrében elsősorban homok, alárendelten finomabb kőzetliszt halmozódott fel. A melegebb és csapadékosabb periódusokban a parti régióban átmenetileg megindult a növényzet terjedése, csökkent a parti területekről a tóba jutó, távolról beszállított törmelékes üledékek felhalmozódása. Ezzel párhuzamosan megindult a vízi növényzet elszaporodása is, megkezdődhetett a biogén mésziszap lerakódása. A helyben képződött üledék jellemzően később, a holocén folyamán vált uralkodóvá.

A részben csapadékvízzel, másrészt felszíni és felszín alatti vizekkel feltöltődő medencerendszer vízzel borítottsága nyugatról kelet felé egyre később következett be. A nyugati medencéket mocsaras, többször kiszáradó, nyugodt, mezotróf, illetve mezo–eutróf vízminőségű, nádassal gazdagon övezett sekély víz



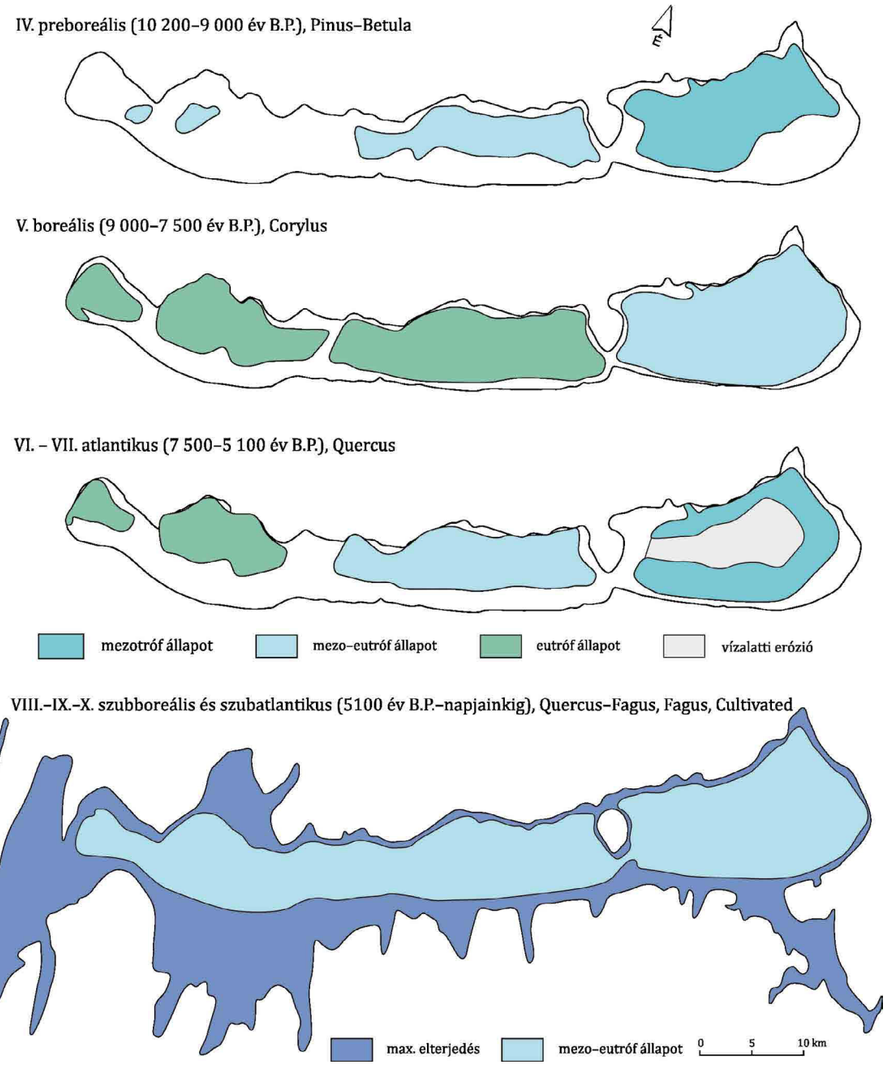
A Balaton víztest elterjedése és vízének trofitása a késő-pleisztocénban (posztglaciálisban)

borította. Kelet felé haladva a mocsaras állapot egyre később következett be, és egyre rövidebb ideig tartott. A legkeletibb Siófoki-részmedencében – egy kisebb északi part menti öböl kivételével – a vízborítás csak a posztglaciális legvégén alakult ki. A víz minősége huzamosan mezotróf és mezo–eutróf között ingadozott.

A holocén egy markáns, geológiai léptékben rendkívül hirtelen bekövetkezett hőmérsékleti ugrással vette kezdetét, amelynek során a Balaton vízi és szárazföldi környezetében jelentős változások játszódtak le.

Az első jelentős változás a késő-pleisztocén és a holocén határán, a preboreális (Pinus–Betula, azaz Fenyő–Nyír vegetációs fázis) kezdetén (körülbelül 10 200 év BP) ment végbe. Ekkor, a hőmérséklet és a csapadék növekedésének hatására a még külön életet élő részmedencékben vízszintemelkedés zajlott le. A geokémiai eredmények szerint ekkor volt az első maximális vízszint, és feltételezhetően már ekkor kialakult az egységes Balaton. Az őslénytani vizsgálatok azonban a Szemesi- és Siófoki-részmedencében sekély vizet, a nyugati medencék egyes területein pedig fokozatos kiszáradást, mezotróf, illetve mezo–eutróf vízminőséget mutattak ki. A korábban már megindult, meleg, nedves periódusokra jellemző folyamatok ekkor teljesedtek ki: a parti régióban elterjedt a növényzet, fokozatosan csökkent a parti területekről a tóba jutó törmelékes üledékek felhalmozódása.

A boreális (Corylus, azaz Mogyoró vegetációs fázis) idején (9000–7500 év BP) a klíma melegebbé és csapadékszegényebbé vált. A részmedencékben a vízi növényzet elszaporo-



A Balaton víztest-elterjedése és vízének trofitása a holocénben

dott, a tavak vize tartósan eutróffá vált. Eleinte a tavi környezetben biogén eredetű mésziszap halmozódott fel, majd az éghajlat szárazabbá és melegebbé válásának következtében abiogén eredetű karbonátüledék ülepedett ki. A fúrási rétegsorokban általában két szintben is megfigyelhető ez a réteg, amely döntően magas Mg-tartalmú karbonátásványokat (protodolomit és Mg-tartalmú kalcit) tartalmaz. Szintén az egyre melegedő klíma következménye, hogy egyes területek időszakosan kiszáradtak, erre utal néhány fúrás rétegsorában az üledékhiány.

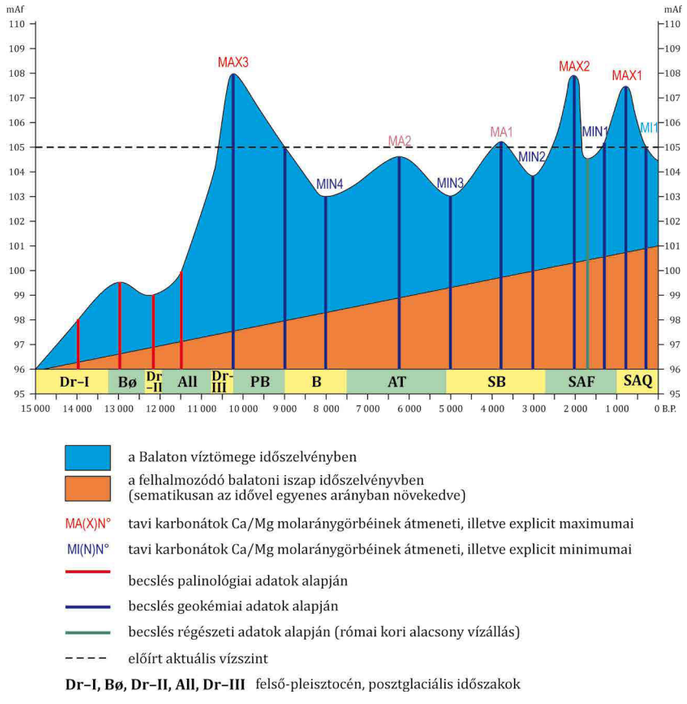
Az atlantikus (Quercus, azaz Tölgy vegetációs fázis) szakaszban (7500–5100 év BP) viszonylag nagy hőmérséklet és csapadékmennyiség növekedés ment végbe, több szerző szerint ez volt az úgynevezett „holocén klímaoptimum". Paleontológusok erre a szakaszra teszik a részmedencéket elválasztó gátak pusztulásának kezdetét. Ugyanakkor, a hidrológus szakemberek ekkorra datálják a részmedencék egyesülését.

A második jelentős és erősen vitatott változás a szubboreális (Quercus–Fagus, azaz Tölgy–Bükk vegetációs fázis) szakaszban (5100–2100 év BP) következett be, a paleontológiai eredmények alapján amikor a hőmérséklet csökkenése és az éghajlat csapadékosabbá válása azt eredményezte, hogy a még egymástól elkülönült tavacskákban a vízszint fokozatosan tovább emelkedett. Ekkor a parti abrázió következtében az elválasztó gátak végleg megszűntek, és létrejött az egységes vízfelület. Ugyanakkor, az ásványtani, geokémiai és régészeti adatok a szubboreálisban igen alacsony vízállást mutattak ki.

A szubatlantikus (Fagus, azaz Bükk vegetációs fázis) időszakban (2100 év BP-től napjainkig) kissé hűvösebb és szárazabb, valamint melegebb és csapadékosabb időszakok váltakoztak, fokozódott a kontinentális hatás. Ennek megfelelően, a mainál 1 méterrel alacsonyabb valamint 1,5–2 méterrel magasabb vízállás (azaz 5–6 m átlagmélység) és maximum a jelenleginél kétszeres vízfelületű tó tartósan kialakulhatott. Hidrológiai számítások szerint a Balaton 106,5–107,0 m A.f. vízszintnél került természetes hidrológiai egyensúlyba. Az ettől eltérő, a mainál magasabb szintek csak mesterséges beavatkozások eredményeként, és csupán időszámításunk kezdete óta mehettek végbe (például népvándorlások, a kelta invázió, a mongolok betörése és a török uralom korában). Ekkor, a csapadékos időszakokban a Balaton vízállása 108 m A.f. magasságig is megemelkedett, ami átlagosan 7–8 méter mélységet és a mainál max. 2,5-szer nagyobb vízfelületet eredményezett. Ennél nagyobb kiterjedés nem valószínű, mivel természetes körülmények között már 106 m A.f. vízszintnél a tónak természetes kifolyása lett volna a Sión keresztül, továbbá a megnövekvő vízfelületről jelentős vízmennyiség elpárolgott volna, melyet a felületre eső csapadék és a változatlan nagyságú vízgyűjtőről érkező hozzáfolyás ellensúlyozni nem tudott. Ezért, az említettnél magasabb morfológiai szinteken nyomozható idősebb színlők mesterséges beavatkozás (azaz a Sió lefolyásának gáttal történő elrekesztése) eredményeként alakultak ki, vagy neotektonikai, differenciált mozgások következtében kerülhettek mai helyzetükbe.

A Balaton vízminősége a szubatlantikus során gyakran változott, de általában a mezotróf, ritkábban eutróf állapot volt rá a legjellemzőbb. Az ember megjelenése (földművelés) a térségben az atlantikus elején (körülbelül 7500 év BP) feltételezhető, míg az egyéb tevékenységének (például legeltető állattenyésztés) hatása a szubboreális kezdetétől (körülbelül 5100 év BP) mutatható ki.

Végezetül játszunk el egy gondolattal, a Balaton jövőjét illetően. A tó jelenlegi átlag mélysége 3,35 m, az átlagos feliszapolódási sebessége 0,36 mm/év, tehát a tó teljes feliszapolódására 9300 év múlva kerülne sor. A tó vízszintjének mesterséges szabályozása mellett ezt az időt további két természetes esemény is megkurtíthatja. Először, az utóbbi évtizedekben tapasztalható felmelegedés folyamata, ami a múlt századhoz képest gyakrabban okozott jelentős vízutánpótlási problémát, azaz negatív vízháztartási egyenleget. Másodszor, az iszapfelhalmozódás sebessége a kutatások eredményei alapján megnőtt. A múlt század 70-es és 80-as éveiben a hidrológusok által mért és számolt feliszapolódási átlagsebesség már 0,62 mm/év volt. A tó medrének 4 pontján elvégzett ^{137}Cs mérések eredményei alátámasztják a feliszapolódás sebességének növekedését. Elfogadva ez utóbbi értékeket, a teljes feliszapolódás folyamatát 5400 évre lehet becsülni.



A Balaton átlagos vízszintjének ingadozása története folyamán

Ajánlott irodalom

Cholnoky J. 1937: Balaton. – Franklin Társulat, Budapest, 191 p.

Cserny T. 2002: A balatoni negyedidőszaki üledékek kutatási eredményei. – Földtani Közlöny 132/különszám, 193–213.

Cserny T. 2009: A Balaton és környezetének rövid földtani, hidrológiai és limnogeológiai leírása. – In: Balaton-kutatásról mindenkinek, MTA Balatoni Limnológiai Kutatóintézet, Tihany 2009., 13–31.

Cserny T., Prónay Zs., Neducza B. 2005: A Balatonon végzett korábbi szeizmikus mérések újraértékelése. – MÁFI Évi Jelentése 2004, 273–283.

Lóczy L. id. 1913: A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése. In: Lóczy L. id. (szerk.): A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei I. kötet, I. rész, I. szakasz. – M. Földrajzi Társaság Balaton-bizottsága, 617 p.

Marosi S., Szilárd J. 1981: A Balaton kialakulása. – Földrajzi Közlemények 29 (105) (1), 1–30.

Mike K. 1976: A Balaton kialakulása és fejlődése. In: Csoma J., Laczay I. (szerk.): Balaton. – Vízrajzi Atlasz sorozat 21 (1), 30–39.

Nagyné Bodor E., Szuromíné Korecz A. 2002: A Balaton negyedkori üledékeinek sporomorpha és ostracoda eredményei. – Földtani Közlöny 132 (különszám), 215–229.

Tullner, T. 2002: A Balaton vízszintváltozásai földtudományi adatbázisának térinformatikai feldolgozása tükrében. – Doktori értekezés. ELTE, Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest, 142 p.

Virág Á. 1997: A Balaton múltja és jelene. – Eger, Egri Nyomda Kft., 504 p.

Zólyomi B., Nagy L.-né 1992: A Balaton múltja a pollensztratigráfiai vizsgálatok tükrében. – In Bíró P. (szerk.): 100 éves a Balaton-kutatás. XXXIII. Hidrobiológus Napok Tihany, 1991, 25–32.



Palaeograpsus lóczyanus

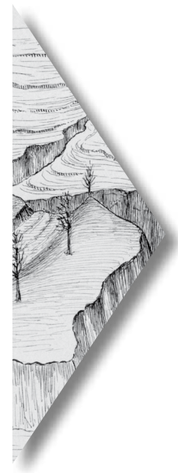
MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

Sümegi Pál, Demény Attila, Nagyné Bodor Elvira, Törőcsik Tünde, Jakab Gusztáv,
Schöll-Barna Gabriella, Serlegi Gábor, Sümegi Balázs Pál,
Gulyás Sándor, Molnár Dávid, Timár Gábor

10

Mit mesélnek a Balaton berkei az ősföldrajzról és a régi klímáról?

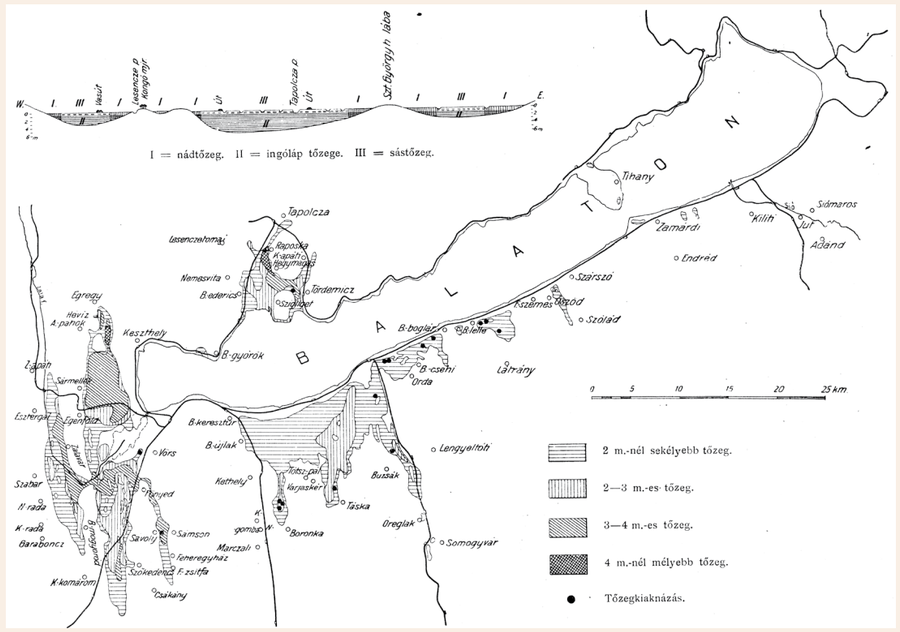
A Balaton környéki tőzegtelepek tudományos leírása a XIX. század elejére nyúlik vissza, a tőzeg elterjedését ábrázoló térkép pedig száz évvel ezután jelent meg. E térkép, valamint a Balaton berkeiben, öbleiben zajló kutatás azt jelezte, hogy a tó a történelmi időkben jóval jelentősebb kiterjedésű volt, mint a vízszint szabályozása után. A Balaton fejlődéstörténetének kutatása azóta sem állt le. Az elmúlt 30 évben számos sekélyfúrás mélyült a Balaton „nyúlványaiba”, melyeket nagyon sokrétű, és nagyon részletes vizsgálatoknak vetettek alá. A prehisztorikus rétegek vizsgálatából például kiderül az is, hogy milyen éghajlat uralkodott a tó keletkezése idején, milyen növényzet borította a környékét és milyen állatok éltek e tájon. A fiatalabb rétegek pedig már azokban az időkben rakódtak le, amikor már a régészeti kultúrák is kimutathatók a Balaton körül. Ezekből kiolvasható, hogy milyen tevékenységet folytattak az itt élők, és hogy milyen hatásai voltak az ember megtelepedésének a Balaton környezetének alakulására.



A balatonmelléki tőzeglápok és berkek

A balatoni lápok vagy „berkek” mind a jelenlegi tómedencze alacsony partjai mentén, azokkal egy síkban sorakoznak, már ilyen helyzetükkel is elárulva történetüknek egy fejezetét. Mert noha évszámokban pontosan ki nem fejezhető, mégis geologiai értelemben nem igen nagy idők előtt helyükön még a Balaton terült el, a maiakkal nagyjában megegyező jelenségeivel, áramlásaival, hullámverésével és vízszíningadozásaival. …

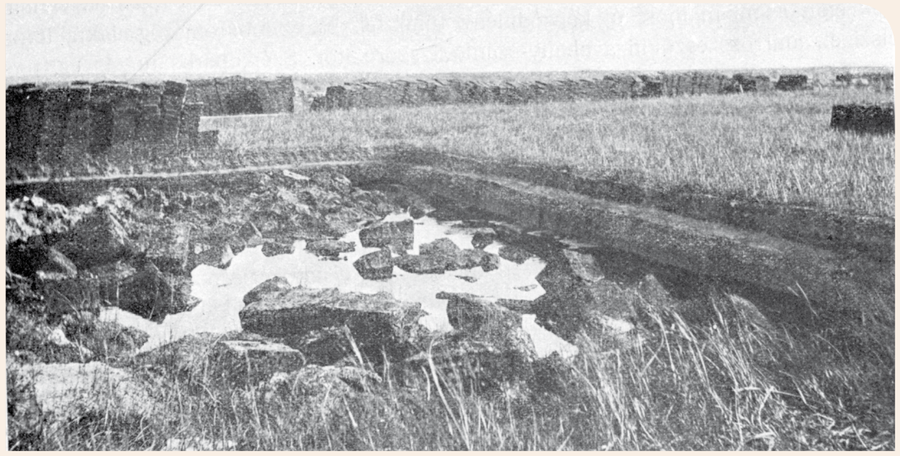
Akármelyik balatoni láp tőzegét vegyük is szemügyre, feltűnő lesz rajta az a rostos, hálósan szálas szerkezet, a mely a tőzegnek szivacsos természetet kölcsönöz. Már egyszerű rátekintéssel is többnyire megismerjük e tőzegben a nád szárrészeit meg gyökereit és valóban a behatóbb vizsgálat is megerősíti e látszatot, mert a balatoni tőzegtelepek bizonyos részeiben a nád majdnem kizárólagos anyaga a tőzegnek. Mindazonáltal tévedés volna azt képzelnünk, hogy a balatoni lápokat valamikor egész kiterjedésükben náderdők borították volna. Ismerve a lápok mélységviszonyait és szem előtt tartva azt, hogy a nád tulajdonképen nem vízi, hanem parti növény, magyarázatot nyer az a megfigyelés, hogy a tőzegtelepeknek nem minden részében találjuk a nád maradványait túlsúlyban. A nád eredeti termőhelye a csendes víz és BORBÁS VINCZE megfigyelései szerint a Balatonnak északnyugati, tehát a szél árnyékában levő csendesebb vizű partszegélyén is legfeljebb 1,40—1,80 m.-es vízmélységig terjed. Az uralkodó szeleknek forduló somogyi partokon nád nincsen.



A balatoni tőzeglápok elterjedésének vázlata

Ha a balatoni tőzeglápok mellékelt térképére egy pillantást vetünk, azt látjuk, hogy a nagyobb kiterjedésű lápok nem csekély részében a tőzegréteg jóval meghaladja a fönnebbi mélységet, ilyen helyeken tehát nem tenyészhetett a nádas, következésképen ott nem is várhatunk valódi nádtőzeget. A tapolczai lápöböl nyugat-kelet irányú szelvényét (Nemesvita és Tördemicz közt) véve szemügyre, a fúrási adatok azt bizonyítják, miszerint a lápöböl szélein és a lápszigetek körül mindenütt szálas nádtőzeg van, de a mélyebb lápteknőkben sötétbarna, sárszerű gyeptőzeg, a mely annál egyöntetűbb és tömöttebb, minél mélyebb rétegű.

E lápteknők tehát olyan öblök voltak, a melyeknek kerületeit sűrű náderdő borította, középső részeiben pedig az ingóláp képződése szakadatlanul folyamatban volt. Az átlag 2 m-nél mélyebb víz tehát megakasztja a nád továbbterjedését, helyt adva a vízi és félig vizi növények csoportjának. Utóbbiaknak tőzegképző hatása azonban nem volna elegendő arra, hogy megmagyarázzák nekünk, miképen tellettek ki ama tetemes mélységű teknők, a milyenek pl. a tapolczai öbölben, a Hévíz völgyében, stb. olykor a 7 métert is meghaladják. A tőzegképződés ezen túlnyomó része a sásoknak, elsősorban pedig a merevsás (Carex stricta GOOD.) nagy életképességének tulajdonítandó. Míg ugyanis a nád csak ott tenyészik, hol ásványi talajban gyökerezhetik — ezért minden kiásott tőzeg helyét csatornákban és gödrökben csakhamar nád foglalja el, — addig a sásfélék igénytelenségük mellett ott is jól tenyésznek, a hol túlnyomóan szerves eredetű talajban, mint a tőzegben, gyökereznek. Minden nagyobb síksági lápon az tapasztalható, hogy a sás alacsonyabb termeténél fogva a náddal együtt nem élhet meg, hanem olyan mélyebb tőzegtelepekre szorul, a hová a nád nem követheti. …



Tőzegvágás a boglári berekben

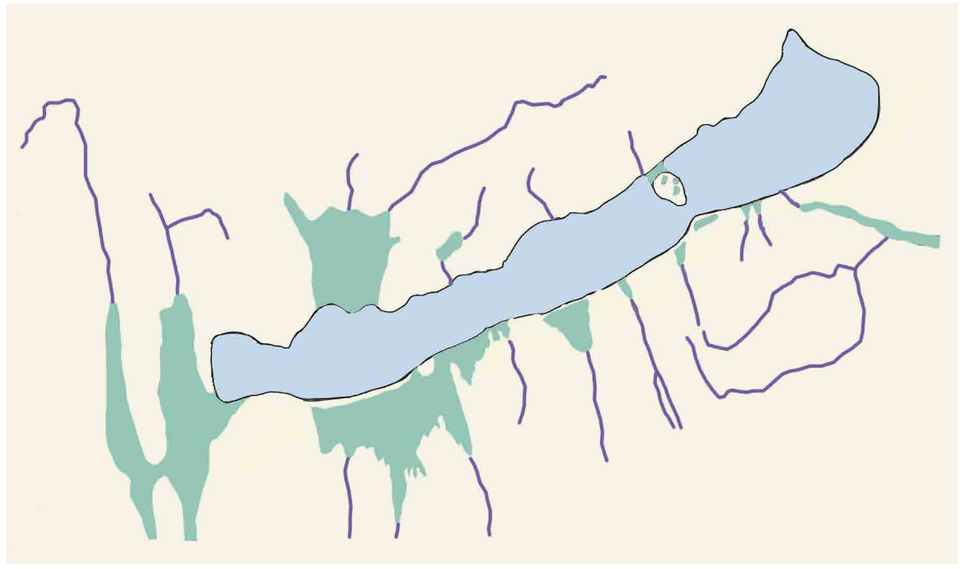
Részlet Lóczy Lajos A Balaton környékének geologiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése *című könyvéből*

1906-ban Lóczy Lajos tudománypolitikai (és pénzügyi) szempontból példátlan döntést hozott, amikor Ferdinand von Richthofen báró, a berlini Tudományegyetem tanszékvezető professzora halála után, a berlini tanári kar javaslata nyomán felkérték rendes oktatónak. Ugyanis – az életrajzírók megállapításai nyomán – a berliniek kérését azzal a szerény válasszal hárította el, hogy életének hátralévő napjait a Balaton tanulmányozásával kívánja tölteni. Valójában ekkor már több mint egy évtizede a Balatonnak és környezetének átfogó földtudományi – geológiai, őslénytani, geomorfológiai – vizsgálatával foglalkozott, és tudományos életének legsikeresebb napjait élhette át ezen kutatások során.

Előzmények

Még a kutatások kezdetén, 1892-ben egy kúriát vásárolt a budapesti Műszaki Egyetemen hidrogeológus mérnökként végzett tanítványának, Cholnoky Jenőnek a családi villája mellett, és ez az arácsi nyaraló lett a központja a balatoni vizsgálódásainak. Majd a kor technikai szintjéhez igazodva tanítványaival, kollégáival főleg gyalog, lóháton, lovas kocsival, az 1861-ben kialakított, a Balaton déli és északi részén húzódó vonattal járták be, térképezték a Balaton környékének földtani képződményeit és gyűjtöttek különböző korú ősmaradványokat, kőzetek. Ezeket rendszerezve kezdték el szerkeszteni a Balaton átfogó és részletes földtani térképét.

A Lóczy-féle Balaton-kutatás kezdetén még alig álltak rendelkezésre tudományos adatok, pedig a tó kialakulására vonatkozó első tudományos értékű elméletet a felvidéki Bél Mátyás már 1732-ben megfogalmazta, amikor is a tavat a Zala folyó hatalmas torkolataként írta le. Majd 1782-ben elkészült az akkor még titkos, a bécsi kancellária és császári udvar, katonai vezetés belső használatára szánt első osztrák katonai, úgynevezett „Jozefiánus” térkép is a területről. A XIX. század kezdetén pedig François Sulpice Beudant francia geológus (később a Magyar Tudományos Akadémia tagja) végzett igen fontos geológiai észleléseket a Balaton környezetében, és elkészítette a Balaton

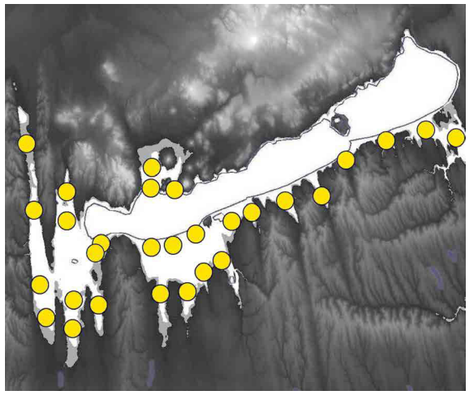


László Gábor 1911-ben szerkesztett balatoni tőzegtérképe (az eredeti ábráról átrajzolva)

első geológiai térképét, valamint felismerte és tudományos szempontból leírta az akkor még allúviumnak (özönvíz korúnak) tartott holocén kori tőzeget (*tourbe*) – a világon először. Ezzel elindította a tőzegnek, mint geológiai képződménynek a kutatását mind magyarországi, mind globális szinten.

Éppen ehhez az irányzathoz kapcsolódott a Magyar Királyi Földtani Intézetnek – különösen az intézeten belül 1891-ben létrehozott Agrogeológiai Osztálynak – az egyik legkiemelkedőbb sikere: a Magyar Királyság (a Kárpát-medence) tőzegtérképe. Ennek a mindmáig egyedülálló munkának az első fontos vetülete Lóczy Lajos egyik geológus tanítványának, László Gábornak a Balaton környéki tőzegtérképe. A geológiai megfigyelések alapján ugyanis László Gábor ismerte fel 1911-ben, hogy a Balaton a történeti és az őstörténeti időkben jelentősebb kiterjedésű volt, mint a szabályozás előtt (900 km^2). A tőzeg elterjedésére, tengerszint feletti magasságára alapozott véleménye alapján a Balaton a legnagyobb kiterjedései során elérhette a 110 m tengerszint feletti magasságot is, amely a mai, szabályozott szinthez (104,3 mBf) és a XIX. századi szabályozatlan szinthez képest egyaránt több méterrel magasabb vízborítást, és mintegy 1200 km^2 kiterjedést mutatott. László Gábor volt az első, aki a Balaton berkeit, öbleit tudományos igénnyel kutatta, fúrásokat mélyített, és átfogó tőzegvastagsági térképeket készített ezekről a területekről. Sőt, a különböző tőzegtípusokat a növényi maradványok, a lápokat pedig a rajtuk élő növényzet alapján elkülönítette és osztályozta is.

Ezt követően Lóczy Lajos – akkor már a Földtani Intézet igazgatójaként – nemzetközi szinten is kiemelkedő, az éghajlati tényezőktől kezdve a tó földtani fejlődésére is kiterjedő limnológiai–paleolimnológiai kutatásokat közölt



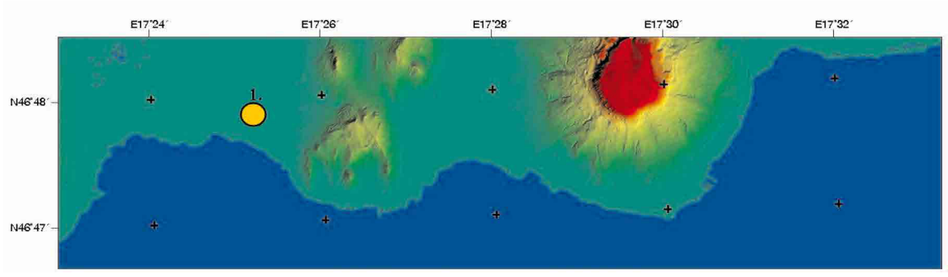
A Balaton jelenlegi medre, legnagyobb kiterjedése (fehér) és a tőzeges területeken mélyített, zavartalan magfúrások (sárga körök)

a Balatonról monográfia sorozat formájában. Az egyik legfontosabb megállapítása, vagy – figyelembe véve az éppen akkor megkezdett geofizikai vizsgálatok és a korai geofizikai adatok színvonalát – inkább sejtése az volt, hogy a Balaton vízborítása alatt több részmedence húzódik és ezeknek a vízzel való feltöltődésével alakult ki az egységes tómeder. Ezt a paleohidrológiai hipotézist csak a tómeder különböző pontján lemélyített zavartalan magfúrások elemzésével sikerült igazolni az 1980-as években, a Magyar Állami Földtani Intézet vezette munka során (lásd a 9. fejezetet).

Sajnos a jelentős számú természettudományi, geokronológiai adat és korrekt elemzés ellenére, a Balaton kialakulásáról és fejlődéséről igen sok természetrajzi vízió, természettudományi adatok nélküli hangos gondolat, elméleti fejtegetés jelent meg, még tudományos körökben is. Az igen sokféle, nem kellőképpen megalapozott, természettudományi adatokat nélkülöző hipotézis miatt, valamint a tó környékén, a tőzeges öblökben végzett fúrások, valamint a régészeti ásatásokon végzett környezettörténeti, régészeti geológiai megfigyelések, kutatások eredményei alapján határoztuk el, hogy újabb vizsgálatokat végzünk a Balaton fejlődésének feltárására.

Kutatási módszerek

Kutatási területnek kezdetben a Tapolcai-medence (az egykori vízzel borított öböl) déli részét, a Balatonederics és Szigliget közötti Edericsi (Szigligeti)-öblözet nyugati részét választottuk, ahol már az 1980-as években idősebb Sümegi Pál helyismeretét is kamatoztató vizsgálatokat folytattunk. Az 1990-es évektől kezdődően pedig ezeket a vizsgálatokat terjesztettük ki a Badacsonytördemici-öbölre, a Nagy-Berekre, amelyet az Ordacsehi-, a Lellei-, az Öszödi- (Szóládi-) és a Zamárdi-Berekben (Brettyóban), az Edericsi-öböl centrumában és keleti részén, valamint a Kis-Balatonban folytattunk. Így a Balaton nyúlványainak – a XVIII. századi elnevezéssel a Balaton rovarszárnyainak – valamennyi részét megvizsgálhattuk. Viszont a legvastagabb és legteljesebb rétegsort a Balaton-edericsi-öblözetben mélyített zavartalan magfúrás biztosította, ezért jelen munkánkban ezt részletezzük, kitérve az egyes szinteknél a berkek, az öblök, a nyúlványok között jelentkező különbözőségekre és azonosságokra is.



A Balaton-edericsi-öblben mélyített fúrás helyzete Lidar felvételen

A Balatonedericsi-öblözet feküjében folyóvízi kavicsos homokot tartalmazó tőzeg és tőzeges rétegek, valamint tavi üledékrétegek folyamatos váltakozásából álló, helyenként laminációt is mutató üledékes rétegsort sikerült feltárnunk, átlapoló zavartalan magfúrással. Ezen az edericsi fúrásszelvényen – a magyarországi negyedidőszaki fúrások közül egyedülálló módon – 32 radiokarbon kormeghatározást végeztettünk. Az elemzések szerint a szelvény időben megközelítőleg a jégkor végi hidegmaximumtól (LGM szint) a középkor végéig, az újkor kezdetéig terjedt. Az ülepedési ráta változásai alapján a rendkívül finom, centiméteres nagyságrendű üledékes váltakozások miatt centiméteres léptékben szervesanyag- és karbonáttartalom, szemcseösszetétel, elem- és ásvány összetételbeli meghatározást, bio-makromolekulákra, a szerves anyag degradáció mértékére koncentrálódó szerves geokémiai elemzést, csiga- és kagylóhéjakon szén- és oxigénizotóp vizsgálatokat folytattunk. Emellett valamennyi, centiméteres vastagságú mintán növényi makromaradványokra, virágporszem és spóra anyagra, fitolitokra, kovamoszatokra, *Chara* oogoniumokra, ostracodákra, ágascsápú rákokra, csiga- és kagylóhéjakra kiterjedő meghatározást és értelmezést végeztünk.

Az edericsi fúrásszelvényt összesen 42 különböző, egykori paleohidrológiai változást visszatükröző paleoökológiai indikátor szempontjából vizsgáltuk meg. A cm-es mintavételnek köszönhetően, az egyes rétegek időbeli felbontása átlagosan 38 évnek adódott, de az ülepedési ráta ingadozása miatt 30–80 év között váltakozott egy-egy réteg képződési ideje. Így a jégkor hidegmaximumától kezdődően egészen az oszmán kor végéig évtizedes léptékben tudtuk a paleohidrológiai, környezettörténeti tényezők változásait megvizsgálni és ennek nyomán a Balaton vízrendszerének és környezetének változásait modellezni.

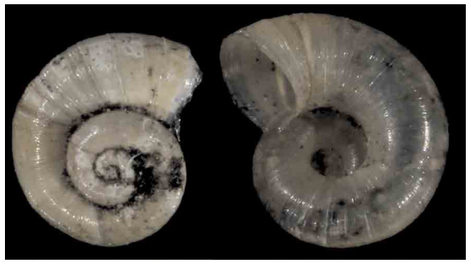
Prehisztorikus rétegek

A fúrásszelvény feküjét egy 20–21 ezer évvel ezelőtt, a jégkor utolsó hideg maximumában kifejlődött folyóvízi üledék, szemcseösszetételére nézve kavicsos homok alkotta. Ez az üledék egy jelentősebb reliefkülönbség megjelenését, azaz a térszín tagolódásának kialakulását, és ennek nyomán a folyóvízi tevékenység élénkülését jelzi a Tapolcai-medence déli részén. Valószínűsíthető, hogy az Edericsi-öblözetet is magába foglaló területen intenzívebb süllyedés indult meg a jégkor végén, és ennek nyomán alakulhatott ki a térben és a tengerszint feletti magasságban is differenciált felszín. Így a hegylábfelszínek (Szigliget, Keszthelyi-hegység, Szent György-hegy) előterében egy mélyebb fekvésű, horpa jellegű terület alakult ki. A magasabb térszínről induló patakok a hegylábi felszíneken a negyedidőszak korábbi szakaszaiban lerakódott kavicsos törmeléket szállítottak ebbe a tál alakú mélyedésbe, amely – az eddigi adataink alapján – a jégkor végén kifejlődésnek induló, ma ismert Balaton tavunk egyik legrégebbi részmedencéje volt.

A folyóvízi eredetű törmelékes üledékbe ágyazva hidegkedvelő molluszka, és napjainkban csak erdős tundrán és tajgán élő növénytaxonok maradványai, köztük termések és fitolitok kerültek elő. Mégis, akármilyen váratlannak és antagonisztikusnak is tűnik, a folyóvízi üledékes rétegből származó molluszkahéjakon végzett izotópos vizsgálatok kifejezetten hideg, de szárazabb klíma kialakulására mutatnak. Így a magas páratartalmat kedvelő, illetve az állandó vízborítást igénylő taxonok fellépése a fúrásszelvénynek az alsó szakaszán döntően az erőteljes lehűlés nyomán kialakult nedvességtartalom-emelkedésnek és nem a csapadék növekedésének tulajdonítható.

Az izotópos vizsgálatok nyomán a fagyos klimatikus szakasz folytatódott a hidegmaximum után 17 ezer évet követően is, de az üledék jellege megváltozott, és a folyóvízi rétegsor felszínén egy fajgazdag tőzegréteg fejlődött ki.

Ebből a változatos, de mégis döntően *Scorpidium* moha szerves maradványaiból álló tőzeganyagból jelentős mennyiségű, ma a hegyi réteken, vagy szubarktikus területeken élő lápimoha-taxonok, valamint *Dryas octopetala* (havasi magcsákó), *Betula nana*, *Betula pubescens*, *Betula humulis* (a nyír nemzetség tagjai), különböző tűlevelű fák, közte erdeifenyő szövetmaradványai, mohák spórái, ugyanezen fajok pollenjei, növényi opalitjai és hideg területekre jellemző molluszka taxonok héjai kerültek elő. Ezek a maradványok az LGM hidegszinttel azonos mértékű lehűlést, és kifejezetten párás



A jégkor végén és a holocén kezdetén lerakódott üledékrétegek egyik jellegzetes csigafaja, a ritka kerekszájú csiga

mikrokörnyezet kialakulását jelzik. A radiokarbon koradatok alapján, a döntően barnamoha maradványaiból álló tőzegréteg kifejlődését az utolsó jégkor végi hidegmaximum, a globális éghajlatrétegtani rendszerekben úgynevezett *H1*, teljes nevén Heinrich-esemény egyes szintjével párhuzamosítottuk.

Az igen sok területen, eltérő képződményekben kimutatott, késő-glaciális korú,

A Heinrich esemény

Hartmut Heinrich, tengerkutatással foglalkozó német geológus írta le először azt a jelenséget, amelynek során a jégtáblák szétesése miatt nagy mennyiségű hideg, édes víz kerül az óceánba, és ennek eredményeként megváltozik a tengeráramlatok mozgása és ezzel együtt sz éghajlat is.

A tengeri áramlatok kialakulását az óceánok különböző területei közötti hőmérsékleti és sókoncentráció különbség idézi elő. Ebből következik, hogy ha az adott térség vizének hőmérséklete illetve sókoncentrációja megváltozik, akkor az befolyásolja a tengeráramlatokat is. A tengeráramlatok éghajlatra kifejtett hatását jól szemlélteti a Golf-áramlat: januárban Norvégia tengerparti területeinek átlagos hőmérséklete mintegy 30 °C-kal melegebb, mint az azonos szélességi fokon fekvő észak-kanadai kontinentális területeké.

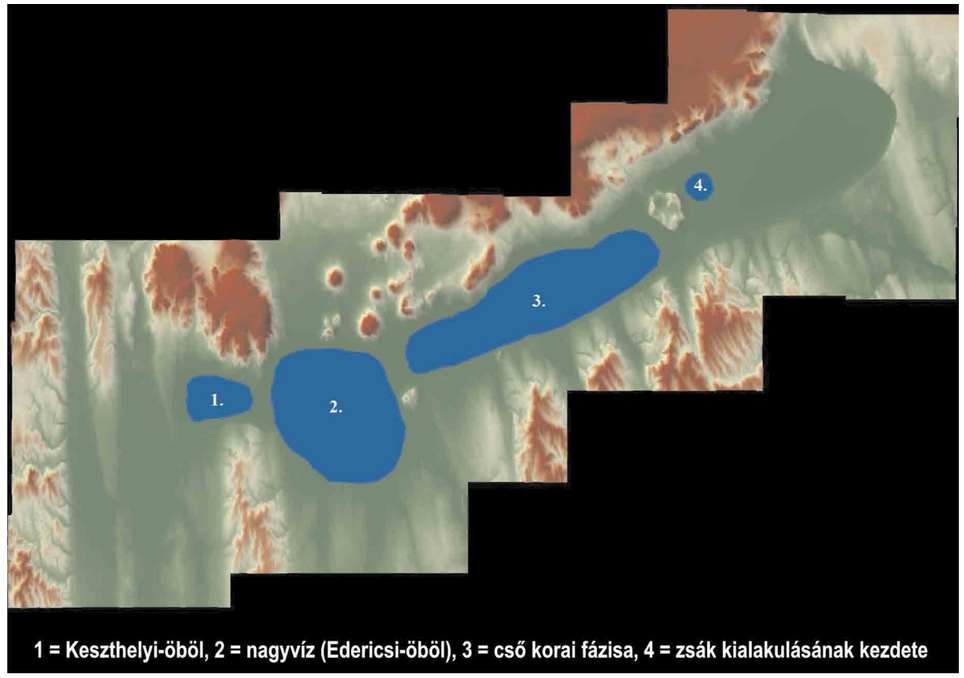
A kutatók szerint a legutóbbi eljegesedés során bekövetkezett Heinrich esemény olyan szárazságot idézett elő, ami egyedülálló volt az elmúlt ötvenezer évben. A H1 megaszárazság néven ismert folyamat olyan drasztikus változást okozott, amelynek következtében még a világ legnagyobb kiterjedésű trópusi tava, a Viktória-tó is kiszáradt, az ázsiai nyári monszun megenyhült vagy teljesen kimaradt. Ez volt valószínűleg a legkomolyabb természeti hatás, amivel a Homo sapiensnek meg kellett birkóznia, és egyes kutatások szerint a neandervölgyi ember is ennek következtében tűnt el a Földről.

A számítógépes szimulációk azt jelzik, hogy a felszín alatti víznek csupán pár fokos emelkedése már elég ahhoz, hogy meginduljon a jégtáblák tömeges szétesése. A számítások szerint, ha ez napjainkban bekövetkezne a nyugat-antarktiszi régióban – ami az egyik legveszélyeztetettebb terület – akkor több mint három méterrel emelkedne meg a tenger szintje.

megközelítőleg 17 és 14 ezer évek között kialakult erőteljes lehűlési szakasz azonban nem lett volna elegendő a tundrára is jellemző, hideg és párás környezetben jól fejlődő mohaláp kialakulásához. Így feltételezhető, hogy az Edericsi-öblözet területén a jégkor végén kifejlődött horpa nyomán egy fagyzug is kialakult, ahol a hideg és párás levegő összegyűlt. Ez a neotektonikus mozgások nyomán kifejlődött mélyedés pedig lehetőséget nyújtott a hideg és nedves helyeket kedvelő *Scorpidium* lápra jellemző taxonok megtelepedésének.

A rendkívül jelentős mennyiségű, helyenként megégett kéregrészekből, szenült fák törmelékéből, növényi szövetekből, termésekből, terméstöredékekből álló *Betula nana*, *B. humulis*, *B. pubescens*, és *Pinus sylvestris* (erdeifenyő) maradványok alapján feltételezzük, hogy a tőzegréteget képező mohalápot vegyes lombozatú, boreális típusú tajga boríthatta. Ugyanakkor a *Schoenoplectus lacustris* (tavi káka), a *Typha* (gyékény), a *Carex* (sás), a *Potamogeton* (békaszőlő), a *Cyperus fuscus* (barna palka), a *Ranunculus sceleratus* (torzsika boglárka) maradványok azt jelzik, hogy a tőzegláp helyenként felszakadhatott, és ideiglenes tőzegpocsolyák, tavacskák is kifejlődhettek, főleg a nyári félévben, amikor az átfagyott, felszínközeli lápi tőzegrétegek kiolvadhattak. Ennek a boreális típusú lápszem tavi állapotnak a kifejlődését elősegíthette, hogy 15–14 ezer évek között a klíma csapadékosabbá vált. A párásabb és csapadékosabb éghajlat következtében a hűvösebb klímaviszonyok – az egykori legmelegebb hónap középhőmérséklete 13–17 °C fok közötti lehetett – hatására az ősi Balaton medencéjében a tó szintje fokozatosan emelkedni kezdett.

Nem zárható ki, hogy e részmedence vízborításának megnövekedését a neotektonikus kimélyülés intenzívebbé válása is segíthette. Így a klíma megváltozásának és talán a neotektonikus kimélyülésnek a hatására a Balaton legrégebbi medencerészén jelentős vízborítási maximum alakulhatott ki 14 és 13 ezer évek között. Sok természetrajzi szakember úgy gondolja, hogy ezeket az eredményeket ki lehet terjeszteni a mai Balaton egészére, azaz ekkor már az egész Balaton medrében jelentős vízmélység jöhetett létre. Mégis az eddigi földtani adatok, a Balaton főmedrébe mélyített fúrások részletes elemzése és a geofizikai adatok nyomán az rekonstruálható, hogy a pleisztocén végén



1 = Keszthelyi-öböl, 2 = nagyvíz (Edericsi-öböl), 3 = cső korai fázisa, 4 = zsák kialakulásának kezdete

A balatoni részmedencék (fióksüllyedékek) kifejlődése a jégkor végén, népi elnevezésekkel

a Balaton még négy fióksüllyedékből állt, és közöttük magasabb hátak jelentkezhettek.

Meg kell azonban jegyeznünk, hogy az itt bemutatott paleohidrológiai eredmények oldalirányú összefüggéseit nem könnyű bemutatni, mivel eleddig ilyen részletes vizsgálatokat más fúrásszelvényeken nem végeztek. Ebben a késő-glaciális szintben és klimatikus horizontban jelentkeztek a déli parti berkekben az első vízborítási nyomok – a jégkor végi üledékfelhalmozódás kezdete, azonban a Nagy-Berek és a Vörsi-Berek régióiban mélyített zavartalan magfúrásokban nem sikerült feltárnunk ezt a paleohidrológiai szintet. Ezekben a régiókban a jégkor végi felszín magasabban helyezkedett el a többi öblözethez képest, ezért itt a tavi rétegek kifejlődése még nem kezdődött el a késő-glaciális során.

A pleisztocén–holocén átmeneti szakaszán, 11,7–11,5 ezer évek között, illetve a holocén legkorábbi szakaszában alakult ki a legjelentősebb vízborítás az edericsi részmedencében, és megindult a mezotróf tavi üledék, a csillárkamoszatban gazdag, foszforban szegény mészisziszap képződése. A legfontosabb paleoökológiai, paleoklimatológiai tény, hogy mind a 42 vizsgált tényező fokozatos átalakulást mutatott a jégkor végén és a holocén kezdetén. Nem találtunk egyetlen tényezőt sem, ami alátámasztotta volna a sok magyarországi természetrajz



A Balaton-edericsi-öbölben a holocén kezdetén kifejlődött, csillárkamoszatokban gazdag, tavi mészisziszapréteg

tudós által igen sok helyen drasztikus lehűlési zónaként megfogalmazott, az utolsó dryas szint és a jelenkor kezdeti erőteljes felmelegedése közötti, rövid idejű, hirtelen átalakulást. Ugyanis a jégkor végi tőzegréteg szervesanyag-tartalma fokozatosan csökkent, míg az üledék karbonát-tartalma fokozatosan emelkedni kezdett, és a jelenkor kezdetén fehéresszürke, majd sárgás-fehér színű, kevés magnézium-karbonátot is tartalmazó, csillárkamoszat-maradványokban gazdag mésziszap rakódott le a pleisztocén végi tőzegképző mohaláp tőzegrétegére.

Ugyanebben az átmeneti időszakban a Tördemici-öbölben, a csuszamlással kialakult és felhalmozódott kavicsos összlet felszínén jelentős, homokfrakcióban gazdag, ugyancsak meszes taviüledék-felhalmozódás kezdődött el. Folyóvízi homok akkumuláció, majd *Chara* maradványokban gazdag, meszes tavi lerakódás indult meg a Kis-Balaton fenékpusztai részén, valamint a Zala folyó torkolatától déli irányban lévő kis-balatoni részen, a Vörsi-Berek környékén is. Ekkor kezdődött el a Balaton déli partjának összes öblében – közte a Nagy-Berekben is – a meszes taviüledék-felhalmozódás, a mésziszapképződés, és mindenütt fokozatos átalakulás figyelhető meg a feküben jelentkező folyóvízi hordalékanyag és a rátelepülő meszes tavi üledékréteg között.

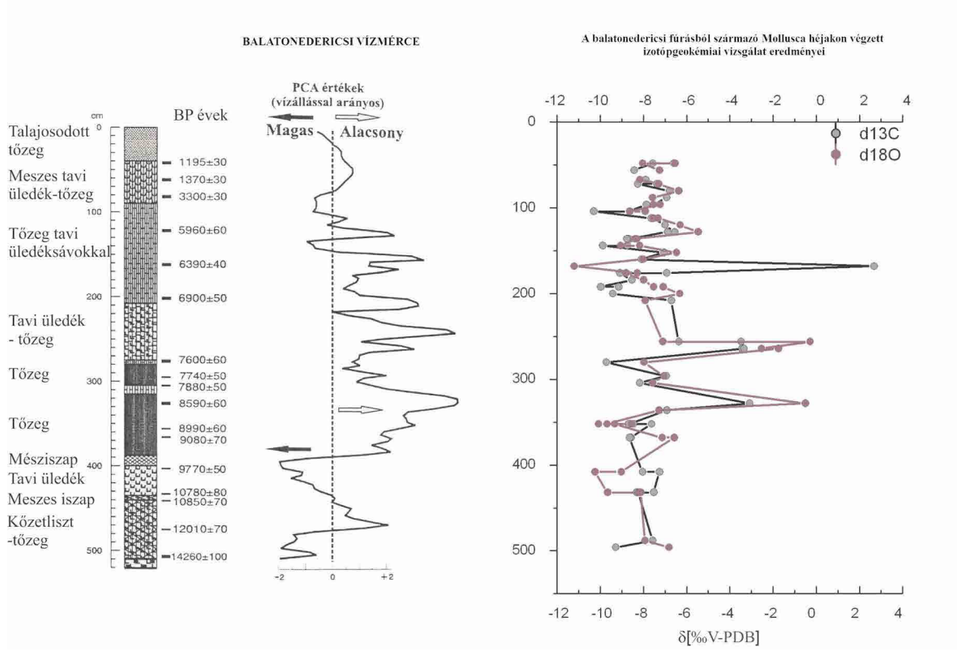


Kora-holocén tavi mésziszap és tőzegrétegek váltakozása a balatonedericsi zavartalan magfúrásban

Ugyanezt a fokozatos átalakulást támasztja alá valamennyi geokémiai adat, valamint az egykori növényzet rekonstrukcióját lehetővé tevő maradványok elemzése is. A fitolitok, a növényi makromaradványok, a fosszilis virágporszemek összetételében a termomezofil tölgyerdőkre jellemző taxonok dominanciaszintjének emelkedését, majd abszolút dominanciáját rekonstruálhattuk 12 és 8 ezer év között. Ezzel párhuzamosan a vegyes lombozatú fenyőerdőkre jellemző maradványok aránya fokozatosan lecsökkent. A mollusz-ka-faunában – hasonlóan a növényegyüttesekhez – a meszes vizeket kedvelő, a felszíni növényborítástól mentes, legalább 3 méteres vízborítást kedvelő vízi taxonok aránya vált dominánssá. Az egyik legfontosabb vonása a molluszka-faunának ebben a szintben, hogy a jégkor végén elterjedt hidegtűrő–hidegkedvelő, és a jelenkorban elterjedő melegkedvelő taxonok még együtt jelentkeztek.

A Balaton összes, addig elkülönülten fejlődő fióksüllyedékére, a déli és nyugati berkekre, öblökre kiterjedő süllyedés hatására, ebben a fejlődési fázisban jött létre a Balaton egységes vízborítása is, mintegy 11 és 10 ezer évek között. Az egységes vízfelszín kialakulásában a neotektonikus mozgások mellett, a megnövekedett csapadékkal jellemezhető klimatikus fázis kialakulása játszhatott fontos szerepet.

Az egységes vízborítást, a Balaton kialakulását követően az Edericsi-öböl paleohidrológiai állapota is megváltozott. A tenyészidőszak megemelkedett hőmérsékletének hatására jelentkező intenzívebb párolgás, a jelenkor első fázisában létrejött jelentősebb növényborítás vízvisszatartó funkciója, valamint az egységes vízborítás megjelenése okozta az Edericsi-öblözet, sőt az egész Balaton környezetének megváltozását.



A balatonedericsi vízmérce és az izotópgeokémiai vizsgálatok alapján lehatárolt magas vízállású (csapadékos éghajlatú) és alacsony vízállású (szárazabb éghajlatú) szakaszok

Ezen változások nyomán a vízparti területek elláposodtak, és rendkívül fajgazdag, lápi–mocsári vegetáció borította a Balaton parti régióját, így a bemutatott edericsi fúrásszelvény környékét is.

Ezzel párhuzamosan a csapadék fluktuációja kezdődhetett el. Erre utal, hogy a holocén középső szakaszának kezdetén kifejlődött tőzegszinteket kisebb-nagyobb vastagságú mésziszapos sávok tagolják, és ennek nyomán a vízszint évtizedes léptékű változásait rekonstruálhattuk a holocén középső szakaszának kezdetén. Az üledékes és őslénytani adatok mellett az izotóp-geokémiai, valamint a bio-, geomolekuláris vizsgálatok is alátámasztották a vízszint és a csapadékbevétel ciklikus váltakozását a kora-holocén szakasz végétől, a középső-holocén kezdetétől.

A Balatonedericsi-öbölben ekkor alakult ki a jelenkori vízmérce állapot, amelyben a csökkent vízállású szakaszokat tőzeges horizontok, a magasabb vízállású időszakokat a tavi eredetű mésziszap-sávok jelzik. A csapadék hullámszerű váltakozásainak hossza egy és öt évszázad közötti volt. Ebből a tőzeges–tavi laminák váltakozásából álló rétegsorból származó, alig 30 évet átfogó, egy centiméteres minták vizsgálata nyomán rövidebb időtartamú, évtizedes klímaciklusokat is rekonstruálhattunk, az évszázadokat átfogó klímaváltozások mellett.

A csiga- és kagylóhéjak izotópadatai alapján a jégkor végi szárazabb, majd a jégkor-jelenkor határán és a holocén első szakaszában kialakult csapadékosabb éghajlati fázist a 10 és 8,5 ezer év közötti szárazabb szakasz váltotta fel. Ugyanakkor az izotópadatok – teljesen összhangban az edericsi vízmérce adataival – azt jelzik, hogy ezt az 1500 éves szárazabb éghajlati periódust hullámszerűen megjelenő, 130 és 30–60 éves csapadékosabb szakaszok tagolták.

A jelenkor kezdetén kifejlődött, lecsökkent csapadék bevételű klimatikus szakaszokban az eutróf tavi – tőzeges, lápos tavi környezetet

kedvelő növény- és állatfajok, mint a *Typha* (gyékény), a *Phragmites*, a *Myriophyllum* (süllőhínár), *Polygonum lapathifolium* (lapulevelű keserűfű), és a *Succinea* csigák domináltak. Ezeknek az őslénytani indikátoroknak az előretörése mellett megemelkedett a tőzeges szinteknek a fitolittartalma is. A tőzeges rétegeket tavi eredetű mésziszap-közbetelepülések szakították meg, és ezekben a közbetelepülésekben a növényi opalittartalom, a lápi–mocsári–vízparti környezetekben elterjedt flóra- és faunaelemek aránya erőteljesen lecsökkent. Ezzel párhuzamosan a mélyebb tavi környezetet jelző elemek, mint a *Chara*-félék, a *Nymphaea alba* (fehér tündérrózsa) és más lebegőhínár-maradványok mennyisége megemelkedett.

Az emberi közösség nyomai

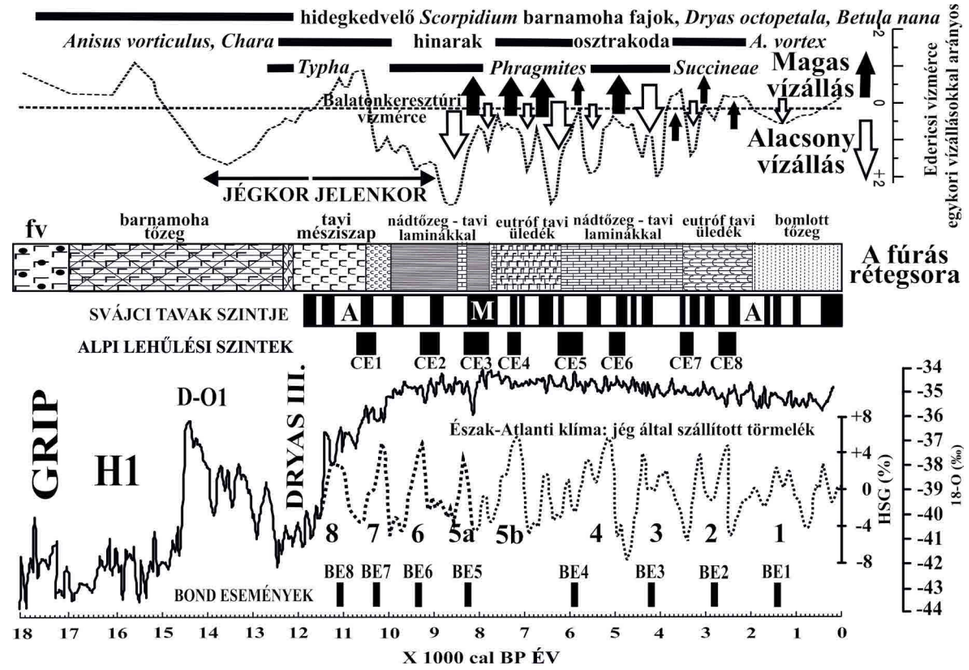
A szárazföldi virágporszemek összetétele alapján a tavat ekkor már tölgyes erdők vették körül. Ugyanez a mésziszapban gazdag tavi üledék halmozódott fel ekkor a déli part összes berekrendszerében és a Kis-Balaton területén is. Ugyanakkor a Kis-Balaton területén ebben a periódusban egy kékesszürke üledék rétegződött a fehér színű, csillárkamoszat maradványaiban gazdag tavi mésziszapréteg közé. A réteg lerakódása egyidős a franciaországi középhegységi vulkáni működéssel, ezért felmerült, hogy távoli vulkáni hamu (tufit vagy más néven tefra) beszállítódása nyomán fejlődött ki ez a rendkívül szokatlan színű üledék a tavi rétegsorban. Az eddigi geológiai vizsgálatokkal ezt még nem sikerült igazolni, ugyanakkor ebben a szintben a parti zónából bemosódott, vagy a vízszint erőteljes csökkenése nyomán jelentkező vízparti növények dominanciája mutatható ki.



A Fenékpusztai-öbölben mélyített magfúrásban, a kora-holocén mésziszap szintjében feltárt kékesszürke réteg

Ettől a szinttől kezdődően már a régészeti kultúrák is kimutathatók a Balaton körül, így a paleohidrológiai és paleolimnológiai eredmények, a *balatonedericsi vízmérce* eredményei az egyes régészeti kultúrák megtelepedési szintjével, a *balatonkeresztúri vízmérce* adataival is összevethetővé válnak. Az utolsó, csak halászatból–vadászatból–gyűjtögetésből élő közösségek jelenléte a mezolitikum végére az első termelő gazdálkodást folytató neolit közösségek megjelenésének időszakára, a Krisztus előtt 6500 és 5800 évre tehető. Ebben az időszakban az Edericsi-öbölben sötét színű, eutróf, szerves anyagban gazdag tavi réteg fejlődött ki. Ebből a középső-holocén szintből *Myriophyllum spicatum* (füzéres süllőhínár), *Nyphaea alba* magvak, *Chara*-oogóniumok, *Schoenoplectus lacustris*, *Potamogeton*-töredékek, és *Anisus vorticulus* (apró fillércsiga) héjak tömege került elő.

Ezek az élőlények napjainkban 2–3 m mély, eutróf tavakra jellemzőek, jelenlétük alapján hasonló tavi környezetet rekonstruálhatunk az Edericsi-öbölben. A markánsan jelentkező tavi fácies kifejlődése alapján egy erőteljes csapadékos szakasz kialakulását és az egész tómederre kiterjedő vízmennyiség-növekedést, magas vízállású paleohidrológiai állapotot rekonstruáltunk. Ezt az állapotot támasztják alá a csiga-, és kagylóhéjak izotópos és az üledékes rétegek biogeokémiai vizsgálatának eredményei is.

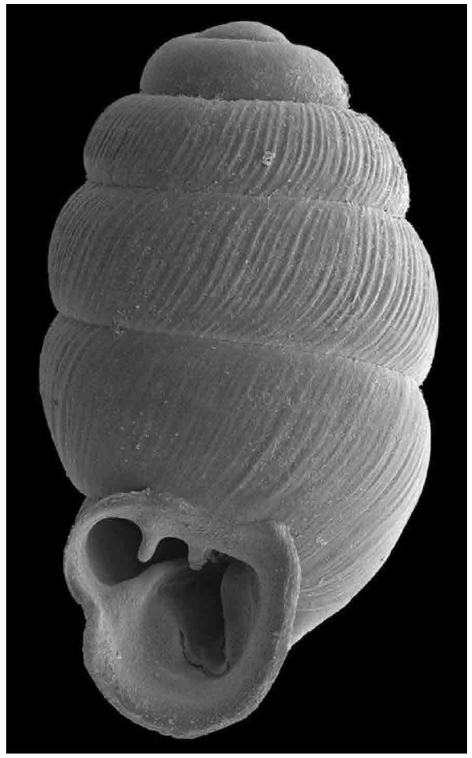


A Balaton rekonstruált vízszintváltozásai a balatonedericsi és a balatonkeresztúri vízmérce, valamint a grönlandi, észak-atlanti, nyugat-európai és alpi paleoklimatológiai adatokkal összehasonlítva

A magas vízállással jellemezhető, csapadékosabb éghajlati szakaszt egy időben jelentősebb időtartamú, aránylag alacsonyabb vízállású paleolimnológiai időszak követte a Krisztus előtti 5800 és 2200 évek között. A középső-holocén második felét teljes egészében átfogó időszakban a vizsgálati területen döntően *Phragmites*-maradványokból álló tőzegréteg jött létre. Ebben a nádtőzegrétegben található csillárkamoszat (*Chara*) maradványaiban gazdag tavi üledékek száz éves vagy évtizedeket átfogó intervallumú, magasabb vízállású állapotot és kiterjedő tavi környezetet jeleznek a középső-holocén második felében. A domináns *Phragmites*-maradványok mellett *Typha*, *Eupatorium cannabinum* (sédkender), *Utricularia vulgaris* (közönséges rence) maradványai tömegesen kerültek elő. Ugyancsak tömegesek a *Valvata cristata* (lapos kerekszájúcsiga) és a *Pisidium* molluszkahéjak, fitolitmaradványok ebben a szakaszban.

A növénymaradványok alapján a produktív gazdálkodást folytató közösségek változó tömegben, de szinte folyamatosan települtek meg a Balaton akkori parti régiójában. A kialakított őskori települések, a növénytermesztésre és az állattenyésztésre használt terek (szántók, legelők, kertek), utak nyomán az erózió ezekben a prehisztorikus időkben is hullámszerűen felerősödött, és a parti zóna, benne az Edericsi-öblözet feltöltődése időszakosan fel-felgyorsult. A lombos fákból származó virágporszemek dominanciája fokozatosan csökkent, a gabonafélékből és gyomokból származó pollenek egyre erőteljesebb fellépése nyomán a produktív gazdálkodású kultúrák megjelenése és kiterjedése az erdősült régió csökkenésével, a növényzeti borítás drasztikus visszaesésével, ezzel párhuzamosan a talajbemosódás ciklikus növekedésével járt.

Paleolimnológiai–paleohidrológiai eredményeink azt bizonyítják, hogy az újkőkor



Vertigo angustior, *mocsárlakó csigafaj a balatonedericsi fúrásból*

végétől a bronzkor kezdetéig néhány, rövidebb ideig tartó, magasabb vízállású szakasz is kialakulhatott. A középső-holocén mintegy 5000 éves időtartama alatt ugyanakkor kiegyenlített, mezőgazdasági termelés számára kifejezetten kedvező klimatikus feltételek alakultak ki a Balaton körül.

A középső-holocén során az ősi szabályozatlan Balaton vízszintje döntően 106 méter tengerszint feletti magasságnál húzódott. Az évtizedes, évszázados léptékben kifejlődött csapadékosabb klimatikus fázisokban azonban 1–2 méteres vízszintemelkedések is létrejöhettek a holocén középső szakaszában. Ezek a magasabb vízállással jellemezhető, csapadékos klímafázisok kedvezőtlenül érintették a közvetlenül az őskori Balaton partján megtelepedő közösségeket. Valószínűsíthető, hogy a Balaton déli részén a régészeti feltárásokon is megfigyelhető vízelvezető árkok, a balatonkeresztúri vízmércénél átfogóan leírt ciklikus magasabb térszínre költözések ezekkel a klimatikus átalakulásokkal, csapadékosabb és magasabb vízállású szakaszokkal mutatnak összefüggést. Ebben a periódusban tőzegesedett el szinte valamennyi berek és öböl a Balaton körül, a Tapolcai-medence déli részétől, a Kis-Balatonon, Nagy-Bereken át a déli part valamennyi berkéig.

Ez a középső-holocénre jellemző, relatíve kiegyenlített éghajlatú, tőzegréteg-kifejlődéssel jellemezhető paleohidrológiai állapot Krisztus előtt 2000 évvel ezelőtt megszakadt, és sötét színű, tavi üledékréteg jött létre az Edericsi-öbölben. Ebből a tavi üledékből a nyíltvízi környezetet kedvelő taxonok, elsősorban ostracodák, *Anisus vortex* (lemezcsiga), és *Anisus vorticulus* (apró fillércsiga) héjai, *Chara* és *Nitellopsis* töredékek kerültek elő tömegesen. Ezzel párhuzamosan a két méternél mélyebb vízben megélni képtelen *Phragmites* (nád) maradványai eltűntek az üledékből. Valamennyi vizsgált tényező a balatoni víztömeg erőteljes növekedését, és a vízszint legalább kétméteres emelkedését, és ezzel párhuzamosan a hőmérséklet, mindenekelőtt a tenyészidőszak hőmérsékletének csökkenését jelzik. A geokronológiai elemzések nyomán ez a csapadékosabb szakasz, és magas tavi vízszinttel jellemezhető paleohidrológiai állapot a bronzkor végén, a vaskor első felében, a Krisztus előtt 1500 és 500 év között alakult ki. Ekkor alakult ki a Balaton medencéjében a legjelentősebb vízborítás, a tó vízszintje elérhette a 109–110 méteres tengerszint feletti magasságot. Ekkor jött létre a Balaton legjelentősebb kiterjedése is. Ezek, a bronzkor végére, vaskor kezdetére vonatkozó paleohidrológiai adatok jó egyezést mutatnak az ordacsehi régészeti feltáráson, egy hasonló korú árokrendszerben megfigyelt, árkot kitöltő tavi üledék kifejlődésével. A meszes tavi üledék 109 méter tengerszintig jelentkezett az árokrendszerben.

A bronzkor végi és a vaskor kezdeti hűvösebb és csapadékosabb klímafázist egy relatíve enyhébb és szárazabb periódus követte a vaskor végén, a Krisztus előtt 500 és a Krisztus utáni 400 év között. Ebben az éghajlati szakaszban a vízparti növények – mindenekelőtt a nádasok – terjedtek el az öblökben és berkekben, így a nádtőzeg képződése vált dominánssá a Balatonedericsi-öblözetben. Ennek a nádtőzegszintnek a felszínközeli része a Balaton szabályozása nyomán talajosodott (kotusodott). Így a császárkornál fiatalabb szinteket – bár megvizsgáltuk paleohidrológiai–paleolimnológiai szempontból – már nem értelmeztük (ezek az utolsó 1000 évre vonatkozó adatok).

Ugyanekkor a Kis-Balaton, a Nagy-Berek, az Ordacsehi-, a Lellei-, az Öszödi- (Szóládi-), Zamárdi-berek területén erőteljes üledékképződés zajlott, amely nyomán a történelmi időkben kialakult emberi hatásokat és az ezekhez kapcsolódó balatoni öblökben lejátszódott üledéklerakódás-változásokat rekonstruálhattuk. A legjelentősebb és a megtelepedett emberi közösségekkel jól szinkronizálható változásokat a Fenékpusztai-öblözetben, még a kora népvándorlás korában is fontos regionális szerepet betöltő Valcum erődítmény közvetlen közelében kialakított fúrásban tártuk fel.

A fenékpusztai szelvényben a vaskor végén, a császárkorban a nyílt területet kedvelő növények, gyomok (fűfélék, ürömfélék) aránya megnőtt és jelentősebbé vált a kertkultúrában terjedő növények (dió, szőlő), valamint a szántóföldi növénytermesztést jelző gabonafélék (*Cerealia*), köztük a búzapollen aránya. Ezekkel a változásokkal párhuzamosan az égést/égetést jelző pernye mennyisége is maximumot mutat, ugyanakkor a nádhoz (*Phragmites*) köthető maradványok eltűntek a szelvényből. Ennek nyomán arra következtethetünk, hogy a nádat folyamatosan leégették a területen. Feltételezhető, hogy a nádas égetését azért hajtották végre a vízparti régióban, hogy a jelentős számú állatállománynak megfelelő itatósávot alakítsanak ki. Ennek nyomán egy rendkívül erőteljes emberi hatás kialakulásával számolhatunk



Kézi kivitelezésű magfúrás a Balatonedericsi-öblében 2018 decemberében

a vizsgált területen: folyamatosan megtelepedett, jelentős lélekszámú, jól szervezett agrárkultúrával jellemezhető közösség megtelepedésével és fennmaradásával.

A fenékpusztai fúrásból kimutatott, késő vaskor végén, császárkorban dominánssá vált búza–szőlő–dió termesztési triád egészen a Krisztus utáni VII. század végéig fennmaradt. Ebből arra következtettünk, hogy a vaskor végén, a császárkor kezdetén kialakult, gabonára, diótermesztésre, szőlőművelésre alapozott szubmediterrán jellegű gazdálkodási formát és gazdálkodási típust fenntartó, megfelelő termelési tapasztalatokkal rendelkező közösségek, emberi csoportok a vaskor végétől egészen a népvándorláskor első feléig, a VII. század második feléig fennmaradtak a vizsgált területen. Ez a késő vaskorban már kifejlődött, majd a császárkorban uralkodóvá vált gazdálkodási forma a mediterrán területeken kialakított ókori búzára, szőlőre és borra, valamint olívabogyóra, mint étkezési és sütőolajra alapozott mediterrán triád mérsékelt övi módosult változata, ahol esetünkben az olívabogyó helyett a dióbél adta az étkezési és sütőolajhoz az alapot.

A Krisztus utáni VII. század második felétől a dió- és a szőlőmaradványok eltűntek a fenékpusztai szelvényből, míg a gabonafélék pollenjei, bár a korábbiakhoz képest alárendeltebb arányban, de fennmaradtak. Ennek alapján egy erőteljes gazdálkodási változás mehetett végbe a fenékpusztai félszigeten. Feltételezhető, hogy a késő-vaskor végén kifejlődött, kert- és szántóföldi kultúrára alapozott agárgazdálkodást működtető, a császárkorban gazdálkodási csúcsot és igen erőteljes környezeti átalakítást létrehozó, mediterrán–szubmediterrán jellegű gazdálkodási tapasztalatokkal rendelkező közösségek ekkor szorultak ki a vizsgált területről.

A növénymaradványok alapján ez a gazdálkodási váltás a Krisztus utáni 604 és 673 év közötti időszakban játszódott le. A Krisztus utáni VIII. század és a X. század között a pernye mennyisége továbbra is jelentős volt a fenékpusztai szelvényben. Ennek alapján egyértelműen egy viszonylag jelentős lélekszámú közösség folyamatos jelenlétére, lakott térségre következtethetünk. A szántóföldi és kerti haszonnövények maradványai ugyanakkor eltűntek a szelvényből. Ebből arra következtethetünk, hogy a területen az állattenyésztés került előtérbe.

A IX. század végén és a X. század kezdetén jelentős változások mutatkoznak a pollenképben: ismét megjelentek a búzapollenek és ettől kezdődően folyamatosan növekedett a gabonapollenek aránya a középkor folyamán. Ezzel párhuzamosan a fűz- és égermaradványok váltak dominánssá a szelvényben, tehát a népvándorláskor végén éger- és fűzlápok borították el a Kis-Balaton fenékpusztai öblét. Hasonló változásokat lehetett kimutatni a déli part valamennyi öblözetében, a berkek területén is. Az Árpád-korban valamennyi balatoni öbölben, berekben a termelő gazdálkodás, gabonatermesztés, állattenyésztés, kertkultúra nyomait lehetett kimutatni. A jelenlegi paleolimnológiai–paleohidrológiai adataink az oszmán korig, megközelítőleg a XVI. századig terjednek időben.

Összegzés

Összefoglalva a paleohidrológiai–paleolimnológiai elemzéseinket egyértelműen megállapíthattuk, hogy a Balaton több fióksüllyedék kifejlődésével alakult ki. Ezek közül a legidősebb a Balatonedericsi-öblözet volt, ahol a jégkor végi lehűlési maximumig (LGM szintig) visszavezethető klimatikus és paleohidrológiai átalakulásokat rekonstruálhattunk. Ezeknek a változásoknak az elemzéseibe a jégkor végétől, a jelenkor kezdetétől fogva a Kis-Balatonnak és a déli parti berkeknek a fúrásszelvényeiben kimutatott eredményeket is össze tudtuk hasonlítani. A balatoni öblözetekben kialakított zavartalan magfúrásszelvények elemzése alapján igen pontosan sikerült a vízszintváltozásokat, a vízborítási szakaszokat, a Balaton környezetében uralkodó növényzetet és a növényzetre gyakorolt emberi hatásokat elkülöníteni, és az összehasonlító elemzések nyomán az emberi közösségek és a balatoni táj változó viszonyát megrajzolni.

A vizsgálataink rámutattak arra is, hogy a Balaton paleolimnológiai szempontból átmeneti helyzetben volt a dél-európai és az atlanti területek között. A Balaton legrégebbi részmedencéje a jégkor végén ugyanis még a Balkán-félszigeti tavakra jellemző paleolimnológiai változásokat mutatta, vagyis a lehűlések során jelentősebb, a jégkor végi felmelegedések során sekélyebb vízborítás alakult ki. A jelenkor kezdetén az edericsi és a többi balatoni süllyedékben kialakult tavacskák egységes vízborítás alá kerültek, és kialakult az egész Balatonra kiterjedő természetes vízfelület. Így a jelenkor kezdetétől lehetséges a Balaton egészében vett víztömegének és paleolimnológiai átalakulásainak lokális, regionális és globális összehasonlító elemzése.

A paleohidrológiai változások alapján látható, hogy a Balaton vízszintjének alakulása a kora-holocéntől kezdődően, ha késve is, de követi az atlanti–alpi térségben kimutatott paleolimnológiai és paleoklimatikus változásokat. Ugyanakkor a Balaton paleohidrológiai szisztémájának változásai nem automatikusan követik ezeket a döntően az atlanti csapadékbevétel irányította átalakulásokat. Ugyanis a Balaton vízgyűjtő területén az atlanti éghajlati hatás mellett erőteljes szubmediterrán és kontinentális hatások is jelentkeztek. Így ezen éghajlati hatások nyomán is rendkívül kiszámíthatatlan mintázatú csapadékeloszlás és vízszintváltozás alakult ki a múltban. Ezt bizonyították a molluszkahéjakon végzett izotópelemzések is, amelyek nyomán kilenc csapadékosabb és hét szárazabb időszakot lehetett elkülöníteni az utolsó 20 ezer év folyamán. Így a Balaton jelenlegi és jövőbeli fejlődésében is a szeszélyes klimatikus és kiszámíthatatlan csapadékbevételi változásokra kell számítanunk. Mind a víz tárolására, mind a vízszint aktív szabályozására fel kell készülnünk, ha azt akarjuk, hogy ezt a 20 ezer éve fejlődésnek indult csodálatos tavat még az unokáink is láthassák.

Ajánlott irodalom

Cserny T. 1987: A Balaton aktuálgeológiai kutatásának eredményei. – A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1985. évről, pp. 343–365.

Cserny, T. 2002: A balatoni negyedidőszaki üledékek kutatási eredményei. – Földtani Közlöny 132, pp. 193–213.

Cserny, T., Nagy-Bodor, E. 2000: Limnogeology of Lake Balaton (Hungary). In: Gierlowski-Kordesch, E. H., Kelts, K. R. (eds): Lake Basins Through Space and Time. – AAPG Studies in Geology 46, pp. 605–618.

Nagyné, Bodor E., Szurominé Korecz A. 2002: A Balaton negyedkori üledékeinek sporomorpha és ostacoda eredményei. – Földtani Közlöny 132, 216–227.

Lóczy L. 1913: A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. Magyar Királyi Földrajzi Társaság, Budapest, 617 p.

Sümegi P., Schöll Barna G., Demény A. 2013: A Balaton vízszintváltozásainak 20 ezer éve. – Természet Világa 145, pp. 74–78.

Timár G., Csillag G., Székely B., Molnár G., Galambos Cs., Czanik, Cs. 2010: A Balaton legnagyobb kiterjedésének rekonstrukciója a függőleges kéregmozgások figyelembevételével. – Földtani Közlöny 140, pp. 455–462.

Tullner, T., Cserny, T. 2003: New aspects of lake-level changes: Lake Balaton, Hungary. – Acta Geologica Hungarica 46, pp. 215–238.



Nannites lóczyi

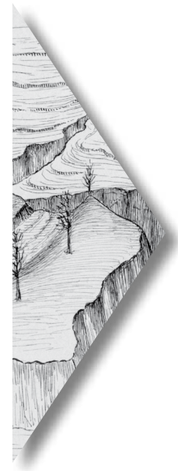
MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

Pósfai Mihály, G.-Tóth László

11

A Balaton iszapjának ásványai

Legtöbbünknek a Balatonra gondolva, partján üldögélve, habjaiban ugrándozva a víz, a nádasok, a tavat övező hegyek, azok erdői jutnak eszünkbe, mint természeti különlegességek. A fenekét övező iszapra leginkább csak akkor gondolunk, amikor fürdés közben a lábunk belesüpped és nem ereszt. Pedig ez a ragadós valami is számtalan izgalmas csodát rejt magában. Ennek a fejezetnek a témája a Balaton iszapját alkotó ásványok eredetének és tulajdonságainak bemutatása, valamint az iszap és a tó élővilága közötti, olykor meglepő kapcsolatok feltárása. Áttekintjük, milyen anyagok és honnan kerülnek a tóba, ezekből miként képződik a finomszemcsés üledék. Röviden tárgyaljuk, hogyan változik az ásványi alkotók jellege és szemcsemérete a tó egyes részeiben, illetve nedves és száraz időszakokban. Végül – bár ez a fejezet elsősorban az üledéket alkotó szervetlen összetevőkkel, az ásványokkal foglalkozik – kitérünk az iszapszemcsék és a tóban élő mikro- és makroszkópikus élőlények közötti kölcsönhatásokra is.



A Balatonba hulló por és a balatonfenéki lerakodások

A Balatonba hulló finom por mennyiségét két éven keresztül pontosan mérhettem. Erre a mérésre egészen más feladatnak nyomozása vezetett reá. Hogy a Balaton felszínén elpárolgó víz mennyiségét megbízhatóbban állapítsuk meg, mint a meteorologiai megfigyelő állomásokon alkalmazott Hottinger-féle emeltyűs vagy a Pick-féle üvegcsöves párolgásmérők a parton a tó vízétől távolabb fekvő állomások adhatják, a m. kir. földmívelésügyi minisztérium Vízépítési Igazgatóságának Vízrajzi osztályával egyetértve, egy párolgásmérőt helyeztem el magam a Balaton vízén. Csopak és Balatonkövesd alatt a Kereked-öbölben, amelyet mindenfelől 2—300 m. széles nádas kerít be, egy 10 m. hosszú és 5 m. széles, fenyőszálakból összetákolt és magasan bepallózott tutajt macskáztunk le. …

1897-ben április hó 28-tól november hó 21-ig; 1898-ban április hó 7-től november hó 10-ig volt a párolgásmérő tutaj a vízen. Télire a befagyás előtt a partra kellett vontatni. …

Alig volt a párolgásmérő néhány hétig megfigyelés alatt, nagy meglepetésemre azt tapasztalám, hogy a tiszta vízben a kád fenekét és a fenéken lévő sárgarézszereit finom iszap lepi el; ez mindennap jobban és jobban szaporodott, utóbb egészen elfedte a síma horganybádogot. Őszszel a partra vontatott tutajról leemeltettem a kádat és a benne levő vizet felkavarva, azzal gondosan mindent leöblögetve, megszűrtem a vizet.

Az első nyárszakán, 1897-ben, a 209 nap alatt hullott és megszárított por súlya 191,68 gr.-nyi volt; a második, 1898. év nyárszaki 217 napján viszonylagosan valamivel kevesebb 197,18 gr. volt a kádba hullott por.

Az utóbbi évben hullott por térfogati súlyát Emszt Kálmán m. kir. osztálygeologus és vegyész 1000 cm3-re 960 gmnak határozta meg.

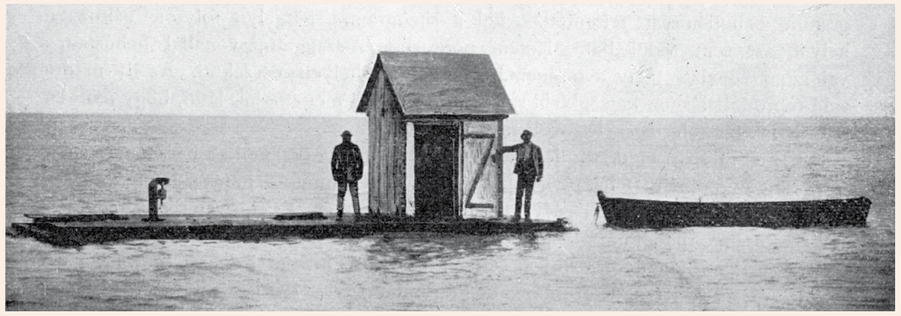
Ezzel az értékkel számolva, 1897-ben 209 nap alatt 199,67 cm3 pormennyiség hullott a kádba; egyenletesen elosztva ez a 80 cm. átmérőjű kerek kád fenekén 0,3981, lekerekítve 0,4 mm. magas réteget ad. Az 1898-ban hullott 217 napi por mennyiség 205,4 cm3 volt és 0,40854, lekerekítve 0,41 mm. vastagságban lepte el a kád fenekét.

Bizonyára nem az egész évben és nem minden esztendőben hull egyenlő mennyiségben a por, mert hiszen a levegő portartalma és az abból leülepedő por a meteorologiai tényezők függvénye. Hogy ha az egész évre egyenletesen számítjuk a két év megfigyelését, akkor 1897-ben 365,13 cm3 por 0,726 mm. magasságban hullott volna a kádba. Ugyanekként számítva 1898-ban 358,7 cm3 por 0,7135 mm. magasságban hullott volna. A két évi átlagból 0,72 mm. magasságúnak mondhatjuk a Kereked-öbölbe évenként hulló por mennyiséget.

A Balaton azonban a legtöbb évben 2—3 hónapig be van fagyva és a jégre hulló porból ilyenkor nem sok jut a vízbe, minthogy a szelek a hóval együtt elsodorják. Azután a téli és tavaszi hónapok nedves idejében a levegőnek portartalma is kevesebb. A tó fenekére leülepedő porhullásokat ezért az esztendő 5/6—3/4-éről vehetjük közelítő számításba. Csak 290 napról összegezve a hullóport, a kétévi átlagból lekerekített értékkel 0,57 mm. magasságú pormennyiség hull a levegőből évente a Balaton fenekére.

Természetes, hogy a hulló por a tófenekén vízzel elkeveredve agyagos iszapot ad, amelynek térfogati súlya jóval nagyobb a szitált, száraz levegővel teli pornál.

Emszt Kálmán barátom a kiszárított balatonfenéki iszap térfogati súlyát 1643gr.-al határozta meg egy dm3-re. A lágy latyakos iszap térfogati súlyát 1400gr.-ra becsülve, a 2,00 m. vastagságú 2 cm.-nyi lágy iszap lerakodásához szükséges időtartamot is ki lehet számítani.



Az áramlás-iró és párolgás-mérő tutaja. Lóczy fényképe után

Az 0,57 mm. vastag, 960 gr. térfogati súlyú por a víz fenekén évenként 0,353 mm. vastag, 1400 gr. térfogati súlyú iszaplerakodásnak felel meg. Amenynyiben a Balaton fenéktalajában 6 m. mélységben a vízszín alatt levő tőzegrétegtől fölfelé számítottam a fenéklerakodások holoczénkori rétegét, a Balatonnak 2—3,50 m. közötti vize mélységeitől a 6 m. vízszín alatti mélységig terjedő holoczénkorú réteg 4—2,5 m. vastagságú, ennek 3,25 m. középrétékéből a 2 m. vastagságú latyakot leszámítva, a holoczénkorú fenéklerakodásra még 1,25 kemény iszap marad. Az utóbbinak térfogati súlyát Emszt Kálmán 1643 gr.-ra határozta meg; az 0,57 mm. vastag, 960 térfogati súlyú évi hulló por 0,333 mm. vastagságú, 1643 gr. térfogati súlyú kemény iszapnak felel meg. Ennek a 1,25 m. vastagságú iszapnak lerakodásához 3755 év volna a fentebbi számítás alapján szükséges. 2 méter vastagságú lágy iszap keletkezéséhez 5667 évet számíthatunk az imént említett évi 0,353 mm.-nyi vastagság alapján. A Balaton fenekén levő holoczéniszap képződéséhez tehát összesen 8421 év volt szükséges. …

Távol legyen tőlem, hogy fentebbi számítgatásaim eredményeinek túlságos jelentőséget és abszolut bizonyítóerőt tulajdonítsak. Inkább csak abban szeretném eziránybani vizsgálataimnak értékét látni, hogy a szubaerikus porhullás mérésének lehetőségét kimutattam velük. Nagy sajnálattal kellett belenyugodnom abba, hogy lemondjak a Balatonba hulló por mérésének folytatásáról. Sem az anyagi eszközök nem engedték, hogy állandósítsam az észlelést, sem pedig hozzá alkalmas megbízható emberem nem volt többé.

Részlet Lóczy Lajos A Balaton környékének geologiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése *című könyvéből*

A balatoni tájról alighanem minden magyar emberben él egy könnyen felidézhető kép: a jellegzetesen kékeszöld tó, hullámok, rajtuk vitorlások, a háttérben nádas és szelíd dombok. A képhez hangok, ízek, szagok, élmények emlékei társulnak: ki ne tudná felidézni a csónakhoz verődő hullámok kotyogását, a víz selymes érintését a bőrön, a parti kövek melegét, a levendula illatát. Érdemes lenne felmérni, hogy egy asszociációs játékban a „Balaton” szóra milyen válaszok kerülnének elő leggyakrabban. Biztosan sokan említenék a „víz”, a „hullám”, a „hal”, a „szél” szavakat, míg az általában kellemetlen élményeket idéző „iszap” keveseknek jutna eszébe. Pedig a Balaton szürke iszapja fontos eleme a teljes Balaton-képnek, hiszen a Balaton különleges, számunkra kedves vagy csak jellemző tulajdonságainak kialakításában az iszapnak fontos szerep jut: befolyásolja a víz színét, zavarosságát, tapintását, sőt a tó egész élővilágát.



A Balaton világosszürke színű, finomszemcsés iszapja kiszárított állapotban

Kutatástörténet

Ahogy bármely tudománytörténeti mű „a régi görögökkel” kezdődik, úgy a Balaton kutatástörténetében a Lóczy Lajos szerkesztette 32 kötetes monográfia a kiinduló pont, legyen szó a Balaton-felvidék geológiájáról, a tó hidrográfiájáról, élővilágáról vagy iszapjáról. Az iszappal az I. kötet két fejezete foglalkozik: Treitz Péter megállapította, hogy az üledék nagyobb részét finomszencsés (azaz kb. 0,06 mm-nél kisebb szemcseméretű), jórészt meszes anyag alkotja, míg Emszt Kálmán a balatoni üledék első kémiai elemzéseit publikálta. A XX. század folyamán több magyar szerző is foglalkozott az üledékképződéssel, de egészen az 1980-as évekig a legátfogóbb és a maga idejében a legmodernebb módszerekkel végzett kutatást német kutatók végezték: German Müller és munkatársai több fúrással felmérték az iszap vastagságát, jellemezték ásványtani és kémiai összetételét, valamint oxigénizotópos méréseket végeztek. Megállapították, hogy az iszap a tó nagy részén mintegy 2/3 részben karbonátásványokból, elsősorban Mg-tartalmú kalcitból áll, és hogy a kalcit Mg-tartalma nyugatról kelet felé nő. Szintén felismerték, hogy a déli part mentén az iszap szemcsemérete durvább (homok frakció – ahol a „homok” egy adott szemcseméret-tartományt jelöl), mint a tó közepén és az északi part mentén (ahol az „iszap” szemcseméret-frakcióba tartozik).

Az 1990-es években Cserny Tibor és munkatársai végeztek kitartó kutatásokat a Balaton üledékével, a tó fejlődéstörténetével kapcsolatban. Meghatározták a tó egyes medencéi kialakulásának idejét, az iszapvastagságot, és megerősítették a korábbi eredményeket az iszap ásványtani összetételével kapcsolatban. Az utóbbi két évtizedben is születtek új ásványtani és geofizikai tudományos eredmények a tavi üledékről (lásd a 4. és a 9. fejezetet), hiszen a hazai földtudományos közösség szinte kötelességének tartja, hogy a legújabb eszközöket és módszereket bevesse a Balaton jobb megismerése érdekében.









A Balaton hidrográfiai jellemzői

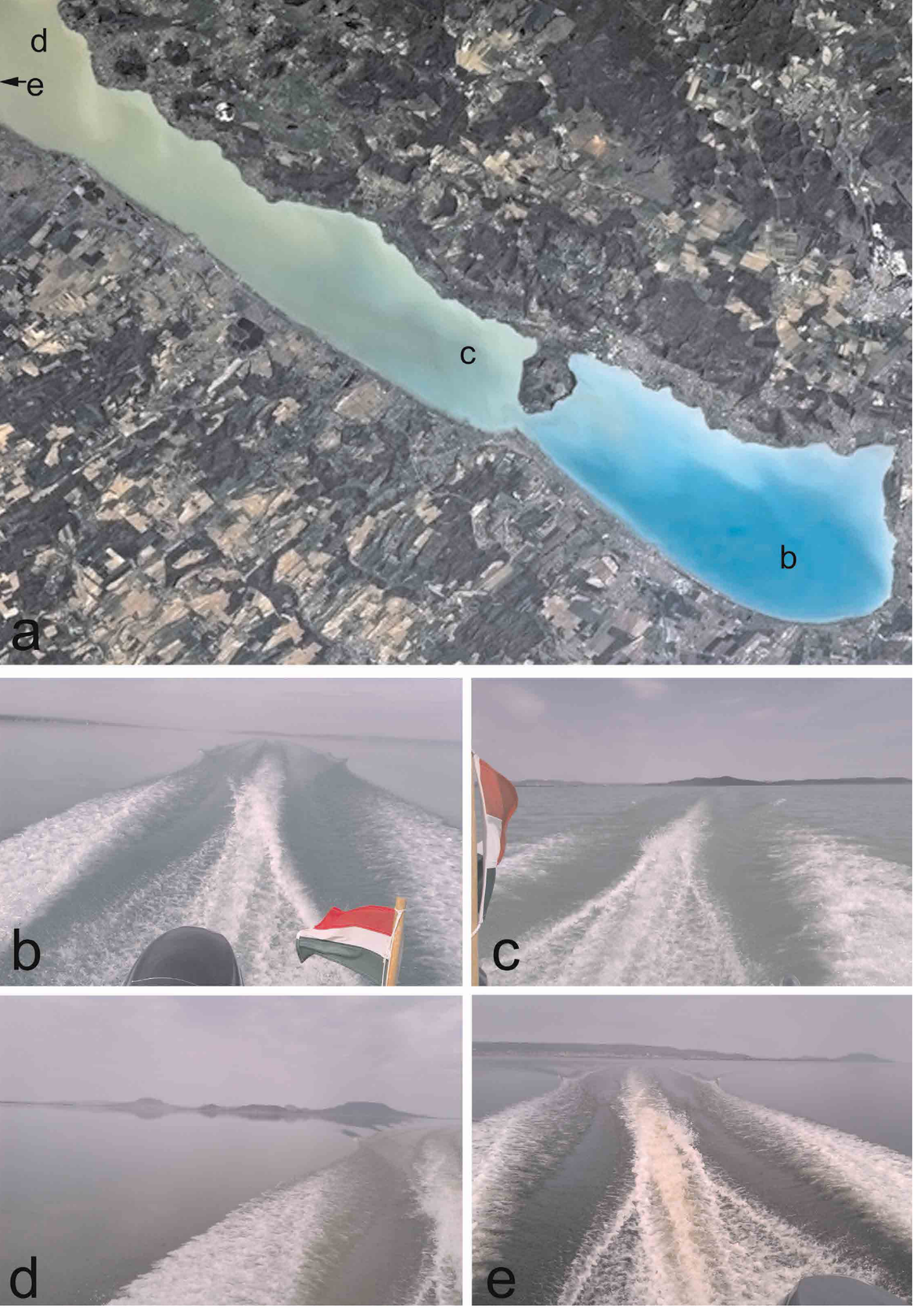
A Balaton különleges tulajdonsága a sekélysége: bár a tó felülete csaknem 600 km², hossza több, mint 70 km, átlagmélysége mindössze 3,5 m körüli. A kis vízmélység a vízszint ingadozása és az iszap felkeveredése révén közvetve az üledék képződésére és jellegére is hat.

A Balaton aktuális vízszintjét olykor még a napi hírek is megemlítik, hiszen ha túl alacsony, az kedvezőtlen a hajózók és fürdőzők számára, ha túl magas, akkor a déli parti üdülőtulajdonosok aggódhatnak a kiöntések miatt. De a vízszint nemcsak az embereknek fontos, hanem a tó élővilága számára is, sőt, a képződő iszap jellegét is befolyásolja. A tó vízmérlegét alapvetően az egyenlet egyik oldalán a befolyókkal és a csapadékkal érkező víz, másik oldalán a párolgással és mesterséges vízleeresztéssel (a Sión) távozó víz egyensúlya határozza meg. Mivel sekély tóról van szó, az időjárás szeszélyei révén az átlagmélységhez képest jelentős lehet a vízszint ingadozása, akár évszakos, éves, vagy jóval hosszabb időtartamokat vizsgálunk. A római korban a maihoz hasonló volt a vízszint, míg a török hódoltság idején és a Sió-zsilip kiépítése (1863) előtti évszázadokban több méterrel magasabb a mostaninál. A Balaton szabályozott szintje a XX–XXI. században a 25 és 135 cm között mozgott (a névleges szintet a siófoki vízmérce nulla pontjához viszonyítják, a 110 cm-es „megengedhető maximum” körülbelül 3,55 m-es átlagmélységnek felel meg).

De hogyan hat az üledékre a vízszint? A kis vízmélység egyik következménye az iszap gyakori felkeveredése. Még a viszonylag gyenge szél által keltett turbulens áramlások is lehatolhatnak az iszap felszínéig, és felkeverik a legfelső, néhány cm-es laza réteget. Emiatt a víz általában zavarosnak tűnik, mindig lebegnek benne kisebb-nagyobb üledékszemcsék. Mivel ezek leginkább kalcitból állnak és fehérek, színük összeadódva a nappali égbolt kékjével és a vízbe lehatoló fénysugarak spektrális elnyelődése optikai szabályaival, adja a Balaton jellegzetes „tejfölösen” opálos, kékeszöld színét messziről nézve, és zavarosságát közelről nézve. Hosszabb szélcsendes időszakokban azután a nagyobb szemcsék leülepednek és a víz kitisztul.

Hosszabb időtávon a szél hatására a Balaton iszapjának felső rétegei állandó mozgásban vannak. Az uralkodóan északi szelek által keltett áramlási viszonyok miatt a déli part mentén halmozódnak fel a durvább szemcseméretű homokszemcsék, míg a gyengébb vízmozgással jellemezhető tóközépi és északi területeken a finomabb szemcseméretű iszap halmozódik fel. Az iszap mozgását még ma sem tudjuk pontosan nyomon követni, de ígéretes áramlástani mérések és mo-

A Balaton különböző arcai egy tíznapos időszakon belül, 2020. február 1. és 10. között: a kristálytiszta, nyugodt víz egy szélvihar hatására felkavarodva iszapos, barna színt öltött, majd néhány nap alatt, az iszapszemcsék leülepedésével ismét visszanyerte a tóra jellemző, áttetsző, kékeszöld jellegét.



dellek segítenek feltérképezni a vízmozgásokat, és ezek következményét, az iszap áthalmozódását.

A tó sekélységének másik következménye, hogy az időjárási szélsőségek a víz kémiai összetételét is jelentősen befolyásolhatják. Ha például egy aszályos nyáron az intenzív párolgás miatt a Balaton vízszintje fél métert csökken (3,5 m-es átlagmélységről 3,0 m-re), az azt jelenti, hogy a víz térfogata 1/7 részével csökken, és ezért a benne oldott ionok, köztük a kalcium-, a magnézium és a hidrogénkarbonát-ionok koncentrációja megnő, azaz a víz töményedik. Fordított esetben, magas vízszint esetén az oldott anyagok koncentrációja csökken, a víz hígul. A vízből kiváló karbonátásványok összetétele tükrözi a töményebb és hígabb időszakok váltakozását. De még a kagylóhéjak növekedési sávjainak összetételéből is lehet következtetni a vízben oldott anyagok koncentrációjára, és így közvetve a vízszintre.

Vízkémia

A Balaton vizének kémiai jellegzetességeit elsősorban a Zala és a befolyók által szállított víz összetétele határozza meg. A Zala és az északi patakok vízgyűjtőjén sok a karbonátos kőzet (mészkő és dolomit), míg a somogyi patakok homokos–agyagos, löszös területeket csapolnak meg. A lehordási terület geológiájának, azaz a karbonátos kőzetek dominanciájának következményeként a Balaton befolyói viszonylag nagy koncentrációban tartalmaznak hidrogénkarbonát- (HCO_3^-), kalcium- (Ca^{2+}) és magnéziumiont (Mg^{2+}) (körülbelül fele olyan töménységben, mint pl. a Theodora ásványvíz). A Balaton-felvidék legelterjedtebb kőzete a dolomit, amely főleg a kőzettel azonos nevet viselő dolomitásványból áll. A dolomitásvány egyenlő mennyiségben tartalmaz Ca- és Mg-ionokat,

A víztiszta Balaton

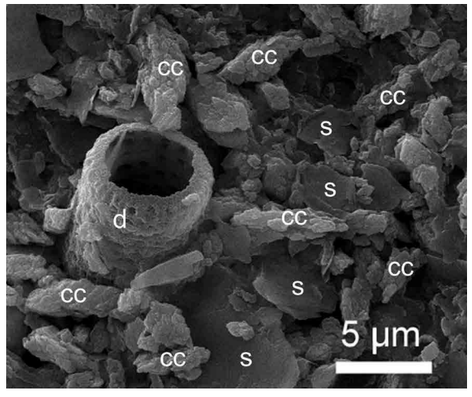
A 2018-as év nyarán sok fürdőző, horgász és vitorlázó észlelhette, hogy szokatlanul átlátszó volt a Balaton, időnként akár a fenékig is le lehetett látni. Ezt annak köszönhettük, hogy az egész fürdőszezonban magas volt a vízszint, színültig megtelt a tó, és még ez a néhány tíz cm-es vízszintemelkedés is elég volt ahhoz, hogy kevésbé keveredjék fel az iszap.



képlete $CaMg(CO_3)_2$, ezért mállása révén a kalcium mellett viszonylag sok magnéziumion is a patakokba, majd a tóba kerül. A tóvíz a benne lévő oldott ionok koncentrációja miatt túltelített a kalcitásványra nézve, ami azt jelenti, hogy termodinamikailag szükségszerű a kalcit ($CaCO_3$) kicsapódása a vízből. A kalcit kicsapódása miatt a vízben maradó, oldott Mg-ionok aránya a Ca-hoz képest megnő, azt eredményezve, hogy a Balaton vizében jellemzően 1 és 5 között változik a Mg/Ca mólarány. A Balaton tehát egy sekély, meszes vizű, oldott Mg-ban gazdag tó. Az oldott ionok miatt gyengén lúgos a víz kémhatása (a pH-ja 8,4–8,6 körüli), amit bárki megtapasztalhatott, aki a Balaton „bársonyos tapintású" vizében valaha is fürdött.

A vízben oldott anyagok koncentrációja a Balaton nagyjából nyugat–keleti irányú hossztengelye mentén érdekes változást mutat. A Zalával érkezik a befolyó vízmennyiség fele–kétharmada, ezért leginkább ez a folyó szabályozza a vízben oldott anyagok „kezdeti" koncentrációját. Mivel a Zala torkolata a tó nyugati végén van, a tavat egyedüliként megcsapoló vízfolyás, a Sió pedig a Balaton keleti végéhez közel ered, a Balaton egy 70 km hosszú, 5–10 km széles

(a) Chris Hadfield kanadai űrhajós 2013. április 25-én, a Nemzetközi Űrállomás fedélzetéről készített felvétele (forrás: Twitter). A Zala tavaszi áradásakor készült képen a tó nyugati vége felől terjedő sötétebb szín a behordott huminanyagoknak köszönhető. (b-e) Nyolc nappal az űrfelvétel időpontja előtt készített felvételeink, melyek helyszínét az (a) képen „b", „c", „d" és „e" jelöli (a „b" felvétel nyugati, a többi keleti tájolású; az „e" kép a Keszthelyi-öbölben készült, ami lemaradt az űrhajós felvételéről).



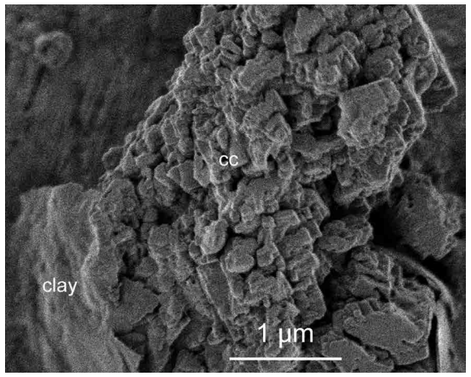
Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel a Balaton iszapjáról, az iszap jellegzetes összetevőivel: törmelékes („kívülről” a tóba került) szilikátok (s), a tóvízből kivált, hosszúkás kalcitszemcsék (cc), és kovaalgák héjtöredéke (d).

és 3,5 m mély kémiai reaktornak tekinthető. Amíg a víz a Zala-torkolattól a Sió-zsilipig eljut, többféle változás történik benne: egyrészt párolog, ezért a legtöbb oldott ion koncentrációja megnő (azaz töményedik a víz), másrészt kiválik belőle a szilárd kalcit ($CaCO_3$), amivel együtt jár a vízben oldott Ca^{2+}-ionok koncentrációjának csökkenése, növelve a vízben maradó, oldott Mg/Ca arányt. Ezek a folyamatok különösen akkor tükröződnek szépen a vízkémia nyugat–keleti irányú megváltozásában, amikor a vízszint alacsony, így az „oldat”, azaz a tóvíz töményedése kifejezettebb. Ennek megfelelően a Tihanyi-félsziget markánsan két részre osztja a Balatont, nemcsak fizikai, hanem kémiai értelemben is.

Az iszap

A Balaton iszapjának vastagságát több szerző is feltérképezte, egyesek fúrásokkal, mások geofizikai módszerekkel (például Müller és Wagner valamint Máté Ferenc tanulmányaiban, majd igen részletesen a Cserny Tibor vezette kutatás során – lásd a 4. és a 9. fejezetet). A tó mintegy 12–15 ezer éves története során az egyes részmedencékben változó, 1 és 8 m közötti, átlagosan mintegy 5 m vastag iszap halmozódott fel. Az erős vízmozgással jellemezhető helyeken alig van iszap, mint például a Tihanyi-szorosban, másutt, a szelektől, illetve áramlásoktól jobban védett területeken azonban vastag rétegek halmozódtak fel.

De milyen ásványok alkotják ezt az iszapot, és ezek honnan kerültek a tóba? A válasz nem triviális – sem az, hogy a nagy mennyiségben jelenlévő karbonátok egyes frakciói miként képződtek, sem az, hogy az iszapot létrehozó, nagyon különböző folyamatok milyen arányban járulnak hozzá a teljes menynyiséghez. Veszprémben, a Pannon Egyetemen jelenleg is folyik egy kutatás, amelynek keretében elsősorban mikroszkópos módszerekkel vizsgáljuk az iszap összetevőit, és az iszapszemcsék tulajdonságai alapján következtetünk az eredetükre. Az elektronmikroszkópos és röntgendiffrakciós vizsgálatok választ adnak arra, hogy milyen méretű, alakú, összetételű és kristályszerkezetű szemcsék alkotják az iszapot, továbbá hasznos adatokat nyújtanak az élettelen ásványok és az élő szervezetek kölcsönhatásairól is. Nem is gondolná az ember, hogy az a híg, lábszárig felburjánzó iszap (tájszóval: lutya), ami olykor elrontja a strandolók szórakozását, milyen szép és változatos, ha kellően felnagyítva, például elektronmikroszkóppal nézzük!



Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel egy vízből kivált kalcitszemcséről (cc). Bár aggregátumnak tűnik, az egyes kristálykák mind azonos kristálytani orientációjúak, azaz a szemcse egykristály. A szemcse bal oldalán egy agyagásvány „lepel” látható

A Balaton üledékét alkotó szilárd anyagok kétféleképpen kerülhetnek az iszapba: vagy eleve szilárd szemcsékként érkeznek a tóba, majd ott leülepednek (ezeket a geológusok allochton szemcséknek nevezik), vagy a tó vizéből, esetleg az üledék pórusvizéből válnak ki (ezek az autochton alkotók).

Törmelékes eredetű iszapalkotók

Az első, allochton csoportba tartoznak (1) a befolyók által szállított, többnyire mikroszkópikus kőzet- és ásványdarabok, (2) a csapadékkal együtt érkező, (3) a levegőből száraz ülepedéssel a tóba kerülő szilárd részecskék, valamint (4) a közvetlen abrázióból (a hullámverés apráló hatásából) származó szemcsék. Ma már a tó körüli magaspartok szinte mind mesterségesen védettek a hullámveréstől, de ezek a védőművek csak XX. századi építmények; korábban a tó hullámai közvetlenül pusztíthatták a kenesei és tihanyi homokpartokat.

Az (1) esetben a Zala egyes mellékfolyásai és az északi parti patakok mészkő- és dolomitfelszínekről szállítanak ásványi törmeléket a tóba – ennek megfelelően a velük a Balatonba érkező lebegő anyag jórészt kalcit- és dolomitszemcséket tartalmaz. De ezenkívül a szilikátásványok mállástermékeit, főleg agyagásványokat is hoznak. A déli parti befolyók a homokos–löszös somogyi dombokról érkeznek, magukkal hozva a jellegzetes kőzetalkotó szilikátásványokat – kvarcot, földpátokat, csillámokat, agyagásványokat –, de szintén hoznak kalcitot és dolomitot is.

(2) A csapadékkal epizodikusan nagy mennyiségű ásvány is érkezhet: a felhőcseppek aeroszol részecskéken képződnek, és amikor a szaharai porviharok elérik Európát, a sivatagból származó ásványszemcséken képződött cseppekből álló felhőkből „sáros eső” esik, sokszor egyenesen a Balatonba. Az esőcseppek „magvát” alkotó ásványok ismét elsősorban kőzetalkotó szilikátok, uralkodóan agyagásványok.

(3) A „száraz ülepedés”-nek nevezett folyamat során a légköri por kerül vissza a felszínre. Ennek megfelelően ezzel a folyamattal olyan anyagok jutnak a tóba, amelyek a környezetében a levegőbe kerülhettek, például mezőgazdasági tevékenység, építkezések vagy a közlekedés által. Ezek a források az eddigiekhez hasonlóan szilikátokat (például a talajból) és karbonátokat (például dolomitmurvás utak kiporzása által) juttatnak a vízbe.

(4) Az egykori közvetlen partpusztulás szintén a környező kőzetek aprózódásának termékeit juttatta a tóba. Így tehát, bár az allochton szemcsék ásványtani jellegét a forrásterület geológiája határozza meg, nincs jelentős különbség a felsorolt, négyféle forrásból származó anyag között, legfeljebb az egyes ásványcsoportok arányai változhatnak.

A tóba az erózió révén kívülről bekerülő, törmelékes ásványfajok jellemző szemcseméretteel rendelkeznek: míg a kvarc, a földpátok és a karbonátok általában nagyok (ezen jellemzően kb. 10 mikrométernél nagyobb szemcseméretet értünk), addig az agyagásványok legfeljebb néhány mikrométeresek, sőt egyes fajaik (például a szmektit csoportba tartozó agyagok) 1 mikrométernél is kisebb, sok esetben csak néhány nm vastag „foszlányokat” alkotnak. Ezért az üledékben a különböző ásványok szemcseméretük szerint elkülönülnek: az erős hullámverésnek kitett déli part mentén vagy a tihanyi homokos partok alatti üledékben sok a nagy szemcseméretű kvarc, földpát, csillám és allochton karbonát, míg a kis szemcseméretű agyagásványok mindenütt megtalálhatók az üledékben, és ezek keverednek fel legkönnyebben a szél keltette turbulencia hatására. A szmektit nanorészecskék

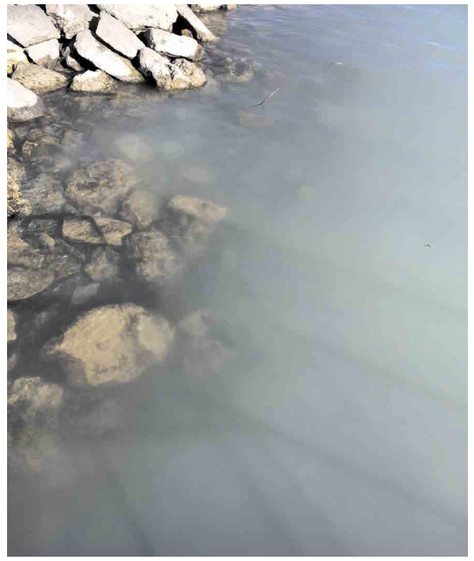
szinte mindig ott lebegnek a vízben, és mivel kiváló adszorbensek (megkötik a nedvességet), valószínűleg ezek az agyagásványok okozzák a Balaton vizének egyik sajátosságát: hogy kiszárítja az úszók bőrét és összeragasztja hajukat – ezeket a hatásokat mindenki észlelhette, aki fürdött már a Balatonban (és van haja).

Az iszap karbonátfrakciója, kalcitkiválás

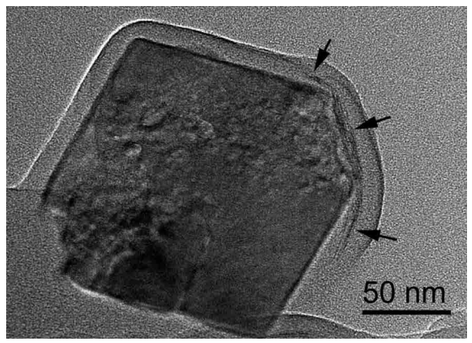
Az iszap nagy részét azonban nem a „behordott", hanem olyan szervetlen anyagok alkotják, amelyek a tóban képződtek. Ezek alapvetően kétfélék: (1) kémiai kicsapódással a vízből kivált karbonátásványok, vagy (2) szilárd vázat építő élőlények héjtöredékei. Az iszap csaknem kétharmadát a tóban képződő, autochton karbonátásványok alkotják. Ezekkel sokat foglalkozott már az utóbbi száz év szakirodalma, de még mindig sok újdonságot lehet felfedezni képződésükkel kapcsolatban.

Mint már említettük, a Balatonba érkező patakok a környező karbonátos kőzetek mállástermékeként nagy koncentrációban tartalmaznak kalcium-, magnézium- és hidrogén-karbonát-ionokat, ezért a tó vize – akár alacsony, akár magas a vízszint – túltelített a kalcitra nézve. Rögtön a torkolatoknál kalcitkéreg (gyakorlatilag vízkő) vonja be a köveket és vízbe nyúló fagyökereket. Beljebb pedig, a nyílt víz minden milliliterében milliárdnyi 0,2–10 mikrométeres kalcitkristály csapódik ki folyamatosan. A hidrológiai rendszer gyakorlatilag átkristályosítja a Balaton-felvidék karbonátos kőzeteit a mikrométeres kalcitszemcsékké a Balaton vízében. A folyamat olyan intenzív, hogy a kalcit kicsapódása révén a Balaton üledéke százévente 1 cm-rel vastagodik. Tehát, a tó 3,5 méteres átlagos mélységével számolva és minden más körülményt állandónak véve, a Balaton 35 ezer év alatt töltődne fel.

A kalcit kicsapódása a Balaton vizéből azonban sem időben, sem térben nem egyenletes, köszönhetően néhány külső tényezőnek. Először is, bármilyen fázisváltás (ebben az esetben a folyadék fázisban lévő oldott ionok szilárd kristálygóccá állnak össze) energiabefektetést igényel, mivel egy új határfelület (folyadék/szilárd) jön létre. Ez a többlet-, azaz aktiválási energia lecsökkenthető, ha a kristálygócok heterogén módon jönnek létre, azaz egy idegen, már meglévő szilárd felületen válnak ki. (Hasonló folyamatot figyelhetünk meg a téli jégképződéskor is: az első jégkristályok a nádszálak tövén vagy a parti köveken képződnek, nem a nyílt vízen.)



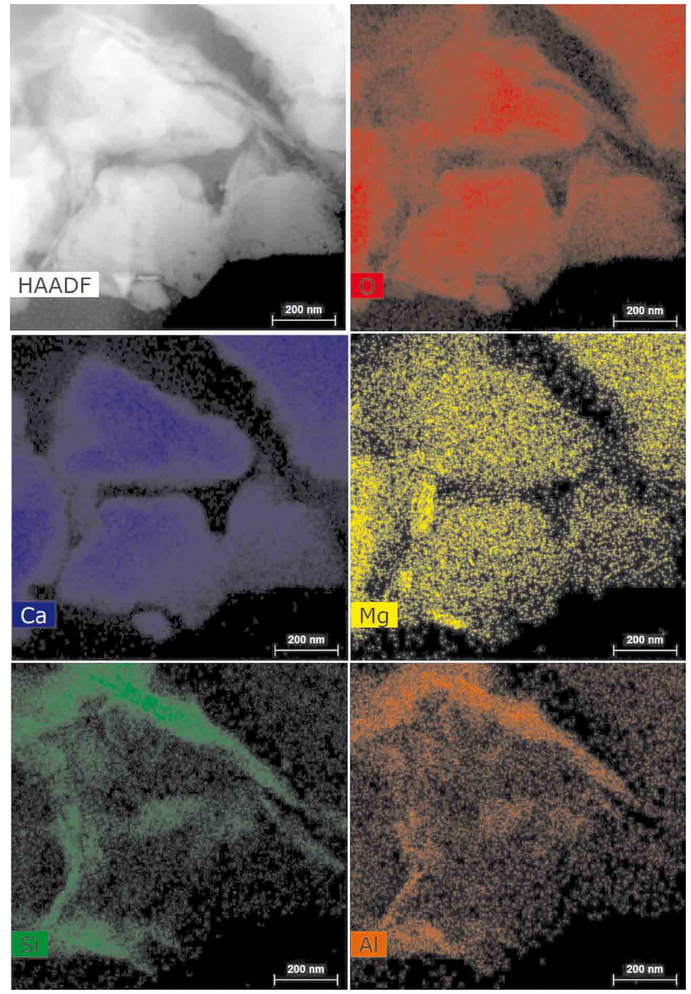
A frissen kivált kalcitkristályok csóváinak fényszórása által opálos tavaszi víz



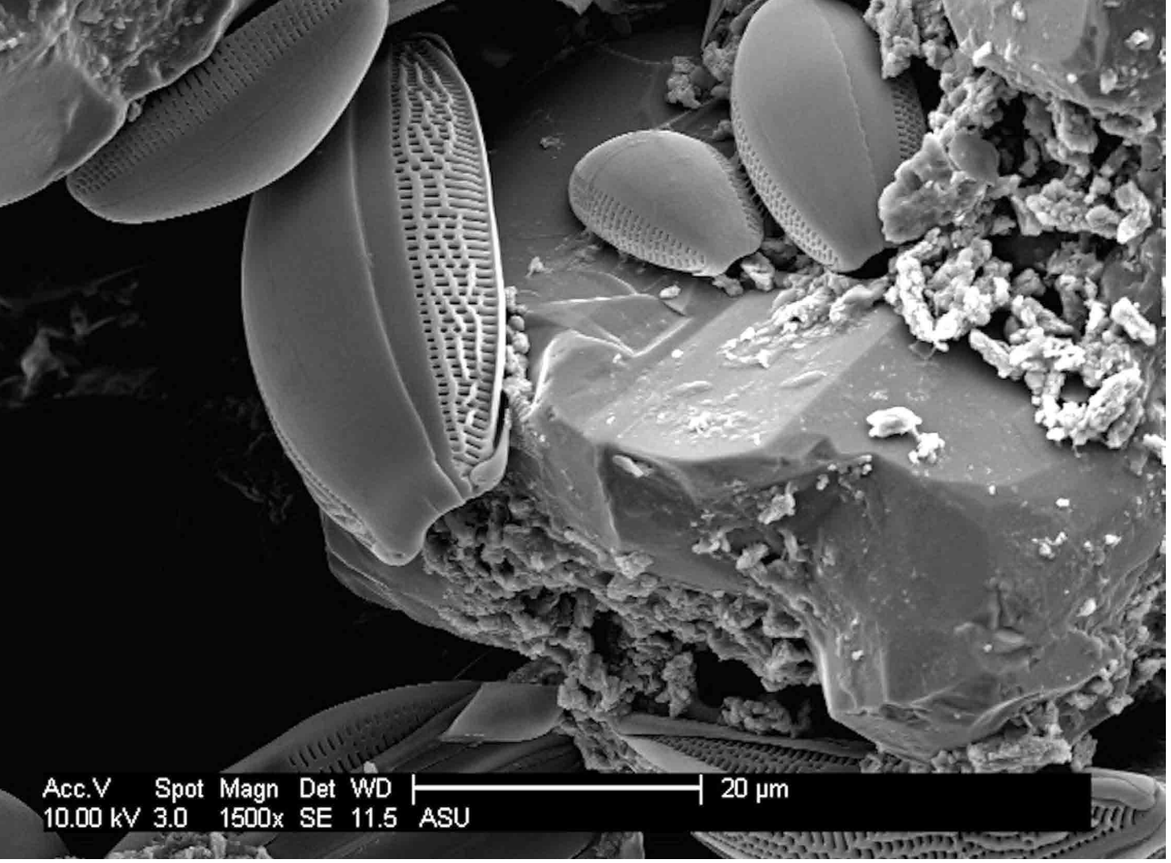
Transzmissziós elektronmikroszkópos felvétel egy vízből kivált kalcitkristályról. A nyilak a szmektitcsoportba tartozó agyagásvány néhány atomi réteg vastagságú „foszlányait" jelölik

A balatoni kalcitképződés esetében azt tapasztaltuk, hogy a vízből kivált kalcitkristályok mindig a szmektitcsoportba tartozó agyagásványokhoz tapadnak. Miután a balatoni kalcitkiválást laboratóriumi kísérletekben is megismételtük, rájöttünk, hogy a vízben lebegő agyagásványok nanométeres „foszlányai" megkönnyítik a kalcitkristály-gócok képződését.

A kalcit heterogén módon, az agyag felületén könnyebben válik ki, mintha homogén úton, kizárólag a vízben képződnének a kristálycsírák. Ez az irányított kiválás ráadásul alighanem azt is meghatározza, hogy milyen méretűek és alakúak lesznek a képződő kristályok. A Balatonból kiváló kalcitszemcsék jellegzetesen hosszúkás alakúak: 5–8 mikrométer hosszúak és kb. 2 mikrométer szélesek. Érdekes tulajdonságuk, hogy mintha sok kisebb kristályból állnának – azonban az elektronmikroszkópos szerkezetvizsgálataink alapján e kisebb egységek mind azonos kristálytani irányban állnak, azaz az egész szemcse egyetlen kristálynak tekinthető. Valószínű, hogy az agyagásvány felületén több kristálycsíra is képződik, majd amikor ezek a növekedésük során összeérnek, az egész szemcse átkristályosodik. Azt is valószínűnek tartjuk, hogy a meglehetősen egységes méret és alak is annak köszönhető, hogy az agyagásvány felszínén, mint egy sablonon képződik a kalcit. Az agyag „sablon" jelenléte a vízben pedig a tó sekélységének, a szél általi felkavarodásnak köszönhető. Ilyen szempontból egyedi a tavunk, mert például a mély alpesi tavakban a kalcit nem agyagon, hanem inkább algák sejtjein válik ki.



Sötét látóterű transzmissziós elektronmikroszkópos felvétel (bal felső panel) és röntgenspektroszkópos mérések alapján kapott elemeloszlási térképek (az adott elem eloszlását a megfelelő színek jelölik, a szín intenzitása a koncentrációval arányos) a Balatonból kivált kalcitkristályokról (Ca-, Mg- és O-tartalmúak), melyeket szmektit agyagásványok leplei kereteznek (Si-, Al-, Mg- és O-tartalmúak)



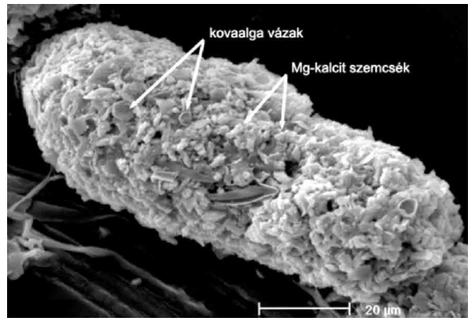
▲ *Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel a sajkodi iszapról, amely jól szemlélteti a Balaton üledékének sokszínűségét: egy allochton kvarcszemcsén kovaalgák „legelnek”, köztük az apró, hosszúkás szemcsék a vízből kivált Mg-tartalmú kalcitkristályok*

A kalcitkiválás idő- és térbeli eloszlását nemcsak szervetlen, hanem biológiai folyamatok is szabályozzák. A vízben lebegő, planktonikus algák fotoszintézisének következménye a „*whiting*”, azaz „fehéredés” jelensége: tengerekben és tavakban is megfigyelt jelenség, hogy adott időben, adott helyen tömeges kalcitkiválás történik, és a néhány mikrométeres szemcseméretű, lebegő kalcitkristályok kifehérítik a vizet. A jelenség – némileg leegyszerűsített – magyarázata, hogy az algák a fotoszintézishez szükséges szenet a vízben oldott hidrogénkabonát-ionokból vonják ki, ezzel növelik a víz lúgosságát (az átlagosan 8,4–8,6 körüli pH nyáron, az intenzív planktonikus elsődleges termelés idején felmehet 9,0–9,2-re is), ami viszont a kalcit kicsapódását eredményezi. Mivel az algasűrűség nem egyenletes, az általuk okozott vízkémiai változások is lokális léptékűek, ezért a kalcitkiválás térben korlátozott. Tavasszal, erős napsütésben, a teljesen nyugodt tóban szabad szemmel jól láthatók a fehér csóvák, amelyek az intenzív planktonikus fotoszintézis miatt kivált kalcitkristályokból állnak. A balatoni kalcitkiválás tehát olyan, biológiailag indukált ásványképződés, amely esetében a kiváláshoz szükséges, megfelelő kezdeti vízkémiát (a kalcitra nézve túltelített állapotot) és a kristálycsíra-képződéshez szükséges heterogén felületet (agyagásványok) szervetlen folyamatok biztosítják, de a kicsapódás közvetlen kiváltó oka a fotoszintézis.

A Balatonból kivált kalcitkristályok további érdekessége, hogy mindig tartalmaznak Mg-ot is, mivel a vízben a Ca-nál jóval nagyobb a Mg-koncentráció. A kiváló kalcitban a Mg:Ca mólarány többnyire ~1:50 és ~1:6 közötti, de a tó keleti medencéjében olyan kristályok is előfordulnak, amelyekben ez az arány csaknem 1:1. Ezek a kristályok már a dolomitásvány összetételét közelítik. A feltételezett dolomitkiválást jelenleg is tanulmányozzuk, hiszen a dolomit közvetlen kicsapódása geológiai kuriózumnak számít.

Héjtöredékek és pelletek az iszapban

Az iszapban sok biogén eredetű szemcse is akad. Ezek egy része héjtöredék, például kagylóhéj, ami aragonit ásványból áll. Az aragonit a $CaCO_3$-nak a kalcithoz képest eltérő szerkezetű módosulata. De a kagylóhéj-töredékeknél



jóval gyakoribbak a kovaalgák vázai, amelyek amorf szilícium-dioxidból (SiO_2), voltaképpen üvegből állnak. Az egyes fajok vázainak mérete, alakja, díszítése eltérő, és az adott faj akár a töredékek részleteiből is felismerhető.

Szintén az élőlények közreműködésének köszönhetők a több tíz mikrométeres „pelletek”, amelyek a szűrő szervezetek anyagcseréjének melléktermékeit, a számukra hasznosíthatatlan anyagot tartalmazzák. Mind a zooplankton (vízben lebegő apró állatok: egysejtűek, puhatestűek, kerekesférgek, rákok, sőt, gerincesek is), mind a kagylók táplálkozásuk során átszűrik testükön a vizet, és ebből a hasznosítható anyagot megemésztik, a szervetlen kalcitkristályokat, héjtöredékeket, agyagásványokat azonban „becsomagolják”, és pelletként a tóba visszabocsátják. A néhány mikrométeres kalcitszemcsék szűrő szervezetek általi „újracsomagolása” tizedmilliméteres pelletekké az iszap szemcseméretének növekedését, ezáltal az iszap felkavarodási hajlamának csökkenését okozza. Így tehát a szűrő szervezetek hozzájárulnak a Balaton vizének tisztításához, abban az értelemben, hogy csökkentik a zavarosságot okozó lebegőanyag mennyiségét.

Fotoszintézis és szűrő szervezetek

A Balaton élővilága és iszapja közötti kölcsönhatások két irányúak: nem csak az élővilág járul hozzá az iszaphoz a héjak és pelletek előállításával, hanem az iszap is visszahat az élőlények fotoszintézisére és táplálkozására. Nézzük először, miként befolyásolja a vízi fotoszintézist az iszap!

Említettük már, hogy a Balaton üledékének legfelső, finom frakcióját a hullámzás, pontosabban a hullámzás vízoszlopba áttevődő turbulens erői nem hagyják nyugodni. Évente 8–10 alkalommal tombol olyan erejű szélvihar a Balatonon, amikor a felkeveredett finomszemcsés szervetlen üledék koncentrációja száraz tömegben kifejezve eléri a 600 mg/litert. Általában pedig 10 és 25 mg között változik a Balaton egy liter vizének szárazsúlyban kifejezett ásványi lebegőanyag-tartalma. A zavarosság pedig nagyban csökkenti a Balaton felszínére érkező napsugárzás lehatolását a vízoszlop mélyebb rétegeibe, gyengítve a víz alatti fény intenzitását és a fitoplankton és a hínárosok fotoszintézisét.

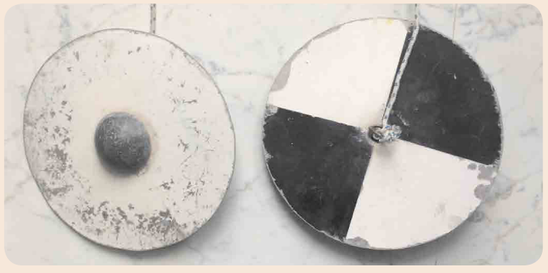
◀ *Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel zooplankton pelletről, melyben felismerhetők a különböző ásványok és héjtöredékek*



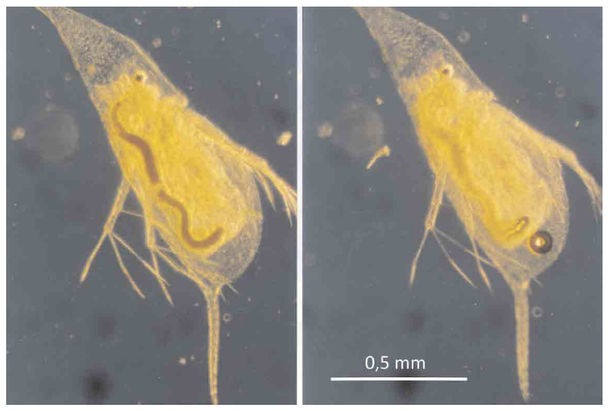
▼ *A friss, átlátszó jéggel borított tóban még a mélyebb vízben is le lehet látni a fenékig. A képen a jég alatti sekély vízben vándorkagylókolóniákkal borított kövek láthatók.*

A víz átlátszóságának mérése

A legegyszerűbb víz alatti fénymérő eszköz az úgynevezett Secchi-korong. Ez egy zsinegen függő, 20–25 cm átmérőjű, negyedcikkelyenként fekete-fehérre festett fémkorong, amelyet a csónak árnyékos oldalán olyan mélységig bocsátunk le a tóban, ahol éppen eltűnik a szemünk elől. Ez a távolság az úgynevezett „Secchi-átlátszóság", amely jól tájékoztat a fényáteresztés/zavarosság mértékéről. A korong abban a mélységben tűnik el a szemünk elől, ahol a víz alatti fény intenzitása a vízfelületre eső fény 5%-a. És ez a mélység a Balatonban sok évtized adatsorai alapján átlagosan 80 cm körüli, de a viharos időjárás esetén 10 cm-nél is kevesebb.



Télen, ha a tavat sima és átlátszó jégmező borítja, és a jeget nem fedi hó, akkor a helyzet gyökeresen megváltozik, mert nincs üledék-felkeveredés. Ilyenkor a tó vize annyira kitisztul, hogy lelátni az üledékig, amelyen ilyenkor – köszönhetően a fenékig lehatoló fénynek – vastag kovamoszatszőnyeg fejlődik ki. Bár ez a téli állapot az utóbbi két évtizedben egyre ritkább, mert ritkábban fagy be a Balaton, újabban más évszakokban is találkozunk a jelenséggel.



A balatoni zooplankton jellegzetes képviselője, a Daphnia cucullata. *Jobbra: sósav hozzáadása után a karbonátszemcsék feloldódtak a béltraktusban, és CO_2 buborék keletkezett*

2015 és 2018 között kísérleti jelleggel, azóta pedig üzemszerűen igyekeznek a tó vízszintjét a korábbi 75–110 cm-es érték helyett 120 cm-en tartani. Ez viszont manapság sokat javít a víz átlátszóságán, mert a szelek a nagyobb mélység miatt sokkal kevesebbszer keverik fel az üledéket. Annak felszínén pedig, a jobban lehatoló fény hatására nyaranta is kialakul a kovamoszatszőnyeg. Az algaszőnyeg egyre vastagabbra fejlődve rengeteg oxigént termel, amely a szőnyegben buborékok formájában benne marad, mígnem annyi lesz belőlük, hogy egész kis bolygatásra, egy erősebb hullámzás hatására, amelyet egy tovahaladó hajó is okozhat, tenyérnyi darabokban felszakadozik, és az oxigénbuborékok felemelik a víz felszínére. Ezeket a barnás, habos, szabad szemmel furcsa eredetűnek tűnő kovamoszatszőnyeg-darabokat a szél a partok, öblök, strandok felé terelheti, ahol a nyaralók emberi eredetű szennyezésnek vélik, holott természetes tavi termék.

Vessünk egy pillantást a Balaton magas lebegőanyag-tartalmának mennyiségi viszonyaira is! A vizsgálatok szerint 25 mg literenkénti száraz tömegű lebegőanyag-tartalom esetén annak mindössze 1,5–2,0%-a az alga és baktérium, 15,0%-a holt szerves törmelék, és 83–83,5%-a ásványi anyag. Sőt, a viharok okozta gyakori felkeveredések idején, amikor a felkevert üledék 600 mg-ot is elér literenként, az ásványi lebegőanyag-tartalom aránya 99%-nál is nagyobb.

A Balaton nyílt vize a nagy lebegőanyag-tartalom miatt nem ideális közeg a zooplankton szűrve táplálkozó képviselőinek (pl. a Cladocera rákok csoportjába tartozó Daphnia-féléknek), mert a lebegő ásványi szemcsék mérete beleillik a legtöbbjük által hasznosítható



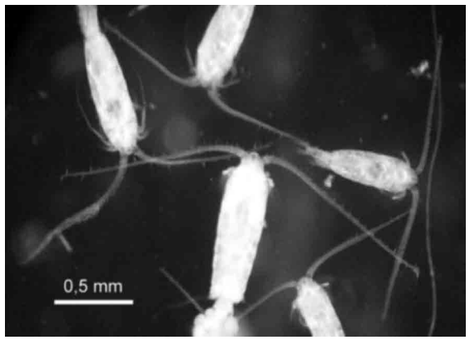
(a) Vándorkagylók által borított parti kőszórás. (b) Elpusztult vándorkagylók (és csigák) partra mosott héjaiból álló zátony Tihanyban.

táplálék (kisméretű algák, baktériumok) méret-tartományába. Az átlagos lebegőanyag-tartalom mellett például a balatoni Daphnia-féléknek több ezer ásványi szemcsét kell visszatartaniuk a szűrőkészülékükkel ahhoz, hogy 1 vízigomba egyedet, 100–1000 szemcsét, hogy egy detritusz részecskét, 50–500 szemcsét, hogy egyetlen algaegyedet, és 1–4 szemcsét ahhoz, hogy egy vízi baktériumot bekebelezhessenek. Ezért a szűrő zooplankton táplálkozási feltételei a Balatonban rosszabbak, mint az ásványi lebegőanyagokban sokkal szegényebb, nagy és mély tavakban és a tengerekben.

A lebegőanyag méreteloszlásából és sajátos összetételéből következik továbbá, hogy a megragadva, válogatva táplálkozó és ragadozó Copepoda rákok előnyben vannak a Balatonban a szűrögető Cladocera rákokkal szemben, amelyet jól mutat, hogy a tó zooplanktonjában sokkal nagyobb a Copepoda-félék aránya a Cladocera-félékhez képest, mint más tavakban.

A kutatások szerint viharos, felkeveredéses időszakokban a balatoni Cladocera-félék béltraktusát oly mértékben tölti meg a bekebelezett ásványi anyag, hogy annak tömege az állat teljes tömegének 55%-át teszi ki. A kísérleti eredmények azt is bizonyították, hogy ilyenkor, mivel az állatok a szűrést abbahagyni nem tudják, mert megfulladnának (a szűrőkészülék által keltett vízáram látja el őket oxigénnel), kénytelenek a béláthaladási időt 10–12 percről 2–3 percre is csökkenteni, hogy ne pukkadjanak szét. Ettől azonban óhatatlanul csökken a felvett táplálékformák emésztésének hatékonysága. Így a balatoni Daphnia-félék fejlődése lassabb, és kevesebb petét is termelnek, mint azt jó táplálkozási feltételek mellett tennék.

A Balatonban a magas ásványi lebegőanyag-tartalom nem csak a Cladocera-félék, hanem a Copepoda-félék fiatal fejlődési stádiumának (Nauplius és Copepodit állapotok) táplálkozását is bénítja, mert azok is szűrve táplálkoznak. Emiatt, míg más tavakban a szűrő zooplankton



Fénymikroszkópos felvétel Eudiaptomus gracilis *(Copepoda rák) egyedeiről*



▲ *Algavirágzás után elpusztult algák pamacsai úsznak a vízen 2019. szeptember 15-én, Révfülöpön*

a teljes víztömeg 30–60%-át is átszűri naponta, ez az érték a Balatonban a felkeveredettség mértékétől függően csak 8 és 35% közötti. Ezzel együtt jelentős a szűrő zooplankton üledékképző szerepe a tóban, mert az állatok a menynyiségüktől (számuk 60 és 250 egyed között lehet literenként) és a lebegőanyag-tartalomtól függően naponta 4–60 ezer tonna ásványi lebegőanyagot szűrnek ki, gyúrnak kompakt fekális pelletekké, és ülepítenek le.

Nem csak a zooplankton egyes képviselői, hanem a kagylók, például a víz alatti tárgyakat, kőszórásokat, nádszálakat sűrűn belakó vándorkagylók is szűrő szervezetek és így lokálisan jelentősen hozzájárulnak a felkeveredett üledék kiszűréséhez és leülepítéséhez. Bizonyos partszakaszok mentén sétálva láthatjuk, ahol a kőszórásokat vastagon beborítják a vándorkagyló-kolóniák, egészen átlátszó is lehet a víz. Több tízezer kis vándorkagyló is előfordulhat 1–2 méter hosszú kőszórásos partvédmű víz alatti kövein, amely kagylók egyenként 100 cm^3 tóvizet is átszűrnek egy óra alatt. A kagylók szűrése annál is inkább hatékony, mert úgynevezett pszeudofeceszt is termelnek. Ez a kiszűrt és nyálkás csomókba bugyolált iszaptömeg nem a béltraktusokból kerül ki, hanem a kagylók köpenyében a kopoltyúfésűkön szűrődik ki, és onnan „ürítik” az állatok és halmozzák fel maguk körül.

A tó magas ásványi lebegőanyag-tartalma az egész balatoni vízi táplálékhálózat szerkezetére is hatással van. Elvileg a szűrő zooplankon lenne a kulcs-szervezetcsoport, az energiaáramlás hídja az elsődleges termelő fitoplankton (lebegő növények, főleg algák) és a halak között. Ez azonban nem így van, mert a planktonevő halak (sok pontyféle és a sügérfélék ivadéka és fiatal korcsoportjai) önmagában a zooplanktonból nem élnek meg a Balatonban. A zooplankton sok egyéb tényező mellett éppen a fentiek miatt nem termel annyi biomasszát, hogy ez teljesüljön. A kutatási eredmények szerint a balatoni halak táplálékának jelentősebb hányadát az iszap állatvilága és a parti öv gazdag gerinctelen állatvilága teszi ki.

A tó üledékének és élővilágának egy másik fontos összefüggésére egy meglehetősen kellemetlen esemény világított rá 2019. augusztus–szeptemberében: évtizedek óta nem látott mértékű algavirágzás indult meg a tó nyugati vége felől, és hatására mocsárihoz hasonló körülményekkel, a víz színén úszó algapamacsokkal szembesültek a fürdőzők. A virágzás több szempontból is váratlan, illetve szokatlan volt: egy Balatonban honos barázdás moszat (*Ceratium furcoides*) és egy eddig a tóban nem jelentős kékalga (*Aphanizomenon flos-aquae*) együttese szaporodott el hirtelen, miközben a virágzást nem előzte meg semmilyen különleges időszak (aszály vagy különösen csapadékos időjárás) vagy jelentős emberi beavatkozás. Ezért tehát az algák számára szükséges tápanyag – elsősorban a foszfor – külső forrásból aligha jöhetett. Valószínűleg az üledék ásványain (vagy ásványaiban), elsősorban a kalciton a korábbi évtizedek során megkötött foszfor egy része szabadulhatott fel és vált felvehető tápanyaggá az algák számára. Ezt a feltevést támasztja alá, hogy a virágzás előtt közvetlenül egy többnapos vihar az üledéket erősen felkavarta. A következő évek fontos kutatási feladata lesz, hogy megismerjük, miként kötődik a foszfor az üledék ásványaihoz, és milyen fizikai és kémiai körülmények eredményezhetik „elszabadulását”. Csakis ezeknek az ismereteknek a birtokában tudjuk majd felmérni, időzített bomba-e az üledékben tárolt foszfor, várhatók-e a jövőben hasonló események, és miként lehet esetleg megakadályozni bekövetkezésüket.

Összefoglalás

Mint láthattuk, az iszap fontos szerepet játszik a Balaton jellegzetes vizének és élővilágának alakításában. A balatoni iszapképződés szép példája a szervetlen és biológiai folyamatok egymásra hatásának. Bár az iszap túlnyomó részét alkotó kalcit kicsapódása élettelen folyamatokra vezethető vissza – hiszen a környező karbonátos kőzetek mállása szolgáltatja hozzá az alapanyagot –, az algák fotoszintézise okozza azt a vízkémiai változást, ami a kicsapódást a nyílt vízen beindítja. A képződő kalcitszemcsék jellegzetes méretét és alakját valószínűleg a nanométeres méretű, lebegtetett agyagásvány-felületeken történő kristálycsíra-kiválás, azaz egy szervetlen folyamat határozza meg. Azonban a kalcitkristályok néhány mikrométeres szemcsemérete visszahat az élővilágra, mivel épp a szűrő zooplankton szervezetek táplálékszemcséinek méretével egyezik meg. A sekély tó gyakori felkeveredése és a kalcitkristályok folyamatos kiválása miatt ezek az élőlények kénytelenek óriási mennyiségű ásványszemcsét „megemészteni”, hogy egy-egy valódi táplálékszemcséhez jussanak. Így tehát az iszapot alkotó ásványszemcsék még a tavi táplálékláncban is szerephez jutnak.

Ajánlott irodalom

Balogh Cs., B. Muskó I., G., Tóth L. 2008: A vándorkagyló (Dreissena polymorpha) szerepe a Balatonban mennyiségének és filtrációjának tükrében. – Hidrológiai Közlöny 88, 12–14.

Cserny T., Földvári M., Ikrényi K., Nagy-Bodor E., Hajós M., Szuromi-Korecz A., Wojnárovits L. 1991: A Balaton aljzatába mélyített Tó–24. sz. fúrás földtani vizsgálatának eredményei. – A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az 1989. évről, 177–239.

Cserny T. 2002: A balatoni negyedidőszaki üledékek kutatási eredményei. – Földtani Közlöny 132, 193–213.

Emszt K. 1911: A Balaton fenékiszapjának és altalajának chemiai alkata. A Balatonnak és környékének fizikai földrajza. In: Lóczy L. (szerk.): A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. Magyar Királyi Földrajzi Társaság Balaton-bizottsága, Budapest, I/VII, 1–16.

Entz G., Sebestyén O. 1942: A Balaton Élete. – Királyi Magyar Természettudományi Társulat, Budapest, 1–366.

Máté F. 1987: A Balaton-meder recens üledékeinek térképezése. – A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése az1985. évről, 367–379.

Padisák J. 2005: Általános limnológia. – ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 1–310.

Pósfai M., Rostási Á., Topa B., Molnár Z., Nyirő-Kósa I., Bereczk-Tompa É., Fodor M., Cora I., Kovács A., Váczi T., Weiszburg T., Haas J. 2017: Karbonátásványok kiválása a Balatonban. – 8. Kőzettani Vándorgyűlés Kiadványa, Szihalom, http://vandorgyules2017.mfgi.hu/sites/default/files/files/Vandorgyules.pdf, 143–146.

Timár G., Csillag G., Székely B., Molnár G., Galambos Cs., Czanik Cs. 2010: A Balaton legnagyobb kiterjedésének rekonstrukciója a függőleges kéregmozgások figyelembevételével. – Földtani Közlöny 140, 455–462.

Treitz P. 1911: A Balaton tó fenékiszapjának és altalajának fizikai alakulása és ásványtani összetétele. A Balatonnak és környékének fizikai földrajza. – In: Lóczy L. (szerk.): A balaton Tudományos Tanulmányozásának eredményei. Magyar Királyi Földrajzi Társaság Balaton-bizottsága, Budapest, I/VI, 1–26.

Zlinszky A., Molnár G., Székely B. 2010: A Balaton vízmélységének és tavi üledékvastagságának térképezése vízi szeizmikus szelvények alapján. – Földtani Közlöny140, 429–438.



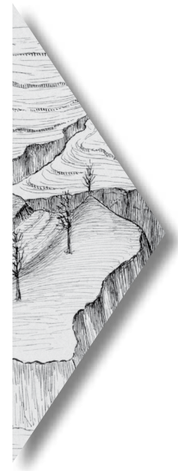
MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

Visnovitz Ferenc

12

Gázok „szellemképe” a balatoni üledékekben

A Balatont övező nádasok, mocsarak környékén gyakran érezni a jellegzetes szagú mocsárgáz illatát. De a lábunk alól is felbugyoghat, amikor a Balatonba gázolva az iszapban taposunk. Ezekre a víz alól szivárgó gázokra már évszázadokkal ezelőtt felfigyeltek a Balaton környékén élők, sőt Lóczy Lajos a „szénsavas felbugyogások” anyagát már „meggyűjtötte” és meg is vizsgáltatta. Ezeknek az eredményeiről részletesen be is számol a monográfiában. A balatoni üledékek gázainak alapos vizsgálatához azonban még sok évtizednek kellett eltelnie: ma már tudjuk, hogy nem csak az iszapban termelődik gáz, hanem a Balaton medre alatt található idősebb üledékekben is. Modern akusztikus eszközeink mérését ugyanis az üledékben lévő gázok „elrontják”, de ennek a kudarcnak az iszapgázok kutatói nagyon örülnek. Ezeknek a mérési zavaroknak a segítségével ma már pontosan fel tudják térképezni, hogy a tó mely területén, milyen mélységben, milyen képződményekben találhatók gázok és mindezek alapján az eredetük is kinyomozható.



A Balatonba folyó vizek

… A Balaton fenekén számba jöhető források nincsenek. A fürdőző közönség ugyan váltig hangoztatja, hogy a tóban forrásoknak kell lenniök, mert úszás közben lábuk hol melegebb, hol hűvösebb vízbe kerül. Ennek magyarázata az, hogy hő nyáron a Balaton vize a felszínen is változtatja a hőmérsékletét ahhoz képest, hogy szélárnyékban, napárnyékban, mélyebb vagy sekélyebb víz felett van. Hosszabb ideig tartó szélcsendben a naptűzés



Turbókolás a Balatonon

szertelenül felmelegíti a felszínt, persze csak 1—2 C°-al a fenékhez képest. Ez a különbség azonban elegendő, hogy már az 1/10-es hőmérsékleti különbségeket is megérző, meztelen emberi test túlbecsülje azt. Az úszó ember mozgásával összekeveri a különböző hőmérsékletű vizet és az összekeveredést a nyugodtan ülő fürdőzők is megérzik.

Cholnokyval nagy figyelemmel kerestük a Balaton fenekén feltételezett forrásokat. Lényegeset egyet sem találtunk. Néhány gyenge forrás van a Csopak—Balatonkövesd közötti Kereked-öböl keleti sarkában, ahol a Kuszkó nevű part előtt a Horogvölgy-séd beömléséhez közel télen a jégtakaró csillagos lékekben megnyílik. Szénsavas felbugyogás van ezekben; amelyek szénsavát meggyűjtöttem és Ilosvay Lajos professzor barátom meghatározta mennyiségét. Hőmérsékleti különbséget a lékek vizében nem tapasztaltam; gyenge szénsavas források szállítják tehát itt a Balaton fenekén a gázt és a csillaglékek kiázását a víz szénsavának, amely az olvadáspontot a vízben leszállítja, lehet tulajdonítani, mint a forrásvíz nagyobb hőmérsékletének.

A Kuszkó-parton a Horogvölgy sédje mellett a réten több gyenge szénsavas forrás fakad. Szigliget alatt is van a jégnek egy felázó foltja, ami forrásra utal. Rendes vidékéről is szól egy adat. Számottevő fenékbeli forrásokat az északi part mellékén már csak azért sem várhatunk, mert ott a fenéken vastag agyag és iszap nyugszik, amelyen keresztül források nem könnyen törhetnek át.

Szólnak ugyan a balatonparti emberek, a nádaratók, a halászok „Hevesekről”, amelyeken gyenge a jég.

Ezek kivétel nélkül a tágas, bereksárfedte Sédvölgyek nyílásában fekszenek. A rétségek melegebb talajvize szivárog a vízszélén a Balatonba és nem enged erős befagyást.

Részlet Lóczy Lajos A Balaton földrajzi és társadalmi állapotainak leírása *című könyvéből*

A Tapolcza, Világos és Lesencze vizei

Szigliget-halmi lejtőség: egészen kicsiny terület ez, állandó forrás nem fakad rajta, az esővíz is kevés, ami innen a tóba jut. Nevezetes dolog azonban, hogy előtte a tófenéken, a parttól mintegy fél km széles zónában sok forrás tör elő, mert télen itt nagykiterjedésű „hevesek” vannak, még oly vastag jégben is. Ezt a vízmennyiséget persze nem lehet meghatározni, épp úgy, mint az Akali és Szepezd előtt a tó közvetlen szélén kitörő vízmennyiségeket. Nagyon bővek ezek a források sem lehetnek, de határozott megjelenésük a nyilt jégmezőn sok tekintetben megnyugtató volt. Ha ezek az aránylag nem nagyon bővizű források ilyen határozott hevesekben jelentkeznek a tó jegén, akkor mindenütt, ahol felbukkannának, jelentkezni kellene hasonló kiolvadt, kerek foltoknak. A jég tanulmányozásakor összejártuk jól a tó jegét, több télen át. Különösen magam megfordultam mindenfelé s alig lehet 1–2 km²-nyi összefüggő terület, ahol nem járt volna. És soha heveseket nem találtam. A halászok is mindig csak a nádasokból, a víz széléről említettek heveseket s egyáltalában semmi tudomásuk sem volt a nyilt tó tükrén jelentkező hevesekről. Ezzel tehát azt a kérdést elintézettnek tekinthetjük, hogy a tó fenekén források volnának. Erről szó sem lehet. Pedig az odavaló úri nép sokat emlegeti s tankönyveinkben is előfordul.



Czölöpös halászkunyhó a Kis-Balatonon

Részlet Cholnoky Jenő A Balaton hidrografiája *című könyvéből*

A Balaton iszapjában, a part menti nádasokban, a mocsaras öblökben többfajta gáz is található. Vegyük most ezeket sorra és nézzük meg, mit tudunk róluk!

A mocsárgáz

Aki nyaralt már a Balatonon, és sétált a nádassal övezett, iszapos partokon, biztosan találkozott már a mocsárgáz jellegzetes illatával. A gáz leginkább a partok mocsaras, hínárral benőtt öbleiben és kisebb csónakkikötőkben termelődik, de a strandokon is gyakran felbugyog, ha a feneken található puha iszapba taposunk. Ez a lágy iszap az, amelyben a gáz keletkezik, majd az üledékből kipréselt buborékok átjutnak a vízen, szerteoszlanak és elkeverednek a levegővel.

Kémiai összetételét tekintve a mocsárgáz alapvetően metánból áll, ami a tavi üledékekben felhalmozódó, oxigénhiányos állapotban lebomló szerves anyag egyik végterméke. Normál esetben az iszapban élő apró élőlények, mikroorganizmusok termelik, és kicsike gázbuborékok formájában van jelen az iszap szemcséi között. Ezek a pici buborékok idővel egyesülhetnek és egy bizonyos méretet elérve – a rájuk ható felhajtóerőnek köszönhetően – felbugyognak a vízfelszínre. Amikor belelépünk a süppedős iszapba, igazából nem történik más, mint hogy megbolygatjuk az iszapot és a buborékok – amik így képesek lesznek egyesülni – a felszínre emelkednek.



A mocsárgáz felbugyogása a megbolygatott tavi iszapból

Vízben oldott gázok

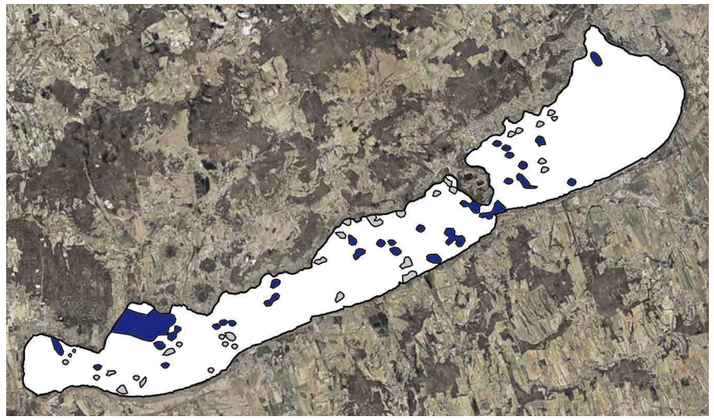
Az iszapgázok felbugyogásához hasonló, de jóval ritkább jelenség, amikor a fülledt, meleg nyári napokon, a parton sétálva azt látjuk, hogy a tiszta víz alatt a tófeneken, a hínárok és algaszálak oldalán apró, gyöngyszerű buborékok sorakoznak. Ezeknek a buborékoknak az anyaga már nem a mocsárgáz, hanem a vízből kiváló, vagy a növényi fotoszintézis által termelt oxigén. A buborékok azért jönnek létre, mert a meleg vízben az oxigén oldhatósága csökken, így a növények szolgáltatta többletoxigén már nem képes feloldódni. Időnként az is előfordulhat, hogy az oxigén oldhatósága annyira lecsökken, hogy az egyébként már feloldott gáz is kénytelen elhagyni a vizet, és itt-ott összegyűlve – a mocsárgázhoz hasonlóan – kisebb-nagyobb buborékokban egyesülve felbugyog a felszínre. Ilyenkor a víz oxigénszegénnyé válhat, ami gyakorta párosul a halállomány pusztulásával. Ennek szerencsés esetben az első hidegfront, a víz lehűlése és átkeveredése hamar véget vet.

Szén-dioxid a savanyú vizekben

Ha a Balatonban előforduló gázokról van szó, nem szabad elfeledkeznünk a Balaton északi partja mentén sorakozó, szénsavban gazdag, vasas ízű Balaton-felvidéki forrásokról sem (lásd a 14. fejezetet). Ezek a savanyú vizek nem csak a forrásaikról jól ismert településeknél (Balatonfüred, Balatonarács, Csopak, Balatonkövesd, Alsóörs, Paloznak, Lovas, Badacsonytomaj vagy Kékkút) törnek a felszínre, hanem 10–12 °C-os forrásokat találunk a Balaton víztükre alatt is. Az ilyen helyeken a felszín alatti vízpályák mentén a tó alá érkező forrásvíz átbugyog a tavi üledékeken, és a Balaton hidrogén-karbonátos „ásványvizével" nyomtalanul elkeveredik. A rejtett források vizében található szén-dioxid – mely a víz szénsavasságát okozza – általában oldatban marad, ezért látványos buborékolást a vízfelszínen nem tudunk megfigyelni. Télen azonban – amikor a tavat erős jégpáncél borítja – a helyzet megváltozik. Ilyenkor a rejtett „forrásokból" feláramló, melegebb és szénsavas víz kikezdi a jégpáncélt, és a vízfeláramlások helyén a jég eltűnik, vagy áttetszőbbé, vékonyabbá válik. A vízből kiváló szén-dioxid ebben az időszakban megrekedhet a jég alatt, és ennek eredményeként buborékok is megjelenhetnek. Az ilyen helyeket hívják a balatoni népek heveseknek.



A vízi növények levelein kiváló oxigénbuborékok



Hevesek és jégmentes foltok egy 2005-ös műholdfelvétel alapján (kék: jégmentes terület, szürke: jégkivékonyodás)

A hevesek egyértelmű bizonyítékai a tó alatti „források" létezésének, amelyek oldott szén-dioxidot szállítanak a tó alatti kőzetrétegekbe és a tavi iszapba. Lóczy Lajos és Cholnoky Jenő a téli Balaton jegét járva kereste és vizsgálta ezeknek a heveseknek az előfordulásait annak érdekében, hogy eredetüket feltárhassák. Később a hevesek térképezésével az 1950-es és az 1960-as években Entz Béla foglalkozott, aki részletes térképeket adott közre az Alsóörstől Badacsonytomajig, a tó északi partja mentén sorakozó jégmentes foltokról. A mai műholdképek alapján a Balaton alatti legnagyobb feláramlási zóna ugyanakkor nem itt, hanem jóval nyugatabbra, a Szigligeti-öblözet északi részén, a Keszthelyi-hegység keleti előterében található.

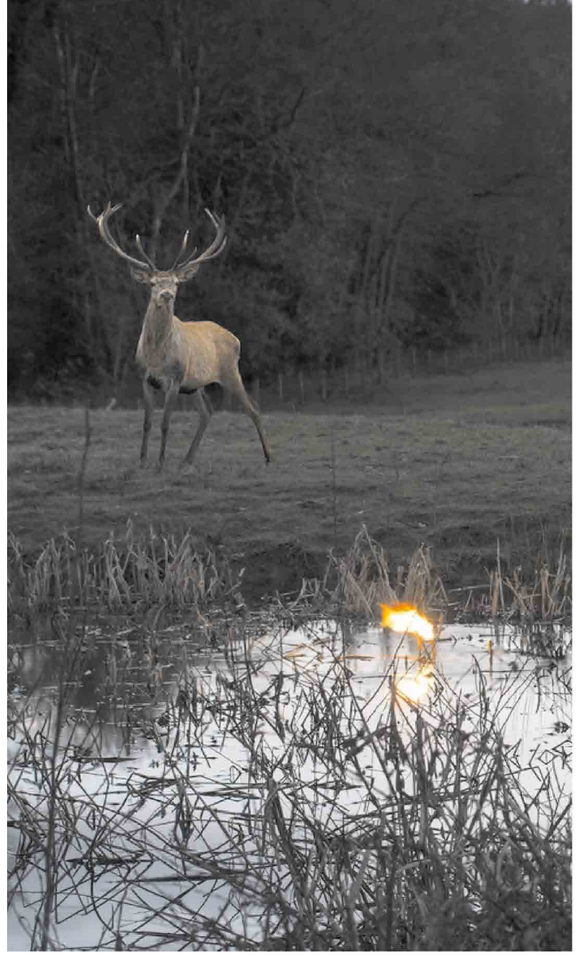
A tó északi partja mentén, a heveseknél feláramló gázok összetételét még Cholnoky Jenő vizsgáltatta meg, hogy a gázok földtani eredetére is magyarázatot találjon. A kémiai vizsgálatok megerősítették a szén-dioxid jelenlétét, amit Cholnoky a Balaton-felvidéki vulkáni működés utolsó maradványainak tartott. Cholnoky a gáztartalmú vizek feláramlási mintázatát a térség földtani felépítése ismeretében magyarázta. Értelmezése szerint a szénsavas vizek a permi vörös homokkőből származnak, amit azzal igazolt, hogy a források elhelyezkedése jól követi a homokkő felszínre bukkanásának vonalát. Utóbbi vonalat Lóczy Lajos a Balaton pereme mentén futó töréses szerkezettel (normál vetővel) hozta összefüggésbe, amelyet mindketten a tó kialakulásának tekintetében is rendkívül fontosnak tartottak.

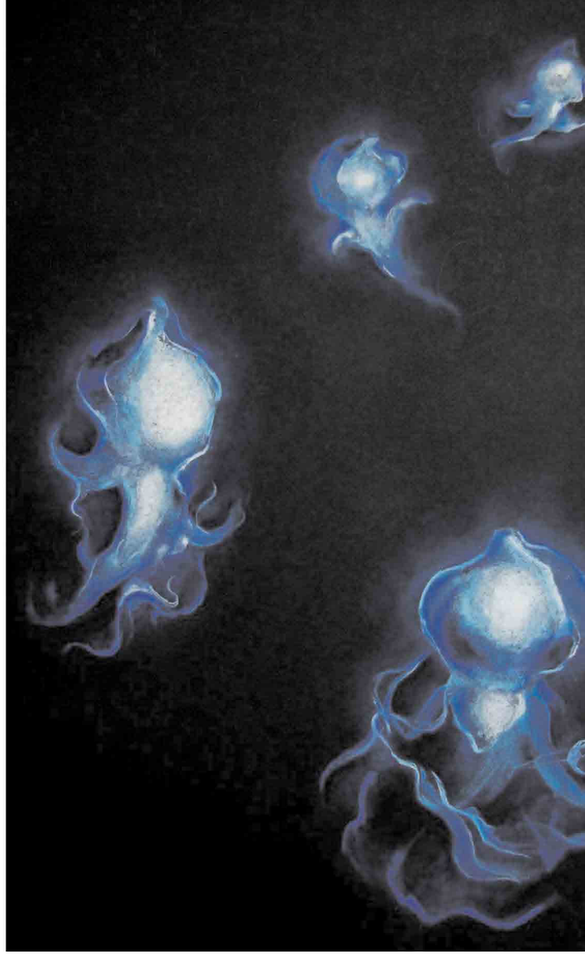
„Ultrahanggal" a gázok nyomában

A földtudományi kutatásokban sekély gázoknak hívjuk azokat a kőzetekben csapdázódó gázokat, illetve a kőzetszemcsék között megrekedt folyadékgőzöket, melyek a „felszínhez közel", vagyis 1 kilométernél kisebb mélységben keletkeznek vagy halmozódnak fel. A gázfelhalmozódások többnyire biológiai, fizikai-kémiai és földtani folyamatok együttes eredményeként jönnek létre, és a mélységből feláramló, vagy a helyben keletkező gázokból táplálkoznak. A sekély gázok kémiai összetétele változatos, de a leggyakoribb komponensek között ugyanazok az összetevők szerepelnek, amelyekkel a Balaton esetében is találkozunk. Ezek a gázok a metán (CH_4), a szén-dioxid (CO_2), a kén-hidrogén (H_2S) és az etán (C_2H_6). Mindezek közül a legfontosabb összetevő általában a metán, melynek egyik fő forrása az üledékekben lerakódó szerves anyag. A tavi–mocsári üledékekben – mint amilyen a Balaton iszapja is – a metán elsősorban bakteriális anyagcsere folyamatok végtermékeként keletkezik, tehát biológiai eredetű. Épp ezért, ezt a fajta metánt *biogenetikus metán*nak (= biológiai úton képződő metán) nevezik. A metán másik forrása lehet a mélyen betemetett, nagy nyomáson és hőmérsékleten, kémiai úton átalakuló szerves anyag, amely fontos ásványi nyersanyagot jelent a gáz- és olajcégeknek a szénhidrogén iparban. Ezt a fajta metánt *termogenetikus metán*nak (= hőhatásra képződő metán) nevezik.

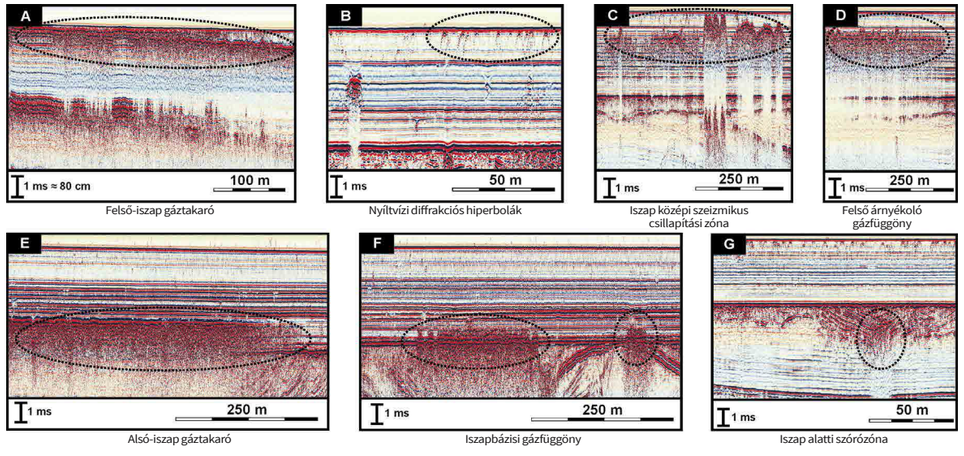
Mint fentebb már említettük, az üledékekben tárolt gázok általában szabad szemmel nem láthatók, és csak olyankor figyelhetők meg, amikor az iszapból kipréselődő mocsárgáz felbugyog a vízfelszínre. Nagyon ritka esetben a mocsárgáz jelenléte a levegőben is megfigyelhető: a metán spontán égése a mocsarak, lápok felett halovány, szellemre hasonlító fényjelenséget produkál. Ez a jelenség a kelta mondákból is jól ismert lidércfény, mely mitológiai lények, varázslatok és földöntúli jelenségek megihletője a fantasy játékokban és irodalomban.

Vajon, ha ezek a gázok ennyire „rejtőzködőek", akkor hogyan lehet mégis vizsgálni a balatoni üledékekben keletkező és csapdázódó gázokat? Úgy, hogy a láthatatlan „gázszellemek" felkutatására egy speciális szellemdetektort hívunk segítségül! A detektorunk pedig nem más, mint az a nagy frekvencián működő „ultrahangos" műszer, amellyel földtani–geofizikai kutatások keretében a tó alatti üledékeket és törésvonalakat is meg tudjuk vizsgálni (lásd a 4. fejezetet). A geofizikai ultrahangként működő vízi szeizmikus mérőműszerek az orvosi ultrahanghoz hasonlóan érzékenyen reagálnak a „pácien-





A lidércfény (Will-o-the-wisp) ábrázolásai a fantasy világban



A balatoni „lidércek”, azaz gázfelhalmozódások jellegzetes megjelenési formái az akusztikus felvételeken. Vertikális torzítás kb. 1:10 és 1:70 között. A szelvények helyét lásd a 259. oldal ábráján

sünk”, vagyis a tavi iszap gáztartalmára. Ennek az az oka, hogy az ultrahanghullámokat az apró gázbuborékok szétszórják, visszaverik, legyengítik, vagy akár teljes mértékben elnyelik. Akinek volt már hasi ultrahang vizsgálata, az biztosan tudja, hogy a vizsgálat előtt kerülni kell a puffadással, gázképződéssel járó ételek fogyasztását, ellenkező esetben a bélben képződő gázbuborékok megakadályozzák a sikeres kivizsgálást.

Ugyanez a helyzet a tavi akusztikus kutatásoknál is. Amennyiben az üledékben – akár csak nagyon csekély mértékben is – szabad gázbuborékok vannak jelen, úgy a rétegtani leképezés kudarcra van ítélve, mivel az „ultrahangos” felvételeken csak az árnyékoló „függönyökként” és szeizmikus „szellemképekként” megjelenő gáztartalmú szinteket (gázfrontokat) fogjuk látni. Megfordítva a dolgot, ezt úgy is felfoghatjuk, hogy éppen ezáltal van lehetőségünk a tavi üledékekben csapdázódó gázok érzékeny detektálására. És valóban, ez az eszköz rendkívül hatásos. Nem csak a Balaton esetében, de a világtengereken és más tavakban is tökéletesen kimutatható vele az iszapgázok jelenléte.

A világtengereken jelenleg is zajló gázkutatások számos példán keresztül mutatják be a gázfelhalmozódások keltette szeizmikus mintázatokat, és ahogy a tengernél, úgy a Balaton esetében is azt tapasztaljuk, hogy a gáz akusztikus képe sokféle formát ölthet. Ezeket az alakzatokat az ezzel foglalkozó tudományterületeken úgynevezett gázindikátorok segítségével írják le, melyek tulajdonképpen akusztikus képi jellemzők. A legjellemzőbb gázindikátorok közé tartoznak az erős, markáns szintekként jelentkező, úgynevezett *erősített reflektorok* (lásd A, E szelvény), a bajuszra hasonlító, úgynevezett *diffrakciós hiperbolák* (lásd B, C, G szelvény), a gázszintek alatt felismerhető *reflexiómentes, üres sávok* (lásd A–G szelvény), a *gázszintek többszöröződései* (lásd A, C szelvény), melyeket a hanghullámoknak a vízfelszín és a gázos réteg közötti oda-vissza verődése okoz, és végül azok a „mákoskoszos” foltokként jelentkező úgynevezett *akusztikus zavarzónák* (lásd C, D, E, F szelvény), melyeket a hullámok buborékokon történő szóródása és a buborékok mérettől függő rezonanciája eredményez. Akusztikus zavarzóna akkor jelentkezik, ha az általunk használt hanghullám hullámhossza és a buborékok átmérője nagyjából azonos. Mivel a víz alatt előforduló gázbuborékok méretét a gáz oldhatósága és a buborék méretéből adódó felhajtóerő határozza meg, ez megadja a gáztartalom kimutatására szolgáló mérőeszközök jól használható frekvenciatartományát is.

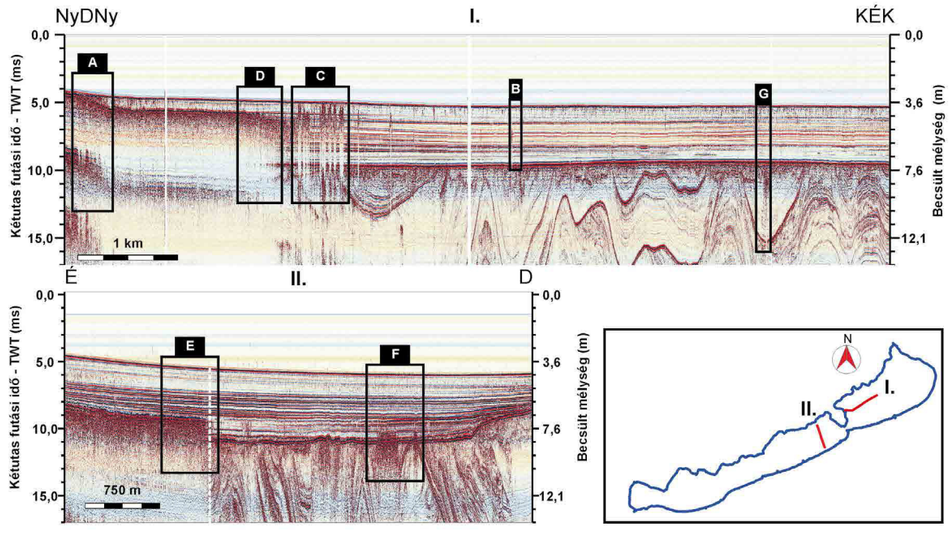
A balatoni gázkutatás szempontjából nagy szerencse, hogy a tó geofizikai kutatásai során legtöbbet használt akusztikus mérőműszer, az IKB-Seistec™ éppen az 1–10 kHz közötti frekvenciasávban működik. A kísérleti tapasztalatok alapján ez a tartomány szinte tökéletesen megfelel a Balaton vízmélysége mellett az iszapban előforduló gázbuborékméretekhez tartozó rezonanciafrekvenciáknak, melyek nagyjából 1,2–12 kHz között mozognak. Így a szisztematikus földtudományi kutatómunkáknak köszönhetően elkészülhetett a „magyar tenger” iszapjának első átfogó gázossági térképe.

Hol találkozunk gázokkal a tó alatt?

A partoktól a mélyvíz irányába

A Balaton fenekén a híg iszapos üledékek és a keményebb, homokos mederfenék térbeli előfordulása egyáltalán nem véletlenszerű. Az uralkodó északi szelek keltette hullámzás és a tó áramlatai átrendezik az iszapot, amelynek eredményeként a durvább szemű homok főleg a déli partnál, míg a híg iszapos üledékek inkább az északi part közelében rakódnak le. A természet mellett az ember is jócskán végez ilyen átalakító munkát, amikor a strandokat feltölti, az iszapot kikotorja, vagy épp olyan, a parti áramlásokat megbontó mólókat, kikötőket épít, melyek mögött a híg iszap megreked és felhalmozódik.

Ahogy a tavi üledék minősége, úgy az iszapgázok térbeli eloszlása is mintázatokat mutat. Az iszapban megjelenő legfelső gázbuborékos zóna – vagy más néven iszapgázfront – a partoktól a nyílt víz irányába jellegzetes képet mutat a tavi geofizikai fel-



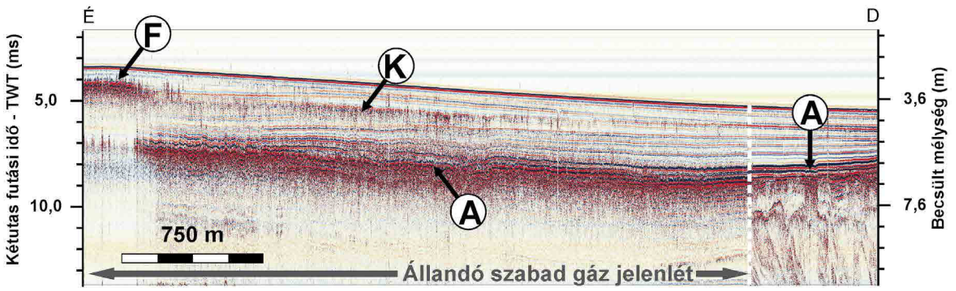
A balatoni iszapgázok akusztikus mintázatainak térbeli rendeződése. Vertikális torzítás kb. 1:180

vételeken. A partokhoz közel az iszap felső részében sokkal gyakoribbak a gázbuborékos zónák, mint a nyíltvízi területeken, és folytonosságuk is többnyire látványosan csökken a nyílt víz irányába. A fentiekkel összhangban, a partoktól távolodva a legfelső gázfront mélysége fokozatosan nő. Amíg a partokhoz közel gyakorlatilag már az iszap legtetején találkozunk gázzal, addig néhány kilométerre a partoktól a buborékok okozta akusztikus anomáliák többnyire az iszapon belül, vagy az iszap alsó részében jelennek meg.

A helyzetet bonyolítja, hogy a Balatonban eltérő mélységekben nem egy, hanem egyszerre akár három különböző gázfront is létezhet. Ezek egymást váltva, vagy egymás mellett felbukkanva, együttesen határozzák meg az általunk észlelt gázfront tényleges mélységét. Épp ezért a Balaton alatti gázszinteket érdemes az iszapon belüli elhelyezkedésük alapján csoportosítani. Ennek megfelelően beszélhetünk felső, középső és alsó gázszintről. A gázszintek megjelenése térben és időben is változó, de előfordulhat, hogy lehetőségünk van mindhárom szintet együtt is megfigyelni.

Bár a Balatonban három különböző gázszint is létezik, az akusztikus szelvényeken általában csak egy-egy szint látható. Ennek az az oka, hogy a legfelső szint többnyire teljesen visszaveri vagy elnyeli a kutatásoknál használt „ultrahang” jelet, ezzel „kitakarja” az alatta levő további gázszintet. A mélyebb szintek csak akkor válnak láthatóvá, ha a felette lévő szintek hiányoznak, vagy nem teljesen folytonosak. Ilyenkor a felszakadozó gázfrontok gázmentes szakaszaiban megjelenhetnek a mélyebb szintekről visszaérkező akusztikus jelek.

A térképezések során az első azonosított gázszint mélysége attól függ, hogy a mérések során a három gázszint közül éppen melyiket látjuk. Ez a partok közelében általában a felső gázszint, míg a nyílt víz irányába haladva fokozatosan előbukkannak, majd a felső gázszint eltűnésével dominánssá és jól követhetővé válnak a középső és az alsó gázszintek is. A tó nyugati felének északi részén, a partoktól távolabb az alsó gázszint a domináns. Ezzel szemben a keleti oldalon, a felső iszapgázoktól mentes területeken többnyire már az egész iszapot gázmentesnek látjuk. Itt a tó



A Balatonban előforduló három különböző gázszint

F: felső gázszint
K: középső gázszint
A: alsó gázszint

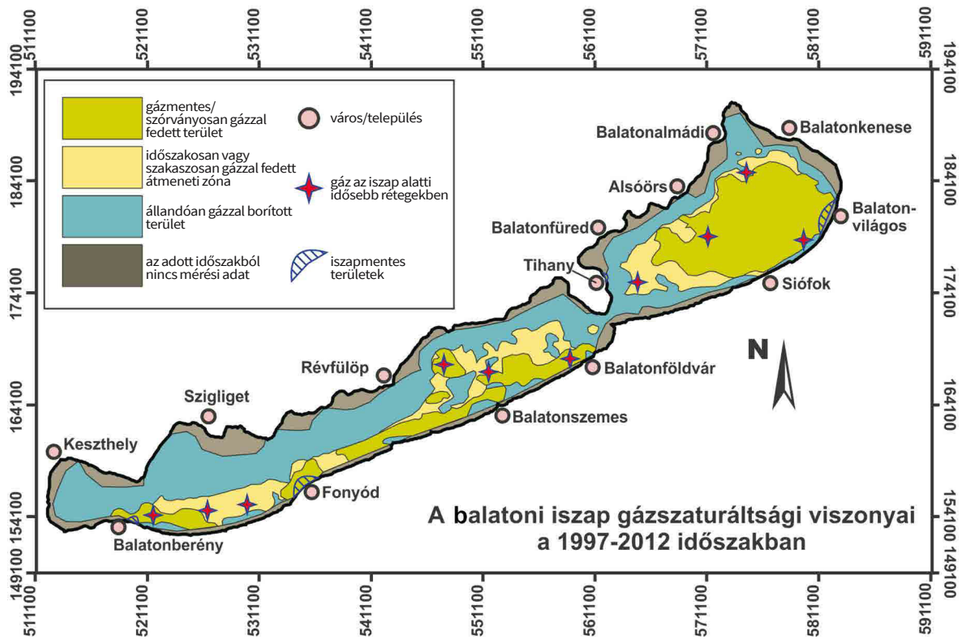
Vertikális torzítás kb. 1:140

belsejében szinte kizárólag csak ott találkozunk gázzal, ahol azt a különleges földtani viszonyok lehetővé teszik.

Térképezzünk iszapgázt!

A balatoni iszapgázok előfordulása térképen is ábrázolható. Egy ilyen térkép elkészítéséhez a legfelső azonosítható gázfrontot érdemes vizsgálni. Egy jó térkép elkészítéséhez természetesen nem elég egyetlen időpontban vizsgálódni, hiszen nem csak a gáz pillanatnyi helyzetére, hanem a gázszintek esetleges időbeli változásaira is kíváncsiak vagyunk. Sajnos a teljes tó egyidejű felmérésére eddig nem volt mód, épp ezért a térképezés technikailag úgy oldható meg, ha méréseinket egy hosszabb időszakra nézve vizsgáljuk és összesítjük. Ezzel a módszerrel olyan áttekintő térkép készülhet, amely a gázelőfordulások mellett azok változékonyságát is feltünteti.

A Balaton esetében az 1997 és 2012 közötti időszakra készült ilyen térkép. Ezen a térképen az látható, hogy a Balaton területe gázborítottság szempontjából három különböző részre oszlik. Vannak területek, ahol a mérések során a gáz mindig is jelen volt (türkizkék), más területeken a gáz időben változó mértékben és/vagy mélységben fordult elő (sárga), míg a tó egyes részein (zöld zóna) a tavi iszapban gyakorlatilag sohasem, vagy csak nagyon szórványosan találkozhattunk szabad gázbuborékokkal. Ilyen „gázmentes” területek a keleti medence belső részei, valamint a tó déli partja mentén húzódó néhány kilométeres sáv, a Tihanyi-szoros kivételével. Ezzel szemben „örök gázmezőnek” bizonyult a tó északi partja mentén követhető 2–3 km-es sáv, illetve a tó nyugati felének durván kétharmada. Utóbbi esetében a stabil gázjelenlét elsősorban az iszap alsó részében található



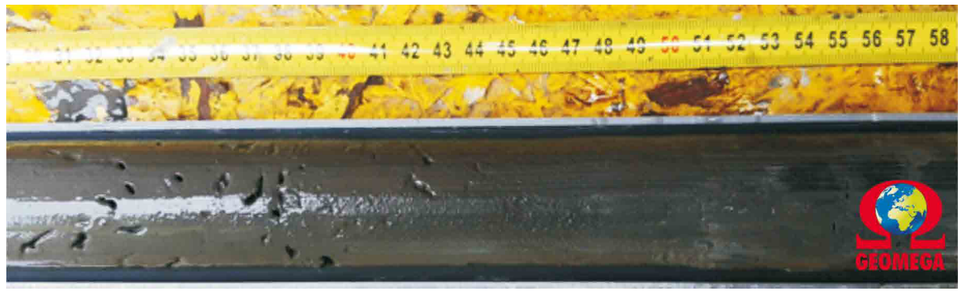
A balatoni iszap gázanomália térképe

gázfrontokhoz kötődik, amit a nyár vége felé és a partokhoz közeledve gyakran elfednek a sekélyebb gázfrontok.

A gázrendszer időbeli változása

Egy kis „gázfizika”

A gáz adta mintázatok megjelenéséhez szabad gázbuborékokra van szükség. A szabad gázbuborék egy, az iszapon belül található tényleges buborék, amely akkor képes stabilan az üledékben maradni, ha a gáz koncentrációja meghaladja a körülötte lévő folyadékban oldható gázok mennyiségét (az oldhatósági küszöböt), és a buborék mérete kellőképpen kicsi ahhoz, hogy a rá ható felhajtóerő ne legyen képes kimozdítani az iszapból. Ez azt jelenti, hogy ha mindig ugyanazzal a geofizikai műszerrel végezzük a gázok „ultrahangos” vizsgálatát, akkor a gázszintek időben változó megjelenésének fő okát, a gáz vízre vonatkozó oldhatóságának vagy a gáz koncentrációjának időbeli megváltozásában kell keresnünk.



Az iszapból távozó néhány milliméteres gázbuborékok helye a Velencei-tóból vett üledékmintán. Hasonló buborékok okozhatják a balatoni akusztikus szelvények ismert gázanomáliáit is

Tételezzük fel azt, hogy a gázkoncentráció időben állandó, vagyis minden mélységben rögzített mennyiségű gáz van jelen. Ilyenkor a gázszintek időbeli változékonysága pusztán az oldhatóság kérdése. De mitől is függ az oldhatóság? Az oldható koncentráció arányos a folyadékban fellépő nyomással. Az arányossági tényező a gáz típusától, az oldat hőmérsékletétől és sótartalmától függ. Vegyük a Balaton vízének sótartalmát és az üledékben előforduló gáz mennyiségét állandónak. Mindezek után két tényezőnk maradt: a hőmérséklet és a nyomás. A hőmérséklet növekedése többnyire csökkenti az oldhatóságot, míg a nyomás esetében általában fordított a helyzet. Ezek után, már csak azt kell megnézzük, hogy a balatoni iszapban időben hogyan változnak a hőmérséklet- és nyomásviszonyok.

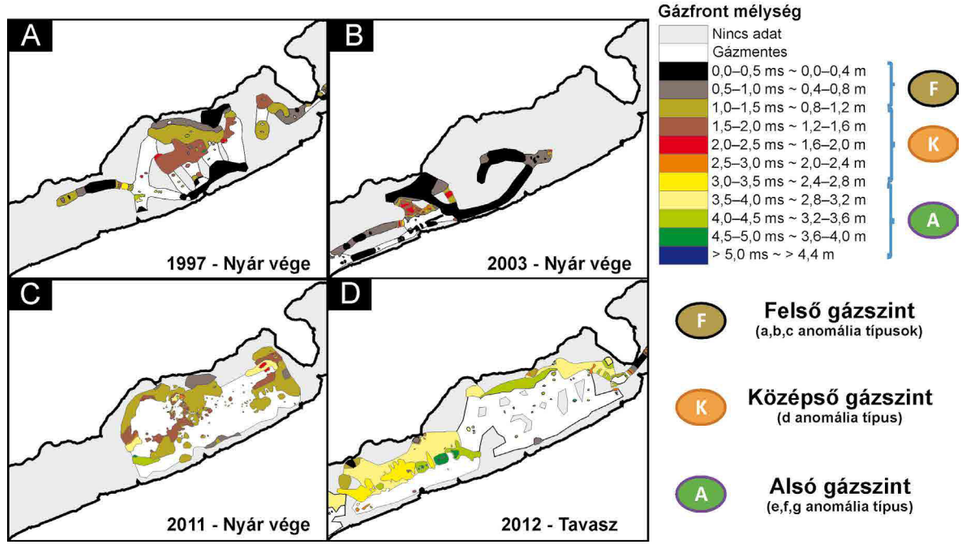
Kezdjük a nyomással! A Balatoni üledékekben lévő nyomás alapvetően két dologtól függ: az aktuális légnyomástól és a felette elhelyezkedő vízoszlop súlyától (vagyis az aktuális vízállástól). Míg a légnyomás nem mutat hosszú távú évszakos trendeket, addig a Balaton vízállása közismerten inkább a téli és tavaszi időszakban magasabb, míg a nyár folyamán, egészen kora őszig általában fokozatosan apad. A Balatonra jellemző vízszinteket és légnyomásváltozásokat figyelembe véve megállapítható, hogy a nyomásviszonyok megváltozása az oldhatósági viszonyokat mindössze néhány százalékban képes csak befolyásolni.

Nem így van ez azonban a hőmérséklettel! Az iszaphőmérséklet-mérésekből kiderül, hogy az április és október közötti időszakban – amikor az akusztikus méréseink zajlottak – a tavi üledékekben durván 20 °C-os hőmérsékletingadozás mutatható ki. Ez az ismert oldhatósági modellek alapján akár 50%-kal is képes megváltoztatni a víz gázfelvevő képességét! Az iszap hőmérséklete tompítva és néhány naptól néhány hetes késéssel követi a légköri és vízhőmérsékleti trendeket. Az iszap körülbelül augusztus végéig melegedik, majd ezt követően, egészen tavaszig, az iszapot a felette lévő víztest már hűti. Mindezekből az következik, hogy az iszapon belüli oldhatósági viszonyok tavasszal lesznek a legkedvezőbbek, majd a nyár folyamán a gázok oldhatósága fokozatosan csökken, így a gázbuborékok mennyisége az iszapban folyamatos nőhet. Azaz, az iszapban tavasszal kevesebb, míg nyár végén és kora ősszel több szabad gázbuborék tud felhalmozódni, vagyis a nyár végén több és jóval kiterjedtebb gázanomáliát várhatunk, mint a tavaszi időszakban.

Itt a bubi, hol a bubi?

A fenti elméleti fejtegetéshez vajon hogyan viszonyulnak a tényleges mérési eredmények? Ha alaposan végig bogarásszuk az elmúlt 25 év vízi szeizmikus szelvényeit, és megkeressük rajtuk az összes kis „lidércet”, akkor már elsőre szembetűnik, hogy a különböző időszakokban mért szelvényeken a gázfrontok alakja, esetleg mélysége nem mindig azonos. Sőt, sokszor azt fogjuk tapasztalni, hogy különböző években mért, de egy közös kereszteződési ponton átmenő két szelvény egyikén láthatunk gázt, míg a másikon ugyanott nem. Mindez jól mutatja, hogy a balatoni gázrendszer időben nem állandó, a gázos zónák évről-évre, vagy akár az egyes éveken belül is változtathatják kiterjedésüket, mélységüket és alakjukat.

A méréseink legtöbbje kezdetben nyár végén zajlott, a gázok szezonális változását pedig csak a 2010-es évek második felétől kezdhettük vizsgálni, amikor a Balaton középső medencéjére nézve már nyár végi (augusztusi és szeptemberi) és tavaszi – nyár elejei (májusi és júniusi) mérésekkel is rendelkeztünk. Ezek a mérések szépen mutatták, hogy az igen alacsony vízállással és meleg száraz idővel jelle-



A középső tómedence gázossági viszonyai 1997, 2003 és 2011 nyarának végén és 2012 tavaszán

mezhető 2003-as évben a gázfrontok sokkal kiterjedtebbek voltak, mint bármelyik más év augusztusában, illetve hogy igen extrém körülmények mellett a gázokat nagyon sekély mélységben, gyakorlatilag már a tófenéknél megtalálhatjuk. A többi nyár végén (1997 és 2011) kissé más mintázattal, de elég hasonló kiterjedésben és mélységben jelentek meg a gázok. A gázborítás nagy volt, és a gázfrontok igen sekély mélységben jelentek meg.

Nem így volt ez 2012 tavaszán! A felmérés ekkor határozottan kisebb mennyiségű gázt talált. A sekély mélységben jelentkező gázok a tómedence jelentős részéről eltűntek, és csak az iszap alsó harmadában lehetett a gáz jelenlétére utaló mintázatokat kimutatni. E tényekből két dolog körvonalazódott. Az egyik, hogy a balatoni iszapgázok követik a fizikai összefüggésekből levezetett szezonális trendeket, a másik pedig, hogy az iszap alsó részében található gázfrontok meglehetősen stabilak, annak ellenére is, hogy ezekre a gázokra hat mindenkor a legnagyobb hidrosztatikai nyomás, és olyan mélységben vannak, ahol általában az iszaphőmérséklet is alacsonyabb. Ez azt jelenti, hogy a tavaszi és nyár elejei időszakban, a kérdéses helyeken az iszap alsó részében érdemben nagyobb gázkoncentrációkkal találkozhatunk, mint az iszap többi részében.

Honnan származik a gáz, és milyen lehet az összetétele?

A Balatonban több gázszint is előfordul, melyek részben egy időben, részben pedig időben eltolva, egymás mellett jelentkeznek. Pusztán logikai alapon az egyes szintek gáztartalmára nézve két modell lehetséges: a gázszintek vagy különkülön gázforrásokkal rendelkeznek, vagy részben vagy egészben azonos forrásból táplálkoznak, és az egyes szintek egymással összekapcsolt rendszert alkotnak. Mivel a felszín alatti gázok kisebb sűrűségűek a víznél (a gázbuborékok felfelé úsznak), emiatt kézenfekvő, hogy az egyes gázszintek forrását vagy magában a gázszintben, vagy annál mélyebben kell keresnünk. A gáz felülről a mélyebb rétegekbe csak nagyon csekély mértékben és oldott állapotban, a molekuláris diffúzió révén képes vándorolni. Mindezek fényében nem tévedhetünk nagyot, ha azt feltételezzük, hogy a gázszintek összekapcsoltsága csak alulról fölfelé lehetséges.

A felső gázszint eredete

A Balatonban kétfajta gáz van jelen: az egyik az iszapban lerakodó szerves anyag lebomlásából származó, biogén metán vagy más néven mocsárgáz, míg a másik a savanyú vizes, Balaton alatti forrásokkal a tóba érkező szén-dioxid.

A balatoni iszap szervesanyag-tartalmát és a benne élő szervezetek gáztermelő képességét – amely a mocsárgáz képződésének alapja – Csermák Kálmán és Máté Ferenc vizsgálta a 2000-es évek elején. Arra az eredményre jutottak, hogy a partok közelében az iszap szervesanyag-tartalma jóval magasabb (1,7–5%), mint a partoktól távoli, nyílt vízi területeken. A nyílt vízi régióban ugyanis Cserny Tibor és munkatársai szerves anyagban alapvetően szegény mésziszapot mutattak ki, amely a vízből kémiai kiválással keletkezik. Ennek a szervesanyag-tartalma mindössze 0,5–2%. A keleti tómedence szisztematikus üledékvizsgálata emellett kimutatta azt is, hogy az iszap felső részében található szerves anyag nagyobb mennyiségének köszönhetően a partok közelében – azok közül is inkább az északi partnál – mind az iszap gáztartalma, mind a benne zajló mikrobiális gáztermelés mértéke nagyobb. A vizsgálatok alapján a metán jelenlétét és termelődését az északi parttól 1300 m távolságig, a déli parttól pedig 750 m távolságig lehetett kimutatni, ráadásul az északi oldalon a metántartalom átlagosan 10–15-ször, a metántermelés pedig 30-szor nagyobbnak bizonyult, mint a déli part esetében. A partok mentén az iszapból kitaposható gázminták laboratóriumi vizsgálata 70–80% metántartalmat mutatott ki, ami azt jelzi, hogy az elsődleges iszapgáz a partok és a tófenék közvetlen közelében a mocsárgáz.

Mindez sok mindent megmagyaráz, és nagyon jól összecseng az „ultrahangos” megfigyeléseinkkel. A fentiek fényében kijelenthetjük, hogy a partok közelében és az iszap felső részében jelentkező gázfrontokat a mikroorganizmusok termelte mocsárgáz okozza. A gázfront folytonosságát a hozzáférhető szerves anyag, a bakteriális aktivitás és az iszap „lágysága” határozza meg. A partnál nagyobb a gáztermelés, ezért a gázkoncentráció meghaladja a mindenkori oldhatósági küszöböt, vagyis összefüggő gázfrontokat kaphatunk az akusztikus szelvényeken.

A nyílt víz felé azonban csökken a szerves anyag mennyisége és ezzel a gáztermelés is, vagyis a csökkenő gázkoncentráció és a nagyobb vízmélységgel járó magasabb oldhatóság a gázfrontok felszakadozásához és eltűnéséhez vezet. Az átmeneti zónában a változó hőmérséklet, vízállás és bakteriális aktivitás mellett a gázbuborékok időszakosan megjelenhetnek, de a gáz idővel, illetve erős mechanikai hatásra (például erős hullámzás) képes távozni az üledékekből. Utóbbi azt is megmagyarázza, hogy miért látjuk a gázfrontot sokszor kissé a tófenék alatt. Ennek az az oka, hogy a tó egyes részein, az iszap tetején egy rendkívül lágy, folyós üledékréteg található. Régen ezt hívták lutyának. A lutya tulajdonképpen egy „iszapoldat”, úgynevezett szuszpenzió, ami átmenetként van jelen a szilárd üledék és a folyékony víztest között. Ez a híg réteg a gázbuborékokat nem képes tartósan megtartani, ezért a gázfrontok csak ez alatt, a már sűrűbb, szilárdabb iszaprétegben jelentkeznek, míg az iszap felső része gázmentes marad.

A felső gázfront időbeli változásai is illeszkednek ebbe a modellbe, hiszen a gázfrontok nyári végi nagyobb kiterjedését és sekélyebb mélységét az ekkor elpusztuló plankton és egyéb szervezetek hatására intenzívebbé váló metántermelés is elősegíti. Mint Csermák és Máté kimutatta, az északi és déli oldal aszimmetriája is megjelenik a metántermelésben, ami részben az északi szelek által végzett üledékosztályozó munka, részben pedig az ebből is adódó eltérő bakteriális aktivitás következménye lehet. Az sem kizárt, hogy egyszerűen az iszapréteg eltérő vastagsága áll a különbségek háttérében. Az északi oldalon ugyanis vastagabb a tavi iszap, ami térfogatában is több szerves anyagot tartalmaz, és ezáltal nagyobb gáztermelődést tesz lehetővé.

Honnan származhat a középső gázszint?

A középső gázszint legtöbbször ott jelenik meg, ahol a parti sekély gázfrontok fokozatosan feloszlanak, és átkerülünk a szerves anyagban szegényebb, nyílt vízi üledékekbe. Itt a gázok adta mintázat is jellemzően megváltozik, a folytonos gázfrontok helyett inkább a szeizmikus képet „elmaszatoló”, úgynevezett akusztikus zavarok vannak jelen. A gázszint rendkívül nagy változékonysága azt jelzi, hogy ebben a szintben az oldható gáz-

Hogyan segít az atomrobbantás?

A tó üledékeiben – bár nagyon kis mennyiségben – megjelenik a cézium 137-es izotópja, amely a természetben normál körülmények között nem fordul elő. Ez az izotóp kizárólag az atomrobbantások és az atomerőmű-balesetek nyomán került a légkörbe, majd a légkörből az üledékekbe. Mindez azt jelenti, hogy az üledékes rétegsorban olyan mélységig találhatjuk csak meg ezt az izotópot, ameddig az iszap az elmúlt 50–80 év során képes volt átkeveredni. A Balaton esetében ez a mélység nem több mint 20–25 cm.

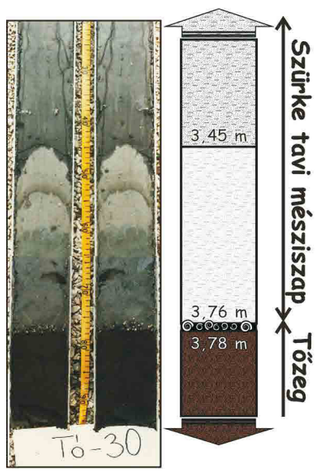
mennyiség és a tényleges gáztartalom közel egyenlő. Elméletileg nem lenne kizárható, hogy ezt a gázfrontot is a szerves anyag lebomlása táplálja, ugyanakkor ehhez a szerves anyagnak valahogyan a mélybe kellene jutnia, és bele kellene keverednie az iszapba.

A balatoni hullámokat látva sokan gondolják még ma is, hogy a Balaton iszapja képes olyan mértékben átkeveredni, hogy a „tegnap” elpusztult élőlények maradványai akár az iszap alsó részébe is lekerüljenek. A helyzet azonban az, hogy a tó 2 méternél mélyebb vizű területein ilyen átkeveredést soha nem tapasztalunk. A szeizmikus szelvényeken látható tavi iszap igen jól rétegzett, nincsen nyoma átkeveredéseknek. Emellett a radioaktív izotópos vizsgálatok is azt mutatják, hogy a mindenkori keveredés az iszap felső 10–20 centiméterére korlátozódik.

A felszín felől tehát nem érkezhet szerves anyag utánpótlás az iszap belső rétegeibe! Ha a gáz az iszapban található szerves anyagból származik, akkor viszont annak mennyisége az iszapban elraktározott szerves anyag mennyisége révén erősen korlátozott lesz. Az iszap alsó részében ugyanakkor lehetnek még további gázforrások! Kezdeti időszakában a Balaton ugyanis sekély vizű láp volt, amelyben nagy mennyiségű tőzeg halmozódott fel. Ezeknek a tőzegrétegeknek a szerves anyaga pedig ma is ott pihen az iszap alatt. A tőzeg anyagából mocsárgáz keletkezhet, amit azután a felhajtóerő fel is tud vinni az iszap belsejébe. A középső gázszint múlékony szabad gáztartalma tehát a mélyebb rétegekből származhat, és alapvetően nem helyben képződő metán. Ennek a gázszintnek a változékonysága az oldhatóság és a feláramló gázok koncentrációjának törékeny egyensúlyán múlik, emiatt a középső gázszint erősen szezonális jelenség.

Gázok az iszap aljában

Az iszap alsó részében található gázszint elsődleges forrásai szintén a tőzegrétegek lehetnek. Cserny Tibor és munkatársai tavi fúrások segítségével részletesen térképezték az iszap alsó részében található tőzegek elterjedését, amely nagyon szépen egybevág az iszap alsó részében található stabil gázfrontok elhelyezkedésével. Mind a tőzeg, mind pedig az iszap alsó részében található gázfrontok elsősorban a tó északi felében vannak jelen, azon belül is a tó nyugati felében a legjellemzőbbek. Ugyanitt találjuk a legidősebb tavi üledékeket is, vagyis a Balaton kezdetektől vízzel borított medencerészeit.



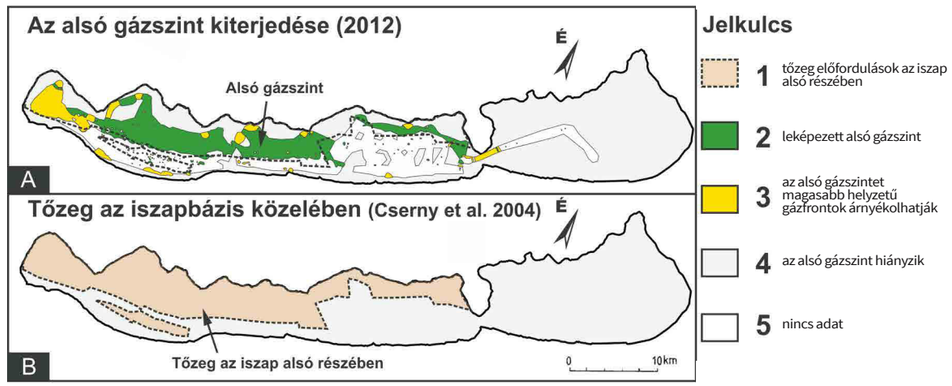


Balra: az iszap alsó részében található tőzegréteg a Tó-30 balatoni mederfúrásban. Jobbra: a Balaton környéki berkekben található tőzeg Alsópáhok mellett

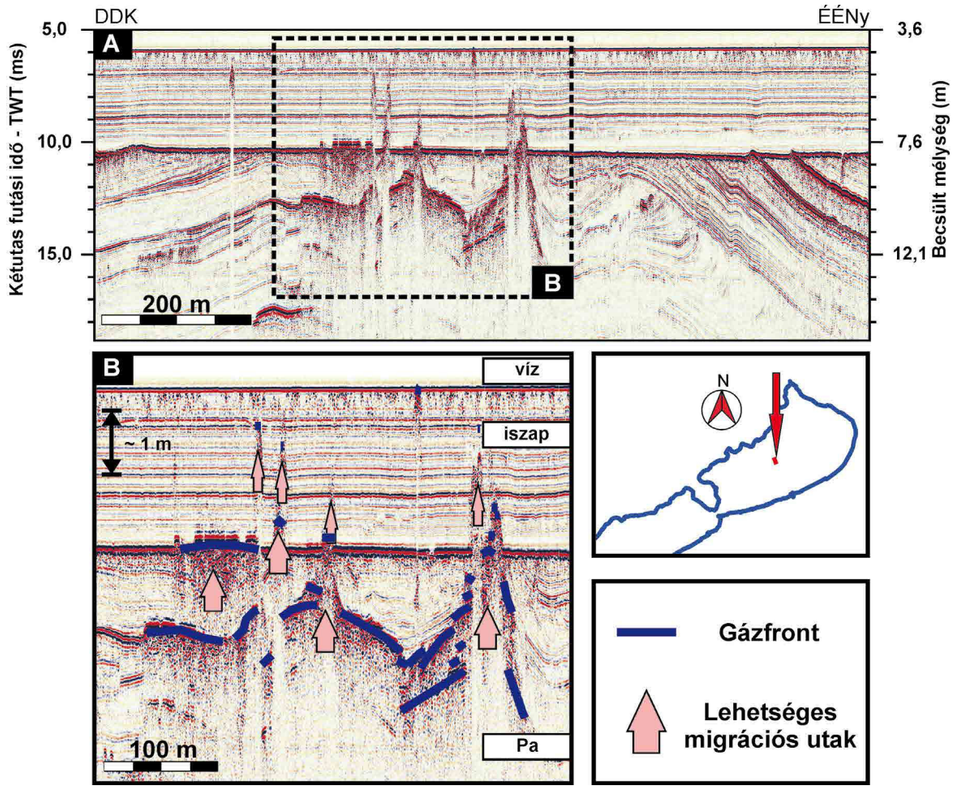
Az állandó gázfrontok és a tőzeg együttes jelenléte két dolgot is jelenthet. Az egyik, hogy az iszapgázoknak a tőzeg lehet a forrása, tehát a tőzegben lehetséges a mocsárgázképződés, a másik pedig, hogy a tőzeg porózus, szivacsos szerkezete képes lehet megtartani a mélyebbről érkező gázbuborékokat, melyek gázfrontokat hoznak létre az iszap alsó részében. A tőzeg tehát egyszerre lehet a gázok forrása, és a mélyebbről érkező buborékok megtartására szolgáló szivacsos, porózus tér.

Vannak azonban olyan helyek is a Balatonban, ahol a fúrások alapján tőzegnek nyoma sincs, és mégis találkozunk gázzal az akusztikus szelvényeken. Sőt, néhol olyat is láthatunk, hogy a gáz közvetlenül az iszap legalján, vagy még az iszap alatt is megjelenik. A jelenség arra utal, hogy itt a gázoknak a tőzegtől és az iszaptól is független forrása van. Ez a szén-dioxid, amely a mélyből érkező „forrásvizekkel” kerül a Balaton alá. A gázrendszernek tehát egy mélységi eredetű forrása is megerősítést nyerhet! A hevesekről szóló térképek alapján ez a forrás kifejezetten fontos lehet, éppúgy az északi partok mentén, mint a tó belső részein is. Ahol a tavi iszap alatt található idősebb kőzetekben megjelenik a gáz, ott felette sokszor az iszapban is találunk kisebb-nagyobb kiterjedésű gázfrontokat, melyek egyre sekélyebb helyzetben települnek egymás fölé.

Mindez a mélyebb rétegek felől történő gázfeláramlás egyértelmű jele. A szelvényeken látható gázmintázatok egyrészt követik a rétegek adta feláramlási pályákat, vagyis ott fognak a gázok megjelenni, ahol a rétegek felfelé vezetik őket, de még sokkal látványosabb gázjelenlétet tapasztalunk a tó alatt futó nagyobb törésvonalak mentén (lásd a 4. fejezetet), ott, ahol az egymás mellett elmozdított kőzettestek között a törésvonalak segítségével fel tud áramlani a gáz. Ilyen helyek



Az alsó gázszint és az iszapban található tőzeg kapcsolata

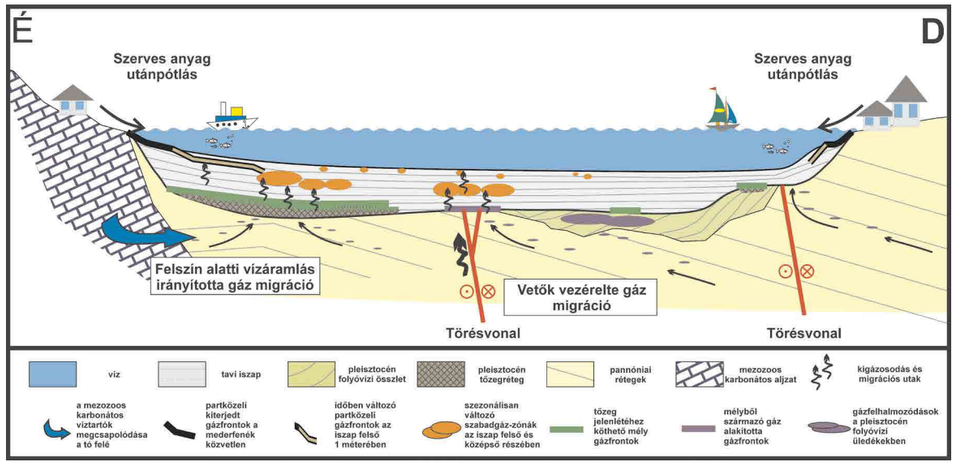


A mélységi gázok feláramlása a mélyebb rétegekből az iszap belsejébe, majd az iszapon keresztül a vízfelszínre

vannak például a Balaton középső medencéje alatt, továbbá Balatonkenesétől DNy-ra, Alsóörs–Balatonfüred irányában, jó közelítéssel annak a vonalnak a közvetlen folytatásában, ahol Entz Béla az 1950-es, 1960-as években a part menti heveseket azonosította.

A balatoni gázrendszer elvi modellje

Ahogy egy terület földtani felépítését, szerkezeti viszonyait, úgy a tavi gázrendszert is egy elvi szelvény mentén lehet a legjobban szemléltetni. Egy ilyen „mesterszelvény” szépen mutatja a gázszaturált zónákat és az azok felső határát jelző gázfrontokat. A partok közelében a feketével és barna színnel jelzett sekély gázfrontokat találjuk, melyek elsődleges forrása a tóban ülepedő és felszíni vízfolyásokkal a tóba érkező szerves anyag, míg másodlagosan az iszapon belül képződő gázok és a mélyebb rétegből felfelé igyekvő gázbuborékok is táplálhatják őket. Ez a felső gázszint mind a déli, mind az északi part esetében a hígan folyós iszap alsó határáig terjed, és a parttól távolodva egyre mélyebbre süllyed, miközben fokozatosan felszakadozva átmegy az iszap középső részén található, időben rendkívül változékony középső gázszintbe (narancssárga foltok). Utóbbi minden bizonnyal alulról táplált rendszer, és múlékonyságát az oldhatósági viszonyok és a hozzáférhető gázkoncentrációk szabályozzák. Ugyancsak az oldhatósági viszonyok következménye, hogy a déli parton a felső és középső gázszinthez tartozó „szellemképek” kiterjedése rendkívül



A Balaton alatti gázrendszer „mesterszelvénye”

limitált. A gyorsabban mélyülő víz és a tavi áramlatok iszapátrendező hatása is ennek az aszimmetriának az irányába mutat.

A szelvényen lila és zöld színekkel jelennek meg az iszap alsó részében található gázfrontok, melyek alatt fekete nyilacskák jelzik, hogy ezeknek a gázfrontoknak elsődleges forrásai a mélységi feláramlásokkal érkező gázok lehetnek. Ilyen gáz a Bakony–Balaton-felvidék irányából, a felszíni alatti vizek által szállított szén-dioxid. Az oldott gázt vagy szabad buborékokat tartalmazó vizeket a kőzetrétegek és törésvonalak vezetik a tó alá, és az iszap alsó részéből fokozatosan a középső majd a felső zónába juthatnak. A gázrendszer tehát alulról felfelé összekapcsolódik. A tó északi oldalán alternatív forrást és az emelkedő gázok számára „pihenőt” jelentenek a kora-balatoni tőzegrétegek, melyek az ábrán feketén sraffozott barna rétegekként vannak feltüntetve.

Az egész gázrendszer a földtani, biológiai és fizikokémiai folyamatok komplex és érzékeny egyensúlyának eredménye, amelyről csak az olyan nagy felbontású, és rendkívül kis gáztartalomra is érzékeny eszközöknek köszönhetően szereztünk tudomást, mint amilyenek a gáz okozta „szellemképeket” észlelő vízi szeizmikus mérőműszerek.

Ajánlott irodalom

Cholnoky J. 1937: Balaton. – Franklin Társulat, Budapest, 191 p.

Csermák K. & Máté F. 2004: A Balaton talaja. – Veszprémi Egyetem Georgikon Mezőgazdaságtudományi Kar kiadványa, Veszprém, 142 p.

Cserny T. 2002: A balatoni negyedidőszaki üledékek kutatási eredményei. – Földtani Közlöny 132/különszám, 193-213.

Davis A. M. 1992. Shallow gas: an overview. – Cont. Shelf Res. 12, 1077-1079.

Floodgate G. D. & Judd A. G., 1992: The origins of shallow gas. – Cont. Shelf Res. 12, 1145-1156.

Lóczy L. 1913: A Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése. – In: Lóczy L. (ed): A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. I. kötet, 1. rész, 1. szakasz, Kilián F. Bizománya, Budapest, 617 p.

Sinke A. J. C., Cornelese A. A., Cappenberg T. E., Zehnder A. J. B. 1992: Seasonal variation in sulfate reduction and methanogenesis in peaty sediments of eutrophic Lake Loosdrecht, The Netherlands. – Biogeochemistry 16, 43-61.

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.

Visnovitz F. 2015: Balatoni vízi szeizmikus szelvények környezetgeofizikai vizsgálata. – PhD értekezés, ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Budapest, 165 p.

Visnovitz F., Bodnár T., Tóth Zs., Spiess V., Kudó I., Timár G., Horváth F. 2015: Seismic expressions of shallow gas in the lacustrine deposits of Lake Balaton, Hungary. – Near Surface Geophysics, 13, 433 446, doi: 10.3997/1873-0604.2015026.



Worthenia lóczyi

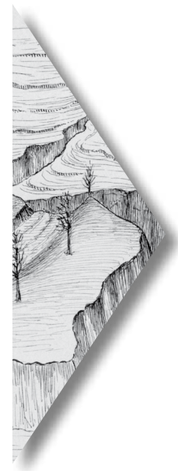
MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

Varga György

13

A Balaton vízjárását befolyásoló tényezők

A Balaton és közvetlen környezete – mint kiemelkedő jelentőségű nemzeti kincs – hosszú ideje áll a szakmai és a szélesebb érdeklődő közvélemény figyelmének homlokterében. Hogy mennyire régóta, azt mi sem bizonyítja jobban, mint a Balaton monográfia, amelyben Lóczy Lajos hosszasan beszámol a tó vízállásváltozásairól, a Sió-zsilip vízállásra gyakorolt hatásairól, valamint arról, hogy a közvélemény már száz évvel ezelőtt is késhegyre menő vitát folytatott az ideális vízszintről. Az elmúlt évtizedekben azonban nem csak a vízszinttel, de a víz minőségével is akadtak problémák. A tó vízminőség-romlásának megállítása, javítása céljából az elmúlt mintegy három évtizedben számos, tudományos kutatási eredményekre támaszkodó döntés történt a vízminőség-védelem és -szabályozás területén. Mindezek mellett ebből a fejezetből azt is megtudhatjuk, hogy pontosan milyen tényezők határozzák meg a Balaton vízháztartását és vízjárását és hogy milyen feladatok állnak előttünk, hogy még ükunokáink is élvezhessék e csodálatos tavat.



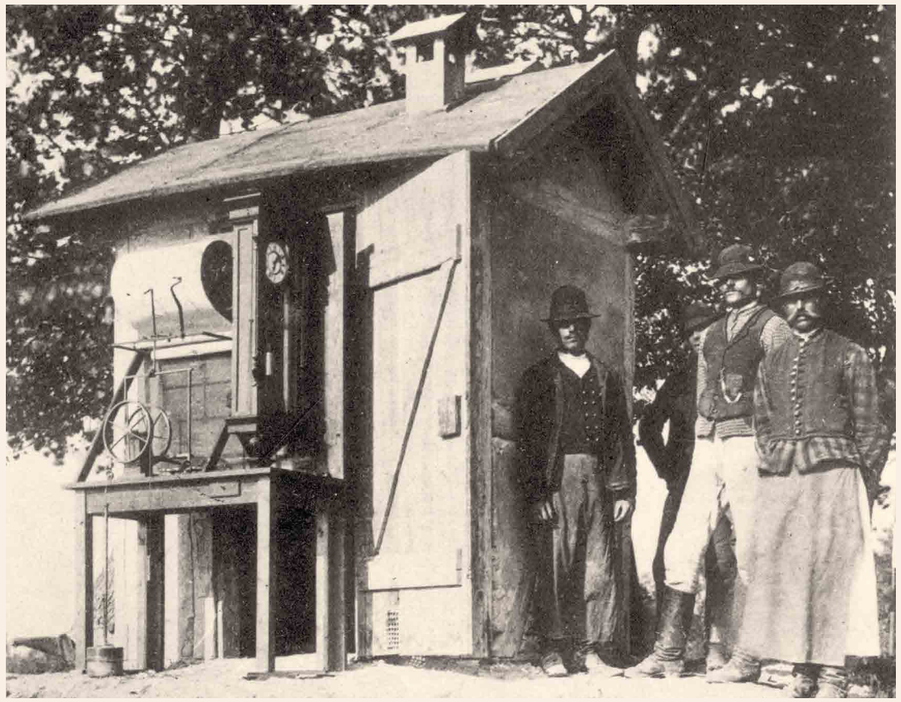
A Balaton vízállása

Az alkotmányos kormány 1867 aug. 26.-án rendeletet bocsájtott ki a Sió-zsilip kezelésére és ennek felügyeletét Veszprém vármegye közigazgatására bízta.

Megállapították, hogy a legalacsonyabb víz 0 legyen, de hogy a Siót mindig táplálhassa, elrendeltetett, hogy a Balatonban minden év november elsejétől a következő május elsejéig legföljebb 0,316 m magas tartalékvíz gyűjtessék össze s a Sióban mindig legyen annyi víz, hogy a zsilip alatt levő mérczén 0,63 m magas vízállás mutatkozzék. Ha azonban a tó a megengedettnél magasabbra emelkedik, akkor szabad több vizet is leereszteni. Az 1868 decz. 31.-én jóváhagyott szabályzat szerint a Sióban nem volt szabad 1,26 m-nél magasabb vízállást előidézni.

A szűk csatorna nem ereszthetett le többet 10 m3-nél másodperczenkint, kiöntés nélkül; ez a mennyiség 100 nap alatt csak 144 millimeterrel volt képes apasztani a tó vizét.

Az 1866. évi nagy leapadás idején sivatagszerű jelenségek mutatkoztak a délipart homokterületein; a berkek kiszáradtak, futóhomok sivított végig rajtuk. A közönség a szabályozást vádolta és szállómondása lett: „lopják a Balatont". Ennek ellenében 1879-ben annyira megáradt a tó, a zsilipkezeléshez fűzött reményeket meghiúsítva, hogy a víz 1,93 m-es magasságával elöntötte a partokat. Siófokon,



A Balatonon használt limnográf



A Balaton 1916. évi árvize a Keszthelyi sétatéren

Balatonfüreden vízalatt állott a parti moló és a sétatér. „Kiöntenek bennünket, mint az ürgét", „puskaport a zsilipnek", efféleképen szólt a haragos közvélemény. Nemcsak a hosszabb időközi nagy ingadozások, hanem ugyanazon évnek vízállása a Balaton két végén ellentétes kívánságokat támasztottak a tó vizének szabályozására nézve. Az 1888. évi zsilipkezelő szabályzattal különösen a 90-es években fellendült fürdővállalkozás nem volt megelégedve; 1903-ban nagyon leapadt a víz, ez a fürdőtelepeket jóhírükben kezdte veszélyeztetni; ekkor a Somogyi part érdekeltsége követelte különösen a zsilipszabályzat revizióját.

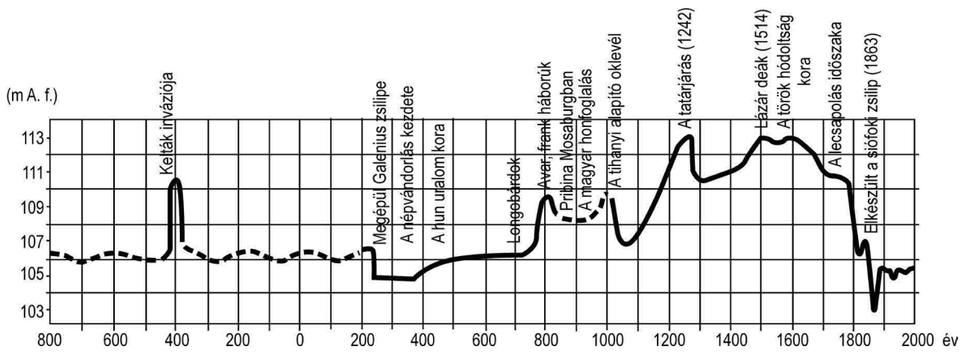
1904 jún. 22.-én Balatonfüreden népes értekezlet volt ebben az ügyben. Ezen a keszthelyi partvidék az 1888. évi szabályzat fenntartását kívánta és panaszkodott, hogy még a mostani alacsony víz sem kedvező a nagy rétségekre; a veszprémi, almádii, balatonkenesei és siófoki érdekeltség ellenben a víz bővítését és ezt előidézendő, a zsilipnek hosszabb ideig tartó elzárását követelte.

Az értekezlet vége felé felszólaltam én is, rámutatva: hogy a Sió-csatorna és ennek zsilipje a Balaton vízállását szabályozni nem képes, mert a víz járását a csapadékmennyiség, annak évszaki eloszlása és az elpárolgás, tehát klimatológiai tényezők intézik. Ráutaltam, hogy mennyire különbözik ezekben a Balaton két végének vidéke. Megjósoltam, hogy nemsokára, legközelebb körülbelül 10 év mulva a somogyi fürdőtelepek, amelyek most a vízállást magasabbra kívánják emelni, az árvíz ellen fognak panaszkodni. Ez be is következett 1915–1916-ban, amikor Keszthely, Balatonberény, Fonyód, Balatonboglár, Balatonvilágos villáit árvíz vette körül.

Részlet Lóczy Lajos A Balaton földrajzi és társadalmi állapotainak leírása *című könyvéből*

A Balaton napjainkig folyamatosan meglévő, egységesen összefüggő vízfelülete 6–8 ezer éve alakulhatott ki, vagyis a Balaton nemcsak geológiai, hanem limnológiai értelemben is igen fiatal képződmény.

A Balaton vízháztartását és vízjárását történelmének első, mintegy 7 ezer éves időszakában kizárólag természeti körülmények befolyásolták. A régészeti kutatások szerint az ember korán megtelepedett a tóparton és a vízszintingadozásoktól függően változtatta településeinek helyét, de a tó életébe nem avatkozott be. dig a klimatikus viszonyok változásának hatására a tó szintje megemelkedett és – a természetes kifolyási hely változó szintjének függvényében – többször elérhette a természetes hidrológiai egyensúlyt. A vízgyűjtőn nem történt olyan beavatkozás, amely a tó addigi vízháztartási viszonyait érintette volna. Mintegy 60%-os lehetett az erdős-cserjés terület aránya, a Zala és a déli parti mellékvizek alsó szakasza mocsaras volt, amely sok vizet párologtatott el. A hozzáfolyás csak mintegy fele volt a mainak, ugyanakkor a



A Balaton tartós vízállásainak görbéje i. e. 800-tól napjainkig

A Balaton fejlődésének második, máig tartó szakaszát az emberi beavatkozások napjainkig tartó következményei jellemzik. Egyes szerzők szerint az avarok (VII–VIII. század) már a vízelvezetéseket, mesterséges elöntéseket védőműként alkalmazták. Az első valószínűsíthető beavatkozás Galerius császár idején (III. század) történt, bár a Siófoknál épített Galerius-féle zsilip létezéséről megoszlanak a vélemények. Később, a legenda szerint a tatárdúlás hírére a tihanyiak elzárták a tó természetes lefolyását lehetővé tevő fokot és a megemelkedett vízszint szigetté formálta a Tihanyi-félszigetet.

A XIII. századig a partvonal és a vízszint alakulása lényegesen nem tért el a római kori állapottól. A XIV. századtól a XVII. száza- párolgás a maihoz volt hasonló. Ennek következtében a tóból lefolyás a XIV. század végéig csak időszakosan fordult elő.

A XV–XVII. században bekövetkezett csapadékosabb és hűvösebb időjárás (kis jégkorszak) hatására nagyobb hozzáfolyás és kisebb párolgás alakult ki, emelkedett a vízállás és gyakoribbá vált, nőtt a lefolyás.

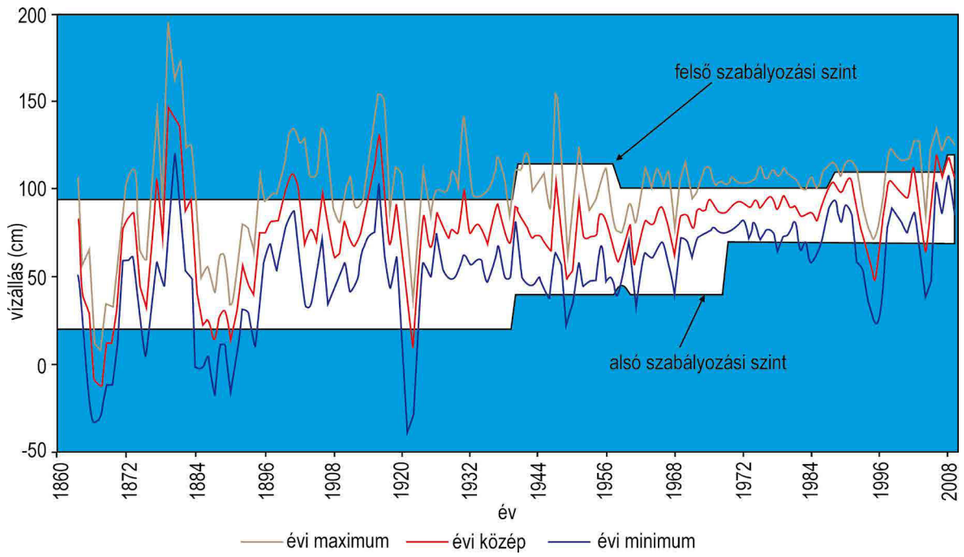
A XVIII. század elejétől fokozatosan kezdődtek meg azok az emberi beavatkozások a vízgyűjtőn és a parton, amelyek befolyással voltak a tó vízháztartására és vízjárására. A vízgyűjtőn végrehajtott, nagy területet érintő erdőirtások hatására megváltoztak a lefolyásviszonyok, a melegebbre fordult időjárás következményeként szélsőségesebb lett a csapadékeloszlás, fokozó-



dott az erózió. A tó vízszintingadozása növekedett, szélsőségesebbé vált a vízjárás.

A Balaton vízállása 1863-ig a maitól merőben eltérő hidrológiai viszonyok között alakult:
– a vízgyűjtő terület növényborítottsága és művelése eltért a maitól,
– a tavat tápláló vízfolyások nem voltak szabályozva,
– a Kis-Balaton, a Nagyberek és a Tapolcai-öblözet ősállapota más volt (mocsár, csaknem összefüggő vízborítás),
– a Sió-völgy leeresztő kapacitása szűkös volt, valamint nem épült még meg a leeresztő zsilip.

Felszálló pára a Szigligeti-öbölben (fotó: Babinszki Edit)



A Balaton évi minimális, átlagos és maximális vízállása 1921–2017 között

A Balaton vízháztartási tényezőinek sokévi (1921–2017) átlag- és szélsőértékei

Vízháztartási tényező	Minimum	Átlag	Maximum
	tómm/év*		
A tófelületre hulló csapadék (C)	309	617	929
Hozzáfolyás a tóhoz (H)	236	851	1974
Párolgás a tó felületéről (P)	723	896	1073
A tó természetes vízkészlet-változása (DK_T)	-281	572	2031
Lefolyás a tóból (L)	0	553	2031
Vízelhasználás a tóból (V_h)**	11	28	51

*1 tómm ~600 000 m^3 vízmennyiség; **a közölt értékek az 1971–2017 időszakra vonatkoznak

A Balaton vízállásai és vízszintingadozásai 1863-tól a siófoki zsilip és vízmérce üzembe helyezésétől ismertek. Az 1863 utáni vízállások a korábbinál kisebb, de még mindig jelentős vízszintingadozásokat mutatnak. A Sió-zsilip többszöri átépítése, a Sió-meder vízlevezető-képességének bővítése lehetővé tette a vízszintszabályozás fokozatos módosítását, amely a szabályozási sáv fokozatos szűkítését és emelését jelentette.

Az utóbbi csaknem két évtizedben a korábbiaknál gyakrabban és többet hallottunk a tó vízmennyiségével, vízkészletének változásával, vízállásának alakulásával kapcsolatos problémákról, amelyeket alapvetően a tó vízháztartását meghatározó természeti tényezők okoztak. A mennyiségi változások jellemzésére kézenfekvő módszer a tó vízforgalmának megismerése, amely a vízforgalomban szerepet játszó vízháztartási tényezők meghatározását és ennek alapján a vízháztartási mérleg összeállítását jelenti.

A Balaton vízháztartása nyomon követésének és értékelésének alapvető feltétele a vízforgalmat meghatározó vízháztartási tényezők átfogó, megbízható ismerete. A tó egy adott időtartamra vonatkozó vízforgalma az alábbi vízháztartási egyenlettel írható le:

$$\Delta K = (C+H) - (P+L+V_h)$$

ahol C a tó felületére hulló csapadék
H hozzáfolyás a tóhoz
P párolgás a tó felületéről
L lefolyás a tóból (szabályozott vízeresztés a Sió-zsilipen át)
V_h vízelhasználás a tóból
ΔK a tó vízkészlet-változása
ΔK_T a tó természetes vízkészlet-változása $\Delta K_T = (C+H) - P$

A Balaton vízháztartásának elemzéséhez 1921 óta állnak rendelkezésre ellenőrzött, megbízhatónak tekinthető havi és évi bontású vízháztartási mérlegek. Ez azt jelenti, hogy vízháztartási tényezőnként jelenleg 97 éves (1921–2017) idősorok állnak rendelkezésre. Megállapítható, hogy a természeti tényezők által meghatározott vízháztartási tényezők közül a legkisebb változékonyságot a párolgás (P), a legnagyobbat a hozzáfolyás (H) mutatja.

A Balaton – sokévi átlagban – lefolyásos tó, az átlagos évi lefolyás mintegy 90%-a a tóra hulló évi átlagos csapadékmennyiségnek. A tó lefolyása a Sió-csatornán keresztül 1863 óta szabályozott. A tóból történő vízlevezetés mértékét és időtartamát a mindenkori vízgazdálkodási igények és a vízszint-szabályozási rend együttesen határozzák meg.

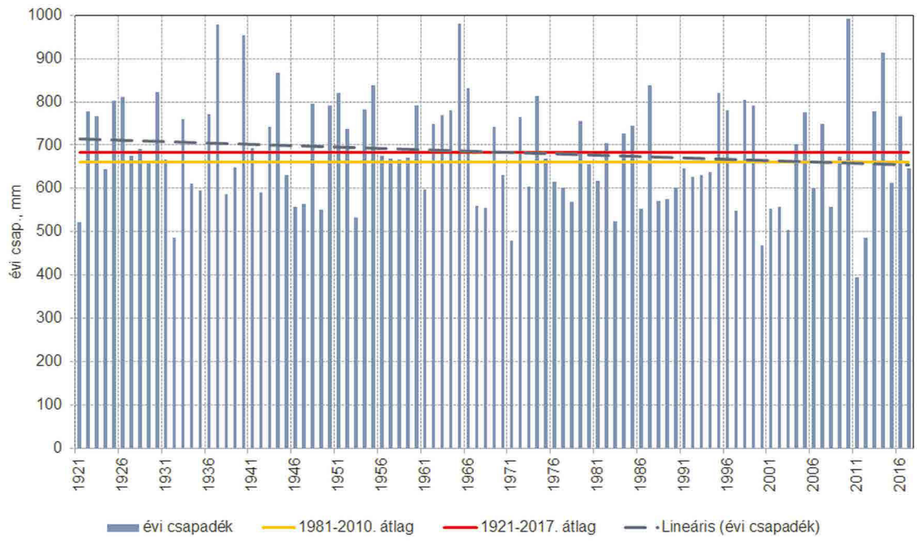
A hidrológiai paraméterek hosszú idejű alakulása

A Balaton-vízgyűjtőjére hulló csapadék

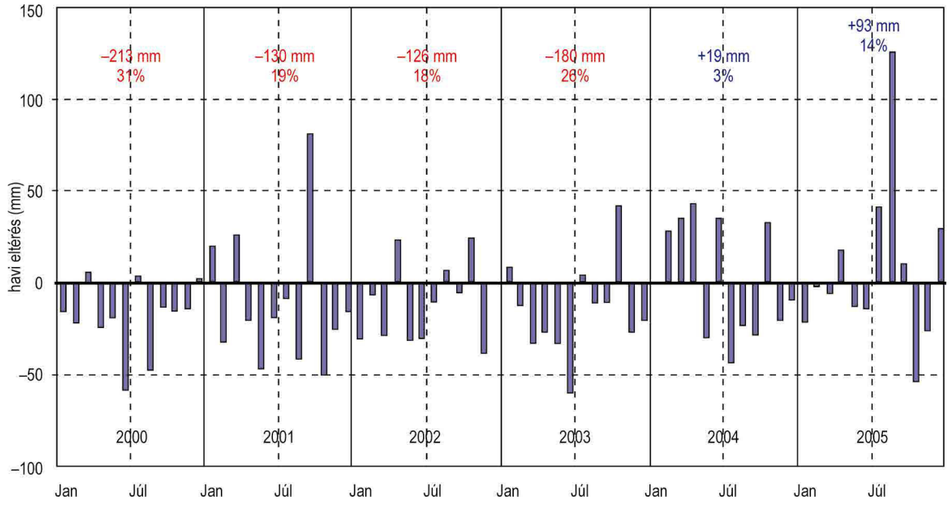
A Balaton-vízgyűjtőre hulló évi csapadék mennyiségének meghatározása 25 csapadékmérő állomás mérési adataiból képzett területi átlag alapján történik. A teljes időszakra (1921–2017) vonatkozó átlag 684 mm/év, a szélsőértékeket két egymást követő évben (!) jegyezték fel, a minimumot (395 mm) 2011-ben, a maximumot (992 mm) pedig 2010-ben.

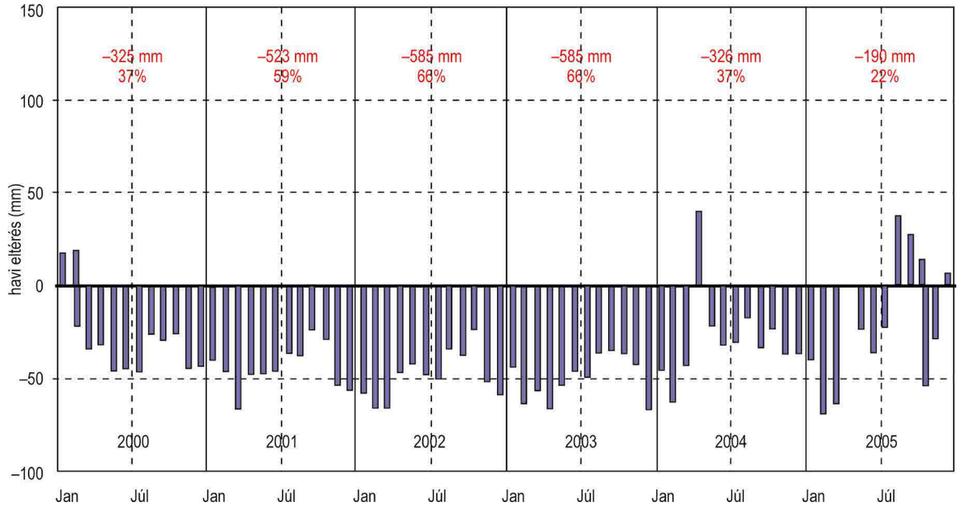
Az 1960-as évek közepétől – a korábbi időszakokhoz képest – nagyobb számban fordultak elő az átlagosnál szárazabb évek. Ez a jelenség halmozódó vízhiányt eredményez a tó vízgyűjtő

A Balaton-vízgyűjtőre hulló csapadék évi összegei (1921–2017)

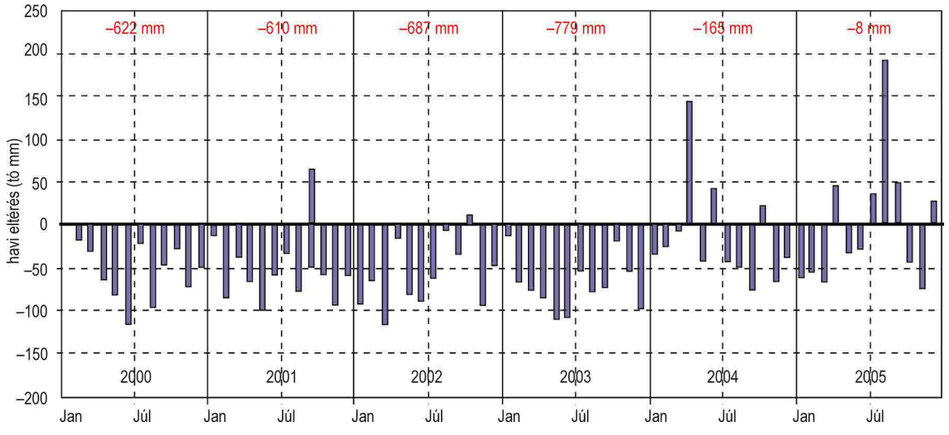


A Balaton vízgyűjtő területére hulló havi és évi csapadékmennyiség átlagtól való eltérése (mm)





A Balatonhoz történő havi és évi hozzáfolyás átlagtól való eltérése (tömm)



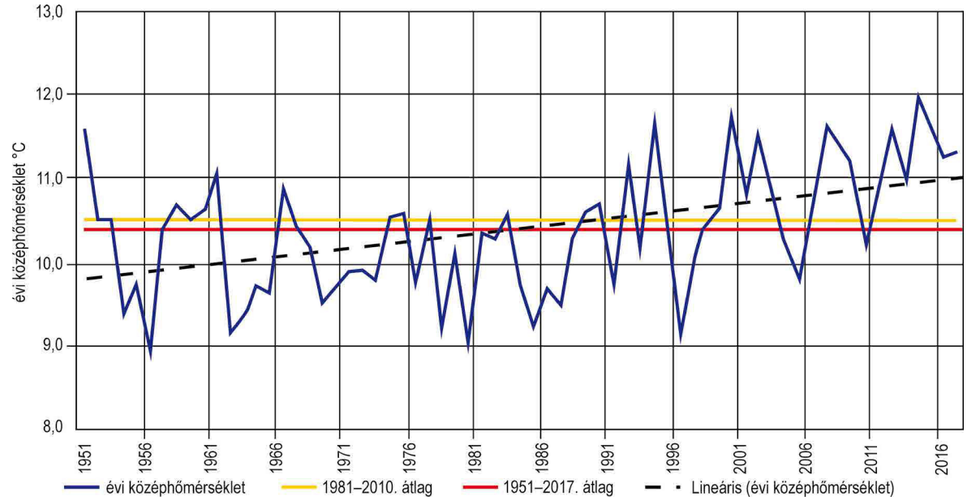
A havi és évi természetes vízkészlet-változás átlagtól való eltérése (tömm)

területén, ami – a lefolyás (a Balaton vízháztartásában a hozzáfolyás) tartós csökkenése miatt – kedvezőtlenül érinti a tó vízforgalmát, tartós vízkészlet- és vízszintcsökkenést okoz.

Külön kiemelésre érdemes a 2000 és 2003 közötti 4 éves időszak. Ekkor a négy év alatt felhalmozódott, a sokévi átlaghoz viszonyított összegzett csapadékhiány (653 mm) megközelítette az egyéves átlagos csapadékmennyiségnek megfelelő értéket, és 4 egymást követő éven keresztül csaknem 80 év után az addig észlelt legszélsőségesebb deficites vízháztartási helyzetet okozta.

A léghőmérséklet alakulása

A vízgyűjtő terület évi középhőmérsékletének alakulását – területi átlagban – 4 állomás adatainak felhasználásával határoztuk meg az 1951–2017 időszakra. A vízgyűjtő sokévi (1951–2017) átlaga: 10,4 °C. Az idősorban szignifikáns növekedés állapítható meg.



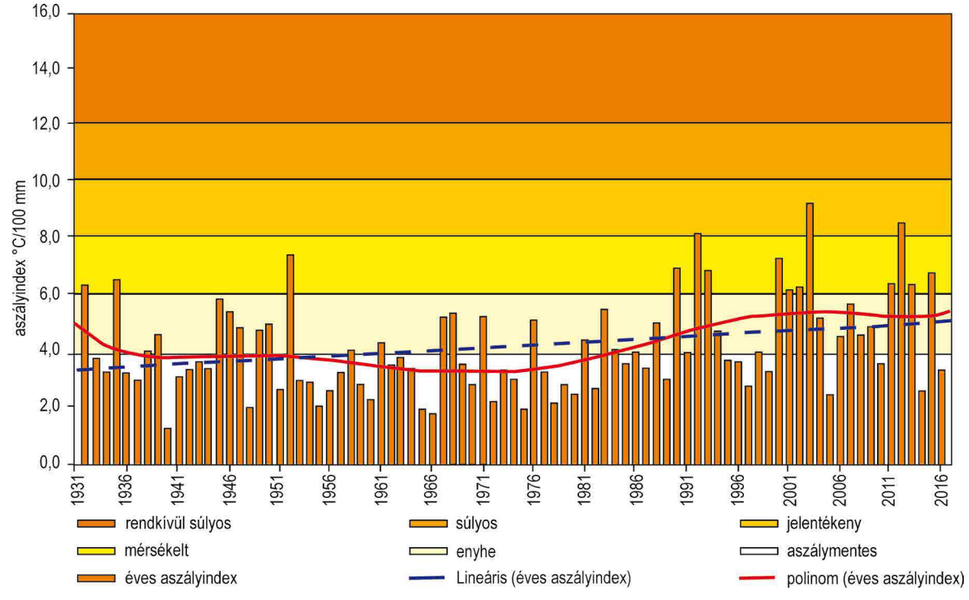
A Balaton-vízgyűjtő éves átlagos léghőmérsékleteinek idősora (1951–2017)

A Pálfai-féle aszályindex alakulása

A Pálfai-féle évi aszályindex Balaton-vízgyűjtőre vonatkozó területi átlagát 6 állomás adatainak felhasználásával határoztuk meg. Az 1931–2017 időszakra vonatkozó idősort áttekintve megállapítható, hogy az aszályhajlam erősödése az 1980-as évek közepétől a legalább enyhe vagy mérsékelt aszállyal jellemezhető évek számának és gyakoriságának növekedésében mutatkozik meg.

A Balatonhoz történő hozzáfolyás

A hozzáfolyás a vízháztartási mérleg bevételi oldalának átlagosan legnagyobb, legváltozékonyabb tagja. A Balaton vízgyűjtő területén a tófelület és a tófelület nélküli vízgyűjtő terület aránya 1:8,6.



A Pálfai-féle aszályindex évi értékeinek alakulása a Balaton vízgyűjtő területén

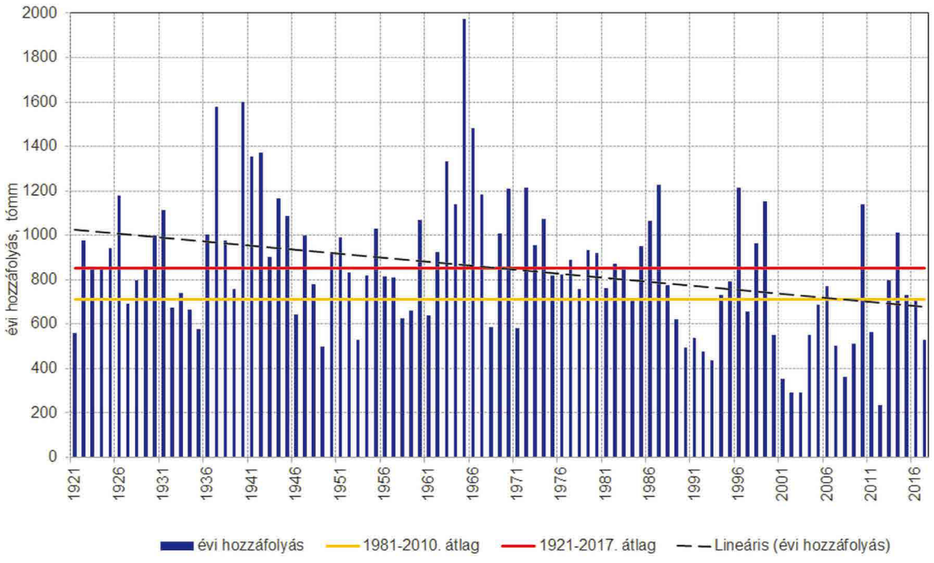
A hozzáfolyás értékének meghatározását szolgáló módszertan sokat változott a vízrajzi észlelőhálózat kiépülésével, a vízrajzi mérésekhez használt eszközök és alkalmazott módszerek műszaki színvonalának növekedésével az elmúlt 97 évben. A változás egyik eredménye az volt, hogy fokozatosan csökkent azon területek részaránya a vízgyűjtőn, ahol a lefolyás (a Balaton oldaláról a hozzáfolyás) meghatározása becsléssel (általában a hidrológiai analógia módszerével) történt. A folyamatos vízállás- és vízhozammméréssel ellenőrzött terület aránya a tó vízgyűjtő területén napjainkra meghaladta a 90%-ot.

A teljes vizsgált időszakra a hozzáfolyás erős csökkenése következett be. Különösen az 1980-as végétől növekedett meg az átlagosnál alacsonyabb hozzáfolyású évek száma és gyakorisága.

A vízgyűjtőről származó lefolyás (a Balaton számára a hozzáfolyás) térbeli és időbeli alakulását természeti tényezők és a vízgyűjtő területen a természetes lefolyást módosító emberi tényezők együttesen határozzák meg. A természeti tényezők közül döntően a csapadék, a léghőmérséklet és a területi párolgás, az emberi beavatkozások közül pedig a területhasználat változása (például az erdőfedettség és a szabad vízfelületek vízgyűjtőn belüli arányának változása) határozza meg.

A hozzáfolyás alakulása szempontjából a Balaton esetében fontos körülmény, hogy az 1950-es évek végétől 1992-ig a Dunántúli-középhegységben a bauxitbányászattal összefüggésben végzett biztonságos bányaművelés érdekében jelentős mennyiségű karsztvizet emeltek a felszínre és ennek túlnyomó részét a Tapolcai-öblözet felszíni vízfolyásain át (Tapolca-patak, Kétöles-árok, Lesence-patak) bevezették a Balatonba. A bevezetett bányavíz mennyisége 1974-ben érte el a maximumot (az évi összeg 114 tómm vízoszlopnak megfelelő vízmennyiség volt).

A bányavíz-bevezetések adatai rendelkezésre álltak, ugyanakkor számolni kell azzal a körülménnyel is, hogy ezek a vízmennyiségek nem tekinthetők teljes mértékben készletnövelő tényezőnek a Balaton vízháztartásában.



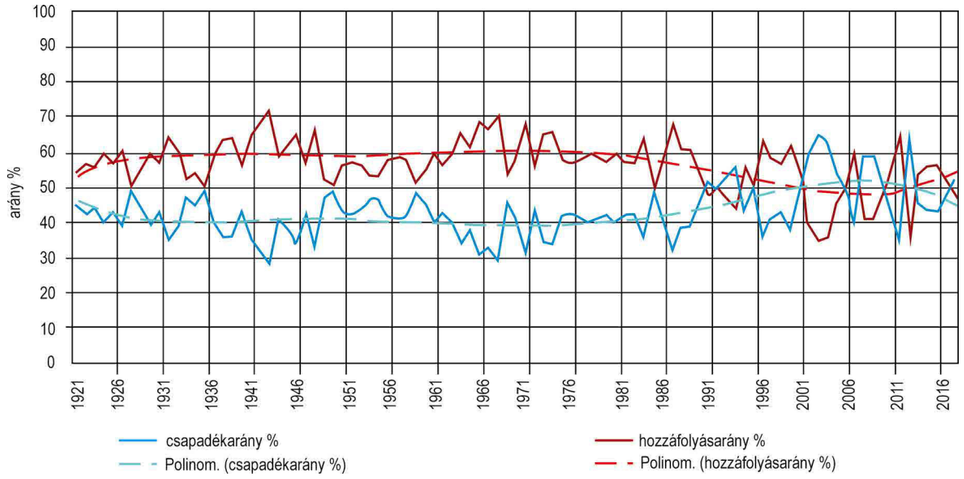
A Balatonhoz történő hozzáfolyás évi összegei, 1921–2017



Ennek oka az, hogy a bányavíz-kiemeléssel egyidejűleg a tó vízgyűjtő területének érintett térségeiben felszínre lépő források vízhozama csökkent, egyesek átmenetileg elapadtak. Ez a hozamcsökkenés egyes Balatonba torkolló – részben karsztforrásokból táplálkozó – vízfolyások vízszállításában is megmutatkozott.

A jelenség részletes kutatására és a változások elemző számszerűsítésére nem került sor, ugyanakkor történtek a térség karsztvíz-háztartását alaposan ismerő hidrogeológiai szakértői becslések. Ezek lényege szerint a Balatonba bevezetett bányavíz mennyiségének mintegy háromnegyed része becsülhető tiszta vízkész-

Átlag 617 tómm/év csapadék hullik a Balaton felületére (fotó: Babinszki Edit)



Az évi csapadék és hozzáfolyás arányának időbeli változása vízmérleg bevételi oldalán

let-növelő hatásnak, a hiányzó mintegy egynegyednyi hányadot a források vízhozam-csökkenése, egyesek teljes elapadása jelenti.

A tó felületére hulló évi csapadék és a hozzáfolyás arányának alakulása

A vízmérleg bevételi oldalán összevetettük a csapadék és a hozzáfolyás arányának időbeli alakulását. Megállapítható, hogy az 1980-as évek közepéig (több mint 60 éven keresztül) a hozzáfolyás átlagosan mintegy 60%-os, a csapadék átlagosan mintegy 40%-os arányt képviselt a vízmérleg bevételi oldalán. Időben ezt követően – elsősorban a hozzáfolyás szignifikáns csökkenése miatt – az arányokban változás történt. Fokozatosan csökkent a hozzáfolyás aránya és ennek a csökkenésnek az arányában relatíve nőtt a csapadék hányada. A 2000-es évek első felében a hozzáfolyás aránya 50% alá csökkent, a csapadék aránya 50% fölé emelkedett, azaz a korábban jellemző helyzet megfordult.

Ezt követően – a csapadékosabb, nagyobb hozzáfolyású évek során a csapadék és a hozzáfolyás aránya ismét az átlagosnak tekinthető vízháztartási helyzetet jellemző értékek felé mozdult el. Ez a jelenség arra hívja fel figyelmet, hogy a tartós és egyirányú meteorológiai és ebből fakadó hidrológiai szélsőségek átmenetileg jelentősen megváltoztatják a vízmérleg bevételei oldalán a mérlegelemek jellemző korábbi tartósan tapasztalt arányait.

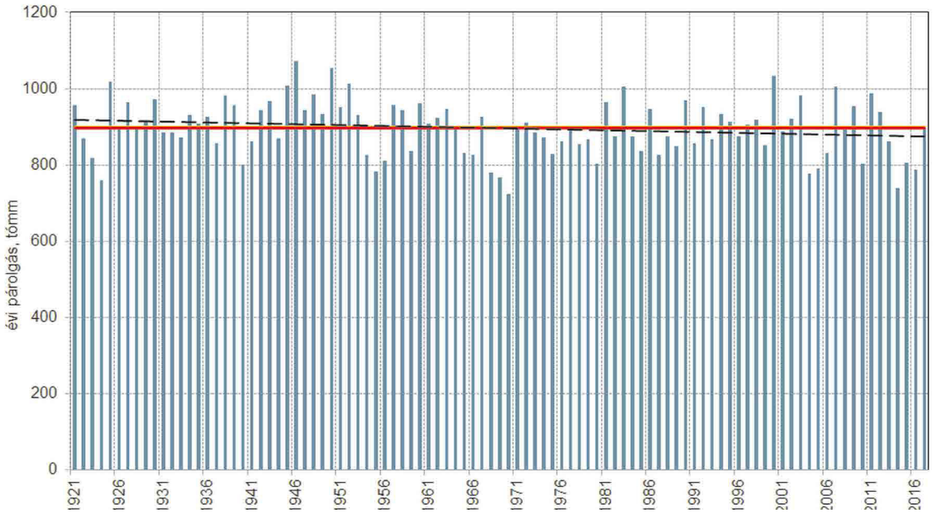
A Balaton felületéről történő párolgás

A Balaton párolgásának számítására a Meyer-formulából levezetett, a Balatonra adaptált tapasztalati összefüggés szolgál. Az összefüggésben két paraméter szerepel: a levegő telítési hiánya (az aktuális léghőmérséklethez tartozó telítési páranyomás és a tényleges páranyomás különbsége), valamint a szélsebesség. Megállapítható, hogy a természeti tényezők közül a párolgás a legkevésbé változékony elem. Az idősorban trendjellegű, jelentősnek nevezhető változások nem fedezhetők fel.

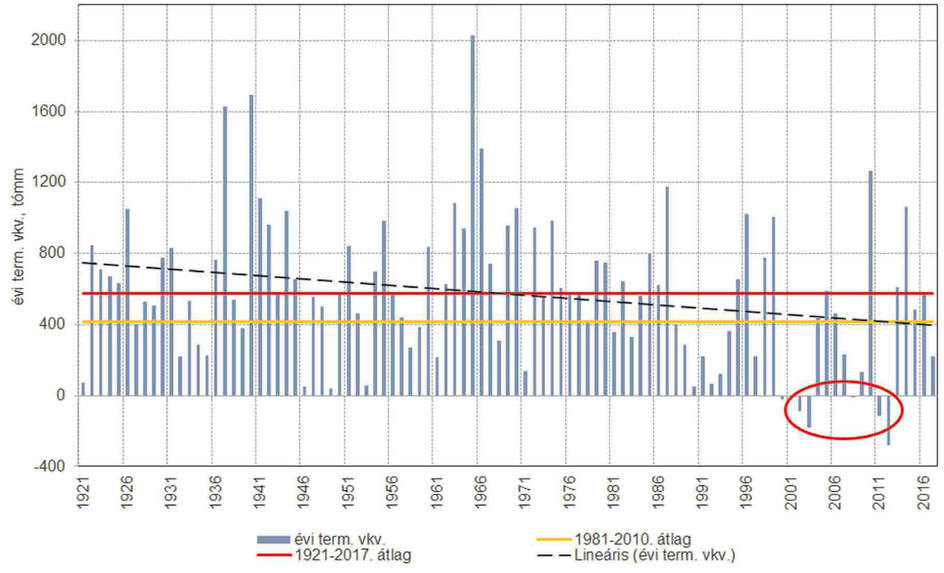
A Balaton természetes vízkészlet-változása

Egy tó vízháztartásában természetes vízkészlet-változásként a természeti tényezők által meghatározott vízháztartási tényezők (a Balaton esetében a tóra hulló csapadék, a tóhoz történő hozzáfolyás, valamint a vízfelületről történő párolgás) algebrai összegét értjük. Ez a számított mutatószám integráltan jellemzi a tó vízháztartásának alakulását.

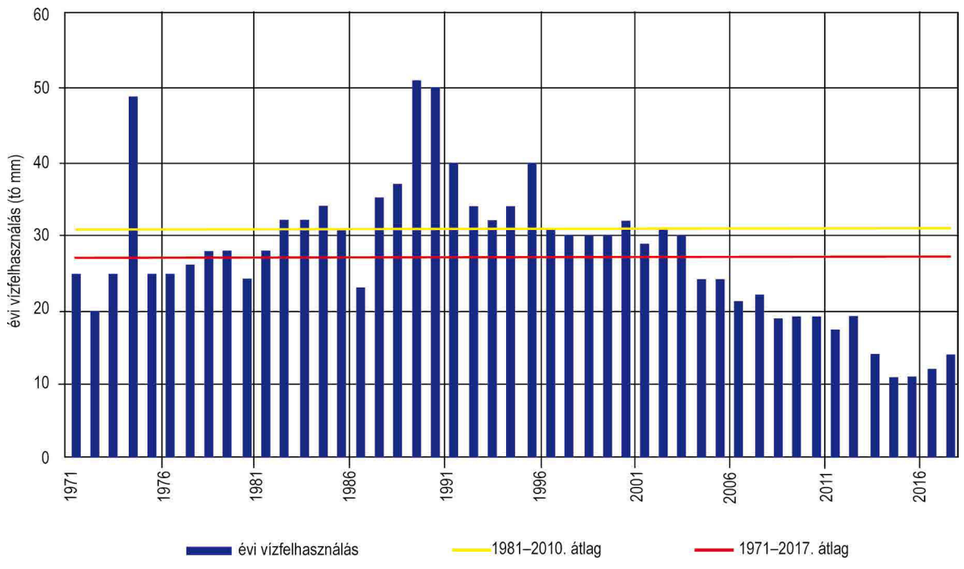
A Balaton esetében szembetűnő az 1970-es évek közepétől jellemző erős csökkenő irányultság, amely feltűnő hasonlóságot mutat a hozzáfolyás ugyanezen időszakban bekövetkezett változásával. Említésre méltó további tény az, hogy az 1921 és 1999 közötti időszakban a természetes vízkészlet-változás évi összegének minden évben pozitív volt az előjele. Ez azt jelenti, hogy a tó természetes vízbevétele (csapadék+hozzáfolyás) több volt, mint a természetes



A Balaton felületéről történő évi párolgás, 1921-2017



A Balaton természetes vízkészlet-változása



A Balaton vízkészletét érintő vízelhasználás évi értékei

vízleadás (párolgás) értéke. Ezt követően a 2000 és 2017 közötti 18 éves időszakban 7 olyan év fordult elő, amikor a természetes bevétel kisebb volt, mint a természetes kiadás!

Vízelhasználás a tóból

A vízelhasználás – a vízmérleg kiadási oldalán – az évi összeget tekintve a teljes vízmérleg legkisebb abszolút értékű tagja. Jelentése: vízhasználat céljából, a tóból közvetlenül kivett és használat után oda visszavezetett víz mennyiségének különbsége.

A vízelhasználás meghatározására csak 1971-től állnak rendelkezésre megbízható adatok. A vízelhasználás teljes időszakra vonatkozó átlagértéke 29 mm/év. A legkisebb érték (11 mm) 2014-ben, a legnagyobb (51 mm) 1989-ben fordult elő. Az utóbbi mintegy másfél évtized első felében a vízelhasználás évi értékei a sokévi átlag közelében voltak, ezt követően az értékek határozott csökkenést jeleznek. Ennek oka egyrészt az ivóvíz-szolgáltatás felszín alatti készletből történő kiváltása, valamint az ipari és mezőgazdasági vízhasználatok jelentős visszaszorulása.

Vízeresztés (a tó szabályozott lefolyása)

A Balaton lefolyása a Sió-zsilip 1863-ban történt átadása óta szabályozható. A zsilipet azóta többször átépítették, aminek következtében az időegység alatt levezethető víz mennyisége növelhetővé vált. A vízeresztések mértékét és mennyiségét a mindenkori vízgazdálkodási, tó- és vízszint-szabályozási szempontok és követelmények szabják meg.

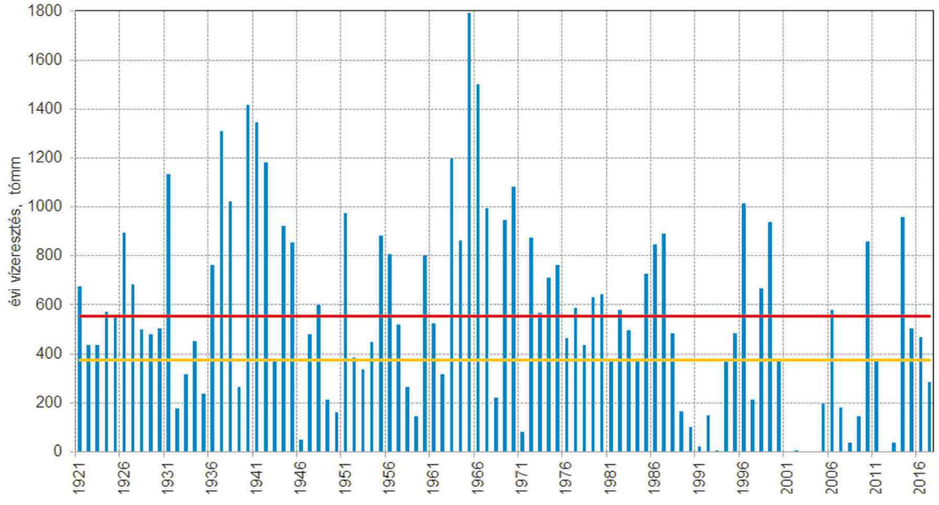
Szembetűnő a leeresztés évi értékeinek nagyfokú változékonysága. A szélsőségesen csapadékos években/évcsoportokban (1964–1966) az évi leeresztés értéke megközelítette a sokévi átlag két-háromszorosát, ugyanakkor az átlagosnál jóval szárazabb években (2001–2004) nem volt leeresztés. A mindenkori szabályozási szint feletti többletvíz-készletek levezetése az 1970-es évek közepétől mutatkozó csökkenése egyúttal a tó vízcsere-aktivitásának lassulására, csökkenésére is felhívja a figyelmet.

Összegzés, előretekintés

A mintegy 3,5 m átlagmélységű Balaton jellegzetes sekély tó. Ezek a tavak mind mennyiségi, mind minőségi vonatkozásban rendkívül érzékenyek a környezeti változásokra. A mennyiségi érzékenység a vízforgalmat meghatározó vízháztartási tényezők változékonyságában nyilvánul meg, amelyek – egyéb, a vízháztartást érintő emberi beavatkozások mellett – együttesen határozzák meg a vízállás mindenkori alakulását. Az elmúlt csaknem két évtized vízháztartási folyamatai számos intő jelet mutatnak. Elsősorban a szélsőségesebbé váló időjárás hatására gyakrabban és nagyobb mértékben fordultak elő szokatlan, mindenképpen szélsőségesnek nevezhető vízháztartási állapotok.

A Balaton természetes tó, de egyúttal hazai és nemzetközi értelemben is széles körben hasznosított üdülőtó. A fenntarthatóság érdekében, valamint a természeti tényezők szélsőségeiből származó hatások mérséklésére a megoldási lehetőségek egyik lépése a szabályozási szint emelésével a mederbeli tározás növelése lehet.

Ezen célkitűzés eléréséhez szükséges folytatni a döntés-előkészítési folyamatokat, illetve újraindítani azokat a tudományos igényű és megalapozottságú kutatási programokat, amelyek a vízháztartási folyamatok pontosabb és megbízhatóbb értékelését és – tekintettel az éghajlatváltozásra – előrejelzését szolgálják.



A Balatonból történt vízleeresztés évi összegei



A siófoki zsilippel jól szabályozott a vízszint (fotó: Cserny Tibor)

Ajánlott irodalom

Baranyi S. 1975: A Balaton hidrológiai jellemzői. – Vízügyi Közlemények 57 (2), 249–262.

Baranyi S. (szerk.) 1979: A Balaton kutatási eredményeinek összefoglalása. – Vízügyi Műszaki Gazdasági Tájékoztató 112., Vízügyi Dokumentációs és Továbbképző Intézet, Budapest, 289 p.

Baranyi S. (szerk.) 1980: A Balaton kutatása és szabályozása. – VITUKI Közlemények 27, 384 p.

Bendefy L., V. Nagy I. 1968: A Balaton évszázados partvonalváltozásai. – Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 215 p.

Mészáros E., Schweitzer F. (szerk.) 2002: Föld, víz levegő. In: Glatz F. (sorozatszerk.): Magyar Tudománytár 1. kötet. Kossuth Kiadó, Budapest, 512 p.

Nemzeti Éghajlati Stratégia 2008–2025. – https://web.archive.org/web/20091016051320/http://www.kvvm.hu/cimg/documents/nes080214.pdf

Virág Á. 1997: A Balaton múltja és jelene. – Egri Nyomda Kft., Eger, 904 p.

Virág Á. 2005: A Sió és a Balaton közös története (1055–2005). – Közlekedési és Dokumentációs Kft., Budapest, 549 p.

Szlávik L. (szerk.) 2005: A Balaton. – Vízügyi Közlemények különszám, 478 p.



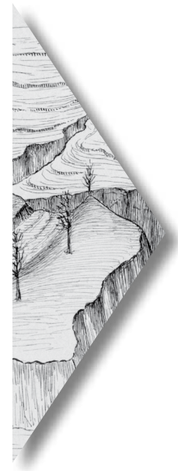
Capreolus loczyi állkapocs

MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

Tóth Ádám, Havril Tímea, Mádlné Szőnyi Judit

14 Rejtőzködő vizek nyomában a Balaton térségében – Mi hiányzik a Balatonból?

Nekünk, magyaroknak, a tavakról rögtön a Balaton jut eszünkbe. Ahhoz, hogy unokáink is élvezhessék e gyönyörű tájat és a tavat, fontos, hogy megértsük a környék vizeinek működési rendjét, s a Balaton vizének eredetét. Ezért a Balaton térségi vizek felszín alatti útjának nyomába eredünk. Arra keressük a választ, hogy hol és hogyan kerülhet a víz a felszín alá, milyen utat tesz meg ott és hogyan, milyen formában kerül vissza a felszínre. Eközben eljutunk a felszín alatti víz természetes végállomásáig, a forrásokig, melyeknek fontos szerepük van a láthatatlan vizek nyomozásában. Keressük a térség híres forrásainak eredetét, azt, hogy miért éppen ott és miért éppen olyan összetétellel érkezik a felszínre a kiáramló víz, és miként válhat a patakok és a Balaton vizének részévé. Utánajárunk annak is, hogy miért csak egy forrás van a Tihanyi-félszigeten, s hogy mi okozhatja a tihanyi partfalomlásokat, de bemutatjuk a félsziget vizes élőhelyeinek jelenét és felvázoljuk a jövőjét is a várható klímaváltozás tükrében.



A Tapolcza, Világos és Lesencze vizei

A Tapolcza, Világos és Lesencze patakok vízvidéke három főrészre bomlik.

Az első a tapolczai melegforrás vize. Ez a melegforrás a kis városka közepe táján, mesterségesen körülfalazott medenczében fakad fel. … A forrás-tó 16 C° hőmérsékletű vízzel van töltve. Kétségtelen, hogy a melegforrás itt freatikus hidegvízzel gyarapodik s Lóczy utal is arra, hogy a tapolczai tavas-barlang vízszínének nyugalma alighanem a melegforrás tavának befoglalása és duzzasztása következtében keletkezett. A forrás ugyanis a szarmácziai mészkő-fennsík déli szélén fakad fel. A fennsíkon dolinák s egy helyen, a halápi országút mellett, a dolina fenekén, barlangnyílás is látszik. A dolinák kétségtelenül földalatti vízfolyást jeleznek s mindenesetre összefüggésben állnak a Tavas-barlanggal. Azt azonban még pontos mérésekkel senki sem döntötte el, hogy a Tavas-barlang tavának felszíne egy szinten van-e a melegforrás tavának felszínével. Egyszerű aneroida-leolvasás szerint a két víztükör pontosan egy szinten van. De a cseppkövek híján dísztelen Tavas-barlang oldalain mutatkozó erős kimosások oly ellentétben állnak a barlangban álló langyos-vizű tó nyugalmas felszínével, hogy okvetetlenül arra kell gondolnunk, hogy egészen fiatal beavatkozásnak kellett történnie, amely a barlangban feltorlaszolta a vizet. Nem lehet ez más, mint a melegforrás medenczéjének mintegy 4—5 m magas felduzzasztása. A barlangi tó is állítólag ilyen mély. Ebben az esetben karsztos, barlangi vizek hűtik le a melegforrás vizét ilyen langyos hőmérsékletre. A csingervölgyi bányák vizével való összefüggést, amit Lóczy említ, nagyon valószínűtlenné teszi az, hogy a Tapolcza-patak árkában valami újabb, erős vízmennyiség-szaporodásnak nyoma sincs.

Sajnos, a forrás-tó vízmennyiségének és hőmérsékletének változásáról mit sem tudunk.

A melegforrás vize mindjárt a tó alatt malmot hajt, aztán nagy esésben siet le a lapályra. Mielőtt elérné a Szt-György-hegy lábát, még néhány árkot vesz fel. Jobboldalán felveszi azt a Séd nevezetű patakot, amelyik a Haláp- és a Vendégi-hegy közül jön. Ez a patak a dolomiton ered, de hamar reájut a szarmácziai alacsony fennsíkra s ebbe kanyónszerű völgyet vágott bele. A Haláp alatt mesterségesen halastóvá volt felduzzasztva, de ennek a helyén most csak vizenyős rét van. Duzzasztógátja még elég épségben megvan a Halastói puszta előtt. Amint a két bazalttal, illetőleg tufával védett meza közé ér az árok, mindjárt apró forrásokat vesz fel a pannóniai rétegekből, aztán nagyobbakat a mészkőből s elég jól megerősödve jut ki a mészkő fennsík peremére. Ott a Viszlói-patak törmelékkúpja keletre kitéríti s belefut a Tapolcza-patakba.



A tapolczai melegtó



Barlangnyílás Tapolcza mellett, a „Kincsesgödör” nevű dolina fenekén

Baloldalról ellenőrizhetetlen réti fakadékok jutnak bele, mind a mészkő lábánál kerülvén napvilágra.

A mészkő-plató típusosan karsztos, dolinás terület. Haláp község közepén áll egy pilléres boltozattal fedett forrás-kút. Ennek vize dél felé folyik le, de hamar elvész a mészkő-felvidék egyik mélyedésében, ahol réteket öntöznek vele. Mivel az itt eltünő víz valószínűleg a sáskai árokban bukkanik újra elő, ezt a részt az Eger vizéhez kellett csatolnom.

Részlet Cholnoky Jenő A Balaton hidrografiája *című könyvéből*

A „láthatatlan vizek” utáni nyomozásban munkánkat a felszín alatti vizek tudománya, a hidrogeológia segíti, melynek célja az, hogy minél pontosabban megismerje a víz felszín alatti, szemünk elől elzárt útját, az út során bekövetkező változásokat, melyek hatással vannak a víz összetételére, hőmérsékletére. Kutatja, hogy az újból a felszínre került víz miként befolyásolja a talajviszonyokat, növényzetet és a felszín jellegét és jelenségeit, melyek az áramló felszín alatti vízhez köthetők.

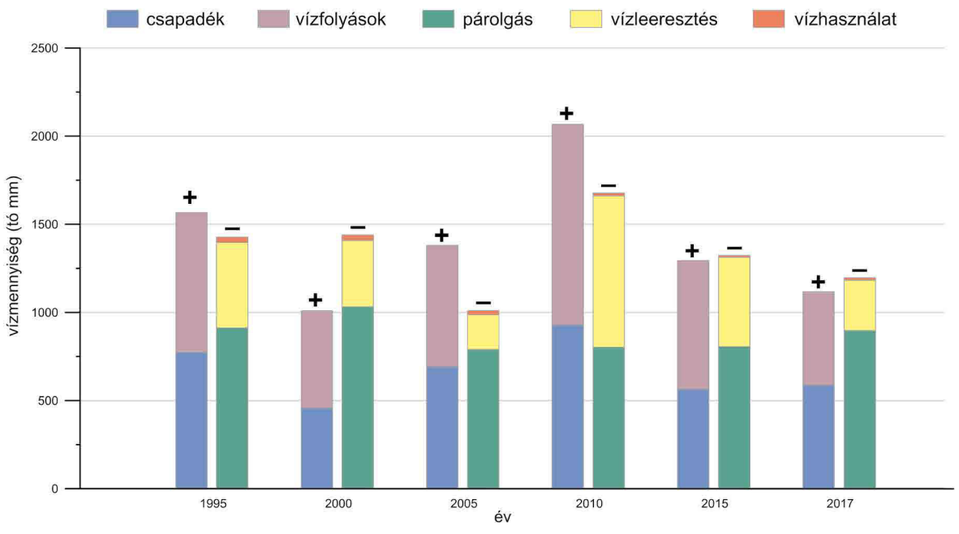
Balaton a környező területek ölelésében

A Balaton Magyarország turisták által leglátogatottabb területe, Budapest mellett. Az ide érkező emberek nemcsak a földtani, vízföldtani, természeti szépséget és sokszínűséget élvezhetik, hanem a környékén található termál- és gyógyfürdők kényeztetését is (például Hévíz, Kehidakustány, Marcali, Zalakaros). A turisztikai főszezon idején a Balaton térségi települések lélekszáma megsokszorozódik, az ivóvízellátásnak ki kell elégítenie a megnövekedett vízigényeket. A vízkivételeknek azonban összhangban kell lennie az ökológiai vízszükséglettel, a Balaton fennmaradása érdekében. Ehhez meg kell érteni a Balaton vízutánpótlódását, fel kell tárni a megfelelő mennyiségű és minőségű ivóvízkészleteket, valamint a turisztikai célokra használható termálvizeket. Vajon mi köze van mindehhez a felszín alatti vizeknek? Több, mint gondolnánk!

Mi hiányzik a Balatonból?

Ahhoz, hogy a Balaton vizét a klímaváltozás és az emberi beavatkozások ellenére is élvezni tudjuk és jó környezeti állapotban tudhassuk, nélkülözhetetlen a tó fenntartható kezelése. Ennek eléréséhez első lépésként szükséges a tó vízforgalmának értékelése, azaz a tómedencébe be- és kilépő vízmennyiség számszerűsítése, az úgynevezett vízmérlegegyenlet felállítása a vízháztartási elemek méréseken alapuló meghatározásával. Ennek függvényében állítható a Sió-csatorna zsilipje, melyen keresztül a Balaton medrében található vízmennyiség szabályozható.

A Balaton vízmérlegének pontos értékelését évről évre a Közép-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság adja ki. Ez tartalmazza a csapadék, a párolgás, a felszíni belépő vízfolyások, a vízleeresztés (Sió), a közvetlen vízhasználat és a természetes vízkészletváltozás (az adott évben a fenti összetevők hatására keletkező víztöbblet vagy -hiány) értékeit az 1992–2017 időszakra vonatkozóan. A rendelkezésre álló jelentésekből 6 kiválasztott év (1995, 2000, 2005, 2010, 2015 és 2017) vízháztartási elemeit és azok mennyiségét egy ábrán foglaltuk össze tó mm egységekben, ahol 1 tó mm 600 000 m^3 vízmennyiségnek feleltethető meg.



A Balaton vízmérlegének komponensei

A jelentéseket tanulmányozva rögtön szembetűnik, hogy nem számolnak felszín alatti víz megcsapolódásával a tó vízkészletében. A gyakorlatban számos esetben kihagyják ezt a komponenst a vízmérlegből, mivel ez a legnehezebben mérhető vízháztartási komponens és sokszor nehéz szétválasztani a többi vízháztartási elem meghatározási módszereinek hibájától. A vízmérleg felállítása során kapott hibát szétosztják, így egy esetleges további komponens – ebben az esetben a felszín alatti víz – lehetőségével nem foglalkoznak. Annak ellenére, hogy a Balatonban megcsapolódó felszín alatti vizekről már rég beszámolt id. Lóczy Lajos és Cholnoky Jenő is, majd későbbi kutatási eredmények is rávilágítottak erre az elfeledett komponensre. Szádeczky-Kardoss Elemér szerint az állandó part menti vízáramlásnak köszönhetően a Balaton pedig nem más, mint a Bakony–Balaton-felvidék vizének felszíni felhalmozódása.

Ezért ennek a feltételezett, vizsgált, majd elfeledett és leginkább vitatott vízháztartási elemnek a nyomába indulunk. A címben megfogalmazott kérdésre – Mi hiányzik a Balatonból? – legalább már tudjuk a választ, azonban ez rögtön felveti azt a kérdéskört, hogy honnan származik ez a felszín alatti víz.

A balatoni termálturizmus

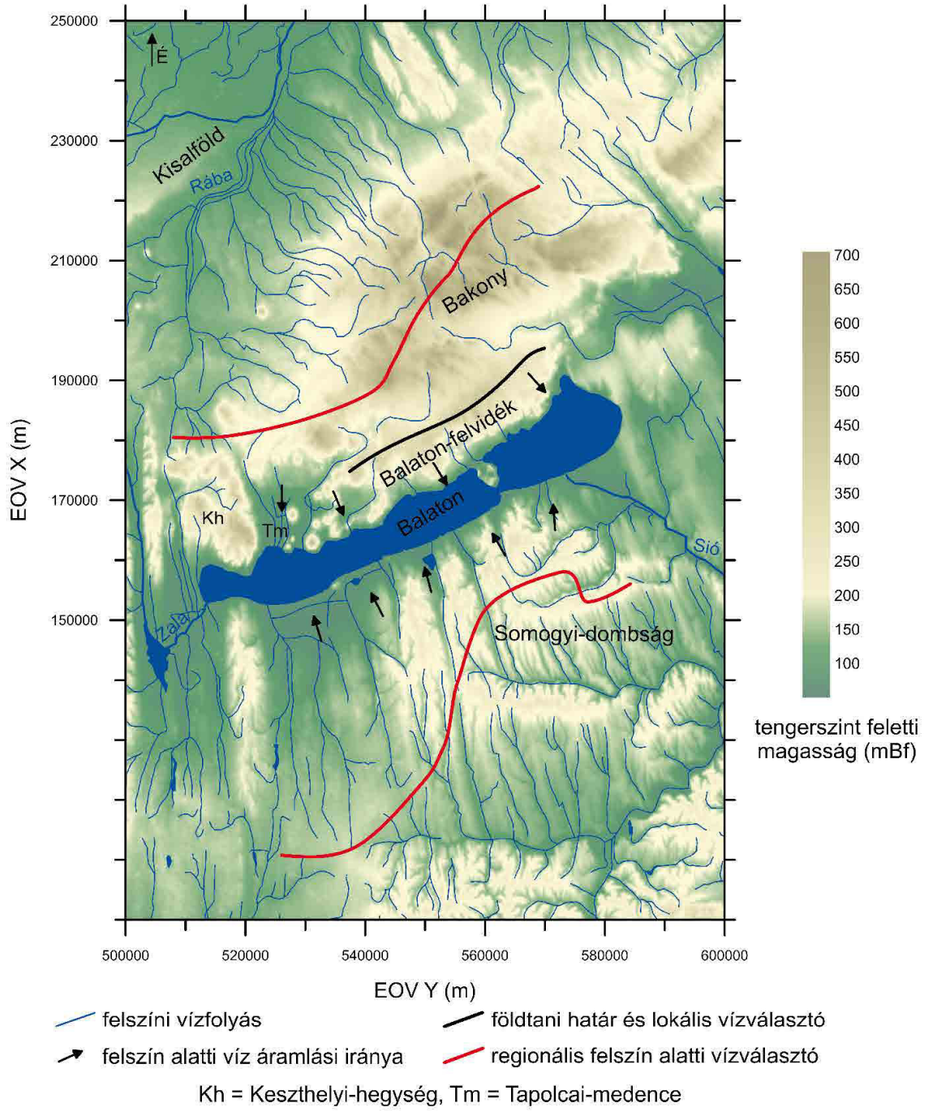
A balatoni régió termálturizmusának fejlesztése szempontjából egyértelmű lehetőséget kínálnak a Somogyi-dombság területén található termálvizek. Az itt tapasztalható hőfelhalmozódásban szerepe van a felszínt borító, jól szigetelő kőzeteknek és az összetartó vízáramlásoknak, melyek a hő szállításában játszanak szerepet. Ugyanakkor, mivel a víz ide a somogyi dombok és részben a Bakony felől a Balaton alatt érkezik, fontos az alapos mérlegelés annak érdekében, hogy a jövőbeni termálvizet hasznosító rendszerek működése ne befolyásolja a Balaton vízháztartását és a környező vízkutak termelését.

A Balaton közvetlen térségében kisebb mértékű (20–40 °C) hőfelhalmozódás tapasztalható, mely a Balatoni riviérán megcsapolódó langyos források hőmérsékletében (~15–20 °C) is érezteti hatását. Itt sekélygeotermikus-energia felhasználására, hőszivattyús rendszerek kiépítésére van lehetőség. A Balaton-felvidéken tapasztalható magas hőmérsékletű vizek a metamorf, rossz tárolóképességű kőzetekben jelentkeznek, melyekből a víz nem termelhető ki.

Honnan érkezik a Balaton vize?

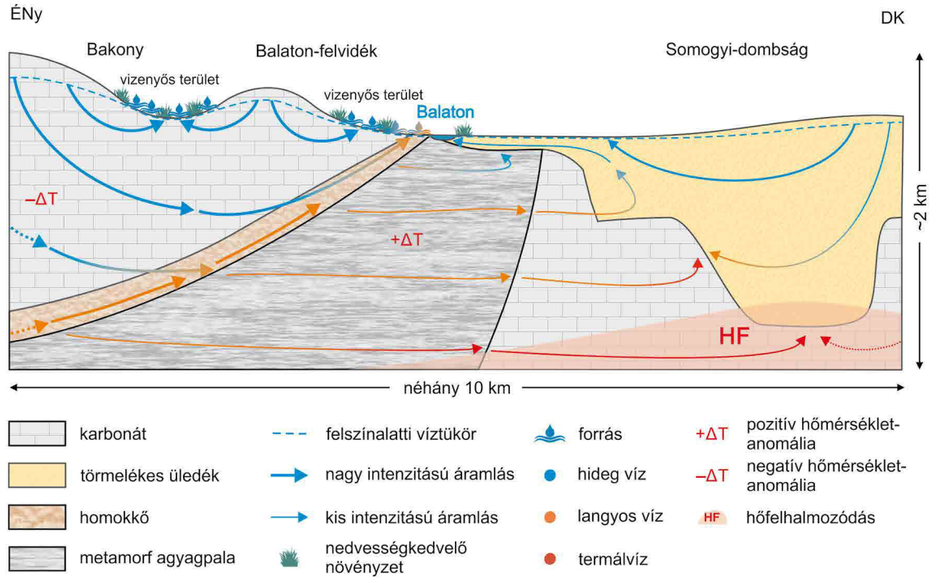
A vízháztartási komponensek értékeléséből tudjuk, hogy a belépő vízmennyiség a csapadékból és a felszíni befolyókból származik, de honnan erednek a felszín alatti vizek, hol keressük e vizek beszivárgási helyét? A felszín alatti vizek áramlását a felszín alatti víztükörben jelentkező magasságkülönbségek hajtják, azaz a magasabb helyzetű vízszintektől az alacsonyabbak felé történik az áramlás a talpunk alatt. Hol találhatók e magasabb helyzetű víztükörrel jellemezhető területek? A hidrogeológiai gyakorlatban azzal az általános feltételezéssel élünk, hogy a felszín alatti víztükör lefutása tompítottan követi a domborzatot, azaz a hegyek, dombok alatt magasabb helyzetű a víztükör, míg a síkságok esetén alacsonyabban húzódik. Ezek szerint azokat a helyeket kell keresnünk a Balaton térségében, melyek környezetükhöz képest magasabban helyezkednek el, és így várhatóan a felszín alatti víztükör is magasabb helyzetű.

A Balaton környezetének vízföldtani adatait összegyűjtve kirajzolhatók e magaslatok.



A Balaton környezetében húzódó felszín alatti vízválasztók, azaz a víztükörmagaslatok

Az ábrán látható, feketével jelölt lokális víztükördombot sokáig a Bakony és a Balaton-felvidék vízföldtani határának tekintették az eltérő földtani helyzet és felépítés miatt. Azonban az itt magasabban húzódó víztükör csak helyi vízválasztóként szolgál, azaz a felszín alatti víz innen áramlik az alacsonyabb fekvésű helyek, így észak (Bakony) és dél (Balaton) felé is. A térség fő felszín alatti vízválasztói azonban a Bakony gerincén és a Somogyi-dombság területén találhatók, s így a közrefogott térrészben a felszín alatti víz – de uralkodóan a felszíni is – a Balaton medencéje felé szivárog. Ezeken a magas fekvésű helyeken rendelkeznek a vizek a legnagyobb energiával, s a föld alatti vizek is úgy mozognak, hogy közben az energiaminimum elérésére törekednek, melyet a régióban a Balaton felé történő áramlással érnek el.



A Balaton térségében zajló felszín alatti vízáramlások, a kapcsolódó folyamatok és jelenségek elvi vázlata

Ezek alapján a felszín alatt a tó felé É–ÉNy és D–DK felől zajlik vízáramlás. Ennek megfelelően új felismerésként a vízáramlási mintázat vizsgálatához, a Balaton hidraulikai helyzetének értékeléséhez és a felszín alól érkező víz mennyiségének meghatározásához az északi és déli részterületeket együtt kell kezelni. A két oldal között különbség ismerhető fel a vizeket mozgató domborzati hajtóerők tekintetében. Ennek oka, hogy a Bakonyban ~500 m Bf, a Somogyi-dombságon ~170 m Bf a víztükör maximális szintje. Különbség tapasztalható az áramlási közeget tekintve is. A Somogyi-dombság felől ugyanis döntően törmelékes üledékes kőzetekben történik a vízmozgás, míg a Bakony–Balaton-felvidéken mészköveken és dolomitokon át szivárog a felszín alatti víz. A kettő között pedig vastag metamorf agyagpala lassítja a vizek áramlását.

A két utánpótlódási terület földtani felépítésében és a hajtóerő tekintetében megmutatkozó különbség a térségben aszimmetrikus áramképet eredményez. A Bakony–Balaton-felvidéken beszivárgó víz egy része a Balaton északi partján kerül újra felszínre, másik része a tó alatt átáramlik. Ez a komponens lelassul a vízfogó képződményeken történő átáramlás során, majd a Somogyi-dombság felől áramló vizekkel összetalálkozik. A szembeáramló vizek az összeáramlás mentén keverednek, majd ezt követően jutnak a Balaton mederüledékén át a tóba.

A felszín alatti, s így láthatatlan folyamatok felszíni lenyomatai a források, a vizenyős, mocsaras területek, a nedvességkedvelő növényzet és különböző felszíni jelenségek. Ezért ezeket vizsgálva a talpunk alatt zajló áramlásokról kaphatunk információt, és ezek látszólag elszórt és szabálytalan elhelyezkedése is rögtön magyarázható a felszín alatti vízáramlások ismeretében.

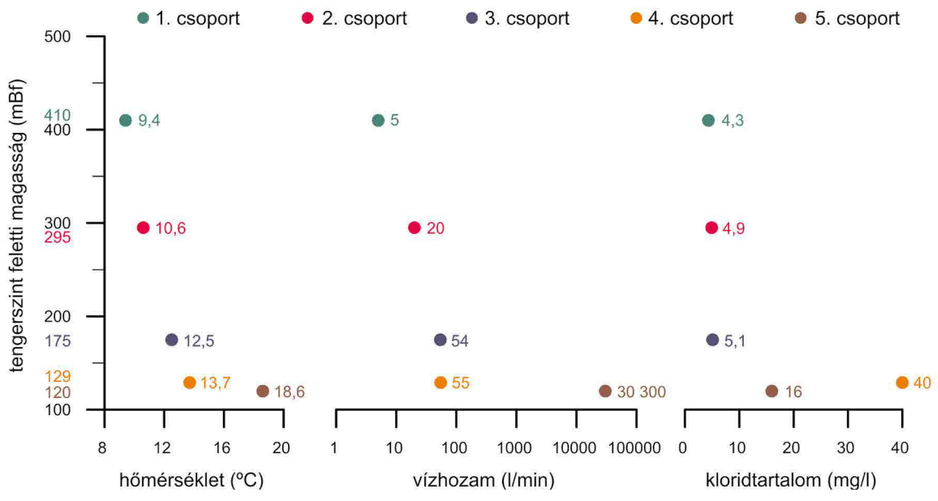
Források, a felszín alatti vizek áramlásának végállomásai

A források a modern hidrogeológia alapgondolata szerint azért fontosak, mert az áramlási rendszerek természetes végpontjai és paramétereik

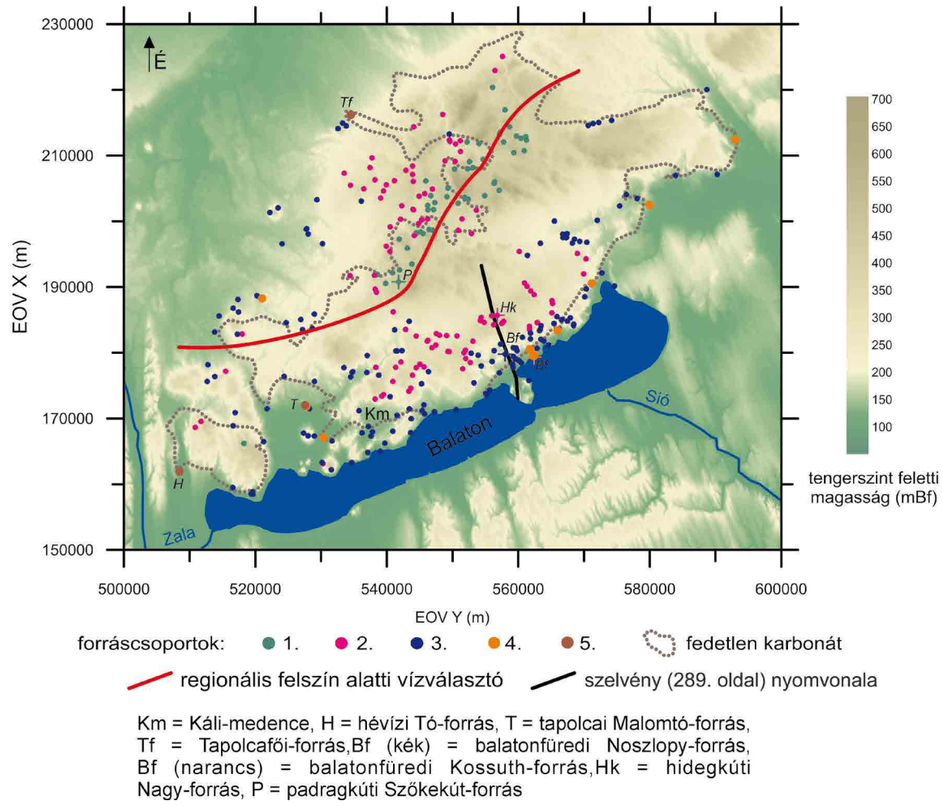
(fizikai tulajdonságaik, kémiai összetételük) tükrözik a föld alatt megtett utat. Ezért a forrásokra mint a felszín alatti vizek föld alatti útjáról árulkodó feltárási helyekre tekintünk. Segítségükkel arra a kérdésre keresünk választ, hogy a Dunántúli-középhegység délnyugati részén fakadó források fakadási helyei, hozamuk, hőmérsékletük és kémiai összetételük különbözőségei segítenek-e minket abban, hogy az azokat tápláló áramlási rendszereket jobban megismerjük. Az Országos Forráskataszter 2002-ig dokumentálja a források adatait. Ez alapján a térségben 557 db forrás fakad. A legfrissebb felmérés eredményei szerint azonban számuk meghaladhatja a 7–800-at is. Az adatelemzési vizsgálatba azonban jóval kevesebb forrás vonható be egyrészt az adathiány, másrészt az egy ideig a térségben zajló, intenzív, bányászati célú vízkitermelés miatt. Ezért csak az azt megelőző (1960 előtti) adatok használhatók a természetes állapotok leírására.

A források tehát fakadási magasság, hőmérséklet, hozam és kloridtartalom (természetes nyomjelző) adataik alapján 5 különböző csoportot alkotnak. A csoport minden egyes forrása nem került ábrázolásra, csak a paraméterek mediánját (a sorba rendezett adatsor középső elemét) szemléltető pont. A csoportok elkülönülésének legmeghatározóbb tényezője a forrásszáj tengerszint feletti magassága. A hőmérsékletadatok egyenletes növekedést mutatnak a tengerszint feletti magasság csökkenésével, ahogy a hozam és a kloridtartalom is: a magasabb térszíneken fakadó források (1–3. csoport) kisebb hozamúak, hidegebbek és kevesebb kloridot tartalmaznak, mint az alacsonyabb tengerszint feletti magasságokon megjelenő források (4–5. csoport).

A legkisebb hozamú, legalacsonyabb hőmérsékletű és kloridtartalmú források (1. csoport) a Bakony legmagasabb fedetlen karsztos részein fakadnak. A második csoport mindegyik paramétere enyhe növekedést mutat – kivéve a fakadási szintet –, ezek az alacsonyabb fekvésű domboldalakon jelennek meg. A harmadik csoport felszínre jutása a hegylábak közelében és kisebb medencékben figyelhető meg. A negyedik és ötödik csoport melegebb, nagyobb hozamú és kloridtartalmú forrásai a karbonátos vízadók és a porózus törmelékes üledékes



A Dunántúli-középhegység DNy-i részén fakadó forráscsoportok paramétereinek mediánértékei



A forráscsoportok területi elhelyezkedése

fedőképződmények határán fakadnak. Ezekben a fedő kőzeteken átszivárgó vizekkel való keveredés okozhatja a megemelkedett kloridtartalmat. A többi forráscsoport alacsony kloridtartalma azzal magyarázható, hogy a nyílt karszton beszivárgó víz felszín alatti útja során is túlnyomórészt mészkövön és dolomiton halad át, és ez nem teszi lehetővé a vizek kloridban történő dúsulását.

A Balaton északi utánpótlódási területén a regionális felszín alatti vízválasztó a Bakony legmagasabb pontjain húzódik, az 1. forráscsoport tagjai e mentén helyezkednek el, hol a vízválasztó északi, hol a déli oldalán. E források közül számos időszakos – a terepen erre a kiszáradt forrásszájak utalnak –, vagy kis hozamú, nem pontszerű, diffúz, „pangó” megcsapolódás. Így ezek gyakorlatilag nem járulnak hozzá a Balaton vízutánpótlódásához. Ilyen forrás például a Szőkekút Padragkút határában, az erdőben kanyargó autóút egyik hajtűkanyarjában, a turista útvonal mentén.



A Szőkekút-forrás Padragkút határában



A hidegkúti Nagy-forrás túlfolyó csövéből induló Hidegkúti-séd



A balatonfüredi Noszlopi-forrás

A Balaton-felvidék híres a forrásairól. A vizsgálatba bevont források fele erre a területre esik, az elemzés alapján döntően a 2., 3. és néhány a 4. csoportba sorolható. Az itt megcsapolódó, jó minőségű víz ivóvízbázisul is szolgál a helyi lakosoknak (például Balatonakali, Balatonfüred, Hidegkút, Pécsely esetében). A 2. csoportba tartozó hidegkúti Nagy-forrás vizét a helyi vízmű hasznosítja, a túlfolyó hideg vízből pedig a Hidegkúti-séd indul dél felé, mely a Szőlősi-sédbe torkollva egészen a Balatonig folyik. A forrás a faluba észak felől vezető út mellett, egy völgyben fakad. Szintén vízfolyást táplál a 3. csoport tagjaként a balatonfüredi Noszlopi-forrás. Az előző forrásokhoz képest ennek már „melegebb" a vize, 12 °C-os hőmérséklettel fakad a Szőlősi-séd mentén Balatonfüred északnyugati határában. A forráshoz túraútvonal vezet, így könnyedén megtalálható a völgy alján. A 4. csoportba sorolt források között találunk egészen híreset is, úgymint a balatonfüredi Gyógy téren a pavilon alatt csordogáló Kossuth-forrást. Az itt kifolyó víz régóta használatos gyógyvízként ivókúrákra, a szomszédos Szívkórház betegei is előszeretettel fogyasztják. A víz ivása közben nem csak kellemes hőmérséklete (14 °C) érződik, hanem a magas vas- és CO_2-tartalma is. Azonban nem csak ez az egyetlen szénsavas forrás fakad Füreden: a helyiek előszeretettel fogyasztják a Berzsenyi-forrás és a Polányi-kút vizét. De a Balaton-felvidék délnyugati részén fekvő Káli-medence is híres szénsavas vizeiről. Itt az ásványvíz minőségű vizek termelése és hasznosítása is több évtizede folyik (például Theodora és Kékkúti).



A balatonfüredi Kossuth-forrás kifolyó vize a pavilon alatt. Látható a kis medence vöröses elszíneződése a vastartalom miatt

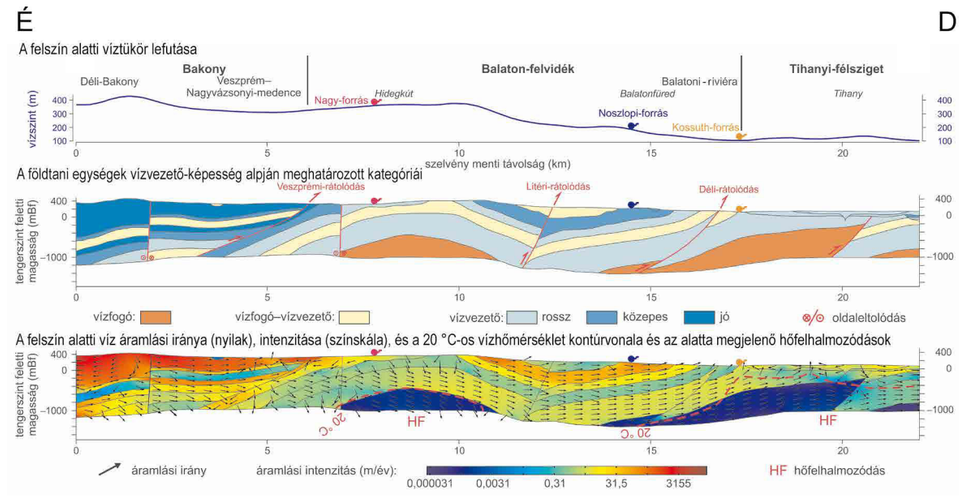
Felmerül a kérdés, hogy mi okozhatja az egyes források és csoportok különbözőségét, a szén-dioxid forrásokban való megjelenését. Miért ott és miért olyan formában fakadnak? A források a felszín alatti vízáramlások felszíni lenyomatai, különbözőségük pedig azt mutatja, hogy eltérő vízföldtani helyzetben vannak, a megcsapolódó vizek pedig más-más felszín alatti utat jártak be. Így a választ a szemünk elől elzárt felszín alatti vízáramlások működésében kell keresni.

A vizek láthatatlan útja a Bakony, a Balaton-felvidék és a Balaton között

Korábban a Balaton-felvidék és a Bakony felszín alatti vizeit függetlennek tekintették egymástól. Mi több, függőlegesen „karsztvízemeleteket" is elkülönítettek, s úgy gondolták, hogy ezeket „vízzáró" egységek választják el egymástól. Ezzel szemben, a modern hidrogeológiai gondolkodás szerint az egyes részterületek és a különböző vízvezető képességű kőzetek között kapcsolat van, melyet a különböző léptékű, kiterjedésű és intenzitású vízáramlások alakítanak ki.

Ahogy már láttuk, a felszín alatti vízmozgás a Dunántúli-középhegység délnyugati részén a Bakony magas fekvésű régiói felől az alacsonyabb területek felé történik. E vízmozgás során nem mindegy, hogy a kőzetek milyen mértékben segítik vagy akadályozzák a víz haladását. A Bakony–Balaton-felvidék fő tömegét alkotó triász dolomit és mészkő jó, kiváló vízvezető képességű, de a Balaton északi partján a kevésbé jó vízvezető permi homokkő is felszíni és felszínközeli helyzetbe kerül, míg alattuk a vizet nem, vagy alig vezető, úgynevezett vízfogó metamorf képződmények is megtalálhatók (lásd a 2. fejezetet). Ez utóbbiak tárolnak ugyan valamennyi vizet, de gazdaságos vízkitermelésre alkalmatlanok. (A „vízzáró" kőzet kifejezést a modern hidrogeológia elvetette, ugyanis felismerték, hogy minden kőzet valamilyen mértékben átjárható, főleg hosszabb, évmilliókban mérhető időskálán.) A különböző vízvezető képességű egységek elhelyezkedését és geometriáját a szerkezeti mozgások alakították. Az egyik ilyen jelentős szerkezeti elem a Veszprémi-rátolódás, mely a Bakony és a Balaton-felvidék földtani határát képezi, a Balaton-felvidéken kialakult helyi vízválasztó pedig a Litéri-rátolódás eredménye.

Felmerül a kérdés, hogy ezek a vízföldtani egységek és szerkezetek hogyan befolyásolják, alakítják a Bakony felől érkező vizek átáramlását a Balaton-felvidék és a Balaton felé, s így a források



Vízföldtani szelvénysorozat a Déli-Bakonytól a Balaton-felvidéken és a Tihanyi-félszigeten át a Balatonig (földtani alap: Budai et al. 1999)

fakadását. Erre az előző oldalon látható szelvény mentén végzett vízáramlás modellezése adott választ, melynek köszönhetően kirajzolhatók, felfedhetők a felszín alatt zajló vízáramlás pályái. Ennek alapján megállapítható, hogy a csapadékvíz felszín alá történő beszivárgása döntően a Déli-Bakony és a Hidegkút környezetében kialakult helyi vízválasztó mentén történik, s e helyekről a víz észak és dél felé áramlik tovább. A felszín alatti víz aztán források és vízfolyások formájában kerül a felszínre: a Veszprém–Nagyvázsonyi-medencében (például Eger-víz és hidegkúti Nagy-forrás) és Hidegkúttól délre (például balatonfüredi Noszlopi-forrás). Ugyanakkor a mélyebb régiókba az Északi- és Déli-Bakony felől felszín alatti vizek érkeznek, ezek a Balatoni riviéra, a Tihanyi-félsziget és a Balaton felé áramlanak, melyek kiáramlási területek, azaz a vizek felszínre jutási helyei.

Arra, hogy milyen gyorsan történik a felszín alatti víz áramlása, a szelvény színeiből lehet következtetni. A megadott értékek nem a tényleges áramlási sebességet mutatják, hanem egy adott térfogatnyi vízrészecske átlagos terjedését. A Déli-Bakony és a Veszprémi-rátolódás között a felszíni–felszínközeli, 200–800 m vastag triász karbonátokban a legintenzívebb a vízmozgás (a szelvény narancssárga és piros színű zónái). Hasonlóképpen a Litéri-rátolódás környezetében is egy ~500 m vastag karbonátösszlet tesz lehetővé jelentős vízáramlást. Ezen egységek lehetnek alkalmasak ivóvíz-kitermelés céljára, hiszen ezekben biztosított a vizek csapadékból történő pótlódása és a kőzetek jó vízvezető képessége. Ezek alatt, a Balatoni riviéra felé zajló vízáramlás intenzitása nagyságrendekkel kisebb (ez a szelvényen kék színnel jelenik meg). Az itt megcsapolódó víz nemcsak a helyi vízválasztó felől érkezik, hanem a Bakony magasabb területein beszivárgó vizek is újból felszínre kerülnek. Ez a folyamatos, kiegyenlített, lassabb, mélyebb, így melegebb áramlás eredményezi a források stabil hozamát és a megemelkedett hőmérsékletüket (például balatonfüredi Kossuth-forrás 14 l/min, 15 °C).

A Bakony és a Balaton-felvidék karbonátos kőzeteibe beszivárgó és intenzíven áramló csapadékvíz (~8–11 °C) lehűti a környezetét és nem tud elég mélyre hatolni, így nem tud kellőképpen felmelegedni. Azonban a mélyebb vízfogó egységeken lassan keresztüláramló víz képes felmelegedni, és enyhe hőfelhalmozódást (20–45 °C) létrehozni egyrészt Hidegkút, másrészt a Balatoni riviéra – Tihanyi-félsziget – Balaton alatt. Utóbbi érezteti hatását a Balatonfürednél megcsapolódó langyos források hőmérsékletében (~15–20 °C).

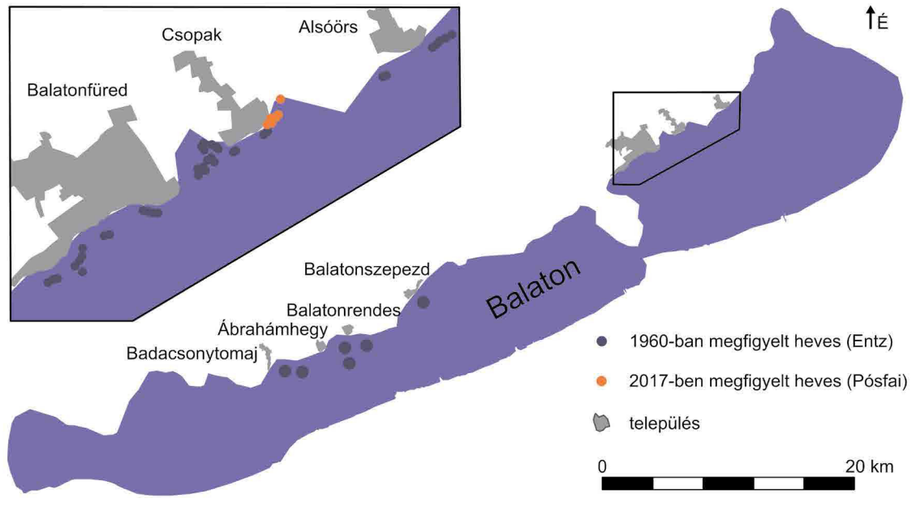
A vizek felszín alatt bejárt útjának ismerete alapján a források különbözősége és a földtani adottságok hatása értékelhető. Az első három csoporthoz tartozó forrásokat feltehetően alacsonyabb rendű, lokális, rövid, intenzív, hideg áramlási rendszerek táplálják (padragkúti Szőke-kút, hidegkúti Nagy-forrás, balatonfüredi Noszlopi-forrás), míg a másik két csoport forrásai magasabb rendű, intermedier vagy regionális, hosszú, lassú, langyos–meleg áramlási rendszerekhez kapcsolhatók (balatonfüredi Kossuth-forrás, valamint hévízi Tó-forrás, tapolcai Malomtó-forrás, Tapolcafői-forrás).

További ivóvíz-termelőkutak kijelölése során érdemes figyelembe venni a Bakonyból érkező vizeket is, melyek egy része megcsapolódik a Balatoni riviérán és a Balatonban, másik része a Balaton alatt a tótól délre eső területek felé áramlik. A kellő mélységbe (~–400 mBf), triász vízadókba, szerkezeti elemek közelébe fúrt kút stabil vízhozammal, kis hatással lenne az ökológiai vízigényekre, hiszen azt a vizet termelné ki, amelyik a természetes többletként továbbáramlik. Mindezek példázzák, hogy az áramlási rendszerek megismerése a terület vízgazdálkodási és természetvédelmi fenntartható kezelését nagymértékben elősegítheti.

Hogyan kerül a felszín alatti víz a Balatonba?

A Balaton felszín alatti vizei egyrészt a Somogyi-dombság, másrészt a Bakony–Balaton-felvidék felől érkeznek a tóba. Utóbbi sokkal nagyobb szerepet tölthet be a tó utánpótlódásában: a kialakult aszimmetrikus áramkép miatt intenzívebben zajlik a felszín alatti vízáramlás a Balaton északi partján. Már csak azt a kérdést kell megválaszolnunk, hogy miként kerül a felszín alatti víz a Balaton medencéjébe.

A felszíni és felszín alatti vizek kapcsolatának irodalmából ismeretes, hogy a tópartok mentén főként oldalirányú áramlás és intenzív felszín alatti víz megcsapolódás történik. A Balaton körül létesített kutak vízszintjei és a földtani–vízföldtani felépítés alapján ez a parti sávban felszín alól érkező vízmennyiség 7–8 tó mm-nek adódott. Továbbá a felszín alatti vízáramlás modellezési eredményei szerint a teljes tófenéken keresztül, nagyon lassan, kis hozammal szivárog fel a felszín alatti víz. Azonban, ha figyelembe vesszük a Balaton területét (592 km^2), akkor rögtön számottevővé válhat az érkező vízmennyiség. Ezt a mederüledéken át felszivárgó felszín alatti vízkomponenst Erdélyi Mihály további 7–8 tó mm-re becsülte. A Balaton vizének felszín alól származó komponensét már Lóczy is feltételezte „fenékforrások" formájában. Ehhez köthetők a hevesek, melyek jégmentes foltok a befagyott víztükrön, ahol víz- és gázfeláramlás (döntően CO_2) történik az északi part mentén. Ezeket már Cholnoky Jenő is megfigyelte; Entz Béla, a tó hidrobiológus kutatója térképezte fel az 1950-es végén. Rádai Ödön az 1980-as években mintavevő berendezésével meg is mintázta a feláramlásokat. A Balatonban megcsapolódó felszín alatti víz mennyiségének közvetlen meghatározása az utóbbi években kifejlesztett és széles körben alkalmazott felszivárgásmérővel lehetséges: a mederüledékbe helyezett „hordók" ismert keresztmetszetén egységnyi idő alatt szivárgó felszín alatti víz mérhető.



A befagyott Balatonon megfigyelt jégmentes foltok, azaz a hevesek területi elhelyezkedése



▲ *A csopaki öbölben megfigyelt hevesek. A helyiek ezeket faágakkal rakják körbe figyelmeztetésül az arra korcsolyázóknak*

E jelenségeket manapság is megfigyelhetjük a befagyott tavon, ahogyan azt Pósfai Mihály 2017 januári észleléseiből tudjuk. Érdekességük, hogy ezeket kizárólag az északi part mentén lehet megfigyelni, a déli oldalon nem látni ilyen jelenségeket. Ennek magyarázata a tó alatti eltérő képződményekben kereshető, ahol a felszín alól érkező víz különböző kőzeteken és szerkezetek mentén áramlik. A vulkáni utóműködéshez köthető feltörő CO_2-gáz pedig a felszín alatti víz áramlási pályáit követve jut a Balatonba (valamint a Balaton-felvidéki forrásokba), ahol buborékok formájában láthatjuk. A kőzettani jellegnek mindenképpen szerepe lehet ebben, ugyanis a vízben oldott CO_2 a karbonátos kőzettel reakcióba lép és felhasználódik, de a törmelékes üledékes képződményekkel nem, ezért csak utóbbinál várható a gáz megmaradása és a vízzel együtt a felszínre jutása. Ugyanígy valószínűsíthető, hogy a felszín alatti vízáramlás alakítja a tómeder üledékeiben a szeizmikus mérésekkel kitérképezett metán térbeli eloszlását is (lásd 12. fejezet). Megfigyelhető, hogy az északi part felé haladva a gázfront egyre sekélyebb helyzetbe kerül, mely a partok felé egyre intenzívebbé váló felszín alatti vízáramlással magyarázható.

De nemcsak a tófenéken keresztül juthat a Balatonba felszín alatti víz, hanem a felszíni befolyó patakokkal, a sédekkel is érkezhet (például a korábban említett Hidegkúti-séd). A Balaton-felvidék felszíni vízfolyásai döntően forrásokból erednek, így felszín alatti víz táplálja ezeket, ezért voltaképp a tóba beömlő vizet is tekinthetjük részben felszín alatti eredetűnek. A 2017-es évben 530 tó mm volt a teljes felszíni hozzáfolyás mértéke. Ennek megközelítőleg fele a Zalán, harmada a déli parton befolyókkal érkezik és ötöde az északi part vízgyűjtőin folyik be. Azzal a feltételezéssel élve nemzetközi analógiák alapján, hogy a befolyókkal érkező víz legalább fele felszín alatti eredetű víz (hiszen csapadékvizet is hoznak magukkal), úgy a teljes felszíni hozzáfolyásból további jelentős vízmennyiséget a felszín alatti víz javára számolhatunk el.

Ha megnézzük az 1992–2017-es időszak pozitív vízháztartási elemeinek átlagértékeit, akkor a csapadék 602, a hozzáfolyás 657, a fentiek alapján számszerűsített, de becsült felszín alatti víz ~345 tó mm (partok mentén 7–8, mederüledéken át 7–8 és a felszíni vizekből 328,5 tó mm). Mindezek alapján a tó vízkészletének legalább negyed része felszín alatti vízből származik. Azaz a korábban elhanyagolt „láthatatlan" komponens mennyiségi értelemben is jelentősen hozzájárul a tó vízháztartásához. S ez a hozzájárulás nemcsak a tó vízmennyiségére, hanem vizének minőségi állapotára és így az ökológiai szerepére is hatással lehet. Emiatt a Balatont felszín alatti víztől függő ökoszisztémának tekinthetjük, azaz megfelelő természeti, ökológiai és turisztikai funkciójára a felszín alatti víz is hatással van, s ezt a tóval kapcsolatos jövőbeni kutatásban és tervezésben is érdemes figyelembe venni. Mindezt tovább bonyolítja a vizek hidraulikusan összefüggő egységes rendszere, ahol a különböző földtani képződményeken keresztüli áramlások összekapcsolják az egyes részterületeket, valamint a felszíni és felszín alatti vizek szoros, összetett és kölcsönös kapcsolatban állnak.

A Tihanyi-félsziget vizes legendáitól a tavak felszín alatti kapcsolatának megismeréséig

A balatoni térség minden szempontból kiemelkedő színfoltja a tó északi partjáról benyúló Tihanyi-félsziget, hiszen sajátos földtani, vízföldtani felépítése mellett a növény- és állatvilága is egyedülálló. Mindennek köszönhetően 1952-től tájvédelmi körzet. A Balaton-felvidéki Nemzeti Park hazánk első nemzeti parkjaként a környező területek élő és élettelen természeti értékei számára védettséget biztosít. 1997-től a Tihanyi-félsziget is a nemzeti park része, mi több 2003 óta geológiai, biológiai és tájképi sokfélesége révén Európa Diplomával is rendelkezik. Az ökológiai és természeti sokszínűséghez a félsziget tavai is nagyban hozzájárulnak, melyek múltját, jelenét és jövőjét a felszín alatti vizek alakítják.

A Tihanyi-félsziget vizeinek múltja

A vízben szegény Tihanyi-félszigeten három aprócska tó is található: a horgászati célokat szolgáló Belső-tó, a javarészt nád borította Külső-tó, valamint a csak kevesek által ismert, időszakosan vízzel borított Rátai-csáva. A lefolyástalan medencékben elhelyezkedő tavakat nem táplálja forrás vagy patak, ezért azt gondolták korábban, hogy egyszerűen a csapadékvíz összegyűlése révén keletkeztek, vizük pedig csak a párolgás miatt fogyott. A múltban nemcsak a természet, de az ember is alakította a félsziget arculatát és vizeit. A bekövetkezett változásokat megfigyelve megismerhetjük a tavak múltját, mely kulcs a jelen megértéséhez.

A Ciprián-forrás

Az 1055-ben alapított Tihanyi Bencés Apátságban íródott oklevelek a XVIII. századig szigetként emlegetik Tihanyt, melyhez napnyugat felől egyetlen bejárat vezetett. Ezt a bejáratot mélyen leásott árokkal és a Balatonból beeresztett vízzel szokták elzárni. Már ebből a korból ismert volt a (fél) sziget északkeleti meredek partfalán, különböző vízvezető képességű rétegek határán fakadó Ciprián-forrás, mely nevét a felfedező apátról kapta. A félsziget egyetlen forrása – melyhez a hajóállomástól induló túraútvonal vezet – 2 l/min átlagos hozammal és 11 °C vízhőmérséklettel csörgedezik.



▲ *A Tihanyi-félszigeten fakadó egyetlen forrás, a Ciprián-forrás*

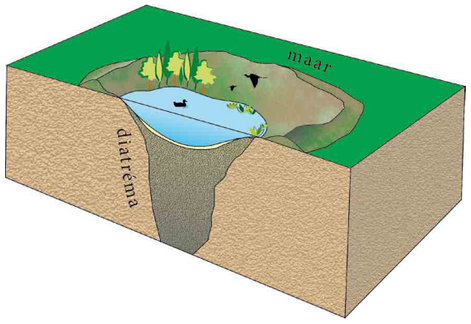


▲ *Légifotó a Tihanyi-félszigetről és a területén található felszíni vizekről*

A félsziget meredek partfalait és dombos vidékét döntően erdő borítja, így a mezőgazdasági művelés számára az egyetlen lehetőséget a Külső-tó lecsapolása jelentette. Az első kísérlet erre 1763-ban történt, amikor egy árokrendszerrel akarták elvezetni és lecsapolni a tó vizét, hogy hasznosítható területet nyerjenek a helyén, ám az árkokat nem tudták olyan mélyre ásni, amely elegendő lett volna a teljes vízmennyiség elvezetésére. 1806-ban már sikerrel jártak: a Külső-tó vizét lecsapoló csatorna megépítését követően a tóterület gyakorlatilag szárazzá vált, medre kaszálóként, legelőként funkcionált. Olyannyira, hogy a lecsapolás hatására a Belső-tó vízszintje is nagymértékben lecsökkent, az északi partjáról benyúló földnyelv nagyobb része szárazra került, melyet egyes időszakokban szántottak is. Az 1900-as évek elejéig a tó medre száraz lehetett, csak kisebb foltokban borította víz, majd vízszintje emelkedni kezdett a Külső-tó vizét elvezető csatorna lezárása (1976) után, és a tavak ismét lefolyástalanná váltak. A csatornák nyomvonala a tóban, valamint a kivezető árok zsilipje még ma is látható a tó északnyugati csücskében.

A manapság már csak időszakos vízborítással rendelkező Rátai-csáva a földtörténeti múltban (9–10 000 évvel ezelőtt) azonban feltehetően éppúgy állandó tó volt, mint a Külső- és Belső-tó. Cholnoky Jenő a XX. század elején a Rátai-csáva kiszáradt, majd újra vízzel borított tómeder váltakozó állapotát írta le, megfigyelései szerint innen a víz a Külső-tó irányába folyt le a felszín alatt. A visszaemlékezések alapján a csávánál mindig vizes volt a föld, így a közvetlen tómedret még a vízborítás megszűnése után sem lehetett használni.

E vizes legendák és történeti dokumentumok alapján a tavak közötti kapcsolatra már régen felfigyeltek, de ez feledésbe merült, hiszen a köztudatban még mindig az él, hogy a tihanyi tavak függetlenek egymástól. Azonban az előző fejezetben láttuk, hogy a domborzati különbségek a víztükör szintjében is jelentkeznek, melyek hajtóerőként hatnak és felszín alatti vízáramlást eredményeznek. Így a változatos domborzatú félsziget esetében is felmerül, hogy Tihanyban járva a talpunk alatt vízmozgás zajlik, mely

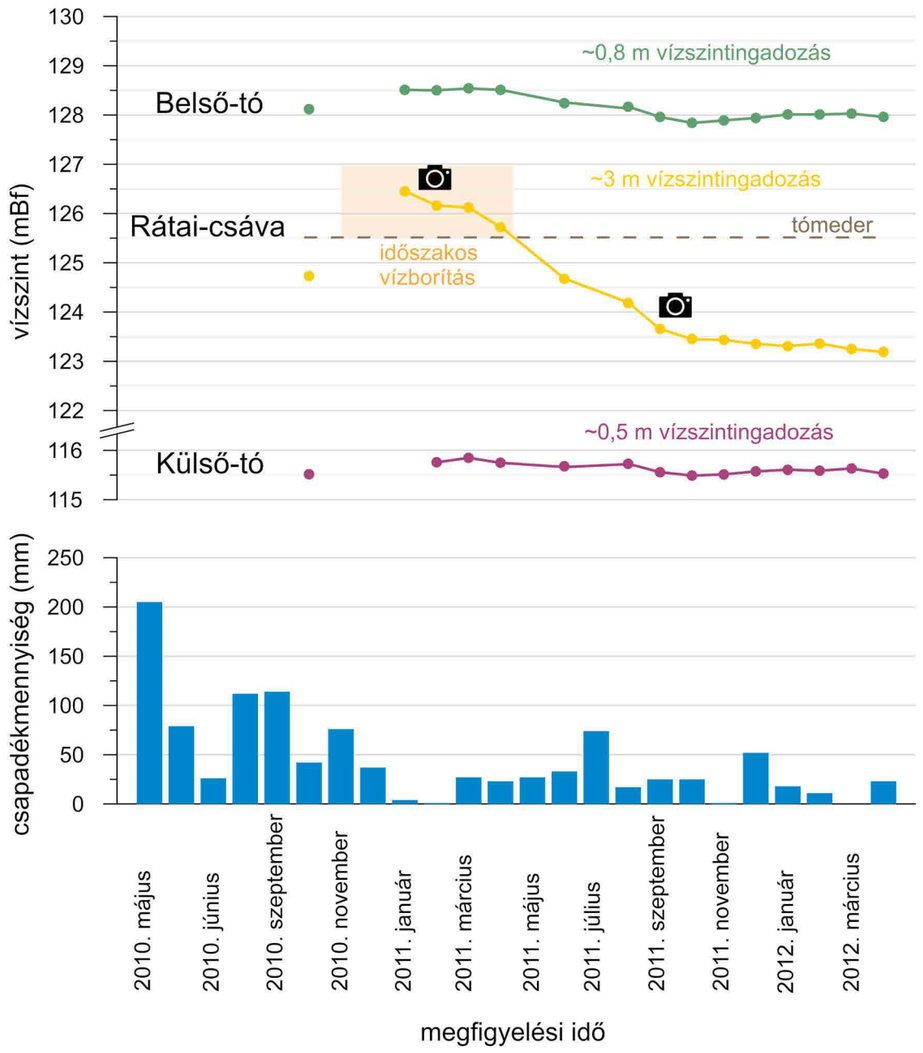


▶ *A Tihanyi-félszigeten található tavak egykori vulkánkitörések által létrehozott diatréma-szerkezetekben találhatók, melyeket a maar-perem vulkáni törmelékei vesznek körbe*

összekapcsolhatja a tavakat a felszín alatt. Ennek, valamint a Ciprián-forrás egyedülállóságának kiderítéséhez a félszigeten zajló vízföldtani folyamatok nyomába kell erednünk!

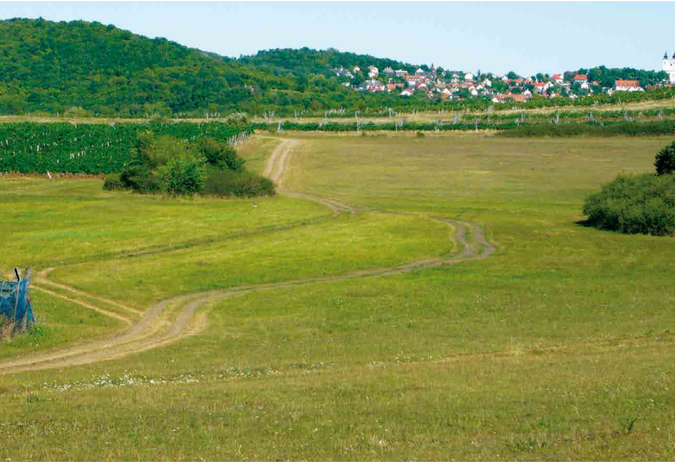
Terepi mérések a tavak környezetében

A Tihanyi-félsziget tavainak vizsgálata a tómedrek közvetlen környezetében a földtani képződmények, kiterjedésük és jellemzőik megismerésével kezdődött. A tavak a térségben 7,9 millió éve lezajlott vulkáni tevékenység által létrehozott mélyedésekben foglalnak helyet. A kitörések során a felfelé áramló forró magma vízzel, illetve vízzel telített üledékkel keveredve heves vulkáni robbanásokat eredményezett. Az így létrejött alacsony törmelékgyűrűt maarnak, a felszínbe vájt tölcsér alakú szerkezetet pedig diatrémának nevezzük (lásd 6. fejezet). E formák és képződ-



◀ *A Belső-tó, a Rátai-csáva és Külső-tó vízszintjeinek alakulása, valamint a lehullott csapadék mennyisége a megfigyelési időszakban*







ények a mintegy 8 millió év során folyamatosan formálódtak, a sűrű növényborítottság miatt nehéz a felszínen észrevenni a maarokat. Ezért olyan földfizikai módszerek segítettek a térképezésükben, melyek a felszín alá is belátnak. Ezekkel a mérésekkel kitérképezték a tölcsérek helyét, melyek a tavak alatt találhatók.

Még részletesebb, felszínközeli kutatás (sekély fúrások és elektromágneses mérések) segítségével a tavak közvetlen környezetének földtani felépítése is térképezhetővé vált. Mivel a Rátai-csáva nem rendelkezik állandó vízborítással, ezért a teljes tómeder vizsgálható, a maar-vulkán törmelékgyűrűjével és tölcsérszerkezetével együtt. A csáva középső részén – a tómeder és környezete – finomszemcsés, agyagos tavi üledékek találhatók, átlagosan 7–10 m vastagságban. Ez alatt és a tómedertől távolodva a tölcsért kitöltő vulkáni törmelékes képződmények, majd a maar-perem kőzetei jelennek meg. Nemcsak a Rátai-csáva körül fordulnak elő a felszínen e földtani egységek, hanem a Külső-tó és a Belső-tó esetében is megfigyelhetjük azokat. A vulkáni eredetű képződmények alatt pedig a Pannon-tó üledékei jelennek meg: agyag, homok és homokkő, melyek az idősebb mészkő és homokkő fölé települnek.

A vulkáni környezetben található tavak vízszintjeinek változásait ismerjük a múltból. Azonban láthatjuk-e ezen ingadozásokat jelenleg is? A válaszhoz nézzük meg az egyes tavak vízszintjeinek alakulását 2010 októbere és 2012 májusa között! A tómedrek partján létesített megfigyelőkutakban mért vízszintek időbeli változásának kiértékeléséhez szükséges a vizsgált periódusban hullott csapadék mennyiségének az ismerete. A területre jellemző évi átlagos csapadékmennyiség 600 mm. A 2010-es év az átlagosnál csapadékosabb volt, összesen 886,6 mm csapadék hullott, míg a 2011-ben lehullott csapadék mennyisége mindössze 284,7 mm volt. Ennek köszönhetően a vízszintváltozások két éves vizsgálata során egy kiugróan csapadékos, és egy nagyon száraz időszak hatásai is megfigyelhetővé váltak.

A Rátai-csávában a 2010 nyári–őszi csapadékmaximum után a víztükör szintje csak 2011 januárra emelkedett olyan szintre, hogy a helyi domborzati mélyedés aljában is megjelenjen a vízborítás. Ezt követően, a januártól kezdődő csapadékszegényebb időszakban, a vízszint kezdetben lassabban, majd gyorsabban csökkent, végezetül a felszíni vízborítás a tavasz elején megszűnt. Ez az időszakos vízborítás aztán az észlelési időszak után is megjelent: 2014 áprilisában ismét összefüggő vízfelület alakult ki, melyet a költöző madarak is kihasználtak.

Az észlelési időszak alatt a Rátai-csávában tapasztalt vízszintingadozás hozzávetőlegesen 3 m volt. A 2010 nyári–őszi csapadékos, majd az ezt követő szárazabb időszak a Belső-tó déli partján kialakított megfigyelőkútban is éreztette hatását: a 2010 októberétől folyamatosan emelkedő vízszintek 2011 májusában kezdtek csökkenni. Az itt megfigyelt vízszintváltozások azonban kiegyenlítettebbek, mint a Rátai-csáva esetében. A legalacsonyabb és legmagasabb vízszintek között a csávában tapasztalt több méterhez képest, itt mindössze 70–80 cm különbség tapasztalható. A Külső-tó déli partján kialakított megfigyelőkút vízszintje az őszi csapadékmaximum után enyhe emelkedést, majd áprilistól kezdve enyhe csökkenést mutatott. Az itt mért vízszintváltozások nem haladják meg a fél métert.

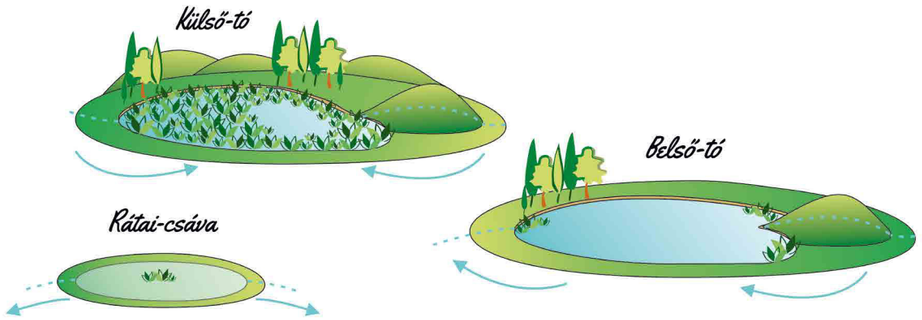
Látható, hogy az egyes tavak eltérő módon reagálnak a csapadék mennyiségének időbeli változására. Az azonban mindegyik esetében elmondható, hogy a bekövetkező változások nem azonnal, hanem a csapadékos időszak után néhány hónappal, esetleg fél évvel később hatnak a vízszintekre. Ez jelzi, hogy a felszín alá beszivárgó csapadékvíz táplálja a felszín alatti víztükröt, ez pedig a tavak vízszintjeit alakítja. Így a Rátai-csávában csak akkor alakul ki vízborítás, ha a csapadékosabb időszakokat követően a tómeder alatt a felszín alatti víztükör olyan mértékben megemelkedik, hogy a felszín fölé kerül. A Rátai-csáva és a többi tihanyi tó tehát nem felszíni víz összegyűlése, hanem a felszín alatti víz felszíni megjelenése. A tavak különböző mértékű vízszintváltozásainak magyarázatához így tehát a felszín alatti vizek mozgását, változását kell nyomon követni a beszivárgástól a megcsapolódásig.

A Rátai-csáva a nyugati peremről: időszakos vízborítás 2010 januárjában; időszakos kiszáradt meder 2010 szeptemberében; időszakos vízborítás 2014 áprilisában

Mi történik a Tihanyi-félszigetre hulló csapadékkal?

A Bakony–Balaton-felvidék–Balaton rendszer vízáramlási modellje magában foglalja a Tihanyi-félszigetet, azonban kis kiterjedése miatt a félsziget folyamatait nem lehet leképezni. Viszont fontos, hogy a területet először a környező térség ölelésében értsük meg, és csak ezután lehet a kinagyított, félszigetre koncentrált vízáramlásokat vizsgálni. Az előző modell tanulságai alapján a félsziget északnyugati „nyakánál” történő megcsapolódás egyrészt a félsziget felől áramló vizekhez köthető, másrészt a Balaton-felvidék és a Bakony felől érkező vizek egy része is itt kerül újra felszínre. Ez hozza létre a Bozsai-öböl és a Diósi-rétek vizenyős, lápos területeit. Feltehetően emiatt lehetett egykoron Tihany sziget, mivel a folyamatosan érkező felszín alatti vizek okozták az összekötő földnyelv vízborítottságát. Az észak felől érkező vizek másik része azonban a félsziget és a tó alatt a déli part felé áramlik. A Tihanyi-félszigeten zajló áramlások voltaképp a Bakony–Balaton-felvidék felől érkező és megcsapolódó–átáramló felszín alatti vízáramlásba fészkelődnek, úgynevezett hidraulikusan alátámasztott helyzetben vannak –200 mBf szint fölött. Azaz a terület alatt átáramló vizek a felszín közelében tartják a félsziget felszín alatti vizeit, nem alakulhatnak ki mély áramlások.

A félszigetre készített részletes háromdimenziós felszín alatti vízáramlási modell segítségével vizsgáltuk a diatrémaszerkezetekben helyet foglaló Belső-tó, Külső-tó és Rátai-csáva közötti hidraulikai kapcsolat. A tómedrekben található tavi üledékek lokális és vékony kiterjedésük miatt nem befolyásolják számottevően a regionális áramképet, hatásuk a vízáramlási intenzitás csökkentésében érhető tetten: ezeken keresztül lassan szivárog a felszín alatti víz. A Rátai-csáva magas helyzetéből adódóan vizet ad le a Külső-tó és a Balaton felé. Akkor jelenik csak meg a felszínén víz, ha a csapadék utánpótlódása meghaladja az innen történő vízleadás mértékét, s

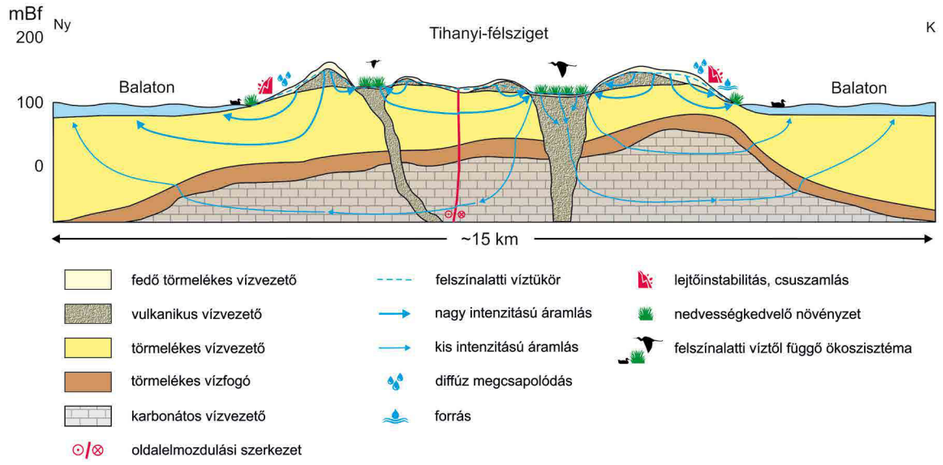


A Tihanyi-félsziget tavainak hidrológiai jellege: a Külső-tó megcsapoló, a Rátai-csáva rátápláló, a Belső-tó pedig átfolyó jellegű

így a felszín alatti vízszint emelkedik. A szintén magas helyzetben található Belső-tó a környező magaslatok vizeinek összegyűjtésével egyidejűleg vizet ad le a nyugati–északnyugati partvonalán a Külső-tó medencéje felé. A Belső-tónál tapasztalt jelenség, hogy északnyugati partvonala mentén a víz télen előbb fagy be, tavasszal pedig később szűnik meg a jégborítás. Ez azzal magyarázható, hogy itt kiáramlás zajlik a tóvízből a Külső-tó felé. A tó többi oldalán felszín alatti vízutánpótlás érkezik, ami kis mértékben „fűtő" hatást is gyakorol a tóra és nehezíti, lassítja a befagyást. Mivel a Rátai-csáva és a Belső-tó közel azonos tengerszint feletti magasságban helyezkedik el, ezért közöttük nincs hidraulikai kapcsolat. A legmélyebb fekvésű Külső-tó egyértelműen megcsapolódási terület, mely a félszigetet belsejének vizeit gyűjti össze. Ezek alapján – a nemzetközi irodalom osztályozását követve – a Rátai-csáva rátápláló, a Külső-tó megcsapoló, míg a Belső-tó átfolyó jellegű tó.

A tavak között, a vulkáni eredetű kőzetekben lassan áramlik a felszín alatti víz, mely útja során a mélyebb régiókba is lejut, ahol a törmelékes vízfogó jelentősen korlátozza az átáramló víz mennyiségét. Ezért az intenzívebb vízföldtani folyamatok a felső 100 m vastag felszín alatti térrészben történnek. A felszínen beszivárgó víz azonban nem csak a tavak medencéibe áramlik és gyűlik össze. A félsziget partjain diffúz módon csapolódik meg: a félsziget belsejéből kifelé áramló víz a part mentén ~50 méteres sávban jut a Balatonba. A tavakat és az egész Tihanyi-félszigetet körülölelő lokális, rövid, intenzív áramlások mellett a félsziget belsejében, leginkább a Külső-tó medencéjéből a diatrémaszerkezeten keresztül mélybe szivárgó víz a partvonaltól távol csapolódik meg a Balatonban, hosszabb, lassabb vízáramlások formájában.

De nemcsak a Balaton vízszintjén zajlik diffúz, nem pontszerű kiáramlás, hanem magasabb térszíneken is, mint például a Ciprián-forrásnál, amely környezetében is meg-



A Tihanyi-félsziget felszín alatti vizeinek útja és a megcsapolódáshoz köthető felszíni jelenségek

figyelhető, hogy nem csak egy forrásszájon át történik koncentrált vízkilépés, hanem a foglalat környezete is nedves, amely miatt a forrás környékén suvadások tapasztalhatók. Az egyik ilyen nagyobb lejtőomlás a Ciprián-forrás mellett újabb vízkilépéseket tárt fel.

A korábbi felfogás szerint a lejtőcsuszamlásokat a csapadék okozza, mivel nedvesebb időszakokat követően gyakoribbak a félsziget peremén előforduló földcsuszamlások. Azonban ezek esetében is megfigyelhető néhány hónapos késés a csapadékesemények után, ahogyan a tavak vízszintjeinek alakulásánál is. Ugyanis nem közvetlenül a csapadék indítja be a suvadásokat, hanem a csapadék hatására megemelkedő felszín alatti víztükör, mely elérve a kevésbé állékony partfalakat nedvesíti a kőzeteket, ezáltal csökkentve azok stabilitását, mely végeredményben lejtőcsuszamláshoz vezet a magasabb térszíneken a félsziget eróziós partfala mentén, mint például a Ciprián-forrásnál. Azonban diffúz vízkilépés még a bazaltos–bazalttufás képződményekből is megfigyelhető a meredek partokon. A Tihanyi-félsziget nyugati oldalán a bazalttufás képződményekből diffúz módon szivárgó víz a téli hideg hatására megfagy, ahogyan ezt Visnovitz Ferenc fényképén megfigyelhetjük. Minden bizonnyal azzal magyarázható, hogy nem találhatunk a Ciprián-forráson kívül más forrást a félszigeten – mely szintén nem egy



A félsziget nyugati peremén, a bazalttufa kőzeteken történő diffúz megcsapolódás, mely a téli fagyban válik igazán láthatóvá 10–20 cm hosszú jégcsapok formájában

pontszerű forrásszájjal rendelkezik –, hogy a felszín alatti vizek nem koncentráltan, hanem nagyobb területen, diffúzan csapolódnak meg, melyek így könnyen elpárologhatnak, vagy a növényzet hasznosíthatja a felszínre kerülő vizet.

A felszín alatti víz ökológiai hatótényező is egyben, mivel befolyásolja a talaj típusát és tulajdonságait, amely meghatározza a vízviszonyokhoz igazodó növényzet kifejlődését. A Rátai-csáva medrében az időszakos vízborítottságnak megfelelően alakult ki a vegetáció: üde, cserjésedő növényzet mellett a szárazságtűrő fajok is jellemzők. Központi részén fűzfacsoportok jelzik, hogy a felszín alatti víztükör a felszínhez közel található (vagy éppen a felszínre lép). Azonban ezek mellett megjelennek a terület kiszáradását jelző szárazságtűrő fajok is. A nyílt víztükrű Belső-tavat keskeny nádas sáv és sásfoltok szegélyezik, amelyek a kezdeti eutrofizáció jelei. A környező magaslatokról csapadékvizet gyűjt össze, mely a tó vizének állapotát javítja, azonban a falu közelsége, az emberi beavatkozások és a beeresztett szennyvíz rontja a vízminőséget. A Külső-tó vízfelületét javarészt nádas, kisebb arányban gyékényes borítja, keskeny parti sávban pedig helyenként sás szegélyezi. A tavat több helyen fűz- és nyárfacsoportok veszik körül foltokban, melyek folyamatos vízellátottságot és szerves anyagban gazdag vizet jeleznek, amelyek kiáramlási területeken kialakuló mocsarakra jellemzők.

A Tihanyi-félsziget felszín alatti vízáramlásait tehát a domborzati különbségek miatt kialakuló víztükörbeli eltérések hajtják, melyek a képződmények tulajdonságai és a Bakony–Balaton-felvidék felől érkező átáramlás miatt a felszín közelébe koncentrálódnak. A félsziget belső területein a tavak egymással kommunikálnak az összefüggő felszín alatti vízrendszerben, a peremeken felszín alatti vízkilépés, valamint a partoktól távol a Balatonban vízmegcsapolódás zajlik. Mindezek ismerete vízkezelés szempontjából is jelentős: a felszín alatti utánpótlódás, illetve megcsapolódás ökológiai hatásával is számolni kell, a fokozottan védett természetvédelmi terület kezelésénél a tavak megőrzését fentiek figyelembe vételével érdemes végezni.

Mi lesz a félsziget tavaival: eltűnnek vagy megmaradnak?

A Tihanyi-félsziget tavainak sorsát nemcsak az emberi tevékenység befolyásolja, hanem a természet önmaga is, mely hatásokat, ha megállítani nem is tudjuk, legalább lassítani, ellensúlyozni lehet. Ez az egész Földet érintő klímaváltozás eltérő módon jelentkezik a világ különböző pontjain. A regionális előrejelzések alapján a Tihanyi-félsziget jelenlegi 600 mm-es átlagos csapadékmennyisége a század végére 20%-kal csökkenhet, ráadásul a csapadék eloszlásában is jelentős egyenlőtlenségek alakulhatnak ki. Ezen kívül a jelenlegi 10 °C-os átlaghőmérséklet további 4–5 °C-kal emelkedhet. Ez pedig a felszín alá beszivárgó víz mennyiségét csökkenti, mivel a hőmérséklet-növekedés hatására megnő a párolgás mértéke is. Milyen következményei lesznek e változásoknak a Tihanyi-félsziget vizeire? Ez a kérdés a felszín alatti vízáramlások időbeli változásainak vizsgálatával válaszolható meg.

Mivel csökken a beszivárgó víz mennyisége, így az elsődleges hatás könnyen érthető. A kevesebb felszín alatti víz már nem tudja követni a domborzati különbségeket, gyakorlatilag a felszín alatti víztükör már nem kapcsolódik a felszín lefutásához, hanem sokkal lapultabb és kisimultabb lesz. Ez pedig a mostani áramlási pályákat, diffúz megcsapolódási helyeket, a tavak felszín alatti kapcsolatait is érinti, átrendezi. Az elkövetkező 100 évben a korábbi összetett áramkép leegyszerűsödése várható. A Rátai-csáva időszakos vízborítása egyre ritkább lesz, mivel az egyre mélyebbre süllyedő víztükör nem fog tudni a felszínre emelkedni a csapadékhiány miatt. Várható, hogy a nedvességkedvelő növényzet is igazodik a szárazabb körülményekhez. Ugyanígy valószínűsíthető a Belső-tó vízszintjének csökkenése a csapadék és a felszín alatti hozzáfolyás mértékének csökkenésével. A jósolt klímaforgatókönyvek alapján 30–35 év múlva a víztükör a jelenlegi tómeder legmélyebb pontja alá süllyedhet (124,5 mBf). Az egyes csapadékesemények után kialakulhat időszakos vízborítás, így hasonló viselkedés feltételezhető, mint a mostani Rátai-csávánál. Majd a század végére a tó teljes kiszáradása is bekövetkezhet. A Külső-tó esetében a helyzetéből fakadóan várható a legkisebb változás. Azonban a többi terület felől érkező vizek a kilapuló víztükör és az egyszerűsödő áramkép miatt egyre nagyobb arányban fognak átáramlani a tómeder alatt a Balaton medencéje felé. Így a Külső-tó jelenlegi megcsapoló jellege átalakulhat átfolyóvá, és vizét a félsziget „nyaka” felé továbbíthatja. E tó esetében csak kismértékű vízszintcsökkenés jósolható a domborzati helyzete miatt (mélyebben fekszik, közelebb a felszín alatti víztükörhöz).

A felszín alatti vízáramlási pályák átrendeződése és az áramlás intenzitásának csökkenése mellett a vizek minőségét és így az ökoszisztémák állapotát is befolyásolhatja a klímaváltozás. A tavak vizei felmelegedhetnek, ez pedig megváltoztathatja a biokémiai folyamatokat, a szervesanyag-tartalmat, elősegítve a Külső-tó eutrofizációját, ezzel az ökológiai sokszínűség sérülését.

A hidraulikai kapcsolatban álló tavak jövőjét illetően számolni kell a megváltozott felszín alatti vízhozzájárulással, illetve vízveszteséggel, továbbá ezek ökológiai hatásával. A félsziget természetvédelmi kezelésénél a vizes élőhelyek megőrzését a félszigeten zajló felszín alatti vízáramlási rendszerek figyelembe vételével érdemes végezni. Az emberi beavatkozások hasonló hatással jelentkezhetnek, ahogy azt a Külső-tó lecsapolásánál is tapasztalták. Így e két hatás együttesen még gyorsabb és drasztikusabb változásokat idézhet elő. A természetvédelmi terület állapotának megőrzéséért csakis ezen esetleges hatások ismeretében lehet felelősen tenni.

Ajánlott irodalom

Bilik I. (szerk.): Tihany – Magyarázó a Balaton és környéke 1:10 000 építésföldtani térképsorozatához. – Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 104 p.

Cholnoky J. 1918: A Balaton hidrográfiája. – Magyar Földrajzi Társaság, Budapest, 316 p.

Csizmazia M. 2010: Volt egyszer egy falu, Tihany. – Tihany Fejlesztéséért Alapítvány, Tihany.

Entz B. 1960: Hevesek és más jégmentes foltok a befagyott Balatonon (Adatok a téli Balaton fiziográfiájának és biológiájának ismeretéhez). –Annales Instituti Biologici (Tihany) Hungaricae Academiae Scientiarum 27, 41–53.

Erdélyi M. 1983: A Balaton mélységi vízforgalma. – Hidrológiai Közlöny 63 (10), 429–476.

Erdélyi M., Sárváry I. 1998: A balatoni régió hidrogeológiája. – Balaton Akadémia könyvek. Balaton Akadémia, Balatonboglár, 130 p.

Futó J. (szerk.) 2002: A Balaton-felvidék természeti értékei III. – A Tihanyi-félsziget. Balaton-felvidéki Nemzeti Park Igazgatóság, 128 p.

Gondárné Sőregi K., Gondár K. 1988: A Balaton-felvidék karsztvízföldtani vizsgálata. – Hidrológiai Közlöny 68 (6), 348–355.

Havril T., Tóth Á., Mádlné Szőnyi J. 2012: A tihanyi maar-tavak hidraulikai kapcsolatának vizsgálata kétdimenziós numerikus áramkép szimulációval. – Hidrológiai Tájékoztató 2012, 50–52.

Korim K. 1974: A Balaton környéki hévízfeltárás helyzete és jövője. – Hidrológiai Tájékoztató 14 (1), 46–47.

Mádl-Szőnyi J. 1997: Víztartó rendszerek sérülékenységi vizsgálata a dunántúli-középhegységi főkarsztvíztároló rendszer (DNy-i rész) példáján. – Földtani Közlöny 127 (1–2), 19–83.

Tóth Á., Havril T, Mádlné Szőnyi J., Müller I. 2012: Hidrogeológiai célú geofizikai térképezés egy tihanyi maar-tó környezetében. – Magyar Geofizika 53 (2), 120–130.



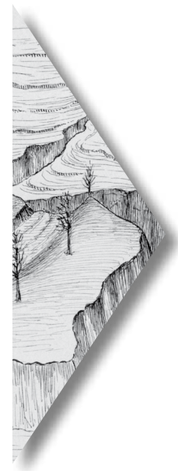
MBFSZ gyűjteménye
Fotó: Lantos Zoltán

Síkhegyi Ferenc, Timár Gábor, Brezsnyánszky Károly,
Galambos Csilla, Zlinszky András

15

A Balaton ábrázolása térképeken

A Balaton a történelem elmúlt évszázadaiban mindig kiemelt szerepet kapott. A Kárpát-medencének ez a különleges természeti csodája az irodalom és a képzőművészet örök témája, utazók és pihenni vágyók minden korban kedvelt célpontja. Különlegessége a földrajz, a térképészet és a földtudományok számára is kiemelt kutatási témát jelentett, és ez jól nyomon követhető az elmúlt évszázadok során megjelent térképek áttekintésében is. A XV. század végéig kellett várni arra, hogy a Balaton a térképeken megjelenjen, onnantól kezdve azonban felgyorsultak az események. A tónak számos különféle ábrázolása jelent meg, amelyek néha még csak nem is hasonlítottak egymásra. Az első, a Balatont valódi alakjában ábrázoló térképek az 1700-as évek elején jelentek meg, külföldi hadimérnökök vázlatain. A precíz osztrákok pontos katonai felmérései a XVIII–XIX. században pedig már az alapjait szolgáltatták az első, kifejezetten földtani célzattal készült térképeknek. Napjainkban ezek a régi térképek is modern formában kelnek új életre, alkalmazkodva korunk digitális kihívásaihoz.



A Balaton a XVI. század térképein

… Sajnos — s ez a történelmi rész szövegéből is már látható volt — a mohácsi vészig terjedő időkből a Balatonról rajzolt térképet eddig még nem ismerünk.

Ámde éppen ez a körülmény szinte kívánatossá teszi, hogy a Balatont ábrázoló azokat a legelső s legérdekesebb térképeket ismertessük, amelyek ugyan közvetlenül a mohácsi vész után jelentek meg csak nyomtatásban, de talán már előbb is készültek. Ezek a térképek kevés előnyükkel, annál több hibájukkal mintegy átmenet a historiából a geografiába. A geografusok is csak megrögzítették mindazokat a tévedéseket, hibákat, amiket a krónikások és historikusok egy időben a Balatonról össze-vissza írtak.

Ne várjunk tehát pontos, megbízható, kifogástalan térképeket, mert ezek inkább csak érdekesek lesznek, s érdekesekké is éppen azok a csodabogarak teszik, amelyeket még talán a legnagyobb képzelőtehetséggel megáldott krónikás is megsokalna. …

Apianus, igazi nevén Bienewitz vagy Bennevitz Péter német csillagász, ingolstadti mathematikus, Münster kortársa, 1528. év május havában, tehát a mohácsi gyásznap után alig két évre, Magyarországról nyitott ívrétalakú térképet adott ki négy oldalon.

A térkép eredetét és keletkezését, magán a térképen, díszesen rajzolt tojásdad keretbe írt latin magyarázat mondja el, mely tulajdonképen nem más, mint a földabrosz hosszú címe.

Eszerint a térképet Bakács Tamás esztergomi bíbornok-érseknek Lázár nevű hajdani titkárja tervezte, minden valószínűség szerint tehát egy térképrajzolásban jártas egyházi személy. Majd pedig Tanstetter-Collimitius György a tervezetet átvizsgálta és bővítette, Cuspinianus (Spieszhammer) János pedig már egy ízben kiadta. …

A térkép jellege: nevezetesen pedig újgót és latin betűs helynevei, helyrajzi adatai és egész rajzmodora, mint pl. a hegységeket oldalnézetben ábrázoló „szénapetrencze rendszerre" valló jelzése, s a helységeket szintén oldalnézetben feltüntető jellegzetes rajza, határozottan arra vallanak, hogy a térkép a XVI. század elején, az Apianus rendszerű újabb térképrajzolás gyermekkorában keletkezett. …

Pannonia inferior-ban — mint a térkép a Dunántúlt nevezi — azonnal szembetűnik a „Balaton lacus" derékban tört hosszúkás alakja, mely északról délnek nyúlik el, nyugaton, a dunántúli középhegység, a Bakony, aljában. A helyzet, melyben a tó rajzolva van, szokatlan és hibás. Ennek pedig az az oka, hogy a térképen az égtájak elhelyezése teljesen hibás. …

Lássuk azonban tovább a Balatont és vidékét.

A tó alakjáról, helyesebben alaktalanságáról már fentebb röviden említést tettünk; ennél többet alig tehetünk, mert a tó partformációja egyenesbe futó vonalakból áll; öblök, félszigetek és mocsárjelzések által meg nem szaggatott. A szerző, a tó alakjának kidolgozására semmiesetre sem fordított annyi gondot, amennyit az megérdemelt volna s amily szorgalommal például a Duna folyását, ismert szigeteivel, kanyarulataival felrajzolta.

A tó hossza az adott mérték szerint 11 ½, legnagyobb szélessége pedig körülbelül 2 ½



Az Apianus (Bienewitz) Péter (1495–1552) ingolstadti mathematikus kiadásában 1528-ban megjelent „Tabula Hungarica ad quattuor latera" című térképről [Lázár deák térképe – a szerk.]

német mérföld, azaz a tó 85,33 km. hosszú és 18,55 km. széles. Talán nem is egészen a véletlen műve a tó akkori és mostani nagysága közt tapasztalható eltérés; mert már e század történetíróinál is azt láttuk, hogy a tóról közölt méretek mind túlhaladják annak jelenlegi nagyságát. A tónak adott méretei elfogadhatók, s ennek figyelmen kívül nem hagyandó egyik bizonyítéka az is, hogy a térképen a jelenlegi Kisbalaton a nagy tóval összefüggő rész gyanánt van felrajzolva és pedig a tó Hídvég alatt sokkal mélyebben nyúlik le délre, mint jelenleg.

A Balaton méreteinek nagyságát tehát az indokolja, hogy a XV—XVI-ik században vízfelülete — ha nem is feltünően, de — kiterjedtebb, vízbősége nagyobb volt.

Emellett látszik bizonyítani az az érdekes jelenség is, hogy a Balaton tavában a térkép egy önálló, egész szigetet tüntet fel Tihany várával. Ez az adat amellett bizonyít, hogy a tó vízállása magasabb volt, mint a jelenben s nemcsak a puszta véletlen, indokolatlan tudákosság, avagy tudatlanság volt szerzője ennek a balatoni szigetnek. Arról, hogy Tihany már a XI. században is sziget volt, fentebb, I. András koráról szólván, is megemlékeztünk.

Részlet Makay Béla A Balaton a történeti korban *című könyvéből*

A térkép a földrajzi valóságnak, vagy a földrajzi valóság egy témájának síkbeli, egyszerűsített ábrázolása. A térkép szolgálhat általános tájékozódásra – tehát saját helyzetünk megállapítására az ábrázolt tereppontok között –, vagy tereppontok megtalálására. Ezek a topográfiai térképek. A közismertebb térképtípusok közül a turistatérképek, vagy az autóstérképek tartoznak leginkább ebbe a kategóriába. Térképeink azonban mutathatnak valamilyen, a terepen nehezen, vagy egyáltalán nem látható, de az adott területhez kapcsolható információt – ezt a típust tematikus térképnek nevezzük. Az iskolai atlaszainkban látható népsűrűségi térképek, vagy az időjárási portálokon található, a pillanatnyi hőmérsékletet mutató térképek is ilyenek; de a tematikus térképeken ábrázolható tartalmaknak szinte csak fantáziánk – és az ábrázolandó információk térbeli jellege – szab határt.

A Balaton megjelenik az általános topográfiai célú országtérképeken, emellett a tavat, illetve környezetét tematikusan is térképezték. E fejezetben időrendben tekintjük át a topográfiai térképeket, a tematikus térképek közül pedig – a kötet földtudományi irányultságának megfelelően – a geológiai, geomorfológiai, illetve egyes hidrológiai térképeket vizsgáljuk. E térképek mindegyike a készítésének idején bemutatott földrajzi, vagy tematikus valóság, illetve az arról meglevő korabeli ismeretek fontos tanúja. A különböző idők topográfiai térképein követhetjük nyomon a terep változásait, a természeti környezet és a települések aktuális helyzetét.

Miközben feltételezzük, hogy a térképek készítési ideje közötti időtartományban a felszín morfológiai és geológiai állapota nem változott, az egyes korok földtani adatokat hordozó térképeiről tájékozódhatunk az adott időszakban elfogadott, vagy a készítő által helyesnek gondolt geológiai ismeretekről. Jelen kötet ihletőjének, id. Lóczy Lajosnak 1920-ban publikált Balaton-térképe e szempontból mérföldkő: ez az a térkép, amelyhez képest mai ismereteink generálisan már nem, hanem inkább csak a részterületek pontosításával módosultak, fejlődtek. A fejezet végén bepillantást engedünk abba, hogy az elmúlt évszázadok térképei hogyan jeleníthetők meg, akár mobil alkalmazásokban a mai, elektronikus térképek fedvényeként, egyfajta időgép adataiként használva azokat.

Hány méter az egy méter?

A térképeket jellemző számos minőségi mutató közül talán a legfontosabb a méretarány. Ez – kis egyszerűsítéssel – azt mutatja meg, hogy a térképet hányszorosára nagyítva kapjuk meg a valós terepet. Ha a térkép méretaránya 1:100 000, akkor százezerszeres nagyítással jutunk el a valódi terepi méretekhez. A Föld görbült alakja miatt viszont ez az egyszerűsítés csak kb. 1:1 millió méretarányig ad elfogadható közelítést. Minél nagyobb a térkép méretaránya (vagyis minél kisebb a méretarány „1:X” kifejezésében az egységgel arányba állított „X” szám), annál részletesebben mutatja be a területet. Ennek az az „ára”, hogy egy kézbe vehető méretű térkép ilyen felbontásban csak viszonylag kisebb terület bemutatására alkalmas. Minthogy a Balaton hossza körülbelül 77 kilométer, ha a tó térségét 100 kilométernek tekintjük, egy széthajtogatva 1 méter kiterjedésű térkép méretaránya 1:100 000 lehet: a térképi 1 méter a valóságban százezer méter hosszúságig nyúló területet mutat be. A mai technológia sokkal inkább a mobil eszközökön történő térkép-megjelenítést támogatja, természetesen egyre inkább a GPS által szolgáltatott pozíció feltüntetésével. E fejezetben a Balaton történeti térképeit tekintjük át egészen a közelmúltig, és mivel e térképek papír alapúak, így a méretarány ismerete továbbra is fontos a tárgyalásukkor.

Topográfiai térképek

Az első, mai értelemben térképnek nevezhető kéziratok és nyomatok a XV. századból maradtak fenn. Ezek, a Kárpát-medencét a török hódoltság előtt és alatt ábrázoló térképek mai értelemben még nem minősülnek topográfiai térképnek. Az ismert kéziratos és nyomtatott térképek legfeljebb topológiai értelemben adnak felvilágosítást. Számos esetben még így is feloldhatatlan ellentmondások mutatkoznak az egyes térképek összehasonlításakor. Jelentős részükben, ha alig felismerhetően is, de megjelenik az ország, a Balaton azonban hiányzik róluk. Ennek oka, hogy a legtöbb térkép Ptolemaiosz, a neves ókori tudós másolatokban fennmaradt könyvén alapult, amiben számos hely földrajzi koordinátáját táblázatba foglalta, de a tó nem szerepelt ezek között.

Más részükön, amelyek már a középkor végi utazások leírásain alapultak, megjelenik a Balaton körvonala. Első ábrázolása Henricus Martellus Germanicus kéziratos Ptolemaiosz atlaszából ismert. Itt az alakja elnyúlt, valódi csapására szinte merőlegesen megjelenő orsó. Másik végletben kerekded, ahogy Magyarország egyik első, Giovanni Andrea Vavassore által jegyzett fametszetes térképén látható. E térképektől pontosságot és alakhűséget nem lehet elvárni. Kevés és pontatlan helymeghatározás állt a térképek torzításai mögött, amelyek a XVI. század elejétől egészen a XVIII. század közepéig alig módosultak. A Kárpát-medence a törökökkel folytatott szakadatlan küzdelem színtere volt, ezért hiába ébredt felfokozott érdeklődés az itt zajló események irányába, helymeghatározási és térképezési munkák lényegében nem zajlottak. Ugyanakkor a térképkiadók és országleírók törekedtek szóbeli hírek térképi ábrázolására, ezért gyakran fordultak a tó

Hogyan rajzoljunk térképet?

A térképek megrajzolása, megszerkesztése – bármilyen méretű terület ábrázolásakor – bizonyos jellegzetes pontok helyzetének meghatározásával kezdődik, illetve arra vonatkozóan is kell egy eljárás, hogy a megismert helyzetű pontokat hogyan helyezzük el a leendő térkép egyelőre üres papírlapján. A pontok kiválasztása, helyzetük megadása a geodéziai felmérés feladata, a meghatározott (és általában a földrajzi szélességgel és hosszúsággal megadott) helyzetükhöz a térképi pozíció (a papírlapon például milliméterben megadva) kiszámítását a térkép úgynevezett vetülete szolgáltatja. Egyes vetületek területtartók, vagyis a térképen ábrázolt területdarabok kiterjedésének aránya megegyezik e részek valóságos területi arányával. Más területek szögtartóak, ami azt jelenti, hogy a térképről leolvasott szög megegyezik a terepen mérhető szöggel. És természetesen nagyon sok vetülettípus egyik most említett tulajdonsággal sem rendelkezik; sem a területek sem a szögek nem valódi mértékükkel vagy arányaikkal szerepelnek. Az viszont mindegyikre igaz, hogy ezek az arányok nagyjából (ha nem is teljesen pontosan) jól jelennek meg; torzulásaik nem igazán zavaróak. Előrebocsátjuk, hogy a most tárgyalt, a Balatont vagy azt is ábrázoló térképek között területtartó térkép nem szerepel; és a szögtartó térképek is csak a XX. században jelentek meg, a hadsereg, ezen belül a tüzérség igényeinek megfelelően.

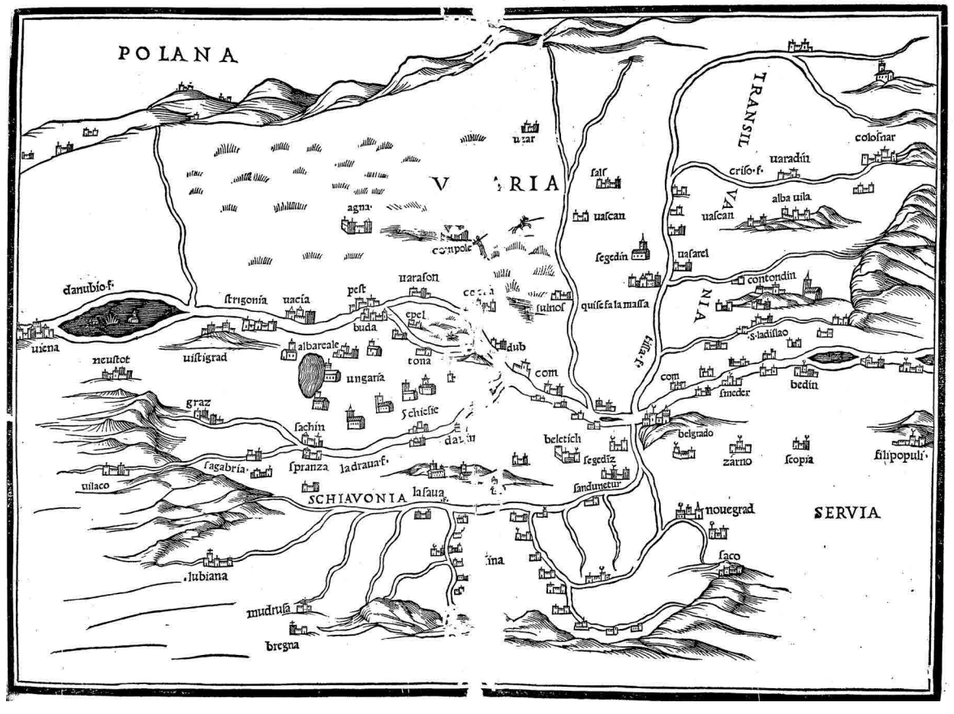
Az említett geodéziai felmérés fontossága azonban nehezen becsülhető túl. A felméréshez választott pontok (az úgynevezett geodéziai alappontok) jelentik a térkép „csontvázát”. Amennyiben pozíciójukat hibásan állapítjuk meg, az torzítja a teljes térképi tartalmat. Ezt leginkább akkor vehetjük észre, ha a korabeli térképet, annak geodéziai alapjait felhasználva a mai adatbázisokra, például a mobil eszközök GPS-programjaiba töltjük: a hibás alappontok környékén a térkép elcsúszik a nyilvánvaló – például hegyek, települések által kijelölt – helyétől. Valójában a geodéziai alappontok elhelyezése szükségszerűen soha nem tökéletesen pontos; a jellemző és a felmérés korában szokásos hiba határozza meg, hogy az illesztés mennyire lehet jó. Ezt a hibát minden tárgyalt térképmű esetében megadjuk. E szempontból a geodézia paradigmaváltása és az ebből következő ugrásszerű minőségi javulás a XIX. század első felére-közepére tehető. Azt ezt megelőzően készült térképek, térképművek esetén az alappontok helye inkább néhány száz méter – 1–2 kilométer, vagy akár ezt meghaladó belső torzulási hibával terhelt, ami már számít a térkép értelmezésekor. A XIX. század közepétől a felmérési pontosság annyit javult, hogy az ebből származó pozícióhibák alig, vagy egyáltalán nem észlelhetők; e térképek saját méretarányukban pontosan vetítettnek tekinthetők.



A Balaton első ismert ábrázolása Henricus Martellus Germanicus XV. század végi kéziratos térképén. Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze

helyzetének és alakjának korábbi térképeken megjelenő másolásához, így örökítve akár évszázadokon át az elkövetett hibákat.

De nem csupán a tó, hanem a vízhálózat és a korabeli településhálózat – különösen érvényes ez a feltüntetett településnevekre – hasonlóan eltorzítva jelent meg a térképek többségén. A legszembetűnőbb elrajzolás a vízhálózatban a Duna szinte egyenes ÉNy–DK-i lefutása a Dunakanyar nélkül, valamint a Tisza, amely hegyesszögben torkollt a Dunába. Ez a napjainkban igen durva, a másolásokból eredő vízrajzi váz csak valamikor a XVIII. század közepén tűnt el a térképekről.



Vavassore 1987-ben kötéstáblából előkerült Magyarország térképe

Lázár deák térképe

Hazánk és a Kárpát-medence térképi ábrázolásának történetében korszakos előrelépést jelentett az úgynevezett „Lázár deák térképe”, a Tabula Hungariae. Ez az egy példányban fennmaradt fametszetes lap tekinthető Magyarország első „valódi” térképének. A Mátyás-korabeli ország területét a Kárpátoktól az Adriai-tengerig, Boszniával együtt ábrázolja. Az adatsűrűség és az olvashatóság megszabta méretaránya helyről helyre változóan 1:1 200 000 körüli. A kívánt részletességű térkép fizikai kiterjedése meghaladta mind a „kézbe vehető”, mind pedig a nyomdai dúcba helyezhető méretet, ezért a teljes országot négy összeillő szelvényen ábrázolta. A térkép tájolása meglehetősen érdekes: a földrajzi észak mintegy 40 fokkal balra el van forgatva a térképi „felfelé” iránytól, vagy a jobb helykihasználás és az esztétikusabb megjelenés, vagy pedig egyszerűen a Ptolemaiosz-féle világtérképeken használt vetület alkalmazása miatt.

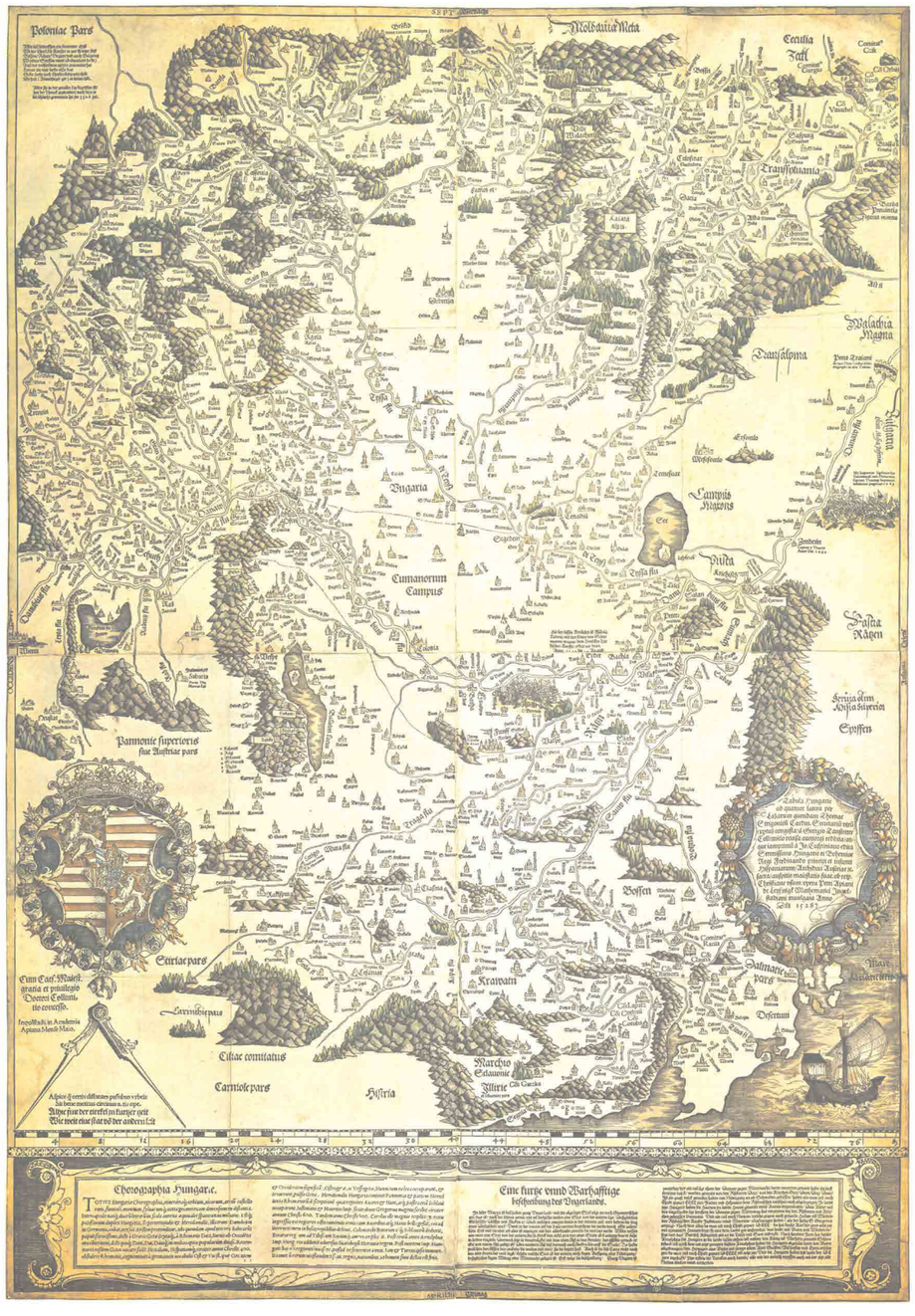
A térképnek már volt mind geodéziai, mind vetületi alapja. A fontosabb városok földrajzi helye Ptolemaiosz ókori táblázatán alapul, de a reneszánsz időszakban az ehhez hozzátett kiegészítések lehetővé tették egy jóval pontosabb térkép elkészítését. Ptolemaiosz egy vetület leírását is megadja ókori művében – ennek alkalmazása a Lázár-térkép esetében matematikailag valószínűsíthető. A térkép illesztési pontossága a mai térinformatikai adatbázisokhoz meglepően jó – egy kilométer körüli – azokon a helyeken, ahol Mátyás idején csillagvizsgáló működhetett, viszont az ország központjától távoli helyeken – az erdélyi és a déli határvidéken, illetve az adriai partokon – 20 kilométeres hibák is előfordulnak.

A térkép publikálásának dátuma 1528, felmérése azonban feltehetően Magyarország XV. századi hatalmi csúcspontjához, a késői Mátyás-korhoz kötődik. Valószínűleg a már szinte teljesen elkészült térképre, a kiadás előtt vezették fel a mohácsi csata helyét és annak sematikus ábrázolását, valamint egy Budáig felnyúló pontsorral a törökök uralta országrész határát is.

Lázár térképe nemcsak az ország, illetve a régió, hanem a Balaton tekintetében is az első, valóban valamelyest felmérési alapot és



Lázár deák térképének balatoni részlete



Lázár deák egy példányban fennmaradt Magyarország térképe

terepbejárási tapasztalatokat is tartalmazó térképi munka. A tó ábrázolása azonban nagyon sematikus. Fő értékét az jelenti, hogy megadja a török háborúk előtti településhálózatot, közöttük a Balaton-felvidék fontosabb várait is. Ez igen fontos adat, hiszen a török hódoltság korában a Balaton több mint száz évig a törökök által megszállt országrész és a maradék Magyar Királyság közötti határvonalon feküdt. A munka jelentőségét mutatja, hogy még ugyanebben a században legalább hat Magyarország térképhez szolgált alapul (például Vavassore, Zsámboky, Lafreri stb.).

Földrajzi szempontból különösen érdekes, hogy Tihany e térképen szigetként szerepel. Ezt a mai domborzat, a félszigetet az északi parttal összekötő földnyelv mocsári üledékei, a tó középkori, magasabb vízszintje ugyanúgy lehetségessé teszik, mint a jelenlegi felszínmozgásokból visszakövetkeztetett korabeli helyzet.

A Lázár-féle térkép topográfiai értelemben nem tekinthető adatforrásnak. Miközben a térkép geodéziai kontrollja a Balaton térségében 5 kilométer pontosságúnak becsülhető, maga a tó ábrázolása nem is emlékeztet a mai alakjára. Ez Tihany sziget-jellege esetén akár el is fogadható, azonban más információt nem tartalmaz azon túl, hogy van ott egy tó, amely délnyugat–északkeleti irányban elnyúlt. Ráadásul a tó hossza eltúlzott: Székesfehérvár irányában túlmutat a mostani partvonalon, amely – épp a kenesei magaspart kiemelt morfológiai helyzete miatt – kizárt. Az lehetséges, hogy a tótól északkeletre akár több kisebb, a Balatontól különálló tó is hullámzott egészen a Velencei-tóig (például a Tikacs süllyedéke), de ezeknek a mai domborzat és a mocsári üledékek hiánya miatt nem lehetett balatoni kapcsolatuk.

Szintén érdemes megjegyezni, hogy Lázár térképén a Balatonnak sem tápláló, sem lecsapoló vízfolyása nincs feltüntetve, vagyis a Zala folyó – mint a korban is jelentősnek számító vízfolyás – nem kapcsolódik a tóhoz. Ezt még érdekesebbé teszi, hogy a ma szintén kis vízhozamú Sárvíz és Kapos viszont rajta vannak a térképen.

Vízrajzi változatok a XVI–XVIII. századi Magyarország ábrázolásokon

Sajátos az utóélete a Balaton és benne Tihany fenti térképi ábrázolásának. A XVI. század közepétől egy laikusok számára is feltűnő néma vetélkedés indult meg két, egymásnak ellentmondó Tihany-ábrázolás között. A térképolvasóknak maguknak kellett választaniuk, hogy a déli vagy az északi vízparthoz kapcsolódó Tihanyi-sziget ábrázolást fogadják-e el valósnak. A helyszíni ellenőrzések lehetetlensége miatt ez a kettősség folyamatosan tovább élt a XVIII. század közepéig. Magyarázatot leginkább az ad erre, hogy az újabb térképek főként a korábbiak másolásával készültek, amikhez további elrajzolások és a velük együtt fellépő névrajzi romlások járultak.

Az ellentmondás eredete Wolfgang Laziusnak, I. Ferdinánd császár udvari térképészének 1552–1556-os Magyarországot, majd a Dunántúlt ábrázoló 1557-es haditérképére vezethető vissza. Ekkor készített „javított” változata nem véletlenül idézőjeles: e térképről sokat elmond, hogy Tihanyt, amely Lázárnál sziget, a déli parthoz kapcsolja. Ez nyilvánvaló tévedés: a Balaton legmélyebb része, hidrológiai okokból épp a Tihanyt Szántódtól elválasztó szorosban húzódó, 10 méteres mai mélységet is meghaladó Tihanyi-kút és nincs okunk kételkedni abban, hogy ez akkoriban is így volt. Inkább azt valószínűsítjük, hogy Lazius, vagy felmérésbeli segítői – épp a tó „frontvonal-jellege” miatt – a török kézben levő déli partra nem látogathattak el.

A hiba tovaterjedésének okát leginkább Laziusnak egy rendkívül széleskörűen ismertté vált Magyarország térképlapjában találhatjuk meg, amely belekerült a kor legfontosabb térképkiadójának, Abraham Orteliusnak több mint 40 kiadást megért atlaszába. Még a XVIII. század közepén is



Lazius Magyarországot bemutató térképének részlete a Balaton környékéről

adtak ki neves térképkiadók olyan Magyarország lapot, amelyen ez a hiba megjelenik.

Zsámboky János 1579-ben metszett, szintén Ortelius kiadásában megjelent Magyarország térképén ugyanakkor több vízrajzi elem valószerűbben jelenik meg, mint a sokkal elterjedtebb Lazius változatokon. Tihany az északi parttól nyúlik a tóba. Emellett a Zala-folyó is határozottan a Keszthelyi-öblöbe csatlakozik, torkolatához közel pedig külön kiemeli a Kis-Balaton lápos–mocsaras vidékét, valamint egy markáns kettős vonallal Zalahídvéget (számos névváltozatban), mint átkelési lehetőséget a Zala mocsaras völgyében. Emellett a Duna lefutása is valósághűbb, mint a Lazius térképen a szinte egyenes, átlós lefutása a Kárpát-medencében.

Amikor a Zala a XVI. század térképein megjelenik, Lazius 1566-os térképén a Drávába folyik, míg Zsámboky 1579-es kiadású Magyarország térképén a Balatonba. Ez az ellentmondás talán feloldható azzal, hogy a Zalavári-hátat jelenleg is áttörő folyó keskeny keresztvölgyét kis erőbefektetéssel elgátolva a folyásiránya továbbra is déli irányba tartott, akár a Dráváig. Katonai–stratégiai oka lehetett, hogy így a legjelentősebb vízfolyás eltérítésével a tó szintje leapasztható vált.

Zsámboky 1579-es országtérképének Lazitól alapjaiban eltérő, de valósághűbb Balaton- és Duna-ábrázolása szintén tovább követhető. Számos, átmásolással szaporított klónja ismert, amelyek időben a XVII–XVIII. század fordulójáig követhetők (például Matthias Quad 1592, Giacomo Cantelli da Vignola 1686, Vincenzo Maria Coronelli 1688, Matthäus Seutter 1728). Ritka kartográfiatörténeti különlegesség, hogy Ortelius – nem tudván igazságot tenni Zsámboky és Lazius térképváltozatai között – mind a kettőt belekötötte atlaszaiba.



A Balaton környéke Zsámboky J. 1579-ben megjelenő Ortelius atlaszlapján

A legszembetűnőbb térképi hibák korrekciója a törökök Balkánra szorítását követően gyorsult fel. A karlócai és a pozsareváci békéhez (1699 és 1718) vezető győztes harcok során számos külföldi hadimérnök tevékenykedett az országban, köztük Luigi Fernando Marsigli gróf, aki Duna menti felmérései során asztronómiai megfigyelésekkel rögzítette a Duna Dunakanyarnál



Matthäus Seutter 1728-as országtérképe

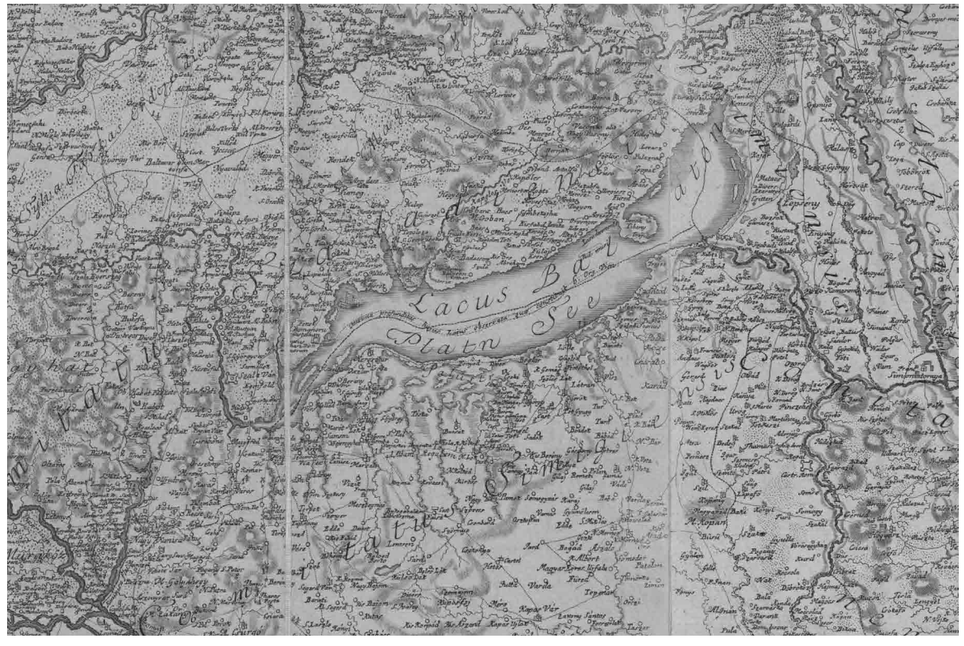
délre forduló irányát, kiküszöbölve ezzel a korábbi térképek ÉNy–DK-i csapású Duna ábrázolásának vízrajzi torzítását. Ugyanebben az időben Stephan Wallner mérnökszázados a Tisza völgyének hasonló felmérését végezte el. A századforduló új és a korábbiakat lényegesen meghaladó pontosságú alapanyagainak felhasználásával a magyar Kamara megbízásából 1709-ben Johann Christoph Müller elkészítette Magyarország első, lényegében valósághűnek tekinthető térképét.

A török uralom alól felszabadult ország újjáélesztése, betelepítése rendkívül sokrétű felmérési és kitűzési feladatot rótt a szakemberekre. A katonai térképészek leginkább csak új települések kitűzésében és telepítési térképek készítésében vettek részt. A közigazgatás (adóztatás), a birtok-, erdő- és határrendezések, vízszabályozási munkák alapvetően polgári feladatok voltak, és a fellendült szakemberigény magával hozta a felsőfokú szakképzést. Nagyszombat egyetemén már az 1600-as évek második felétől számos földmérő és térképész tanult, majd az egyetem Budára költözése után az Institutum Geometricum-on folyt a képzés. Selmecbányán az 1735-ben megindult felsőfokú bányászati akadémia ugyancsak számos földmérőt bocsátott ki. Itt tanított a hazai polgári térképészet jeles tudósa, Mikovinyi Sámuel, akinek munkái rendkívüli hatással voltak a polgári térképészetre. A földmérők számtalan pontos kéziratos térképpel szolgáltak a kisebb méretarányú térképek szerkesztéséhez.

Mikoviny Sámuel megyetérképe

A Balatonról újabb érdemi információkat leginkább Mikoviny Sámuel, 1735(?)-ben megjelent, Veszprém megyét ábrázoló kéziratos térképén találhatunk. Bár Veszprém megye ebben az időben csak a tó parti sávjának kis részére (nagyjából Balatonalmáditól Siófokig) terjedt ki, a partvonal-ábrázolás és a vízrajz változása jelentős Lázárhoz képest. Tihany itt már az északi parthoz csatlakozó félsziget, benne a Belső- és Külső-tóval, a somogyi parton Boglár és Fonyód dombjaival, és megjelenik a Sió, amely a Cinca vizét felvéve a Kaposba ömlik. Mikoviny megyei térképei az elsők, amelyeket dokumentált földrajzi helymeghatározás alapján kapott koordinátákkal is elláttak, ezek pontossága körülbelül 5 szögpercre (5–8 kilométer) becsülhető. Mikoviny megyetérképei azonban nem készültek el teljes számban, így a Zala megyei mű sem, pedig a Balaton szinte teljes északi partja Zala megyéhez tartozott akkor.

A déli partvonal hiányát Müller Ignác 1769-es országtérképe pótolta valamelyest. Számunkra e térkép az eddigiekben megadott topológiai elemek (Tihany félsziget-jellege és tavai, déli parti dombok, vízfolyások) megerősítésén túl már a Balaton vízmélységére is utal. Térképén a mainál a Kis-Balaton irányába akkor természetesen hosszabb tó furcsa banánalakban a két végén északra hajlítva jelenik meg, ami felmérési hibákból adódhat. Ugyanakkor



A Balaton legmélyebb részét kijelölő vápa Müller I. 1769-ben készült térképén

az ő térképe az első, amely mélységadatot tartalmaz: a tó nyugati medencéjének a középvonalában egy 6 bécsi öl (11,3 méter) maximális mélységű keskeny árkot ábrázol.

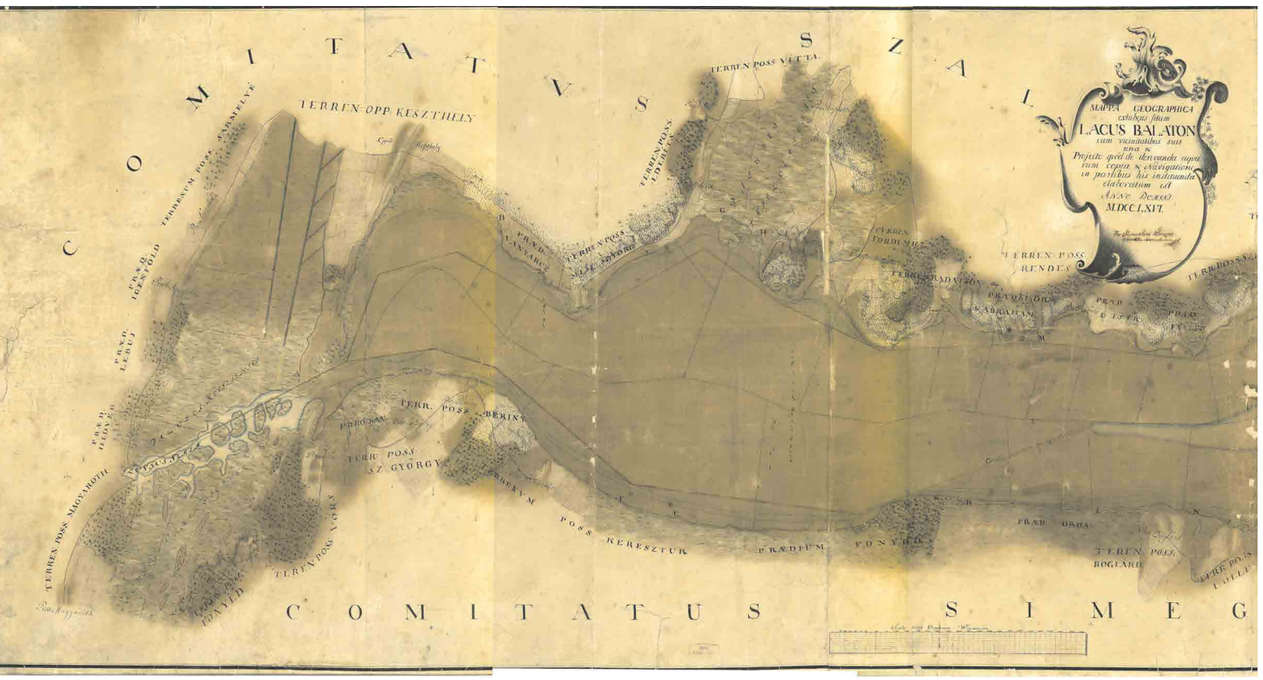
Krieger Sámuel 1776-os kéziratos Balaton-térképe

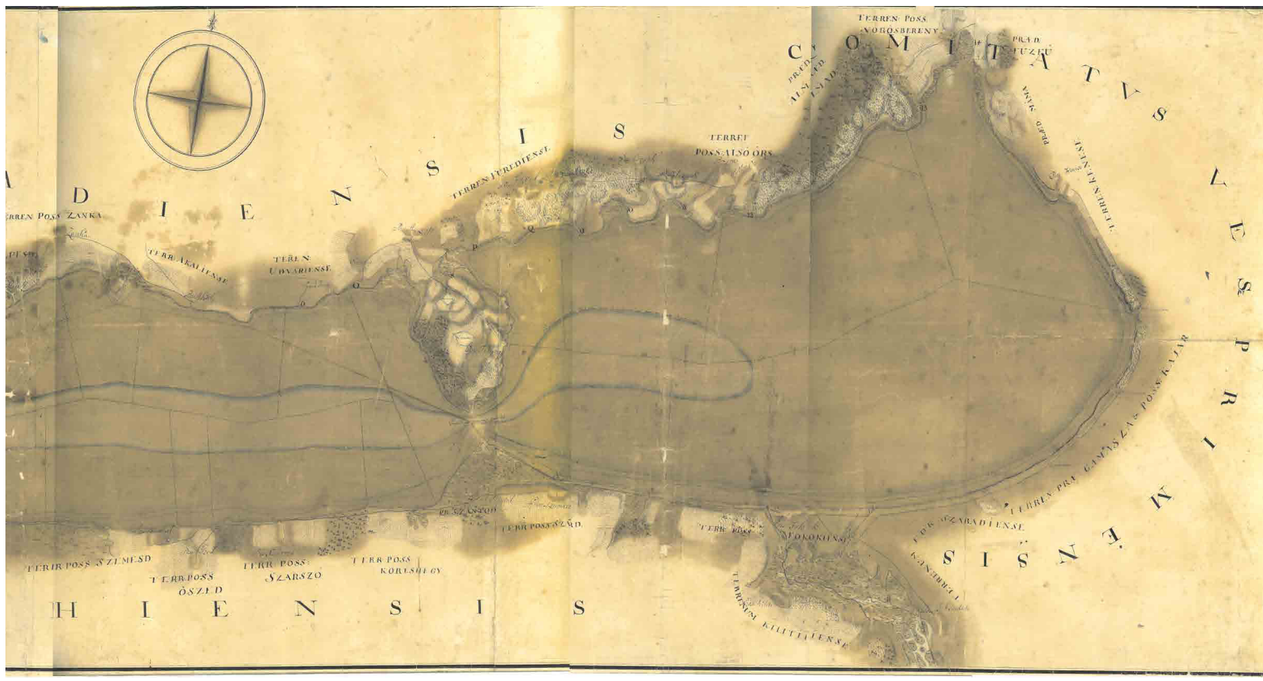
Az első olyan térképmű, amelynek kifejezett célja a Balaton ábrázolása volt, Krieger Sámuel 1776-os, két kéziratos példányban fennmaradt Balaton-térképe. A térképezés célja a Balaton lecsapolásának előkészítése volt. A gigantikusra tervezett természetátalakítás célja egyrészt a Sió és Zala hajózhatóvá tétele, másrészt pedig termőföld nyerése lett volna. A térkép tehát feltünteti a becsatornázandó folyószakaszokat és az egyes települések leendő határát a tómeder helyén. A térkép méretaránya 1:34 560 (a kor mértékegységeivel egy hüvelyk ötszáz ölnek felel meg), tehát a mai turistatérképekhez hasonló részletességű, papíron körülbelül 2×0,5 méter területű. Krieger részletesen bejárta a Balaton környékét, és korának legjobb geodéziai módszereivel és eszközeivel dolgozott. A munka során felvette a Balatonba betorkolló folyók vízhozamát, sőt vízmélység-méréseket is végzett, bár mérési pontjainak nem ismerjük a helyét. Megfigyeléseit, eredményeit a térképhez kapcsolt részletes latin nyelvű dokumentációban közölte, ami a tóról írt legkorábbi tudományos monográfiának tekinthető.

A Krieger-térkép mélységvonalai lehetővé tették a tó vízszintjének rekonstrukcióját. Ha elhanyagolhatónak vesszük a tó átlagában a feliszapolódást – vagyis feltételezzük, hogy Krieger idejében a vízszint más volt, mint most, de a tómeder nagyjából hasonlított a jelenlegihez –, akkor az általa feltüntetett mélységvonalak helyén a meder tengerszint feletti magasságához hozzáadhatjuk a Krieger által mért vízmélységet, és megkapjuk a Krieger korabeli vízszint tengerszint feletti magasságát. Ha ezt több pontban is elvégezzük, az eredmények szórásából következtethetünk a becslés pontosságára. A Krieger-térkép esetén ez a művelet meglepően pontosnak tűnő eredményeket adott. A rekonstrukció eredménye azonban némiképp meglepő: 107,0 méteres Adria alapszint fölötti magasságot kaptunk, tehát Krieger idejében a Balaton középvízszintje a jelenleginél csak két méterrel volt magasabb. Ez az adat a tó legkorábbi, geodéziai felmérésből származó vízszintje.

A XVIII. század végére a katonai és polgári térképészet szinte függetlenül működött egymás mellett. Az osztrák irányítású katonai térképészet (Militar-Geographische Institut, Bécs) megkezdte a több mint 140 évig tartó katonai felméréseket a birodalom területén. Ebből a polgári térképészet szinte semmit, vagy igen szerény részt tudott csupán felhasználni. Saját, polgári célú mérései azonban fokozatosan lehetővé tették a jelentősebb birtokok, erdők, régiók és teljes vármegyék mai értelemben vett „pontos” felvételét. Különösen fontossá vált a vízszabályozás és a vízrendezés feladata, mert az évszázadokig elhanyagolt munkák miatt az évenkénti árvizek és a kiterjedt lápvilág a közlekedéstől a termőföldek használatba vételéig mindenféle fejlődést gátolt. A katonai térképek titkossága miatt ezekre a polgári céllal készült részletekre támaszkodhatott Lipszky János, aki a XIX. század első felének igen népszerű, az adott körülmények között a legkorrektebb országtérképét szerkesztette meg.

Krieger Sámuel kéziratos Balaton térképének részlete, körülhatárolva a tó legnagyobb mélysége





A Krieger-térkép…

Krieger térképét mai digitális térinformatikai rendszerbe illesztve átrajzoltuk a rajta feltüntetett mélységvonalakat, és a rajz minden egyes töréspontjára kiszámítottuk a meder tengerszint feletti magasságát. A térképen a két- és háromöles mélységvonalakat tartottuk hitelesnek (az egyöles mélységvonal a későbbi partvonalváltozások, feltöltések miatt túl sok hibás pontot tartalmazott), így két, részben függetlennek tekinthető mintarendszer adatait hasonlíthattuk össze, egyenként több ezer ponttal. Az adatok szórása egy méter körüli, a két adatrendszerből számított vízszint különbsége fél méternek adódott. Krieger leírja azt is, hogy a tó vízszintje egy-egy éven belül három–négy lábat ingadozik (0,9–1,2 m), tehát a becslés hibája belül esik a rendszeres ingadozáson.

Lipszky János térképe

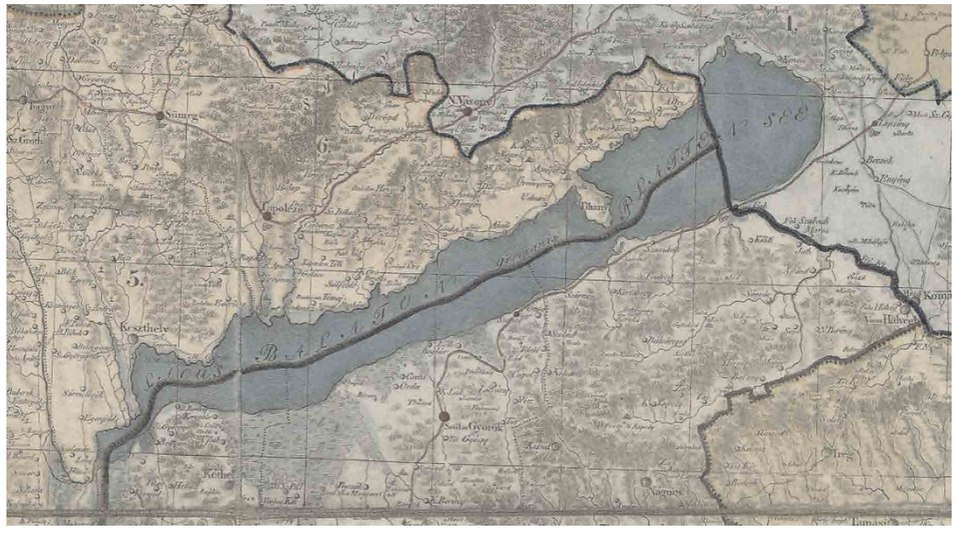
Lipszky János huszártiszt 1804–1810 között elkészített, 12 szelvényes, körülbelül 1:480 000 méretarányú (tehát körülbelül a mai autótérképek felbontásában készült) térképműve a két évtizeddel korábbi, első katonai felmérésen kívül az első olyan térkép, amelyet nagyjából pontosan illeszthetünk a mai térképekre, így számszerű vizsgálatokra is alkalmas. Méretaránya alapján országtérkép, a Balaton és környéke a 4. szelvényen, egyben látható. Rátekintve a mai szemmel ismerős alakot követi, délnyugaton a Kis-Balaton ekkor még szerves részét képezi. A kapcsolódó folyóhálózat már a modern ismeretekkel nagyrészt azonos, a partvonal egyes apró részletei azonban mai ismereteink alapján bizonytalanok, illetve felszínközeli mintavétellel esetleg igazolhatók.

Népszerűségét számos kiadása, kisebbített változata, és az Edmund von Zuccheri kiadásában újrametszett, számos kiadást megélt falitérképe igazolja. A Lipszky-térkép szolgált François Sulpice Beudant geológiai országtérképének topográfiai alapjaként is.

A Habsburg katonai felmérések

A Habsburg Birodalom egymást követő katonai felmérései jelentik a nagy felbontású (nagy méretarányú) topográfiai igényű térképeket tágabb régiónkról, így a Balaton környékéről is. Magyarországon az első felmérés 1783–86 között; a második felmérés 1822–1861 között; a harmadik felmérés 1880 után zajlott.

Az első katonai felmérés térképeinek méretaránya metrikus rendszerben a francia mintánál háromszor nagyobb (részletesebb), azaz 1:28 800, vagyis a mai turistatérképeknél is részletesebben ábrázolta a terepet. Geodéziai



Lipszky János 1805-ben kiadott országtérképének Balatont ábrázoló részlete

A Habsburg katonai felmérések eredete

Az 1700-as évek közepétől Franciaországban a Cassini-csillagászdinasztia négy, egymást követő tagja állt igazgatóként a párizsi obszervatórium élén. Munkájuk eredményeként elkészült az első topográfiai országtérkép, 1:86 400 méretarányban. A felmérés és a térképezés módszere hamarosan egyfajta európai szabvánnyá vált. Miután a hétéves háborúban (1750–1757) Franciaország és a Habsburgok szövetségben voltak, és a baráti viszony egész a francia forradalmi időszakig fenn is maradt, a francia tudósok ezt az ismeretet 1761-ben átadták az osztrákoknak. Az első katonai felmérés a birodalom területén ezt követően indult meg. Magyarország területén már II. József császár idejében készült el, emiatt a térképművet „Jozefiánus felmérés”-ként is emlegetik.

háttere bizonytalan, szelvény-alapú illesztéssel a mai térképekhez képest 1–2 kilométeres vízszintes eltolás mutatkozik, amit helyi korrekcióval 200 méter alattira lehet javítani. Az első katonai felmérés – a bő fél évszázaddal későbbi második felméréshez hasonlóan – a gyalogsági harcászat igényeinek megfelelően készült. Emiatt elsődleges fontosságú célja az volt, hogy az egyes terepszakaszok megközelíthetőségét bemutassa; így a területek „mocsár” jellege minden mást felülír, a „mocsaras erdők” esetében az „erdő” bemutatása sokszor elmarad. De épp emiatt az első katonai felmérés a Balaton környéki berkek, lápok és mocsarak első nagyméretarányú térképi ábrázolása is. A tó partvonalának helyzete a mainál némileg magasabb vízszintnek megfelelő.

A második katonai felmérés az első olyan topográfiai térképmű, amelynek geodéziai



A második katonai felmérés topográfiai térképlapja (részlet)

kontrollja már megközelíti a mai kartográfiai termékekét. Méretaránya azonos az első felmérésével. Bár a szelvények az első felméréshez hasonlóan sem földrajzi sem térképi-vetületi koordinátákat nem adnak meg, a szelvényhatárok vetületi hálózati vonalakként értelmezhetők, és így egy ismert geodéziai elhelyezésű alapfelületen, a bécsi Stephansdommal, mint vetületi kezdőponttal definiált Cassini-vetületben a szelvények sarokpontjai elhelyezhetők. E módszerrel a mai térképekhez történő illesztésének hibája térségünkben maximum 40–50 méter (2 térképi milliméter), amit akár a szelvények szkennelés előtti hajtogatása, vagy vászonra kasírozása is okozhat.

A második katonai felmérés – méretarányát, az ábrázolás és a geodézia minőségét együttesen tekintve – korának vezető térképműve volt, vagyis Magyarország és így a Balaton is a XIX. század közepén a világ legkorszerűbben feltérképezett részéhez tartozott. A térképmű felmérési ideje a Balaton térségében a szabadságharc körüli: Veszprém környéke 1846–1847; míg a part nagy részén 1855–1857 közötti, vagyis bőven az 1867-es déli parti vasútépítés és a kapcsolódó vízszintcsökkentés előtti. Az 1:28 800 méretarányú felmérési szelvények alapján 1:144 000 méretarányú, rézbe metszett átnézeti térképek is készültek. Ezek a polgári felhasználók számára egyéb térképművek híján igen jelentősek voltak. A földtudományi jelentőségük abban nyilvánult meg, hogy az alábbiakban ismertetett, 1:144 000-es földtani térképek számára ez a térképmű szolgált munkatérképként, azaz fekete-fehér alapként, amelyre a geológiai ismereteket manuálisan „rászínezték".

A harmadik katonai felmérés gyökeres változást hozott az előzőkhöz képest. A Cassini-féle felmérési és térképezési módszer helyett immár a tüzérség igényeinek megfelelő, szögtartó térképsorozat elkészítése volt a cél. A felmérés méretaránya 1:25 000 volt, és az ezekből származtatott, azonos korú állapotot mutató 1:75 000 méretarányú szelvényekkel gyakran találkozhatunk például antikváriumokban; utóbbit ugyanis már sokszorosították, ezért a széles közönség számára is elérhetővé vált. Az 1:75 000-es méretarányú szelvényeket még a második világháborút követően is felhasználták a geológiai, illetve geofizikai észlelési térképek munkatérképeiként.

A térképmű geodéziai és vetületi alapja mindazonáltal az új technológia miatt számos gyermekbetegségben szenvedett. A geodéziai alappontok hálózatát elkezdték az akkor kifejlesztett Gauss-féle kiegyenlítéssel ellipszoidra helyezni, ez a munka azonban nem fejeződött be az 1878-as Balkán-háború miatt. A szelvényeket az 1880-as évek elején rohammunkában kinyomtatták úgy, amilyen állapotban épp voltak, emiatt azonban a vízszintes illeszkedés globális hibája ismét több száz méter lett, ami szerencsére az egyes helyszíneken javítható. A hálózati kiegyenlítés 1892-ben elkészült, és adatai 1901-től elérhetővé váltak. A korrigált térképek egy részét a háború idején kiadták, a teljes új kiadás azonban a Monarchia megszűnése miatt elmaradt.

A térkép vetülete az 1:75 000-es lapokhoz rendelt síkdarabokból álló poliéderhálózat. Ez szelvényen belül szögtartó, de a szelvényhatárokon a térkép nem illeszthető síkban. Az 1:25 000 méretarányú szelvényeken helyenként már megjelenik a szintvonalas domborzatábrázolás. (Ezt megelőzően a domborzatot számszerűen csak a csúcsokon és a geodéziai alapponton adták meg, minden más helyen a gyalogsági hadviselésben fontos meredekségre utaló „csíkozás" volt a domborzatábrázolás alapja, bár az esésirányú csíkozás megrajzolásához szükség volt a szintvonalak meghúzására.) A hiányos magassági adatok kiegészítésére a földtani terepbejárások elmaradhatatlan műszerévé váltak a közelítő magasságot megadó barométerek.

Magyar felmérések

A függetlenné vált ország területi változásai szerencsére nem érintették a Balaton térségét. Az önálló magyar térképészet, katonai irányítás mellett megkezdte a korábbi osztrák–magyar térképek felújítását és a változó terepviszonyok feltüntetését. Ez a munka a második világháborúra a teljes (ideiglenesen megnőtt területű) országra elkészült. A térképmű méretaránya 1:50 000 lett, amelyet részben a Gellérthegy-középpontú síkvetületi koordinátákkal, részben a második világháborúban, a német hadsereg által használt koordinátarendszerrel láttak el.

A második világháborút követően, az 1950-es években először ezen térképek felújításával készült el az ország 1:25 000 méretarányú katonai térképsorozata. Hazánk északkeleti tájain ennek koordinátarendszere már a Szovjetunióban használt 1942-es rendszer volt, míg az ország egyéb tájain – így a Balaton térségében is – az 1950-es évek elején még a német világháborús katonai hálózat volt az alapfelület. Ez a helyzet 1958-ig állt fenn. Az új, egységes katonai térképsorozat már a szovjet rendszert használta, és ennek minimális módosításával és felújításával készült az 1983-as katonai sorozat is.

Időközben, 1975-ben a magyar polgári térképészet bevezette az Egységes Országos Vetületet (EOV), amely mindmáig a hazai topográfiai és kataszteri térképészet koordinátarendszere. Ebben a rendszerben a legrészletesebb térképek méretaránya 1:10 000. A Magyar Állami Földtani Intézet 2000-es években kiadott geológiai térképsorozatának alaptérképeit az EOV 1:100 000 méretarányú lapjai jelentik, míg a megelőző, szocialista korszakban a geológiai térképek bázisát a szovjet rendszer 1:200 000 méretarányú lapjai adták, hasonlóan a Varsói Szerződés többi tagállamához.

Földtani térképek

Országleírások földtani vonatkozású térképekkel

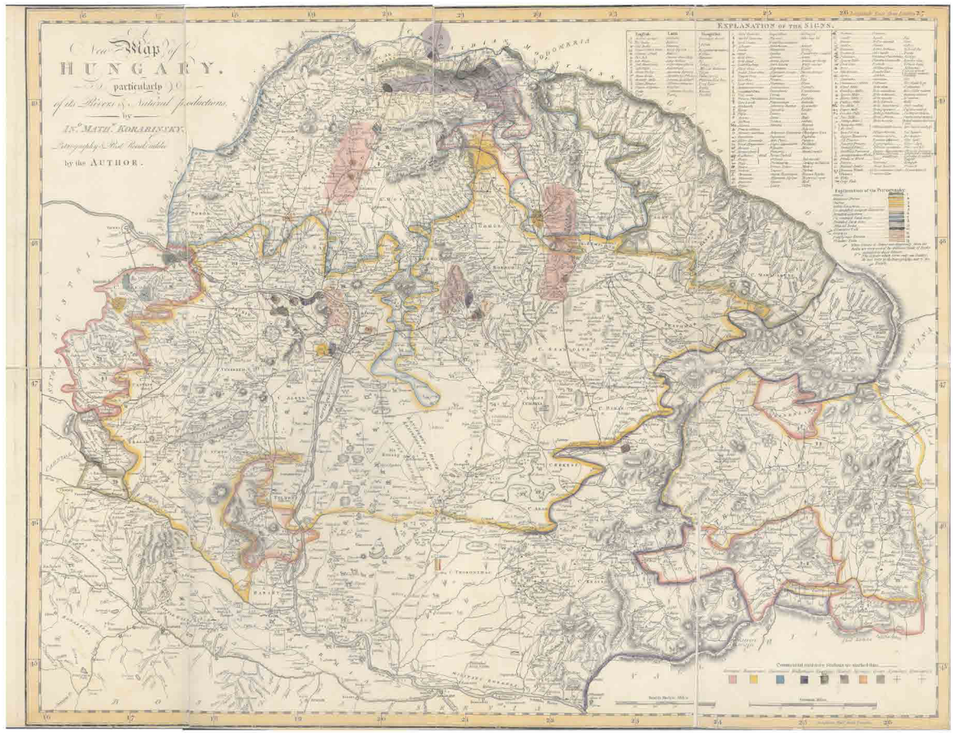
Az 1700-as évek végétől kezdve, a Magyarországról kevés információval rendelkező nyugat-európai országokból számos utazó tett kisebb-nagyobb körutat hazánkban, amelyek alapján aztán térképmellékleteket tartalmazó, vaskos országleírások készültek. Előbb Robert Townson, angol természettudós járta be az országot, aki 1797-ben megjelent könyvének mellékletéhez egy már meglévő, Korabinszky János Mátyás által szerkesztett térképet használt fel. Térképe – így a Balaton és vidéke is – a helyszíni ellenőrzés nélküli, másolt források miatt elnagyolt, de különös értéke, hogy az északi országrészeken, foltszerűen egyes földtani képződmények elterjedését is feltünteti. A térkép, bár tartalmaz utalásokat a kőzetek minőségére, előfordulására, csak távoli rokona a mai geológiai térképeinknek: a tudós utazásának helyszínein és azok környékén, nem feltétlenül saját észlelései, hanem sokszor a helyiek elmondása alapján rajzolt be foltszerűen kőzetjeleket Korabinszky országtérképére. A Townson-térkép a Balaton térségére még nem ad helyi geológiai ismeretet.

Lényegesen fontosabb földtudományi szempontból a francia François Sulpice Beudant háromkötetes munkája. Az 1822-ben napvilágot látott vaskos munka mérföldkőnek tekinthető, mert kétkötetnyi országleírás mellett a harmadik kötet teljes egészében egy alapos bejáráson nyugvó leírást ad az akkori idők

Földtani térképek

Földtani (geológiai) térképeknek azokat nevezzük, amelyek a felszínen található, vagy az eltemetett kőzettestek anyagi minőségét (kőzettípusát) és esetleg azok érdekes, számszerűsíthető paramétereit térképszerűen mutatják be. A geológiai térkép lehet „fedett földtani térkép”, amelyen a legújabb időszak üledékei „elfedik” az idősebb kőzeteket és csak a felszínen található kőzettípusokat (az úgynevezett formációkat) mutatják be. Ezzel szemben a „fedetlen földtani térkép” csak egy bizonyos kornál idősebb kőzetek elterjedését ábrázolja. A földtani térképeknek is van geodéziai alapjuk; rendszerint valamely topográfiai térképmű vagy országtérkép fontosabb síkrajzi elemeit (folyók, tavak, utak, települések, határok) tartalmazó változatát használják e célra; ezt színezik ki geológiai tartalommal úgy, ahogy gyerekeink a kifestő könyvet – a nem elhanyagolható különbség, hogy ezek esetében a „kifestést” komoly terepi és laboratóriumi vizsgálatok alapján végzik.

világszínvonalú francia földtani ismereteinek az alkalmazásával, térképi mellékletei pedig egy külön, 4. kötetbe vannak egybekötve.

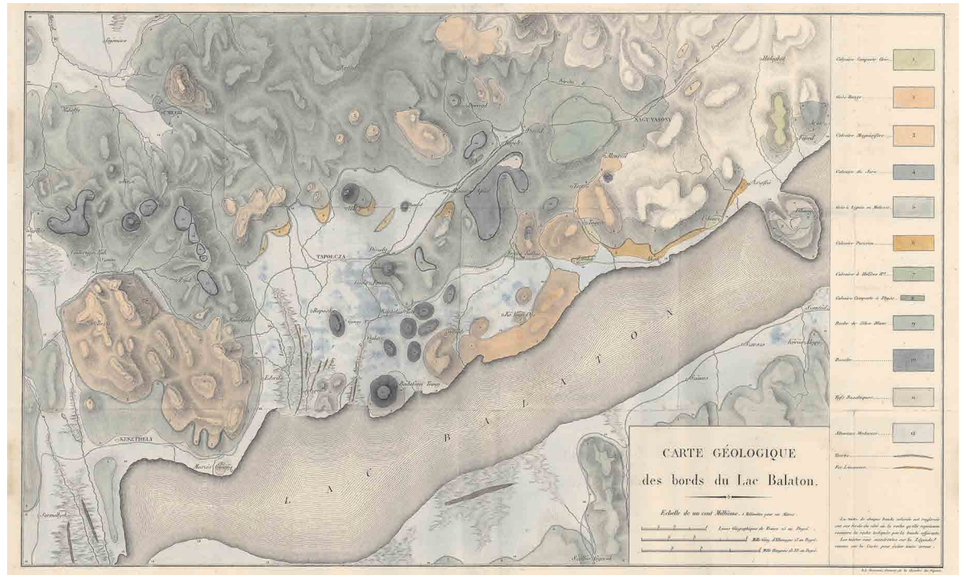


Hazánk első, nagyobb területet ábrázoló, színezett földtani térképe (Townson, 1797)

Az országtérkép alapjául – ahogy a szövegben meg is jegyezi – a korábbiakban leírt Lipszky-féle térképet használta fel. Méretarányai is újszerűek, rendhagyók voltak: az új, méter alapú francia hosszmértéket alkalmazta, évtizedekkel megelőzve a mindenféle váltószámokkal (mérföld, lépés, öl, láb, vonal stb.) dolgozó térképészeket. Az országtérkép egymilliós, a részlettérképek, így a Balaton vidéke is, százezres méretarányú. Ezért térképészeti tekintetben is úttörő jelentőségű a kiadvány.

Az országhatárokon túlnyúló földtani térkép 27 jelkulcsi elemével a kőzettani alaptípusok tekintetében napjainkban is helytálló, számos földtani szelvénye pedig jól tükrözi a leírt képződmények települési viszonyait.

Két részterületet külön kiemel a munkájában: Selmecbányának és környékének a bányászati je-



François Sulpice Beudant földtani tartalmú térképe a Balaton környékéről. M=1:100 000

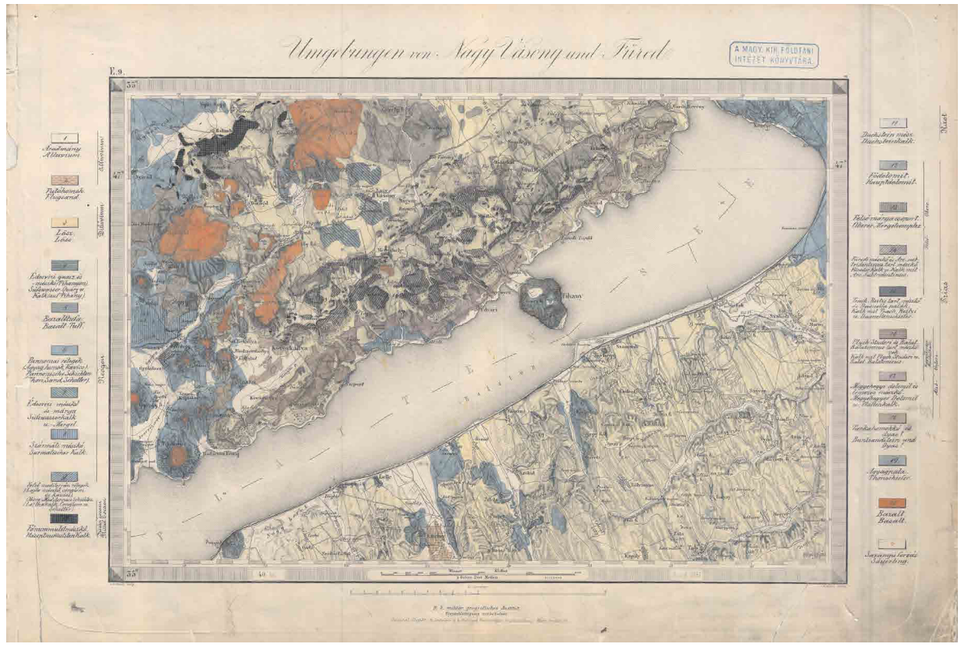
lentősége indokolja a részletes térképét; a Balaton vidékének kiválasztásában pedig a földtani felépítés és a földrajzi–vízrajzi különlegessége is szerepet kaphatott. Mindazonáltal a Balaton térségének geológiáját nagy vonalakban pontosan vázolja fel: felismeri a Dunántúli-középhegység fő tömegének és a Keszthelyi-hegységnek a karbonátos jellegét, a fiatalabb üledékes formációkat, és a Balaton-felvidék bazaltfoltjait is.

A földtudományi célú térképek megjelenése

Ahogy a Balaton és a hozzá kapcsolódó mocsarak ábrázolásának kezdeti tökéletlenségei fokozatosan elmaradtak, úgy vált a XIX. században egyre inkább lehetőséggé a tónak a mind részletesebb ábrázolása, a környezetében zajló folyamatoknak a szakszerű kimutatása, a változások meghatározása és számszerűsítése.

Ahhoz, hogy a talpunk alatt lévő szilárd közeg földtani jellegzetességeit, így korukat, képződési viszonyaikat és kőzetösszetételüket meg lehessen határozni, alapfeltétel a megfelelő topográfiai térképalap. Az Osztrák Császárságban ugyan elsősorban hadi célok vezérelték a topográfiai térképezést, de a felszabadított területeken megindult iparosodás következtében megnövekedett a nyersanyag- és energiaigény, és persze az állandó háborúskodáshoz nélkülözhetetlen nemesfémbányászat. Ezek fejlesztése magával hozta a nyersanyagkutatás alapvető feltételének, a rendszeres geológiai kutatásoknak és a földtani térképezésnek a birodalmi szintű irányítását. Ennek központi szervezete az 1849-ben alakult bécsi Geologische Reichsanstalt, és az 1869-től önállóan működő Magyar Királyi Földtani Intézet lett.

Mindkét intézmény a földtani felvételek végzéséhez igényelte a megfelelő részletességű topográfiai térképi alapokat. Kézenfekvő lett volna az első és második katonai felvétel térképeihez fordulni, de a katonai titkossági rendszabályok felülírták az értelem szabályait. Az egypéldányos (kétpéldányos) kéziratok titkosak voltak, és igen nehéz volt ezt az akadályt megkerülni. Legelőször a második katonai felvétel eredetijéről engedélyezték egyszerűsített másolatok készítését, amit



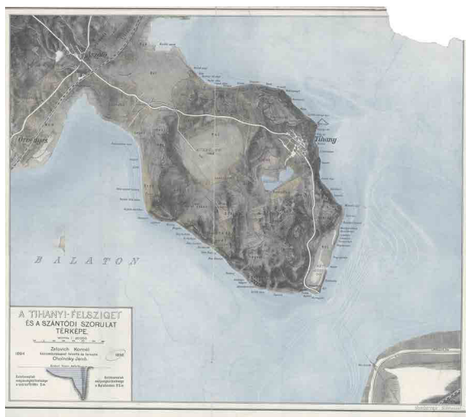
Nagy-Vázsony és Füred vidéke. (Umgebungen von Nagy Vazsony und Füred 1:144 000) M. Kir. Földtani Intézet kiadványa (Böckh János, 1881, kézirat)

aztán a terepen használni lehetett. A felvételi lapok azonban sohasem váltak közkinccsé. Mindössze annyit ért el a polgári közigazgatás és a civil oldalról egyre hangsúlyosabban fellépő igény, hogy 3×3 felvételi lap egybevonásával összeállított, úgynevezett részletes térképek (Spezialkarte) 1:144 000-es lapjai megjelenhettek nyomtatásban.

Ennek megfelelően, az országról készülő rendszeres földtani felvételt is ezeken a nyomtatott szelvényalapokon kezdték el közreadni. A lapokon már főbb vonalakban felismerhető a földtani felépítés a mai ismereteinknek megfelelő alakban, így megfelelő támpontot adtak a részletesebb felvételeknek. Ilyen például a Balaton túlnyomó részét magába foglaló nagyvázsonyi szelvény.

Cholnoky Jenő Balaton kutatásai

Cholnoky Jenő eredetileg vízépítő mérnökként végzett 1892-ben. Első balatoni térképét is vizes témában készítette Zelovich Kornéllal, aki akkor a József Műegyetem Mérnöki Osztály Víz-, Híd-, Út- és Vasútépítéstan Tanszéke tanársegédje volt. Közös munkájuk *A Tihanyi-félsziget és a szántódi szorulat térképe* néven jelent meg, magyar és német kiadásban. Feltételezhetően ez a munka indította Lóczy Lajost, hogy a fiatal mérnököt pályaelhagyásra ösztönözze, és bevonja a balatoni kutatásokba. Ennek eredménye a Balaton monográfia limnográfiájának leírása, aminek a

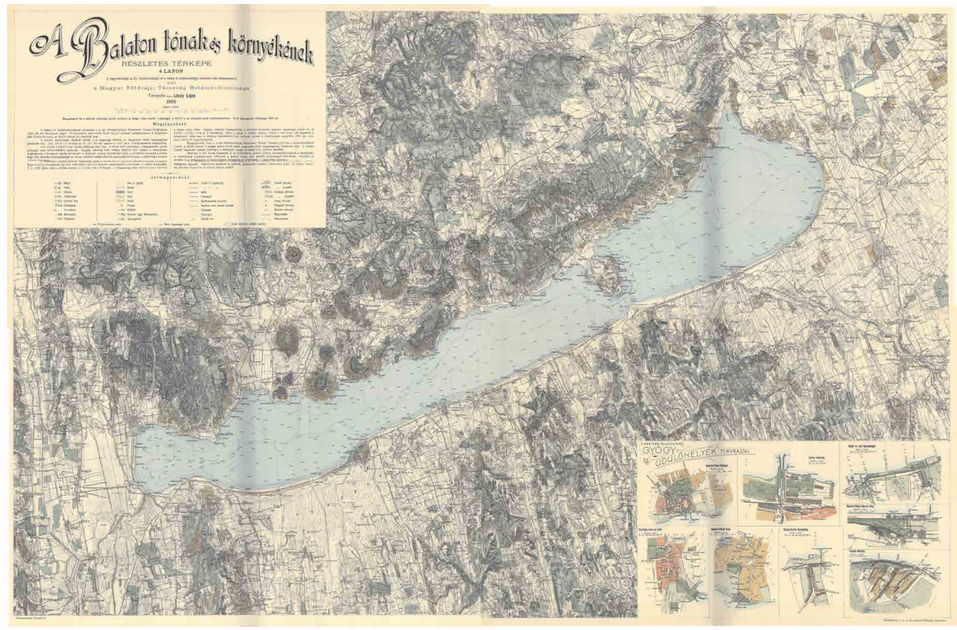


Cholnoky J. és Zelowicz K. 1897: A Tihanyi-félsziget és a szántódi szorulat térképe 1:20 000

részeként megkezdődött a tó vízszintingadozásainak (denivellációjának) rendszeres mérése, a Balatonkenesén és Keszthelyen létesített „limnografus”-ok telepítésével. Ugyancsak őt bízta meg Lóczy, hogy a Balaton medencéjének hidrográfiai leírását elkészítse. Cholnoky munkásságának folytatásaként még számos Balaton szintvonalas mélységtérkép keletkezett 1896 és 1930 között, egy részük nyomtatásban.

A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei

Az 1800-as évek végén indult meg a Magyar Földrajzi Társaság kezdeményezésére a Balaton és az azt körbezáró régió kutatása. A megjelentetett, *A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei* című monográfiában



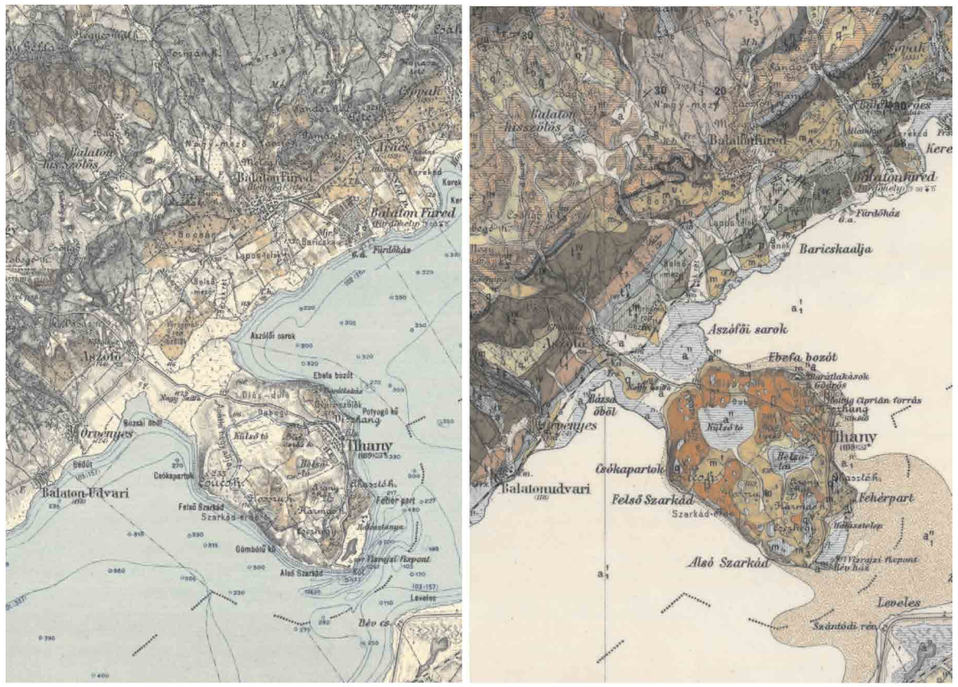
A Balaton vízmélységének szintvonalai Lóczy 1903-ban kiadott 1:75 000-es topográfiai térképén

természetszerűleg kiemelt helyet foglalnak el a földtudomány különféle szakterületei és 1:75 000-es méretarányú térképei.

Maga a térkép két változatból áll. Először, 1903-ban a topográfiai alap jelent meg. Négy finom rajzolatú lapján a mederben szintvonalak mutatják a tófenék domborzatának abszolút magasságait 1 m-es mélységközökkel.

A másik változatot, a Balaton-felvidék földtani térképezésének és szintézisének térképét az I. világháború miatt késéssel, 1920-ban publikálták. Alapja az 1903-as részletes térkép volt. A fenékmélység ugyan hiányzik róla, de topográfiai alapja így is bőséges lehetőséget ad az alapos tudományos értékelésekhez. A rétegsorok monografikus leírásai még napjaink földtani felvételeinek menetét és rétegtani felosztását is alapvonalaiban határozzák meg. Maga a jelkulcs is mutat érdekességeket, különösen annak tükrében, hogy geológus eleink folyamatosan részt vettek a nemzetközi egységesítésben és a nemzetközi földtani jelkulcs kialakításában. Lóczy remek kartográfusi érzékkel rendelkezett, így szabadon átlépett néhány színkulcsi előírást, és a Balaton-felvidéken kitérképezett, a rétegek csapása mentén több tíz kilométeren át követhető vezető szinteket kék

raszterrel, vagy akár függőleges barnás vonalkázásokkal emelte ki. A szabályostól eltérő ábrázolási mód tökéletesen kirajzolja az idős permi és mezozoikumi üledékes összletek szerkezetét. Zseniális húzás: a közérthetőség elsődlegessége a görcsös szabálykövetések helyett.



A Tihanyi-félszigetet és Balatonfüred környékének topográfiája (1903) és földtana (1920) Lóczy térképein

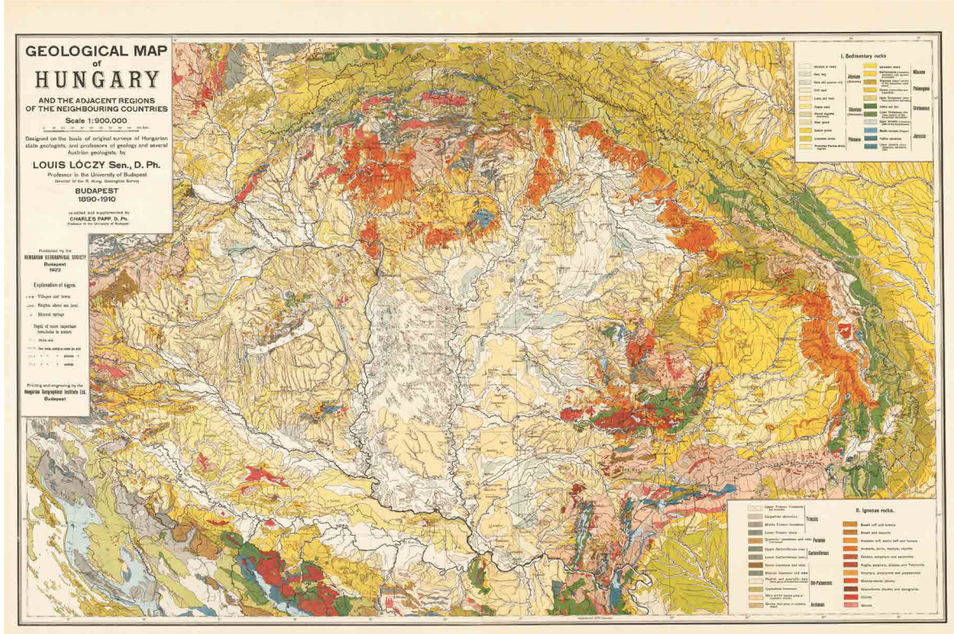
A monográfia külön fejezetben foglalkozik a XVI. század folyamán megjelent térképekkel, elsődlegesen a tó megjelenésével és környékének víz- és névrajzával. Értékelése kissé szigorú: hibákról és elrajzolásokról beszél, figyelmen kívül hagyva, hogy csak a XIV–XVI. században, a földrajzi felfedezések és a fél kontinensekre kiterjedő háborúskodások miatt kezdett el felgyorsulni a helymeghatározások és térképi ábrázolások fejlődési folyamata. A fellelhető térképek csupán a legelső lépései voltak egy több évszázados folyamatnak. Részletesen elemzi Lázár deák térképét, a már említett Wolfgang Laziusnak és Zsámboky Jánosnak az Ortelius-atlaszban együtt megjelenő változatait, a számos nyomtatást megélt Mercator-féle térképet, továbbá Münsternek a *Magyar- és Lengyelország új leírása* című fametszetes térképét. Ez utóbbit még a többinél is hevesebben bírálja, pedig a térkép csupán a szerző egyik kedvelt ismeretterjesztő kiadványának a melléklete volt, egy, a számos kiadást megért világleírás tengernyi képe között.

Földtani térképek Lóczy monográfiája után

A Magyar Királyi/Állami Földtani Intézet az 1869-es alapítása óta alapfeladatának tekintette a kor színvonalának megfelelő igényességű áttekintő, vagy részletes földtani térképezések végrehajtását, kutatási eredményeinek térképi és szöveges formában való közreadását. Számos kiadványa a magyar műszaki tudományok és a kartográfia kiemelt jelentőségű, mindenhol számon tartott alkotása. A felvételezések visszatérően, több generációban ismétlődtek, ami a tematikával szemben támasztott felhasználói igények szakadatlan változásából és az alkalmazott módszerek fejlődéséből ered.

Az ország területéről készült korai, XIX. századi földtani térképekről már volt szó. A XIX. század végének és a XX. század elejének térképei közül első helyen a Magyarhoni Földtani Társulattal együttműködésben, Böckh János vezetésével megszerkesztett, 1896-ban kiadott térképet, valamint a szintén egész Kárpát-medencét ábrázoló 1:900 000 méretarányú, Lóczy Lajos által szerkesztett, és halála után Papp Károly közreműködésével kiadott térképet említjük. Ezek a kartográfiai és nyomdatechnikai értelemben vett csúcsteljesítmények a mai országhatáron túli területekre is kiterjedtek, és tökéletesen visszaadják a Kárpátok által körülzárt terület egységes és szétválaszthatatlan földtani felépítését.

Az utóbbi évtizedekből, a mai országterületet bemutató térképek közül az 1956-ban megjelent, 1:300 000 méretarányú falitérképet, és az 1984-ben 1:500 000 méretarányú földtani térképet emeljük ki. Az 1950-es években készült egy térképsorozat 1:25 000 méretarányban, ez azonban kéziratban maradt. Jellegzetessége, hogy a hegyvidéki területeken a már meglévő felvételeket egységesítették, míg a domb- és síkvidéki részeken új, gyors (úgynevezett kerékpáros) felvételeket végeztek. Ezek a térképek szolgáltak alapjául az 1960-as és 1970-es években, több változatban, KGST szabványok alapján készült 1:200 000-es sorozatnak. Az akkor titkos minősítésű sorozat az egész ország területét felöleli, egy próbanyomati lap (Sopron) kivételével nyomtatásban is megjelent 1961–1977 között. Egy-egy tájegységről is megjelentek



Lóczy által szerkesztett országos földtani térkép (1922)

1:10 000-es és 1:25 000-es méretarányban térképsorozatok, és ezek összesítő tájegységi térképei is, de ezek jelkulcsa minden tájegység esetén egymástól eltérő elvek alapján készült.

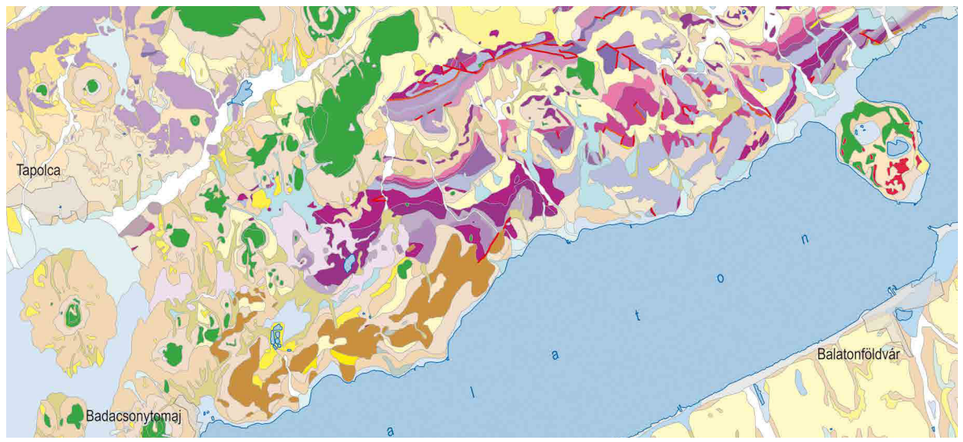
A 100 000-es térképsorozat

A Magyar Állami Földtani Intézet 2001-ben hosszútávú kutatási célként jelölte meg „Magyarország földtani térmodellje" című, geoinformatikai rendszerének a fejlesztési irányát. Ennek egyik lényeges kiindulási eleme az informatikai eszközök és GIS programok gyors ütemű fejlődése volt. A másik alappillér a felhalmozott földtani ismeretek, információk korszerű, a felhasználói igények messzemenő figyelembevételével történt adatrendszerekbe szervezése volt.

A térképezési módszertanban is jelentős változások történtek. A síkvidéki felvételek negyedidőszaki képződményeinek légifényképkiértékeléseket alkalmazó, a kor, a genetika és a jellemző kőzettani összetétel szerinti elkülönítése a hegyvidéki területeken is alapvető feltétellé vált, az idősebb képződmények esetén pedig a korábbi évtizedekben uralkodó kor, fontosabb ősmaradványok és fácies jellemzése helyett a litosztratigráfiai egységek, a formációk és a tagozatok elkülönítése vált a térképi elkülönítés alapjává. A korábban elkészült térképek esetében ez jelentős átértékelést, újabb litosztratigráfiai egységek bevezetését kívánta meg.

Az új szemléletű térképkészítés eredménye a MÁFI által közreadott 1:100 000 méretarányú földtani térképsorozat. A térképsorozat egységes, az ország valamennyi földtani képződményét magába foglaló jelkulcs alapján készült, szerkesztése Gauss-Krüger szelvényezésű, de EOV rendszerű térképlapokon történt. Az ország területét 92 darab térképlap fedi le. Az országos áttekintésű, egységes jelkulcs alapján szerkesztett térkép az intézet több mint 130 éves térképezési eredményeinek korszerű szintézisét jelenti. Ezen túlmenően web-es szolgáltatásként elérhető digitális változata közvetlenül felhasználható gyakorlati feladatok, regionális tervezések alapjául, ugyanakkor alapot szolgáltat tudományos kutatási feladatok megoldásához, további tematikus térképek készítéséhez.

Ebből az országtérképből szerkesztette meg a Földtani Intézet a kisebb méretarányú, kétszázezres, félmilliós és milliós földtani térképváltozatot. Ez utóbbi belekerült Magyarország 2019-ben megjelent Nemzeti Atlaszába.



A Magyar Állami Földtani Intézet 100 000-es földtani térképsorozatának balatoni részlete



A felszíni földtani térkép domborzatárnyékolása (földtan: Budai et al. 1999a, kartográfia: Vikor Zsuzsanna)

A Balaton-felvidék térképe

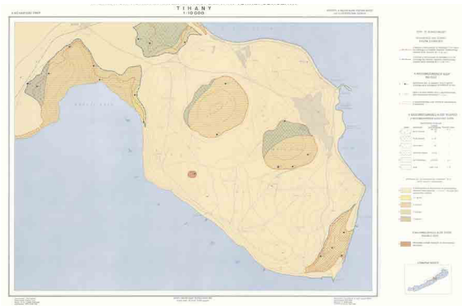
Id. Lóczy Lajos születésének 150. évfordulója (1999) alkalmából jelentette meg a Magyar Állami Földtani Intézet egy csaknem két évtizeddel előtte, nagy lendülettel megindult, majd megtorpant kutatási programjának lezárásaként a Balaton-felvidék 1:50 000 méretarányú földtani térképét és a hozzá tartozó magyarázót. Az intézet ezzel kívánt adózni egykori igazgatója, a világhírű tudós emlékének. Több mint 80 évvel Lóczy nagyszerű Balaton-térképe után elérkezett az idő egy új, a legújabb kutatások eredményeit tükröző földtani térkép megalkotásának.

A Balaton-felvidék földtani térképe némiképp túlnyúlik a tájegység földrajzi határain. Magába foglalja a Keszthelyi-hegység teljes tömegét, a Zalaszántó–Várvölgyi-medencét, nyugat felé a Zalai-dombvidék keleti peremét. Északkeleten – Veszprém környékén – a Déli-Bakony keskeny sávját, keleten pedig a Mezőföld legnyugatibb csatlakozó részét.

Az új térkép a Balaton-felvidék hegységszerkezeti felépítése tekintetében nagy vonalakban megegyezik a Lóczy-féle alapvetéssel. A különbségek a részletekben vannak. Az elmúlt évtizedekben számos mélyfúrás tárta fel a hegység mélyebb rétegeit, és hozott új eredményeket. Lóczy Lajos kora óta nagyon nagy fejlődésen ment át a rétegtan, mind módszereiben, mind pedig a nemzetközi közmegegyezéshez igazított időbeosztás tekintetében. Ennek köszönhetően számos új rétegtani egység került fel a térképlapra, vagy változott meg korbesorolása mind a paleozoos, mind a mezozoos rétegsor esetében.

Mérnökgeológiai térképek

Az idegenforgalom, az üdülés tömegessé válása az 1950-es évektől egyre nagyobb környezeti terhelést jelentett a tavon és annak közvetlen parti sávjában. A települések és környezetük egyre intenzívebb beépítése tette szükségessé a Balaton parti sávjának építésföldtani felmérését részletes, 1:10 000 méretarányban. A munkálatokat a Földtani Intézet végezte külső szakértők bevonásával. A munka első szakasza, a Tihany atlasz elkészítése (1969) meghatározó jelentőségű volt a részletes építésföldtani térképezés módszertanának kialakításában. A partvidéket lefedő, 1:50 000-es méretarányú, négy változatban megjelent atlaszok a földtani térképre alapozott



A Tihanyi-félszigetet mérnökgeológiai térképe

vízföldtani, építésföldtani, geomorfológiai térképváltozatokat tartalmaznak. Az atlaszok része egy szintetizáló térkép is, ami az építésföldtan szempontjából legfontosabb információk kombinációján alapuló értékelést, építés-alkalmassági körzetbeosztást ad a vizsgált területről.

A parti sáv építésföldtani feldolgozása után – kielégítve a tó vonzáskörzetének megnövekedése miatt felmerült igényeket – 1982 és 1991 között, kéziratos formában elkészült a Balaton Kiterjesztett Üdülőkörzet Építésföldtani Térképsorozata a tó tágabb környezetéről, 1:100 000-es méretarányú, szerkesztett változatban is.

Ismeretterjesztés

150 év alatt az intézet könyvtárának és térképtárának állománya számos ország- és földtani térképpel gyarapodott. A közfeladatok ellátása érdekében több kiállítást szervezett az intézet a Balaton környéki térképeinek megismertetésére is. Többek között a teljes Balatonra, továbbá Tihany, a Kis-Balaton és Fonyód köré szervezett kiállításokat, egyes parti településekkel együttműködve, amiket magyarázó füzetekkel látott el a látogatók ismereteinek minél mélyebb megőrzése érdekében.

Az intézet fennállásának 140. évfordulójára pedig egy olyan CD készült el, ami az elmúlt kétszáz év minden jelentősebb térképezési programját és térképét mindenki számára hozzáférhetővé tette digitális formában.

A jelenkori földtani folyamatok kimutatása a meglévő térképek GIS összevetésével

Már a Habsburg Katonai Felmérések pontossága is lehetővé tette, hogy a Balaton környéki mocsarak, vizenyős területek körvonalait átrajzoljuk egy térinformatikai rendszerbe. Régóta tartotta magát a feltételezés, hogy a Balaton környéki mocsarak kiszáradását a tó 1863-as jelentős (körülbelül 3 m) vízszintcsökkentésének köszönhetjük, de ez csak a terület- és vízszintváltozások számszerű összehasonlításával igazolható vagy cáfolható. A második és harmadik katonai felmérés vetületi rendszere lehetővé teszi az automatikus konverziót és összehasonlítást, de az első katonai felmérés illesztéséhez minden egyes térképlaphoz kontrollpontokat kellett felvenni. Ezek olyan épületek, útkereszteződések lehetnek, amelyek bizonyíthatóan nem mozdultak el a térkép készítésének időpontja, tehát a XVIII. század második fele óta. A muemlekem.hu internetes adatbázis segítségével találtunk a tó teljes vízgyűjtő területén összesen több, mint ötszáz ilyen pontot.

A területváltozások elemzése azt mutatta, hogy a Balaton környéki mocsarak területcsökkenése nem egyidejű a tó vízszintjének csökkenésével. A Sió-zsilip 1863-as megnyitása előtt, 1847-ben elbontották a Sión a Balatonhoz legközelebbi malom gátját – ez tekinthető a tó vízszintjébe való legkorábbi célzott emberi beavatkozásnak. A vízgyűjtő mocsarainak egyharmada (mintegy 120 km^2) viszont még ezelőtt – az első és második katonai felmérés között – bizonyíthatóan kiszáradt, illetve lecsapolásra került. Az adatok alapján tehát semmiképpen sem mondhatjuk, hogy a tó vízszintcsökkentése okozta volna a legnagyobb változást a mocsarak kiterjedésében, ez a területcsökkenés inkább annak köszönhető, hogy a helyi földbirtokosok célzottan lecsapolták a saját földjük mocsarait.



Mai topográfiai alapra illesztett régi térkép

Régi térképeink modern formában

Hazánk régi térképeinek minél jobb olvashatósága és összehasonlíthatósága érdekében számos térinformatikai fejlesztés történt az elmúlt tíz évben. Ezek célja az volt, hogy a jelen cikkben taglalt térképeket eredeti pontosságuk korlátaival együtt ráillessze a jelenkori térképekre, műholdak és légifényképek állományaira. Lehetővé vált a Lázár térkép, Krieger kéziratos Balatonjának, vagy éppen Lipszky 12 lapon közzétett térképének megfelelő pontosságú illesztése. A katonai felmérések vetületi paramétereinek feltárásával pedig már a MAPIRE digitális térképkezelő felület jelenlegi topográfiai alapra illesztése is megoldott.

Ezeket az elemzéseket ma már bárki megteheti, aki számítógépén belép a MAPIRE történeti térképes adatbázisba, ahol a történeti topográfiai és kataszteri térképművek a mai térképek fedvényeként tekinthetők meg. A viszonylag nagy méretarányú katonai felmérési térképeken gyakorlatilag a falusi házak alaprajzszerű ábrázolásának szintjéig nagyíthatunk a korabeli táj térképi ábrázolásába, ahol a régi térképes réteget átlátszóvá téve a mai terep jelenik meg, segítve ezzel a korabeli helyszínek azonosítását. Az így létrejött, mintegy két és fél évszázadra visszamenőleg alkalmazható „időgép” a térképészeti alkalmazások egyik gyorsan fejlődő ága, amellyel a Balaton térségében is sok érdekességet fedezhetünk fel.

Ajánlott irodalom

Bendeffy L., V. Nagy I. 1969: A Balaton évszázados partvonalváltozásai. – Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 215 p.

Budai T., Csillag G., Dudko A., Koloszár L. 1999: A Balaton-felvidék földtani térképe, 1:50 000. – Földtani Intézet kiadványa, Budapest

Galambos Cs., Brezsnyánszky K., Timár G. 2020: Magyarország első közepes méretarányú (M=1:144 000) földtani térképsorozatának georeferálása. – Földtani Közlöny 150/1, 185–194.

Gyalog L., Síkhegyi F. (sorozatszerk.) 2005: Magyarország földtani térképe, M=1:100 000. – Magyar Állami Földtani Intézet kiadványa, Budapest.

Jankó A. 2007: Magyarország topográfiai felmérései 1763–1950. – Hadtörténeti Intézet és Múzeum Könyvtára, Argumentum Kiadó, Budapest, 196 p.

Lóczy L. id. 1903: A Balaton-tónak és környékének részletes térképe négy lapon. Topográfiai és geológiai atlasz. I. rész 1:75 000 – Cs. és Kir. Katonai Földrajzi Intézet, Wien.

Lóczy L. id. (szerk.) 1920: A Balaton-tó környékének részletes geológiai térképe 4 lapon. Topográfiai és geológiai atlasz. II. rész 1:75 000. – Cs. és Kir. Katonai Földrajzi Intézet, Wien.

Plihál K. 2013: A Tabula Hungariae… Ingolstadt, 1528 térkép és utóélete. – Kossuth Kiadó, Budapest, 224 p.

Plihál K. 2009: Magyarország legszebb térképei 1528–1895. – Kossuth Kiadó, OSZK, Budapest, 240 p.

Stegena L. 1998: Tudományos térképezés a Kárpát-medencében 1918 előtt. – Akadémiai Kiadó 69 p.

Szathmáry T. 1987: Descriptio Hungariae. Magyarország és Erdély nyomtatott térképei 1477–1600. – Szerzői kiadás, Fusignano Grafiche Morandi, 261 p.

Szántai L. 1996: Atlas Hungaricus. Magyarország nyomtatott térképei, 1528–1850 I–II. – Akadémiai Kiadó, Budapest, 777 p.

Timár G. 2016: Hol futnak a Balaton régi partvonalai? – Függőleges felszínmozgások a Dunántúlon. – Természet Világa 2016/1 különszám, 17–19.

Affiliációk

Brezsnyánszky Károly | Magyar Állami Földtani Intézet, nyugalmazott igazgató
Budai Tamás | Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat, Budapest
Cserny Tibor | Magyar Állami Földtani Intézet, nyugdíjas főmunkatárs
Csillag Gábor | CSFK Földtani és Geokémiai Intézet, Budapest; ELTE–MTA Földtani Kutatócsoport, Budapest; MTA–ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport
Demény Attila | Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földtani és Geokémiai Intézet, Budapest
Fodor László | MTA-ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport; ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest
G.-Tóth László | ELKH Ökológiai Kutatóközpont Balatoni Limnológiai Intézet, Tihany
Gábris Gyula | ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet Természetföldrajzi Tanszék Professzor Emeritus
Galambos Csilla | Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat, Budapest
Gulyás Sándor | Szegedi Tudományegyetem Földtani és Őslénytani Tanszék, Szeged
Harangi Szabolcs | MTA– ELTE Vulkanológiai Kutatócsoport; ELTE TTK Kőzettan–Geokémiai Tanszék, Budapest
Havril Tímea | Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra, ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest
Héja Gábor | MTA-ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport; ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest; Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat, Budapest
†Horváth Ferenc | ELTE TTK Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, nyugalmazott tanszékvezető
Jakab Gusztáv | Szent István Egyetem, Öntözési és Vízgazdálkodási Intézet, Szarvas
Karátson Dávid | ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet Természetföldrajzi Tanszék, Budapest
Katona Lajos | MTM Bakonyi Természettudományi Múzeuma, Zirc
Kövér Szilvia | MTA-ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport, ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest
Mádlné Szőnyi Judit | Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra, ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest
Magyar Imre | MTA-MTM-ELTE Paleontológiai Kutatócsoport
Molnár Dávid | Szegedi Tudományegyetem Földtani és Őslénytani Tanszék, Szeged
Nagyné Bodor Elvira | Szegedi Tudományegyetem Földtani és Őslénytani Tanszék, Szeged
Németh Károly | Massey University, Volcanic Risk Solutions, Palmerston North, New Zealand
Pósfai Mihály | Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, Bio-nanotechnológiai és Műszaki Kémiai Kutatóintézet, Nanolab, Veszprém
Prónay Zsolt | MinGeo Környezetvédelmi és Vállalkozási Kft., Budapest
Ruszkiczay-Rüdiger Zsófia | Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földtani és Geokémiai Intézet, Budapest
Sárdy Julianna | Balaton-felvidéki Nemzeti Park, Csopak
Schöll-Barna Gabriella | MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Földtani és Geokémiai Intézet, Budapest
Sebe Krisztina | Pécsi Tudományegyetem, Földtani és Meteorológiai Tanszék, Pécs
Serlegi Gábor | Bölcsészettudományi Kutatóközpont Régészeti Intézet, Budapest
Síkhegyi Ferenc | Magyar Állami Földtani Intézet, nyugdíjas főmunkatárs
Sümegi Balázs Pál | Szegedi Tudományegyetem Földtani és Őslénytani Tanszék, Szeged; Bölcsészettudományi Kutatóközpont Régészeti Intézet, Budapest
Sümegi Pál | Szegedi Tudományegyetem Földtani és Őslénytani Tanszék, Szeged; Bölcsészettudományi Kutatóközpont Régészeti Intézet, Budapest
Sztanó Orsolya | ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest
Szurominé Korecz Andrea | MOL NyRt., FAF Laboratóriumok, Budapest
Tari Gábor | OMV Upstream, Kutatás és Termelés, Bécs
Timár Gábor | ELTE TTK Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Budapest
Tóth Ádám | Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra, ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest
Törőcsik Tünde | Szegedi Tudományegyetem Földtani és Őslénytani Tanszék, Szeged; Bölcsészettudományi Kutatóközpont Régészeti Intézet, Budapest
Varga György | Országos Vízügyi Főigazgatóság; ELTE TTK Természetföldrajzi Tanszék, Budapest
Visnovitz Ferenc | ELTE TTK Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Budapest
Zlinszky András | Ulyssis Kft; ELKH Ökológiai Kutatóközpont Balatoni Limnológiai Intézet, Tihany