

## **Kutatási zárójelentés a Budai-termálkarszton (Szemlő-hegyi-barlang, Molnár János-barlang, Gellért-hegyi-aragonitbarlang, továbbá a Lukács-fürdő, Gellért-fürdő, Rudas-fürdő és a Rác-fürdő területén folytatott kutatásainkról**

A KDV-KTVF-től 2018. július 04-én kapott PE-06/KTF/1261-5/2018 sz. nem feltáró, tudományos célú kutatási engedélyünk 2022- december 31-én járt le.

Folytani kívánt kutatási tevékenységünkről a következő jelentést adjuk le:

### **A kutatás célkitűzése**

A Budai-hegység részét képező Gellért-hegy térségében, valamint a Rózsadomb 5–6 km<sup>2</sup> kiterjedésű területén, nagyrészt a lakóövezet felszíne alatt jelenleg már több mint 100 barlang ismert, melyek összhosszúsága meghaladja az 55 km-t. A Budai-termálkarszton belül kiemelt jelentőségű rózsadombi barlangok különleges keletkezésmódjuknak, méreteiknek, formakincsüknek és ásványkiválásaiknak köszönhetően méltán kerültek nem csak a hazai, de a nemzetközi érdeklődés középpontjába is. Ezek a barlangok a tektonika által meghatározott szerkezeti zónák, törések mentén nagy mélységből feláramló termálvizekhez kötődve, a felszíni morfológiától függetlenül, a mélyben zajló karsztosodási folyamatok következtében oldódtak ki. E termálkarsztos barlangrendszerek, a korábbi hidrotermás események során keletkezett ásványtársulások, valamint a jelenleg a Duna mentén megcsapolódó meleg és langyos források a hipogén karsztos folyamatok és jelenségek jellegzetes és komplex típusú területévé avatták a Budai-termálkarsztot. A fenti adottságoknak köszönhetően a budai Rózsadomb és környékének termálkarsztja 1993 óta az UNESCO Világörökség várományos listáján szerepel. Vizsgálni kívántuk a barlangi ásványok keletkezésében a baktériumok szerepét is, valamint elemezni kívántuk a csepegő vizeket, az antropogén szennyezések megállapítása céljából.

Kutatásunk több helyszínre (barlangra) terjedt ki. A **Szemlő-hegyi- és a Molnár János-barlangi kutatások** eredményeit **Virág Magdolna** sikeresen megvédett PhD dolgozatában összegezte, melynek összefoglalóját alább mellékeljük.

„Dolgozatomban a Rózsadomb barlangjainak hipogén (termálvizes) és epigén (beszivárgó vízhez kötődő) oldódási és kiválási jelenségeit kutatom az inaktív Szemlő-hegyi-, és a jelenleg is aktív Molnár János-barlang példáján, kiemelt figyelmet szentelve a barlangi képződmények („szpeleotémák”) vizsgálatának.

A Szemlő-hegyi-barlang 1986 óta idegenforgalmi barlang, melynek kiépítése során számos olyan „feltárást” nyitottak a barlangfolyosókban, melyek kitűnő lehetőséget kínálnak a termálvizes barlangi képződmények, üledékek és a formakincs vizsgálatához. A

termálkarsztos barlang jelenleg területileg már kiemelt helyzetben, a vadózus zónában található, inaktív járatrendszer. Ezzel hasonlítottam össze a még aktív, jellemzően a freatikus zónában, a Rózsadomb lábánál elhelyezkedő, jelenleg is képződő Molnár János-barlangot, melynek járatai döntő részt az elmúlt 20 évben váltak ismertté. A Budai-termálkarszt jelenlegi és korábbi megcsapolódási területén húzódó rózsadombi barlangok közül a Molnár János-barlang a jelenleg ismert egyetlen, közel 6 km hosszú járatrendszer, melynek szakaszait szinte teljes egészében termálvíz tölti ki, ezáltal benne a hipogén termálkarsztos barlangképződés folyamatai, búvárok segítségével, mint „természetes laboratóriumban” tanulmányozhatóak.

A legmagasabb szinten lévő járatok felső része már a légteres szakaszban helyezkedik el. Az ezekre jellemző képződmények, üledékek és oldásformák közvetlenül is megfigyelhetőek. A járatokat kitöltő termálvíz néhány kiválasztott üregrészből származó mintáinak fizikai-kémiai elemzésén túl célom a befogadó alapkőzet és oldódási jelenségeinek, oldásformáinak megismerése, valamint az üledékek és barlangi kiválások vizsgálata volt. Ezáltal a hipogén barlangképződés, azaz a jelenlegi termálvizes szakasz paramétereit kívántam komplex módon jellemezni. A recens oldódási-kiválási jelenségek vizsgálatával a jelenlegi (termálvizes, illetve vízszint közeli) eseményeket és azok paragenetikai sorrendjét rögzítem. A barlangi képződmények morfológiai (kiválástípus, „szpeleotéma”), szerkezeti és szöveti megfigyelésével/leírásával választ keresek arra, hogy a kiválások miként tükrözik, őrzik meg az oldási-kiválási folyamatok nyomait, illetve miként határozható meg belőlük az azokat létrehozó víz hőmérsékleti és kémiai paramétereit. A kiválásokból kapott eredményeket összevetem a recens vízvizsgálat (pl. kémiai összetétel, hőmérséklet, telítettségi viszonyok) ismert adataival. Térinformatikai módszerekkel feldolgoztam a vizsgált rózsadombi barlangjáratok helyzetét és járatirányát, az üregek képződési szintek tengerszint feletti magasságát, s ezen adatok felhasználásával bemutatom a barlangjáratok térbeli gyakorisági eloszlását. A „szpeleotéma” térképezés során dokumentáltam az egyes kiválástípusok térbeli helyzetét, elterjedési szintjét, és ezt a képződmények korával összevetve, az adott időszakban a termálvízszint tengerszint feletti magasságát is.

A vizsgálatokkal választ kerestem arra, hogy mikor, melyik tektonikai irány és ásványtelér generáció mentén történt barlangüreg-fejlődés, mi az ún. kovás elváltozott zónák keletkezésének oka és folyamata, valamint arra, hogyan zajlott le a barlangi üledékek és a kémiai kiválások képződése. További kérdésként merült fel, hogy a kiválástípusok és azok megjelenési gyakorisága az egyes rózsadombi barlangokban, illetve az egyes barlangrészekben belül miért különbözik. A már területileg kiemelt, telítetlen zónában elhelyezkedő, korábban hipogén módon, mélyebb helyzetben termálvizek hatására a pleisztocénben kialakult Szemlő-hegyi-barlang (2,2 km) járatait és képződményeit jelenleg már epigén, felszíni eredetű hatások (pl. beszivárgó víz) érik, ezáltal a termálvizes oldásformák, üledékek és képződmények fejlődése közvetlenül már nem vizsgálható. A barlangjáratokat korábban ért hipogén, és a jelenlegi epigén hatások nyomai jelenleg együtt észlelhetőek. Célom a kiválástípusok részletes térképezése, a helyzetük rögzítését követően morfológiai, szedimentológiai, ásványtani és geokémiai vizsgálata, majd a hipogén és epigén jelenségek és képződményeik, képződési környezetük azonosítása és elkülönítése, a paragenetikai sorrend felállítása és eseménytörténet felvázolása volt. Az üledékek és a befogadó kőzet oldási maradványának vizsgálatával a termálkarsztos barlangokban (elvileg felszíntől elzártan) zajló üledékképződést és -felhalmozódást próbáltam megismerni, közben vizsgálva az esetleges

felszínre nyílás lehetőségét is. A termálvizes kiválások pleisztocén képződési környezete és hőmérséklete, az egykori víz összetétele megbecsülhető a recens kiválások és az azokat létrehozó termálvíz paramétereinek (pl. kémiai összetétel, hőmérséklet, telítettségi viszonyok) vizsgálati eredményeivel való összehasonlítás alapján. A Molnár János-barlang jelenségei ehhez részben jó analógiai alapot nyújtanak. A paleo-hőmérséklet számítását stabilizotóp geokémiai mérések eredményei alapján végeztem el. Kutatási eredményeim hozzájárulnak a pleisztocénben a termálvízszint klíma és tektonika által együttesen vezérelt időbeli változásainak megismeréséhez. Ennek nyomai elsősorban a Szemlő-hegyi-barlang képződései segítségével vizsgálhatók. Doktori értekezésemben – a jelenlegi termálvizes barlangi vizsgálatok alapján – kísérletet teszek arra, hogy a Szemlő-hegyi-barlang, mint rózsadombi pleisztocén barlangüreg, szpeleotémáinak és üledékeinek képződését, és az események fejlődéstörténetét felvázoljam, továbbá, hogy a termálvíz hőmérsékleti és összetételbeli jellemzőit, valamint az egykori vízszint helyzetét és időbeli változását rekonstruáljam. Alkalmazott módszerek A rózsadombi barlangok szerkezeti helyzetét és járatainak eloszlását térinformatikai módszerek segítségével elemeztem (ERDAS Imagine 9.1, ArcGIS10, POLYGON Cave Surveying Software, GEOrient). A Szemlő-hegyi- és a Molnár János-barlangban részletes terepi megfigyelést, mintagyűjtést és kiválástérképezést végeztem. A Szemlő-hegyi-barlang térképén, a hossz- és keresztmetszvényeken eredetileg ábrázolt mélység, illetve ismert tengerszint feletti magasság (mBf) adatok segítségével méterenként, vertikálisan beszinteztem a hosszmeteszvény térképszelvényeket, és ezeken rögzítettem a megfigyeléseimet, a mintagyűjtés és a térképezés eredményeit. A Molnár János-barlangban bűvárok segítségével (Szieberth Dénes vezetésével) vízmintavétel és helyszíni vízmérés történt (víz hőmérséklet, pH, fajlagos elektromos vezetőképesség, belőle származtatott TDS, redox potenciál: PONSEL ODEON). A víz hőmérsékletét sikerült a helyszínen in situ rögzíteni, melyhez minden esetben vízmélység adatok is társultak. A vízminták fő-ion elemzése (titrimetria: hidrogén-karbonát, kalcium-, magnézium- és kloridion; Spektromom 195 spektrofotométer: szulfátion, szilikát, nitrátion; Flamom típusú - 3- lángfotométer: nátrium és kálium-ion) és a CO<sub>2</sub> mennyiségének (CO<sub>2</sub> monitor M-70) meghatározása az ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék laboratóriumában, a kén-hidrogén mérés a terepen kicsapatott kadmium-szulfidból titrimetriával történt (ELTE TTK Kémiai Intézet Analitikai Kémiai Tanszék). A víz, illetve karbonát minták mellék- és nyomelem-összetételének mérése Agilent 4100 MP-AES mikrohullámú plazma emissziós spektrométerrel történt (MTA ATOMKI HEKAL Izotóp-, Klíma- és Környezetkutató Központ – ICER). A terepi és laboratóriumi vízmérések adataiból PHREEQC Interactive 3.4.0 geokémiai modellező program alkalmazásával telítettségi index meghatározás és kiválás modellezés történt. A begyűjtött barlangi kiválásmintákat makroszkópos és mikropetrográfiai vizsgálatokkal elemeztem (OLYMPUS SZX9 sztereomikroszkóp, 30 µm vastagságú, 5x5 vagy 5x7 cm méretű vékonycsiszolatok: OLYMPUS BH-2 polarizációs mikroszkóp, OLYMPUS MAAS Nuclide ELM-3R hideg katódos (CL) luminoszkóp, ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék; ZEISS Axioskop 40 UV-fluoreszcens mikroszkóp, kékfény gerjesztés, MTA-ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport).

A képződmények és üledékek ásványtani, geokémiai és petrográfiai vizsgálata az alábbi módszerekkel történt: röntgen-pordiffrakciós vizsgálatok (XRD): Siemens D 5000-típusú, szcintillációs detektorral felszerelt diffraktométer, ELTE TTK Ásványtani Tanszék;

pásztázó elektronmikroszkópos (SEM+EDX) vizsgálatok: AMRAY 1830i típusú, EDAX PV 9800 energiadiszipatív spektrométer, ELTE TTK Kőzettani és Geokémiai Tanszék; üledékek szemcseeloszlása: HORIBA Partica LA950V2 típusú lézeres szemcseanalizátor, ELTE TTK Környezet- és Tájföldrajzi Tanszék. A stabilizotópok közül a karbonátfázisok szén- és oxigénizotópjainak mérése vívógáztechnika alkalmazásával, Finnigan delta Plus XP tömegspektrométerrel, a vízminták hidrogén- és oxigénizotóp mérései LGR LWIA-24d típusú üreglecsengéses lézer analízátorral készültek (MTA CsFK Földtani és Geokémiai Intézet Stabilizotóp Laboratórium). A szulfát- és szulfid- kén, valamint a szulfát-fázis oxigén stabilizotóp mérése ThermoFinniganDeltaPLUS XP izotóparány-mérő tömegspektrométeren történt (MTA ATOMKI HEKAL Izotóp-, Klíma- és Környezetkutató Központ – ICER). A barlangi karbonátkiválások képződési idejét  $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$  izotóparány mérésén alapuló uránsoros (U-Th) radiometrikus kormeghatározási módszerrel, Surányi Gergely segítségével vizsgáltam (kémiai feldolgozás: MTA-ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport Radiometriai Laboratóriumában részben saját kezűleg; az urán és tórium tartalmú oldatok kvantitatív izotóp összetételének mérése: Finnigan Thermo ELEMENT2 típusú, ICP-HR-MS tömegspektrométer, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske- és Magfizikai Intézet). A korhatározás hibaszámítása Monte Carlo-módszerrel történt. Eredmények, az értekezés tézisei Doktori kutatásomban a rózsadombi barlangok közül a topográfiai már kiemelt helyzetben lévő Szemlő-hegyi-barlang járatainak szerkezetét, oldásformáit, képződményeit és üledékeit vizsgáltam és hasonlítottam össze a jelenleg is aktív Molnár János-barlang folyamataival és jelenségeivel.

Munkám során igyekeztem elkülöníteni a termálvíz (hipogén) és a felszínről beszivárgó víz (epigén) hatásait, valamint külön kezelni a víz alatti, a vízfelszíni és légteret kiválókat.

Legfontosabb megállapításaim az alábbiak:

1, A Molnár János-barlangot kitöltő termálvíz fizikai-kémiai paraméterei a barlangon belül vertikálisan változnak. A felső 5-10 méteren aránylag meleg,  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os, magas oldott anyag tartalmú víz helyezkedik el a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os, alacsonyabb oldott anyag tartalommal jellemezhető, langyosabb víz komponens - 4- fölött, vagyis a víztest hőmérsékleti és szalinitás sztratifikációt mutat. Az előbbihez hasonló értékekkel a barlang K-i részén meleg víz „beáramlás”, míg az ÉNy-i részen (továbbá a Régi-részen is) langyos víz beáramlás észlelhető. A kétféle víz kb. 10-15 méteres mélységben, egy opálos zónát létrehozva (termoklin és haloklin) keveredik, ahol átmeneti értékek jellemzők. (ERŐSS (2010), illetve ERŐSS et al. (2012) a barlang keveredő vizének termálvíz és meteorikus komponenseit, illetve szélső tagjait is modellezte.) A mélyebb zónában a víz lassú áramlása figyelhető meg, a víz fölé nyúló levegős termekben pedig a víz nyugodt tükrű tóként viselkedik. A Kessler-terem tava és a Szent Lukács-ág sekély tavai repedéseken, üledékpórusokon keresztül egymással kapcsolatban vannak. A barlangba lokálisan beszivárgó víz hatása a nagy térfogatú terekben nem, azonban a sekélyebb tavacska vizében már észlelhető. A mért paraméterek alapján modellezett telítettségi és kiválási paraméterek jól megfelelnek a barlangban jelenleg is tapasztalható oldódási és kiválási jelenségekkel.

A Szemlő-hegyi-barlangban jelenleg már csak felszíni eredetű (epigén) beszivárgás jellemző. Ugyanakkor az ÉNy-DK-i irányú repedések mentén a mélyebb, termálvízzel kitöltött zóna felől meleg és  $\text{CO}_2$ -dús levegő feláramlása is észlelhető.

2. A vizsgált barlangok oldásformái, oldási jelenségei (a korábbi véleményekkel ellentétben) csak részben keletkeztek a járatokat kitöltő termálvíz szintje alatt, másik részük a vízszint feletti kondenzvíz-korróziós kioldódással jött létre. Az oldásformák víz alatti keletkezése a Molnár János-barlangban jól megfigyelhető, ahol a keveredési korrózió, a vízben feláramló CO<sub>2</sub> buborékok, valamint a víz lassú áramlása főként áramlási kagylókra emlékeztető formákat, kezdetleges üstöket hoz létre. A jobban fejlett, nagyobb méretű gömbfülkék a víztükör feletti kondenzvíz-korrózióval keletkeznek. A Szemlő-hegyi-barlangban a fenti megfigyelések analógiájára elkülöníthetők a feltehetően víz alatti oldásformák (áramlási kagylók vagy „scallopok”, kisebb üstszerű formák, buborékáramlási csatornák), illetve a kondenzvízkorrózióval, a termálvíz szintje fölött létrejött nagyobb méretű gömbfülkék, melyek a mészkő főtéjében mennyezeti záróformaként is megjelennek. Az utóbbi oldásformák keletkezése már a barlangjárat légtéres szakaszában történhetett, miközben az alsóbb szakaszon a vízszint felett a folyamat részeként borsókó képződés zajlott. Az ilyen módon létrejött borsókó kora tehát a kondenzvíz-korróziós gömbfülke képződéssel egyidejű lehet, így azok kioldódási idejét is meghatározhatja. Ezek a – most immár adatokkal alátámasztott – vélemények jól egyeznek a korábban csak koncepcionális alapon felvetett ötletekkel és megfigyelésekkel (pl. MÜLLER 1974, KRAUS 1993). A gömbfülkékben megjelenő termálvizes eredetű, freatikus zónában képződött kiválások a vízszint oszcilláció nyomainak tekinthetők, ugyanis a gömbfülkék a vadózus zónában, kondenzvíz korrózióval oldódtak ki, a felületükön található víz alatti kiválások azonban a vízszint ismételt megemelkedését követően képződtek. A fő járatirányra merőleges, ÉNy-DK-i irányú hasadékok mentén a mélyebb, aktív termálvizes (ismeretlen) szakaszok felől jelenleg is hipogén eredetű, CO<sub>2</sub>-dús meleg levegő feláramlás észlelhető, mely a képződmények felületét egységesen visszaoldja (a formák peremén pedig „evaporatív frostwork” képződése zajlik).

3. A Molnár János-barlang üledékét főként az adott hely alapkőzetének kőzetoldási maradéka, vagy a kovás elváltozott zóna anyaga képezi, jelentős külső üledékbehordás nyomai nem észlelhetők. A szemcseméretre a befogadó kőzet függvényében kőzetliszt és agyag, valamint kis mennyiségben homok a jellemző. Ásványtanilag az anyag uralkodóan kvarcból és változó arányú kaolinitből áll. Egyes szakaszokon (a redox állapottól függően) pirit és illit is megjelenik. A Szemlő-hegyi-barlang Hosszú-folyosójának üledéke egyértelműen a befogadó kőzet oldási maradékának, továbbá a közbetelepülő agyagos - „tufarétegnek” az áthalmazódásából ered. Az üledékek a Molnár János-barlangiakhoz képest nagyobb arányban tartalmaznak agyag frakciót, a kőzetliszt aránylag kevesebb, ásványos összetételére a kvarc és kaolinit jellemző. Az Oldal-folyosó üledékéhez az Örvény-folyosón és/vagy Kinizsi-szakaszon keresztül bekerült felszíni eredetű anyag is hozzá keveredhetett (plagioklász, piroxén és amfibol, valamint kevert illit-szmektit, földpát és csillám tartalma alapján), így ott időszakos felnyílás vagy repedéseken keresztül beszűrődő üledék nyomai észlelhetők, ami feltehetően a Tardi és/vagy Kiscelli Agyagból származik. A barlangban az üledék a mélyebb részeken nagyobb vastagságban, a sekélyebb, kiemeltebb részeken vékonyabb és cementáltabb állapotban található, és felszínét szinte minden esetben karbonátos képződmények (kérgék, bevonatok) borítják.

4. A széles, porózus elváltozott zónák (régábbi szóhasználattal: „kovás telérek”) a pirit tartalmú (a barlangképződést megelőzően létrejött) kalcit telérek és az oxidatív állapotú víz kölcsönhatása során, kénsavas oldódás hatására jöttek létre. A Molnár János-barlang Kessler-

termében, és a bevezető segédterében észlelhető jelenségek tanúsága szerint a „kovás” porózus elváltozott zónák keletkezése során a pirites-kalcitos ásványtelérek oxidációja során lokálisan erősen kénsavas oldat jön létre, mely a márga karbonáttartalmát oldja, az agyagásványokkal történő kölcsönhatásnak köszönhetően pedig az üregekben kaolinit és kvarc válik ki. Lokálisan jarosit is észlelhető. A pirit vas-tartalma az erősen savas oldatban  $Fe^{3+}$  formájában a zóna pereme felé vándorol, majd annak fokozatos semlegessé válása során ferrihidrit formájában kiválik, és goethitté alakul. A Kessler-terembe vezető segédterő építése során feltárult, még reduktív viszonyokkal jellemezhető szürke márgában lévő néhány cm széles pirites-kalcitos ásványtelér a barlangüreg mállott, agyagos oldalfalában, illetve főtéjében már nem követhető tovább, hanem a fenti színzónás (középen fehér, majd a két oldal irányába sárga és vörös), szinte karbonátmentes, kvarcban és kaolinitben gazdag, porózus elváltozott zónaként jelentősen kiszélesedve (1-2 m) folytatódik. Az elváltozás rossz állékonysága miatt omlások és járatfelharapódzás látható a teremben, és a barlang további, víz alatti szakaszain is. Az ásványtelér piritjét a zóna mentén fokozatosan hematit és goethit váltja fel, melynek átmenete is jól megfigyelhető. A zóna mentén gyakran gipsz is megjelenik, mely a pirit oxidációjakor felszabaduló kénsavas víz karbonáttal történő reakciója során, párologás útján válik ki. A folyamat kénsavas oldásként is felfogható, a barlangképződéssel egy időben,  $O_2$ -dús vizes oldat jelenlétében játszódik le, és a barlangképződéssel egyidejűleg, jelenleg is zajlik. Ez a jelenség (folyamat) a terület már kiemelt helyzetű barlangjaiban, a márgában létrejött járatokban sokfelé megfigyelhető. A Szemlő-hegyi-barlang mészkőben húzódó járataiban nem észlelhető, azonban a márgában kialakult DNy-i szakasz főtéjében (az Április 3.-folyosóban és a Csengő-teremben) végig jellemző. Itt a kovás elváltozás kipergésével, felharapódzásával magasba nyúló kürtök jöttek létre.

5. A Molnár János-barlangban a víz alatti szakaszokon a járatok falán jelenleg intenzív Fe-Mn-oxid kiválás zajlik. A tó víztükre feletti vadózus zónában Fe-Mn-oxidos, illetve szulfátos ásványtársulás, gipsz a jellemző. A kisebb üregeket és repedéseket részben vagy teljesen kitöltő durvapátos, szkalenoéderes kalcit és táblás barit kristályok a barlangképződést időben megelőzően, vagy annak a kezdetén létrejött karbonát és szulfát kiválások. Nem a jelenlegi körülmények között, hanem magasabb hőmérsékletű vízből jöhettek létre a „Vulkánok”-nak nevezett képződmények karbonát kiválásai. A víz alatt intenzív karbonát- és szulfátásvány képződés jelenleg nem észlelhető. A víztükör feletti kiválások közül a  $Fe$ - $Mn$ -oxidos képződmények a vízszint felett határozott vertikális kiterjedésű bevonatként, a szulfátok pedig az agyagos, oldott falban áttetsző, durvakristályos gipsz „tövisekként”, a falon finomkristályos fehér - 6- gipszkéregként, és alárendelten gipsz szálakként, gipsz kígyókként vannak jelen. Ahol felszíni beszívargás észlelhető, ott a gipsz kiválások hiányoznak. A szulfátásványok keletkezése főként a termálvíz párologásához, a márga piritjének vagy a benne húzódó piritereknek az oxidációjához lokálisan kötődő kénsavas oldás és kiválás eredménye. A Kessler-terem fenti képződményeihez képest a főként már vadózus zónában húzódó Szent Lukács-ágban változatos recens(?) karbonátos kiválás-együttes is megfigyelhető. A sekély, aránylag nagy párologási felszínnel rendelkező nyugodt, sima víztükör tetején intenzív vékony kalcitlemez képződés zajlik. A lemezek a víz alatti részre lesüllyedve megőrződnek, azonban itt víz alatti kalcitkéreg kiválása, a kalcitlemezek tovább vastagodása (még) nem észlelhető. A vadózus zónában részben a gipsz paragenéziséhez kötődve dolomit, huntit, továbbá aragonit és kalcit is megjelenik. Ezek jellegzetes „evaporatív frostwork” formában, apró borsókövekként, túpamacsokként vannak jelen, és képződésük a kondenzvíz korrózió

folyamatához, párolgáshoz, illetve mikrobiális közreműködéshez(?) köthető. Az oldalág legmagasabb végpontja a vadózus zónában keletkező apró borsókőszerű, kalcitból és dolomitból álló „evaporatív frostwork” koradata alapján 6500-7000 évvel ezelőtt már az akkori víztükör szintje fölött húzódhatott. A gipszekhez kis mennyiségben cölesztin is társul. Mivel ezek keletkezése a termálvíz párolgásához kötődik, hipogén eredetű, de vadózus-zónabeli kiválásokként azonosíthatók. Felszíni víz beszivárgás a képződmények környezetében nem észlelhető.

6. A Szemlő-hegyi-barlang látványos ásványkiválásai részben idősebbek a barlang keletkezési idejénél, részben a termálkarsztos fázisban, a freatikus és vadózus zónában, illetve annak határán keletkeztek/keletkeznek. A barlangjáratokban egyes helyeken a termálvizes és beszivárgó vízhez kötődő ásványok egyidejű kiválására utaló jelek is megfigyelhetők. A Szemlő-hegyi-barlangban a járatoknál idősebb kalcitok repedéseket tölthetnek ki, melyek a szakirodalomból ismert miocén hidrotermás esemény részeként jöhettek létre (vagy fiatalabbak). Később a pleisztocén barlangképződés is főként e repedések mentén zajlott (POROS 2011, POROS et al. 2012, GYÓRI et al. 2011). Ezzel szemben a barlangban helyenként megfigyelhető üregkitöltő durvapátos kalcit, továbbá az ÉNy-DK-i hasadékok mentén jellemző, járatbekérgező kalcit és barit ásványok feltehetően a barlangképződést még éppen megelőzően vagy annak korai szakaszában (maximum 1,5 millió évvel ezelőtt) jöhettek létre. A Szemlő-hegyi-barlang képződményein a hipogén és epigén hatások egyaránt kimutathatóak. Ezek azonosítása és szétválasztása összetett feladatnak bizonyult. A barlangban nagy mennyiségben jelen lévő középső- és késő-pleisztocén képződményekre főként karbonátos ásványtársulás jellemző, azonban néhány szakaszon nagyobb mennyiségű gipszkéreg is előfordul. Az utóbbi kiválása feltehetően a vadózus zónában, a termálvíz feletti szakaszon, annak párolgásával és a kőzet finom eloszlású piritjének oxidációjával jött létre. A képződmény egyenletes vastagságban borítja az alatta található oldásformákat és/vagy képződményeket, a kontakt zónában pedig lokálisan dolomit és cölesztin jellemző. Dolomit a porózus borsókő üregeiben is megjelenik, és feltehetően mikrobiális közreműködéssel, barlangi kiválásként jött létre. A vadózus zónában termálvíz párolgásához, valamint kondenzvíz korrózióhoz és a párolgás – CO<sub>2</sub>-kigázosodás folyamatához kötődve keletkezhetett az „evaporatív frostwork” és borsókő kiválások egy része, melyet a stabilizotóp értékek is alátámasztanak. A borsókőben gyakran aragonit is található, vagy teljesen abból épül fel. Az aragonittűs és kalcitkristályos sávok gyakran váltakoznak benne, és főként a kalcitos rétegeken belül barit is megfigyelhető. Ezek az aragonit kristálytűkön saját alakú, apró kristályokként vannak jelen, és a szabadon maradt kristályközi pórusokban, valamint rajta kalcitkristályok válnak ki. Gyakoriak az átmeneti helyzetben lévő borsókövek, melyeknél a felszínről beszivárgó víz és a termálvíz együttes hatása érvényesülhetett. A stabilizotóp mezőn belül jól elkülönülnek a beszivárgó víz párolgásának - következtében létrejött borsókövek. Az utóbbi két esetben a kiválástípusok gyakran halványsárga cseppkövekkel váltakozhatnak. A barlangon belül a legintenzívebb cseppkőképződés a DNy-i, a többi szakaszhoz képest vastagabb fedővel jellemezhető járatban történik. A termálvizes eredetű kalcitlemezek, karfiolszerű kalcitkérges kora, valamint a cseppkövek kora bizonyítja, hogy a beszivárgás és cseppkőképződés epigén karsztos folyamata már abban az időben is zajlott, amikor a járat aljában még hipogén karsztos hatás érvényesült. Ezeknek a cseppköveknek a színe sötétbarna, és stabilizotóp értékeik alapján beszivárgásuk idején (180-220 ezer évvel ezelőtt) a vastagabb fedőrétegeknek köszönhetően hosszú kőzet-víz

kölcsönhatás érvényesülhetett. A termálvíz freatikus zónájában a tómeder oldalát, és az oldásformákat egyenletes vastagságban bekérgező karfiolszerű kalcitkéreg, a nyugodt, sima tükrű tó vízfelszínén pedig vékony kalcitlemez képződhetett, amely a víz hullámozásával mélyebbre süllyedt és az aljzaton felhalmozódott. Amennyiben ez csak néhány cm-es vízmélységben történt, vékony, cementálatlan kalcitlemezek felhalmozódása történt, ha pedig nagyobb mélységbe süllyedt, újabb kalcitkéreg vált ki a lemezekre, és tovább vastagította és cementálta azokat.

7. Felismertem, hogy a Szemlő-hegyi-barlangban, a termálkarsztos fázis idején keletkezett szpeleotémák, a felszínről beszivárgó vízből kialakult cseppkő és a víz bepárlódásához kötődő borsókő képződmények helyzetének térképezése és részletes anyagvizsgálata lehetővé teszi a termálvízszint és a vízhőmérséklet időbeli változásának rekonstrukcióját. A különböző kiválástípusok abszolút korának meghatározásával (U-Th módszer) ismertté vált a jellemzően termálvizes karbonátos kiválássorozat keletkezésének kezdete és vége, amivel megbecsülhető, hogy mennyi ideig tartózkodott adott barlangjáratban a tútelített, kiválásokat létrehozó termálvíz. Meghatároztam, mikor és minek hatására vált a víz tútelítetté a barlangokban, úgy, hogy az üregképződést felválthatta a barlangi kiválások képződése. Azt is meg tudtam állapítani, hogy ebben a kiválási időszakban milyen eloszlásban, hol és mikor képződtek az adott kiválási környezetre jellemző termálvizes képződmények. A „szpeleotémák” vizsgálatával tisztáztam, hogy a pleisztocén idején volt-e nyomon követhető vízszint oszcilláció (vagy a termálvízszint csökkenése egyenletes volt-e a terület kiemelkedése során), valamint, hogy mikor indult meg a termálvizes kiválásképződés, és mikor hagyta el a víz a barlang adott járatait. A felszínről, beszivárgó epigén vizekből kivált szpeleotémák (főként cseppkövek) a vadózus zóna üregeiben a középső-késő-pleisztocén és holocén beszivárgás viszonyokról, klímáról és változásairól szolgálnak felvilágosítással. A kormeghatározás alapján ismertté válik, hogy mikor nyílt lehetőség az adott barlangszakaszban (vadózus zóna) a felszínről történő vízbeszivárgásra. A Szemlő-hegyi-barlang kiválásainak térképezése alapján rekonstruált „paleo vízfelszínnek”, az ÉK<sub>1</sub> DNy-i hasadékszerű fő járatok aljában nem egységes vízfelületként, hanem egymástól elkülönülő „paleo tavak” formájában voltak jelen. Vízfelületük kb. 179-180 mBf magasságban húzódnak, és az egyes „tavakat” kiemelkedések, „gátak” választották el egymástól. Ezt megelőzően valószínűleg a keveredési korrózió és állandó víz utánpótlódás következtében a termálvíz telítetlen volt, kiválás nem történt. A vízfelszínnek elkülönülésével kialakult „paleo-tavak” vize kb. 500 ezer évvel ezelőtt tútelítetté válhatott, és a vízfelszín-közeli fokozott CO<sub>2</sub>-kigázosodásnak köszönhetően megindulhatott a kalcitlemez képződés. Ekkor a víz hőmérséklete (a δ<sup>18</sup>O adatokból számolt kiválási hőmérséklet értékek alapján) kb. 37 °C-os lehetett. Ezt a legmagasabb helyzetben lévő vékony kalcitlemezek jelzik. A karfiolszerű kalcitkéreg képződése, és a lesüllyedt lemezek megvastagodása csak később kezdődött meg a kevésbé mély részeken (kb. 390-410 ezer éve).

A Budai-hegység fokozatos kiemelkedésének, és a Duna-meder bevágódásának köszönhetően fokozatos vízszint csökkenés és egyidejűleg vízhőmérséklet csökkenés történt, amit a kalcitlemezek és a karfiolszerű kalcitkéreg keletkezési helyének egyre mélyebb topográfiai szintre kerülése követett (kb. 360 ezer éve 31°C és 171 mBf), miközben a vízszint feletti részeken megindult a vadózus zónabeli kiválások (pl. borsókövek) képződése. Kb. 290-300 ezer évvel ezelőtt a 27-28 °C-os termálvíz szintje a jelenlegi 172 mBf szintre



csökkenhetett. Ezt a borsókőszerű képződmények rétegsoron belüli megjelenése, és bennük anomálishan lumineszkáló és fluoreszkáló sávok jelenléte is jelzi.

Feltehetően klimatikus és/vagy tektonikus hatások együttes eredményeként kb. 280 ezer évvel ezelőtt a vízszint akár 5-6 métert is emelkedhetett, a mai 178-179 mBf szintre, és a víz hőmérséklete is megemelkedett: a vízfelszín közeli rész 47-48 °C-os lehetett. Ezért újabb vékony kalcitlemezek megjelenése észlelhető, és főként ebben az időszakban keletkezhettek a járatok alján nagy mennyiségben jelen lévő karfiolszerű kalcitkéreg is (az utóbbiak: kb. 260 ezer évesek, 40-41 °C-os vízhőmérsékletet jeleznek 174-175 mBf szinten). A kalcitkéregen belül vékony kalcitlemezek is előfordulnak, amely a vízfelszíni kalcitlemez képződés és a víz alatti kalcitkéreg kiválás egyidejűségét mutatja. Ezt követően aránylag fokozatos vízszint csökkenés és hűlés tapasztalható, azonban a rétegsorokon belül kisebb mértékű oszcilláció, és 2-3 °C-os hőmérsékletváltozás kimutatható. 7

A „termálvizes időszak” vége felé a víz hőmérséklete már csak 21-25 °C körüli lehetett. A folyamat előrehaladtával a barlang alsó részeiben, főként a mélyebbre nyúló kisebb barlangtermekben lehetett már csak jelen a langyosabb termálvíz. Az egyik helyen 222 ezer évvel ezelőtt 36 °C-os vízből kalcitlemez (164 mBf), 191 ezer éve 23-24 °C-os vízből az alsó végponton kalcitkéreg képződött. Egy másik szakaszon (~168-169 mBf) 228 ezer évvel ezelőtt 31 °C-os vízből karfiolszerű kalcitkéreg kiválása zajlott. A rétegsor tetején található, a legkésőbbi keletkezésű vékony kalcitlemezek (kb. 186 ezer év) pedig 20-21 °C-os sekély vizű tóból közvetlenül azelőtt jöttek létre, mielőtt a víz elhagyta a járatot. A minimum korok alapján a kb. 164- 167 mBf helyzetű, legalsó barlangrészeket kb. 160 ezer évvel ezelőtt hagyta el a kb. 20-23 °C-os „termálvíz”. A víz hűlését a hozzákeveredő, csapadék eredetű beszivárgó hideg víz tovább fokozhatta. A borsókő- és cseppkőképződmények kora alapján a barlang fő járatszintje kb. 50-70 ezer évvel ezelőtt már a vadózus zónában húzódnak. A Földszíve-teremben a vörössárga cseppkőkéreg alatti vékony kalcitlemezek kb. 9400 évesek, és kb. 14-15 °C-os hőmérsékletű, sekély vizű tóból keletkeztek, ami feltehetően a termálviztől függetlenül később kialakult, beszivárgó vízből összegyűlt állóvíz lehetett. 6000 évvel ezelőtt a kalcitlemezekben már vadózus zónabeli cseppkőkéreg képződés történt.

8. A rózsadombi barlangokat nagyobb léptékben vizsgáló térinformatikai elemzések is kimutatták, hogy a pleisztocénben keletkezett termálkarsztos barlangjáratok csapásiránya, és a barlangokban (is) látható idős (miocén kori) hidrotermás ásványtelérek képződése ugyanazon tektonika által meghatározott szerkezeti zónák, törések, repedések mentén történt (vö. POROS 2011, POROS et al. 2012). A Ferenc-hegyi-, Szemlő-hegyi-barlang és József-hegyi-barlang járatainak helyzetét főként a tektonika által létrehozott repedések határozták meg (vö. FODOR et al. 1991, BENKOVICS et al. 1995, 1999), míg a Pál-völgyi-barlangrendszer K-i zónája (így pl. a Mátyás-hegyi-barlang; vö. NÁDOR 1991) és a Molnár János-barlang esetében a szerkezeti elemek mellett a közetrétegek DDK-i 20-30°-os dőlése is fontos szerepet játszott. A járatok gyakorisági eloszlása alapján több kitüntetett üregesedési szint is látható, melyek közül a nagy barlangokat is magukba foglaló magasság-intervallumok a jelentősebbek. Ezek jó összefüggést mutatnak a termálvizes barlangi kiválások és travertínók térbeli megjelenésével (vö. SCHEUER & - 9- SCHWEITZER 1980, 1988; KELE 2009, KELE et al. 2011; LEÉL-ŐSSY et al. 2011, SZANYI et al. 2009, 2012), melyeknek helyzete klimatikus és tektonikus hatások együttes eredménye.”

*Forrás:*

- ALBERT, G., VIRÁG, M., ERŐSS, A. (2015): Karst porosity estimations from archive cave surveys – studies in the Buda Thermal Karst System (Hungary). – *International Journal of Speleology* 44 (2), pp. 151–165. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.44.2.5>
- BENKOVICS L., TÖRÖK Á., NÁDOR A. (1995): A Ferenc-hegyi vonulat barlangjainak geológiája. – *Karszt- és Barlangkutató X*, pp. 193–210.
- BENKOVICS, L., OBERT, D., BERGERAT, F., MANSY, J. L., DUBOIS, M. (1999): Brittle tectonics and major dextral strike-slip zone in the Buda karst (Budapest, Hungary). – *Geodynamica Acta* 12/3-4, pp. 201–211.
- ERŐSS, A. (2010): Characterization of fluids and evaluation of their effects on karst development at the Rózsadomb and Gellért Hill, Buda Thermal Karst, Hungary. – PhD Dissertation, Eötvös L. University, Budapest, 171 p.
- ERŐSS, A., MÁDL-SZÖNYI, J., SURBECK, H., HORVÁTH, Á., GOLDSCHIEDER, N., CSOMA, A.É. (2012): Radionuclides as natural tracers for the characterization of fluids in regional discharge areas, Buda Thermal Karst, Hungary. – *Journal of Hydrology* 426–427, pp. 124–137.
- FODOR, L., LEÉL-ŐSSY, SZ., TARI, G. (1991): En-echelon fractures in a dextral shear zone – tectonic heritage for a hydrothermal cave (Budapest, Hungary). – *Terra Nova* 4, pp. 165–170.
- GYŐRI O., POROS ZS., MINDSZENTY A., MOLNÁR F., FODOR L., SZABÓ R. (2011): Budai-hegységi paleogén karbonátos kőzetek diagenézistörténete. – *Földtani Közlöny* 141/4, pp. 341–361.
- KELE S., SCHEUER GY., DEMÉNY A., SHEN, C-C., CHIANG, H.-W. (2011): A Rózsadomb (Budapest) édesvízi mészköveinek U/Th sorozatos kormeghatározása és stabilizotóp-geokémiai vizsgálata. – *Földtani Közlöny* 141/3, pp. 293–312. KRAUS S. (1993): A Szemlő-hegyi-barlang vízszintváltozásai. – *Karszt és Barlang* 1993/I–II, pp. 47–53.
- LEÉL-ŐSSY, SZ., SZANYI, GY., SURÁNYI, G. (2011): Minerals and Speleothems of the József-hegy Cave (Budapest, Hungary). – *International Journal of Speleology* 40/2, pp. 191–203.
- LEÉL-ŐSSY SZ., VIRÁG M. (2018): Az utóbbi 20 év barlangkutatói eredményei a Budai-hegységben (különös tekintettel a Rózsadomb környékére). – *Földtani Közlöny* 148/1, pp. 45–74.
- LEÉL-ŐSSY SZ., VIRÁG M. S (2022): The Caves of Northeastern part of the Transdanubian Mountains (In Ed. M. Veress and Sz. Leél-Őssy: Cave and Karst Systems of Hungary).- Springer, Cham, Switzerland, pp. 361-414.
- MÜLLER P. (1974): A melegforrás barlangok és gömbfülkék képződéséről. – *Karszt és Barlang* 1974/I, pp. 7–10.

- NÁDOR A. (1991): A Budai-hegység paleokarszt jelenségei és fejlődéstörténetük. – Doktori disszertáció, ELTE TTK Általános és Történeti Földtani Tanszék, Budapest, 171 p.
- POROS, ZS. (2011): Fluid migration and porosity evolution in the Buda Hills, Hungary – selected examples from Triassic and Paleogene carbonate rocks. – PhD Dissertation, Eötvös L. University, Budapest, 141 p.
- POROS, ZS., MINDSZENTY, A., MOLNÁR, F., PIRONON, J., GYŐRI, O., RONCHI, P., SZEKERES, Z. (2012): Imprints of hydrocarbon bearing basinal fluids on a karst system: mineralogical and fluid inclusion studies from the Buda Hills, Hungary. – *International Journal of Earth Sciences (Geol. Rundsch.)* 101, pp. 429–452.
- SCHEUER GY., SCHWEITZER F. (1980): A budai hévforrások fejlődéstörténete a felsőpannontól napjainkig. – *Hidrológiai Közöny* 60/11, pp. 492–501.
- SCHEUER GY., SCHWEITZER F. (1988): A Gerecse és a Budai-hegység édesvízi mészkőösszletei. – *Földrajzi Tanulmányok* 20, Akadémiai Kiadó, Budapest, 129 p.
- SZANYI GY., BADA G., SURÁNYI G., LEÉL-ŐSSY SZ., VARGA ZS. (2009): A Budai-hegység pleisztocén kiemelkedéstörténete barlangi lemezes kalcitkiválások uránsoros kormeghatározása alapján. – *Földtani Közöny* 139/4, pp. 353–366.
- SZANYI, GY., SURÁNYI, G., LEÉL-ŐSSY, SZ. (2012): Cave development and Quaternary uplift history in the Central Pannonian Basin derived from speleothem ages. – *Quaternary Geochronology* 14, pp. 18–25. Az értekezés tárgykörében megjelent publikációk: Folyóirat cikkek:
- VIRÁG M. (2016): Történeti áttekintés a budai barlangok keletkezéséről – a klasszikus karsztfejlődéstől a hipogén barlangképződésig. – *Karszt és Barlang* 2012-14, pp. 24–46. Könyv szerkesztés:
- VIRÁG M. (2016): MINDSZENTY A. (szerk.): Budapest: földtani értékek és az ember. Városgeológiai tanulmányok („In urbe et pro urbe”). – ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 311 p. – 2 fejezet szerkesztése
- VIRÁG M. (2013): Szépvölgy-Rózsadomb (város)geológiai tanösvény és barlangtúrák. –
- VIRÁG M., LEÉL-ŐSSY SZ., MINDSZENTY A. (2013): Szpeleológiai adottságok. A felszín alatti víz oldóhatásának tanúi: a budai barlangok. – In: MINDSZENTY A. (szerk.): Budapest: földtani értékek és az ember. Városgeológiai tanulmányok („In urbe et pro urbe”). – ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, pp. 104–111.
- VIRÁG M., TAKÁCSNÉ BOLNER K., LEÉL-ŐSSY SZ. (2013): Barlangi kiválástípusok (szpeleotémák). – In: MINDSZENTY A. (szerk.): Budapest: földtani értékek és az ember. Városgeológiai tanulmányok („In urbe et pro urbe”), ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, pp. 248–252.
- VIRÁG M., MINDSZENTY A., SURÁNYI G., MOLNÁR M., LEÉL-ŐSSY SZ. (2013): A Búboskemenye cseppkőlefolyás. – In: MINDSZENTY A. (szerk.): Budapest: földtani értékek és az ember. Városgeológiai tanulmányok („In urbe et pro urbe”), ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, pp. 245–248.

VIRÁG M., TAKÁCSNÉ BOLNER K., SURÁNYI G. (2013): A Budai-hegység legidősebb vizsgált cseppköve: az Óriás-cseppkő. – In: MINDSZENTY A. (szerk.): Budapest: földtani értékek és az ember. Városgeológiai tanulmányok („In urbe et pro urbe”), ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, pp. 243–245.

VIRÁG M., KÁLMÁNFINE AST H., MINDSZENTY A. (2013): Barlangszintek, barlangi kiválások és travertínók térbeli jellemzése. – In: MINDSZENTY A. (szerk.): Budapest: földtani értékek és az ember. Városgeológiai tanulmányok („In urbe et pro urbe”). – ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, pp. 259–263.

VIRÁG M. (2013): Szemlő-hegyi-barlang – Budapest föld alatti virágoskertje. – In: MINDSZENTY A. (szerk.): Budapest: földtani értékek és az ember. Városgeológiai tanulmányok („In urbe et pro urbe”), ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, pp. 218–223.

VIRÁG M., SZABÓ Z. (2013): Molnár János-barlang – a rendszer jelenleg is aktív tagja. – In: MINDSZENTY A. (szerk.): Budapest: földtani értékek és az ember. Városgeológiai tanulmányok („In urbe et pro urbe”), ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, pp. 228–232. VÖRÖS P.,

VIRÁG M., MINDSZENTY A., BENDŐ ZS., NÉMETH T., LEÉL-ŐSSY SZ. (2013): Eocén kőzeteket átszelő repedéskitöltésekhez kapcsolódó elváltozott zónák a budai barlangokban. – In: MINDSZENTY A. (szerk.): Budapest: földtani értékek és az ember. Városgeológiai tanulmányok („In urbe et pro urbe”), ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, pp. 34-39. Válogatott konferencia kivonatok, absztraktok:

VIRÁG, M., MINDSZENTY, A., SURÁNYI, G., LEÉL-ŐSSY, SZ. (2011): Infiltration history of the last 50 thousand years as reflected by the anatomy of a flowstone type speleothem precipitated from dripwaters of the Pálvölgy-Mátyáshegy Cave System (Buda Thermal Karst, Budapest, Hungary). – In: CAPEZZUOLI, E., BROGI, A., RICCI, M., BERTINI, A. (eds.): Rend. Online Soc. Geol. It. Vol. 16, pp. 39–41.

VIRÁG M., HEGEDŰS A., SURÁNYI G. (2014): Szpeleotéma-térképezéssel az egykori termálvizek nyomában. – In: VERESS M., ZENTAI Z. (szerk.): Karsztfelődés XVII. Absztrakt kötet, 2014. május 30 - június 1, Bük-Szombathely, p. 13.

VIRÁG, M., MINDSZENTY, A., KISS, K., KELE, S., CZUPPON, GY., PALCSU, L., SURÁNYI, G., BRAUN, M., WEIDINGER, T., HEGEDŰS, A., LEÉL-ŐSSY, SZ. (2015): Superimposition of hypogenic and epigenic karst processes documented by speleothems of the Szemlő-hegy Cave (Budapest, Hungary). – In: Abstract Book of 31st IAS Meeting of Sedimentology, International Association of Sedimentologists, Polish Geological Society, 22-25 June 2015, Krakow, Poland, p. 564.

VIRÁG, M., MINDSZENTY, A., KELE, S., CZUPPON, GY., SURÁNYI, G., BRAUN, M., PALCSU, L., FUTÓ, I., HEGEDŰS, A., KISS, K., SZIEBERTH, D., LEÉL-ŐSSY, SZ. (2016): Study of speleothems and other thermal-karst features in the caves of Rózsadomb (Budapest, Hungary). – In: OTONICAR, B., GOSTINČAR, P. (eds.): Paleokarst – 24th International Karstological School "Classical Karst", Abstract & Guide Book, 13-17 June 2016, Karst Research Institute ZRC SAZU, Postojna, Slovenia, p. 34.

VIRÁG, M., VÖRÖS, P., MINDSZENTY, A., NÉMETH, T., BENDŐ, ZS., LEÉL-ÖSSY, SZ. (2017): Altered zones as evidences for an unusual sulphuric acid related carbonate dissolution in the Buda Thermal Karst (Hungary). – In: GOSTINČAR, P. (ed.): Milestones and Challenges in Karstology – 25th International Karstological School "Classical Karst", Abstract & Guide Book, 19-23 June 2017, Karst Research Institute ZRC SAZU, Postojna, Slovenia, p. 57.

VIRÁG M., MINDSZENTY A., SURÁNYI G., DEMÉNY A., CZUPPON GY., PALCSU L., KISS K., HEGEDŰS A., LEÉL-ÖSSY SZ. (2017): Hipogén és epigén karsztos folyamatok hatása a Szemlő-hegyi-barlang oldódási jelenségeire és barlangi képződményeire (Budai-termálkarszt). – In: ZENTAI Z. (szerk.): Karsztfejlődés XXI. Absztrakt kötet, 2017. június 9-10, Szombathely-Bük, pp. 25–26.

VIRÁG M., SZIEBERTH D., LEÉL-ÖSSY SZ., BÍRÓ L., PALCSU L., KELE S., CZUPPON GY., NÉMETH T. (2017): Az aktív termálkarsztos Molnár János-barlang oldódási és kiválási folyamatainak jellemzése (Budai-termálkarszt). – In: ZENTAI Z. (szerk.): Karsztfejlődés XXI. Absztrakt kötet, 2017. június 9-10, Szombathely-Bük, pp. 23–24.

VIRÁG, M., SURÁNYI, G., KELE, S., KISS, K., NÉMETH, T., BRAUN, M., PALCSU, L., FUTÓ, I., HEGEDŰS, A., LEÉL-ÖSSY, SZ., MINDSZENTY, A. (2018): An attempt to reconstruct paleohydrological changes on the basis of speleothem studies in a show cave (Szemlő-hegy Cave, Buda Thermal Karst, Hungary). – In: PRELOVŠEK, M. (ed.): Show Caves and Science – 26th International Karstological School "Classical Karst", Abstract & Guide Book, 18-22 June 2018, Karst Research Institute ZRC SAZU, Postojna, Slovenia, pp. 98–99.

VIRÁG M., SURÁNYI G., KELE S., KISS K., HEGEDŰS A., LEÉL-ÖSSY SZ., MINDSZENTY A. (2018): Termálvízszint változások nyomai a Szemlő-hegyi-barlangban. – In: ZENTAI Z. (szerk.): Karsztfejlődés XXII. Absztrakt kötet, 2018. június 15-16, SzombathelyBük, pp. 16–17.

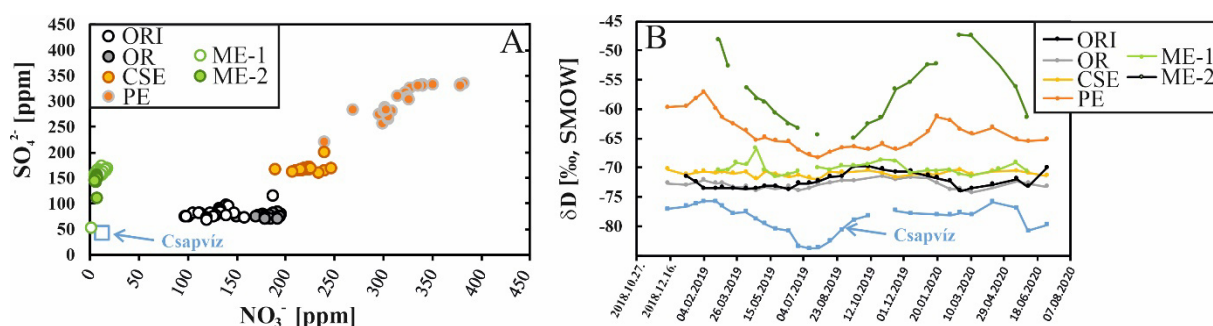
WEIDINGER T., VIRÁG M., TORDAI Á., LUKÁCS D., LEÉL-ÖSSY SZ., MINDSZENTY A. (2017): Barlangklimatológiai mérések a Budai termálkarszton. – In: CSERNY T., ALPEK B.L. (szerk.): HUNGEO 2017, „Bányászat és környezet – harmóniában”, Tanulmánykötet, Magyarhoni Földtani Társulat, pp. 110–115.

Ezen túlmenően, 2021-ben egész évben, havi rendszerességgel csepegő víz mintát gyűjtöttünk a Szemlő-hegyi-barlangban 4 helyszínen: a Csengő-teremben, az Óriás-teremben, az Örvény-folyosóban és a Pettyes-teremben; a Pál-völgyi-barlangban a Meseország mögötti két helyszínen (az egymástól mindössze 5 méterre lévő csepegési pontok vizének összetétele meglehetősen eltérő). (A Meseország-2 csepegési pontnál nem volt mindig csepegő víz, ezért az ottani mérések nem folyamatosak). A Pál-völgyi-barlangban végzett kutatásunkra Pest Megyei Kormányhivatal Érdi Járási Hivatalától 2018. július 09-én kapott PE-06/KTF/272-5/2018 sz., 2021. december 31-éig érvényes nem feltáró, tudományos kutatási célú engedélyünk adott lehetőséget).

Ezek a vizsgálatok még nem fejeződtek be, a méréseket folytatni kívánjuk a következő években is - amennyiben megkapjuk az új tudományos kutatási engedélyünket.

Az eredményekről előzetes tájékoztatást az alábbiakban adunk:

A Szemlő-hegyi- és a Pál-völgyi-barlangokban gyűjtött csepegő vizek vizsgálatával kimutattuk, hogy ezek a vizek jelentős mennyiségben tartalmaznak szulfátot, nitrátot, kloridot, nátriumot (l. ábra) összhangban más, korábbi tanulmányokkal (pl. Virág, 2008; Fehér, 2009). Ennek alapján megállapítható, hogy ezek a komponensek 10 év elteltével is jelen vannak a csepegő vizekben, amelyek egy része (szulfát) részben magyarázható természetes folyamatokkal, míg a másik része egyértelműen (nitrát, klorid, nátrium) emberi tevékenységhez kötődik. Mindazonáltal a jelenlegi projekt keretében elvégzett stabilizotóp mérések rámutattak arra is, hogy a korábbi feltételezésekkel szemben a szennyeződés elsősorban nem csatorna vagy a vízvezeték szivárgáshoz kötődik, hanem az esővízhez, amely a felszínről, a talajból szállítja le a fent említett komponenseket.



A csepegővizek szulfát (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) és nitrát (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) tartalma a Szemlő-hegyi-barlangban (ORI=Óriás-terem; OR=Örvény-folyosó; CSE=Csengő-terem; PE=Pettyes-terem) és a Pálvölgyi-barlangban (ME-1=Meseország-1; ME-2=Meseország-2).

*Forrás:*

VIRÁG M. (2008): A Szemlő-hegyi-barlang csepegő vizeinek vizsgálata a rózsadombi törmeléktakarón át történő beszivárgás értékelése céljából. – Diplomamunka, ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest, 153 p.

FEHÉR K., KISS K., KOVÁCS J., KISS A. (2009): Beszivárgás vizsgálatok a Rózsadombi Termálkarszton. Karsztfejlődés, XIV. 45-55.

LEÉL-ŐSSY SZ., VIRÁG M. (2022): The Caves of Northeastern part of the Transdanubian Mountains (In Ed. M. Veress and Sz. Leél-Őssy: Cave and Karst Systems of Hungary).- Springer, Cham, Switzerland, pp. 361-414.

CZUPPON GY., DEMÉNY A., LEÉL-ŐSSY SZ., STIEBER J., Óvári M., DOBOSSY P., BERENTÉS Á., KOVÁCS R. (2022): Monitoring and geochemical investigations of caves in Hungary: implications for climatological, hydrological and speleothem formation processes (In Ed. M. Veress and Sz. Leél-Őssy: Cave and Karst Systems of Hungary).- Springer, Cham, Switzerland, pp 465-486.

VERESS M., LEÉL-ÖSSY SZ (ed) 2022: Cave and Karst Systems of Hungary).- Springer, Cham, Switzerland, p .629.

A Rózsadomb térségében kutatási engedélyünk volt a Ferenc-hegyi-barlangra is (Pest Megyei Kormányhivataltól Érdi Járási Hivatalától 2018. július 09-én kapott PE-06/KTF/1249-5/2018sz, 2021. december 31-éig érvényes nem feltáró, tudományos kutatási célú engedélyünk). Ebben a barlangban tektonikai méréseket terveztünk, de TDK- vagy szakdolgozat sajnos még nem készült a témában. A téma iránt érdeklődő hallgató van, így remélhető, hogy a következő kutatási engedélyünk érvénytartama alatt ilyen témájú dolgozat is fog születni. Ugyanígy tervezünk a Mátyás-hegyi-barlangban is, ahol a kiterjedt, a kőzetkeletkezésessel egyidejű szingenetikus vetőrendszer rendkívül izgalmas vizsgálatokra ad lehetőséget.

A József-hegyi-barlang esetében (amire a Pest Megyei Kormányhivatal Érdi Járási Hivatalától 2018. július 09-én kapott PE-06/KTF/183-5/2018sz, 2021. december 31-éig érvényes nem feltáró, tudományos kutatási célú engedélyünk adott lehetőséget) az őskarsztos kitöltések vizsgálata és a Kinizsi-pályaudvar csepegő vizeinek rendszeres elemzése szerepelt terveink között, a mire. Ezt a tervezett munkát eddig – idő hiányában - nem tudtuk elvégezni. A 2020-as években feltárt, a Kulcs-teremtől D-re elterülő szakasz kitöltése rendkívül érdekes, és egyelőre nehezen megmagyarázható. Az új engedély megkapása után megkezdjük ennek a kitöltésnek a vizsgálatát. A barlang kristály képződményeinek védelme érdekében a kijelölt kutatási helyszíneink (és a megközelítési útvonal) részben képződmény mentesek, részben a járat mérete (a Kinizsi-pályaudvar esetében, ahol a remélt új engedély birtokában azonnal megkezdjük a rendszeres vízminta gyűjtést) garantálja a sérülés mentességet.

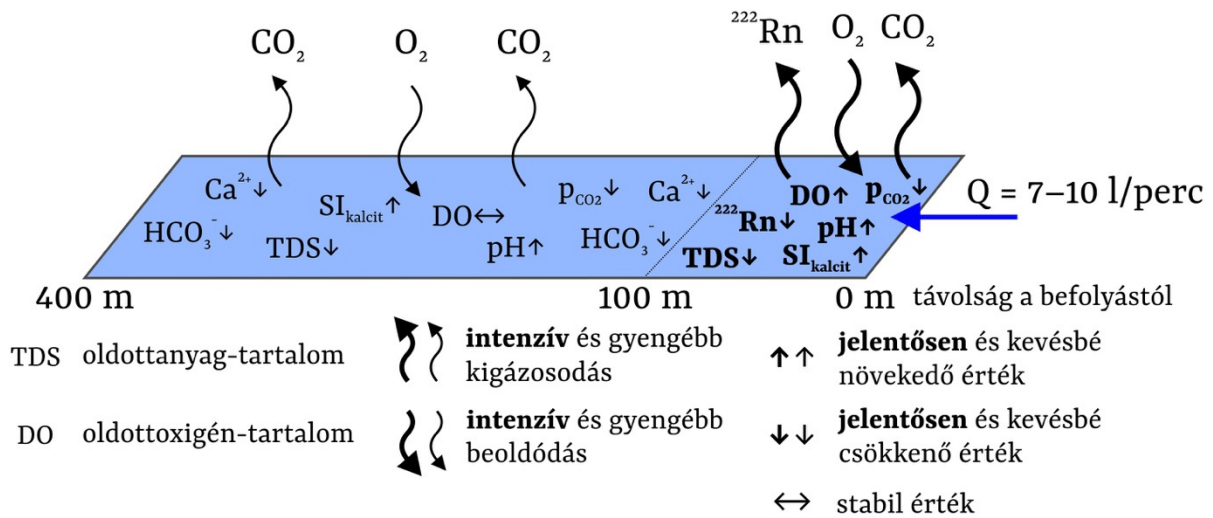
Az engedélyben szereplő kutatási területünk volt továbbá a Gellért-hegyi Török-forrás barlangja, az Ósforrás, az Aragonit-barlang, ill. a táró is. Itteni eredményeinkről a következő összefoglalást adom:

A Budai-termálkarszt aktív hipogén karsztrendszerében *in situ* kísérletet végeztünk doktori kutatás keretében (Kovácsné Bodor 2020). A kutatás célja a Gellért-hegy környezetében a forrásbarlangokban megfigyelhető kalcitútajok (cave ra ft), biogeokémiai kiválások és kialakulásukat meghatározó folyamatok megismerése volt. A víz fizikai-kémiai paramétereit és a vízből képződő kiválásokat egyidejűleg vizsgáltuk annak érdekében, hogy megismerjük i) a kiválások képződési körülményeit, ii) időbeli fejlődését, iii) hatásukat a víz paramétereire és hogy a iv) vízből mennyi elemet képesek megkötni.

A kutatás fő helyszíne a Gellért-táró volt, ahol az egyik termálvízút vizét a táróban lévő vályúba vezettük és a hossz-szelvény mentén vizsgáltuk a víz és a képződő kiválások paramétereit. Az *in situ* kísérlet két fázisban valósult meg, az első fázisban csak a víz fizikai-kémiai paramétereit tanulmányoztuk a vályúban hosszszelvény mentén két alkalommal. A második fázisban a vályúba folyó víz paramétereinek változását és a kiválások képződését 12 héten át követtük folyamatos mintavételezéssel. A kísérlet legfontosabb eredményei a következőképpen foglalhatók össze:

- A felszínre lépő termálvízben (1. ábra) a vízben oldott CO<sub>2</sub> és <sup>222</sup>Rn kigázosodása, a levegő oxigénjének vízbe történő beoldódása, a víz oldott Ca<sup>2+</sup>- és HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

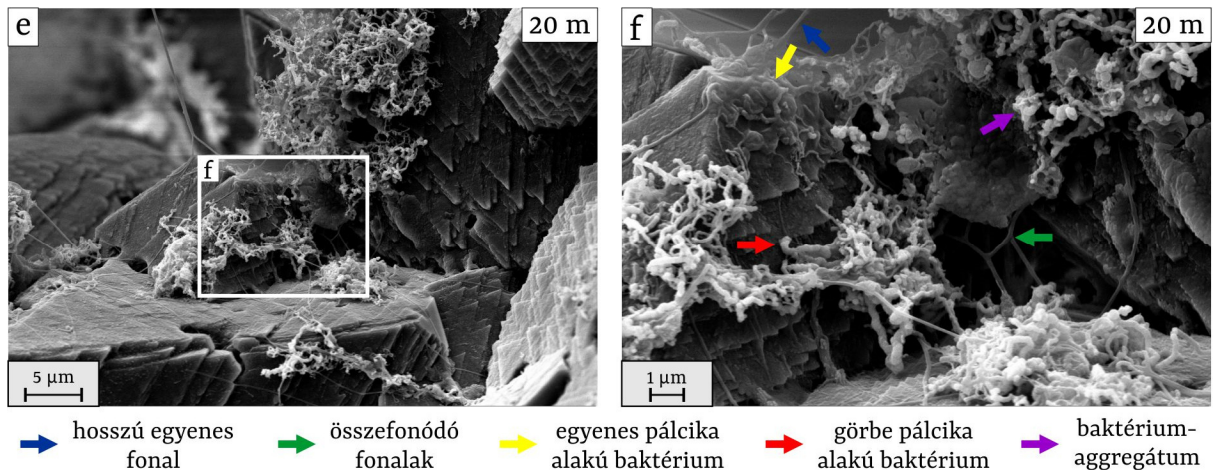
tartalmának, valamint oldottanyag-tartalmának (TDS) csökkenése, a pH és a kalcittelítettség ( $SI_{\text{kalcit}}$ ) növekedése következett be. A termálvíz felszínre jutását 7-10 l/perc vízhozam mellett „szimulálva” a termálvíz felszínre jutásától számított 100 m-en ezek a folyamatok intenzívebbek voltak, míg 100 m után lelassultak.



1. ábra A vízben zajló legfőbb fizikai-kémiai folyamatok az *in situ* kísérlet első fázisában (Kovácsné Bodor 2020)

- A Gellért-hegy egyik kútjában megcsapolódó termálvizet használtuk a kísérlethez. Megállapítottuk, hogy a víz hőmérséklete, pH-ja, oldottoxigén-tartalma és fajlagos elektromos vezetőképessége a három hónapos monitorozás alapján időben állandó, összhangban a korábbi, de csak egy-egy alkalomra vonatkozó terepi mérési eredményekkel.
- A természetes barlangok forráskilépéseinél (Ősforrás) egyidejűleg zajlanak a mikrobiológiai és fizikai-kémiai folyamatok, ennek eredményeképpen karbonát és biogeokémiai kiválások képződnek a termálvízből. A felszínre lépő alacsony oldottoxigén-tartalmú redukív termálvíz a légköri oxigén beoldódása miatt oxidatív válik, így a vízben oldott  $Fe^{2+}$  oxidálódik. Ennek hatására megfigyelhető volt, hogy a forráskilépési hely közelében, az első 8 m-en ferrihidritet tartalmazó biofilm képződött. Feltételezhető, hogy a ferrolízis folyamata gátolhatja a karbonátképződést a kilépés közelében.
- A képződő kiválások domináns jellegében kimutató volt egy hossz-szelvény menti és időbeli szekvencia, a biogeokémiai kiválások kezdeti dominanciája a kilépéstől távolodva megszűnt és a karbonátkiválás vált uralkodóvá. Ennek megfelelően megállapítottuk, hogy közöttük nincs éles határ és „biofilm jellegű biogeokémiai kiválást” és „karbonátos jellegű biogeokémiai kiválást” különítettünk el. Előbbiben a mikroorganizmusok és a mikrobiológiai folyamatok dominálnak, de kevés ásványiszemcsét is tartalmaznak. Utóbbi esetén a fizikai-kémiai folyamatok a meghatározók,  $CaCO_3$  összetételű kristályos fázis dominál, a kristályok felszínén láthatóak mikroorganizmusok (2. ábra).





## 2. ábra Mikroorganizmusok a karbonátkristályok felületén (Kovácsné Bodor 2020)

- A vizsgálatok kimutatták, hogy a biofilm által nagy mennyiségben adszorbeált  $^{226}\text{Ra}$  (8000–10000 Bq/kg) rövid idő alatt is (kísérleti viszonyok között néhány hét alatt) a víz oldott  $^{222}\text{Rn}$  aktivitáskonzentrációjának növekedését okozza (130 Bq/l-rel).
- Az *in situ* folytatási kísérlet körülményei között a karbonátkiválási ráta 0,34–2,66 g/cm<sup>2</sup> /év. Ennek értékei időben, a vízáramlás mentén és lokálisan is változnak.
- A Török-forrásban stagnáló vízben korábban végzett *in situ* kísérlettel [Burkus 2017, Anda 2019] összehasonlítva az eredményeket igazolást nyert, hogy a kiválások kialakulása, a képződés sebessége összefüggést mutat a víz hidrodinamikájával. Áramló víz esetén gyorsabb a képződés sebessége.

### Forrás:

BURKUS V. (2017): Termálvízből történő biofilm képződés folyamatainak értékelése a Török-forrásban zajló *in situ* kísérletben. ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, MSc diplomamunka, 77p

ANDA D. (2019): A Budai Termálkarszt víz és biofilm prokarióta közösségeinek sokfélesége összefüggésben a hipogén karsztosodással. ELTE TTK Mikrobiológia Tanszék, PhD disszertáció, 134p

KOVÁCSNÉ BODOR P.(2020): Termálvíz megcsapolódáshoz köthető vízkémiai és kiválási folyamatok kísérleti tanulmányozása. PhD értekezés. ELTE TTK Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék PhD disszertáció, 200p <https://doktori.hu/index.php?menuid=193&lang=HU&vid=22431>

ENYEDI NT., MAKK J., KÓTAI L., BERÉNYI B., KLBERT SZ., SEBESTYÉN Z.,

MOLNÁR ZS., BORSODI AK., LEÉL-ÖSSY SZ., DEMÉNY A., NÉMETH P. (2020): Cave bacteria-induced amorphous calcium carbonate formation.- Sci Rep 10, 8696 (2020).

<https://doi.org/10.1038/s41598-020-65667-w>

disszertáció, 200p <https://doktori.hu/index.php?menuid=193&lang=HU&vid=22431>

DEMÉNY A., RINYU L., NÉMETH P., CZUPPON GY., ENYEDI NT., MAKK J.,  
LEÉL-ÖSSY SZ., KESJÁR D., KOVÁCS I. (2021): Bacterial and abiogenic carbonates  
formed in caves–no vital effect on clumped isotope compositions. Plos One Published:  
January 25, 2021 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245621>

CZUPPON GY., DEMÉNY A., LEÉL-ÖSSY SZ., STIEBER J., ÓBVÁRI M., DOBOSY P.,  
BERENTÉS Á., KOVÁCS R. (2022): Cave monitoring in Hungary: An overview.- Central  
European Geology 1-14.

ENYEDI-LANGE NT., NÉMETH P., BORSODY AK, HALMY R., CZUPPON Gy.,  
KOVÁCS I., LEÉL-ÖSSY Sz., DEMÉNY A., MAKK J. (2022): Calcium Carbonate  
Precipitating Cultivable Bacteria from Different Speleothems of Karst Caves.-  
Geomicrobiology Journal 39:2 107-122 SN: Journal homepage:

<https://www.tandfonline.com/loi/ugmb20>

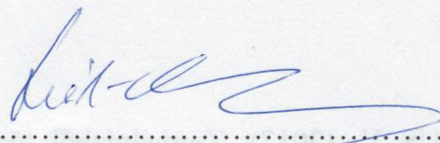
ELTE-TTK-FII-GKK  
Általános és Alkalmazott  
Földtani Tanszék  
1117 Budapest, Fázomány P.s.1/c  
Adóig.szám: 15308744-2-41

Budapest, 2023. február 15.



Dr. Fodor László

tanszékvezető egyetemi tanár



Dr Leél-Össy Szabolcs

barlangi kutatásvezető (076)