

Részletes jelentés a Béke- és Baradla-barlangokban végzett tudományos kutatásról

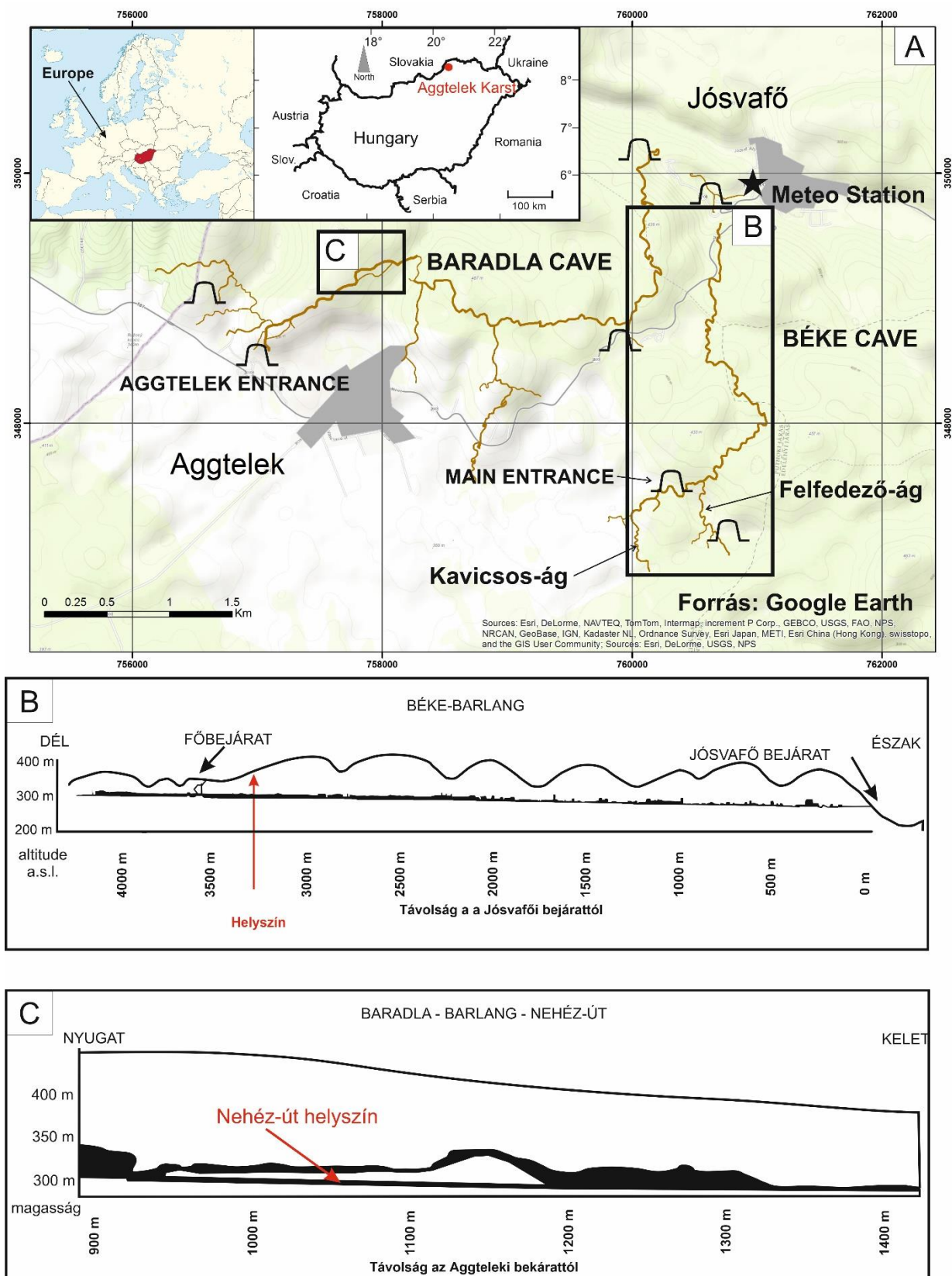
Előzmények

2023. február 27. dátummal kaptuk az ANPI/492/2023 ikt. sz. vagyonkezelői hozzájárulást (2025. 12. 31-ig tartó érvényességgel) az Aggteleki Nemzeti Park Igazgatóságától a Béke- és a Baradla-barlangban folytatandó tudományos kutatási tevékenységre. Engedélyes: ELTE-TTK-FFI-GKK.

Mint a kutatást irányítók (az ELTE TTK Földrajz-földtudományi Intézetének részéről Dr. Leél-Össy Szabolcs, leel-ossy.szabolcs@ttk.elte.hu, ill. a HUN-REN CSFK Földtani és Geokémiai Intézetének részéről Dr. Czuppon György: czuppon.gyorgy@csfk.org) a következő zárójelentést tesszük:

1. Bevezetés:

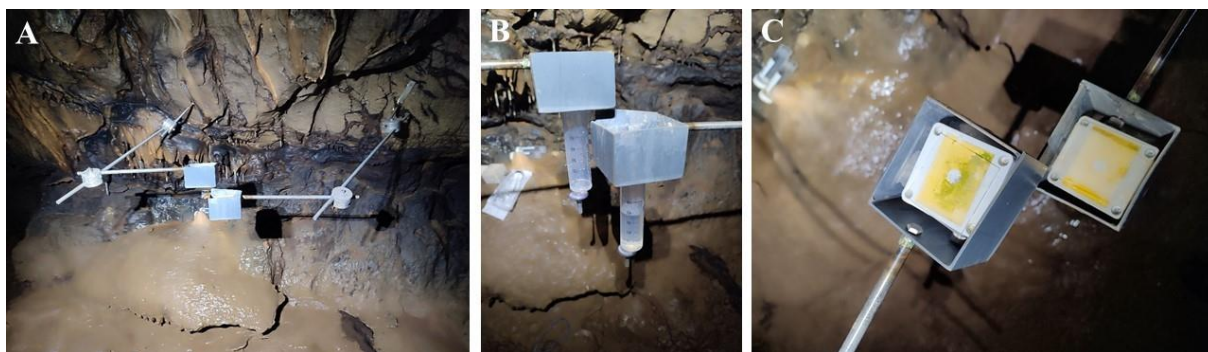
A barlangi cseppkövek a szárazföldi területek egyik legfontosabb klímajelző képződménye, mivel képződési kora jól meghatározható és számos olyan jelleggel, proxival rendelkezik, amelynek segítségével rekonstruálni lehet a múltbeli környezeti változásokat. Ezek közül a cseppkő C- és O-izotópösszetétele a leggyakrabban használt proxy, amelynek értelmezése számos esetben azonban nem egyértelmű. Ezért az elmúlt évtizedekben számos törekvés volt arra vonatkozóan, hogy más klímajelző proxikat is, - nemesgáz összetétele, víz-tartalmú zárványok stabilizotóp összetétele, kapcsolt izotópok és fluidum-zárvány mikrotermometria -, is felhasználjanak és a bennük rejlő lehetőséget feltárják. Ezen törekvések ellenére egy átfogó és minden részletre kiterjedő paleoklíma-rekonstrukció továbbra is komoly kihívást jelent. A nem tradicionális izotópok, mint például a Ca- és a Mg-izotópok felhasználása lehetőséget nyújt arra, hogy ezt az eszköztárat tovább bővítsük. Ennek érdekében egy átfogó barlangi monitoringot végeztünk a Béke- és a Baradla-barlangokban (*1. ábra*), amely során vizsgáltuk a barlangi klímát, a csepegővizet és frissen kiváló karbonátokat különös tekintettel azok kémiai és izotóp-összetételére. Az alábbi jelentésben még nem a Ca- és Mg-izotópok vannak fókuszban, hanem a barlang klimatológiai mérések, valamint a csepegővizek és frissen kivált karbonátok stabilizotóp vizsgálatának eredményeinek értékelése és értelmezése.



1. ábra: Az Aggteleki Karsztban található Béke- és Baradla-barlang elhelyezkedése (A). A vizsgált helyszínek a Béke-barlangban (B) és a Baradla-barlangban (C) a piros nyilak jelzik.

2. Vizsgálatok:

A 2025-es évben tovább folytattuk a havi, monitoring jellegű vizsgálatainkat a Béke- és Baradla-barlangokban (1. ábra), így már bizonyos paraméterek esetében több mint ötéves idősor áll rendelkezésre. A vizsgálatok keretében kiolvastuk a hőmérsékletet, csepegésintenzitást és CO₂ koncentrációt regisztráló loggerek által rögzített adatokat. Továbbá gyűjtöttünk két-két csepegési pontból (2/A-B. ábra) csepegővizet stabil hidrogén-, oxigénizotóp-elemzésre, Ca/Mg izotópelemzésre, valamint nyomelem-összetétel meghatározásra. A csepegővíz mellett évszakos gyakorisággal begyűjtöttük az üvegelemezen kivált karbonátokat stabilizotóp-, valamint nyomelem-mérés céljából (2/C. ábra). A csepegővizek gyűjtési helye, valamint a friss karbonátok gyűjtési helye és a csepegés intenzitását rögzítő loggerek helye ugyanaz, így ugyanazon csepegési pontról kapunk nagyon részletes és átfogó képet. A csepegővizek gyűjtése 12-24 órát vesz igénybe, így csak ez idő alatt nem regisztrálnak a csepegésintenzitást mérő loggerek (2/C. ábra). Ezenfelül a vizsgált helyszíneken meghatároztuk a csepegővíz pH-ját, elektromos vezetőképességét.



2. ábra: A vizsgált helyszín a Baradla-barlangban (A), csepegővíz gyűjtése (B), csepegésintenzitás számláló (C).

Eszközök:

A csepegésintenzitás méréshez 'PiTech Research Ltd' által gyártott „Stalagmate” típusú loggert; a hőmérséklet regisztrálásához a „Gemini Data Loggers Ltd” által gyártott „TinyTag Plus 2 (TGP-4017)” típusú loggert, míg a CO₂ regisztrálásához a „Stieber Levegőtisztas-védelem Bt.” által gyártott „Enviro 100” típusú loggert használtuk. A vízminták hidrogén- és oxigénizotóp összetételének elemzése LGR LWIA-24d lézeranalizátorral történt a HUN-REN CSFK Földtani és Geokémiai Intézetében. Az eredményeket a V-SMOW nemzetközi sztenderdhez viszonyítva δ értékben adtuk meg (a megadott képlet szerint), amelynek

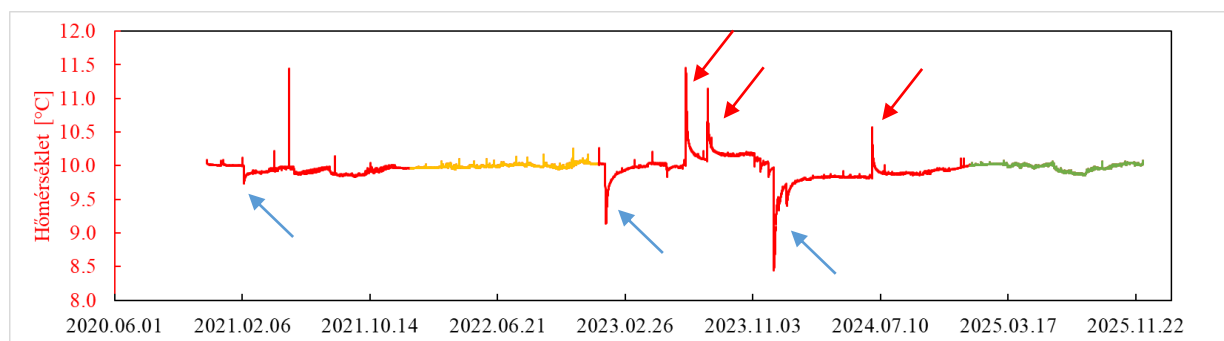
dimenziója ‰: $\delta = (R_{\text{minta}}/R_{\text{sztenderd}} - 1) \cdot 1000$, ahol R_{minta} és $R_{\text{sztenderd}}$ a mintában és a sztenderdben meghatározott $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ és $^2\text{H}/^1\text{H}$ arányt jelölik.

A karbonátminták szén- és oxigénizotóp-összetételének meghatározása a HUN-REN Földtani és Geokémiai Intézetben üzemeltetett Finnigan delta+XP stabilizotópmérő tömegspektrométerrel történtek. Az eredményeket a V-PDB nemzetközi sztenderdhez viszonyítva δ értékben adtuk meg (a megadott képlet szerint), amelynek dimenziója ‰: $\delta = (R_{\text{minta}}/R_{\text{sztenderd}} - 1) \cdot 1000$, ahol R_{minta} és $R_{\text{sztenderd}}$ a mintában és a sztenderdben meghatározott $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ és $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ arányt jelölik.

3. Eredmények:

Barlang-klimatológiai adatok:

A Béke-barlangban a vizsgált helyszínen a hőmérséklet közel állandó: $9,98 \pm 0,16$ °C. Mindazonáltal a látszólagos állandóság mellett felfedezhetők apró, rövid-idejű „tűszerű kiugrások”, amelyek valószínűleg a barlangban tett látogatások lenyomata (3. ábra). Emellett vannak olyan nagyobb „kiugrások” is (piros és kék nyilak 3. ábrán), amelyek hosszabb idejű lecsengést mutatnak. Ezek a nagy esőzéseket követő árvizekkel magyarázhatók: nyári félévben pozitív irányú kiugrást (piros nyíl), míg téli félévben negatív irányú kiugrást (kék nyíl) eredményeztek.

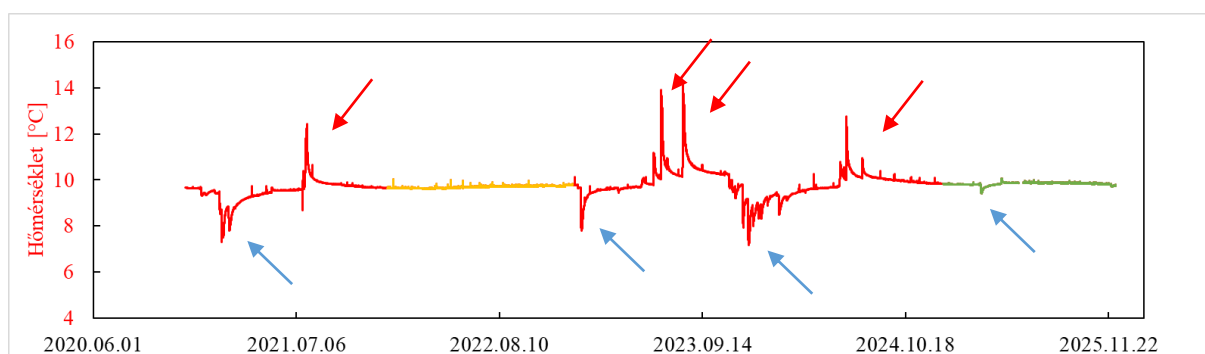


3. ábra: Béke-barlangban mért hőmérséklet 2021-től. A sárga szakasz a 2022-es évet, míg a zöld szakasz a 2025-ös évet jelöli, a piros nyilak a nyári, a kék pedig a téli árvizek barlangi léghőmérsékletre gyakorolt hatását).

A 2025-ös év száraz év volt, sem télen sem nyáron nem volt jelentős mértékű csapadék mennyiség, amely kisebb-nagyobb áradást okozhatott volna a Béke-barlangban. Így a 2025-ös

év során (zöld szakasz), hasonlóan 2022-es évhez (sárga szakasz), nem voltak árvízhez köthető hőmérsékleti kiugrások.

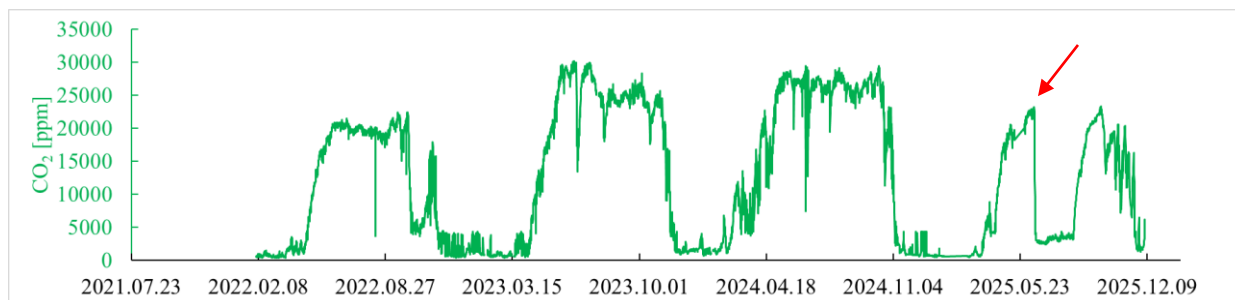
A *Baradla-barlangban* (Nehéz-út) hasonló jelenséget tapasztaltunk (4. ábra). Továbbá ebben az esetben is a hőmérséklet viszonylag szűk tartományban változott ($9,69 \pm 0,57$). Mindazonáltal meg kell jegyezni, hogy a Béke-barlanggal szemben, itt megfigyelhető volt egy apró kiugrás a 2025-ös évfolyamán, amely azt jelzi, hogy a Baradlában a kevesebb mennyiségű csapadék ellenére levonult egy kisebb méretű árhullám a tavaszi időszak folyamán. Ebben a tekintetben tapasztalt apró különbség valószínűleg a vízgyűjtőterület eltérő méretével hozható összefüggésbe.



4. ábra: Baradla-barlangban mért hőmérséklet 2021-től (a sárga szakasz a 2022-es évet, míg a zöld szakasz a 2025-ös évet jelöli, a piros nyilak a nyári, a kék pedig a téli árvizeket).

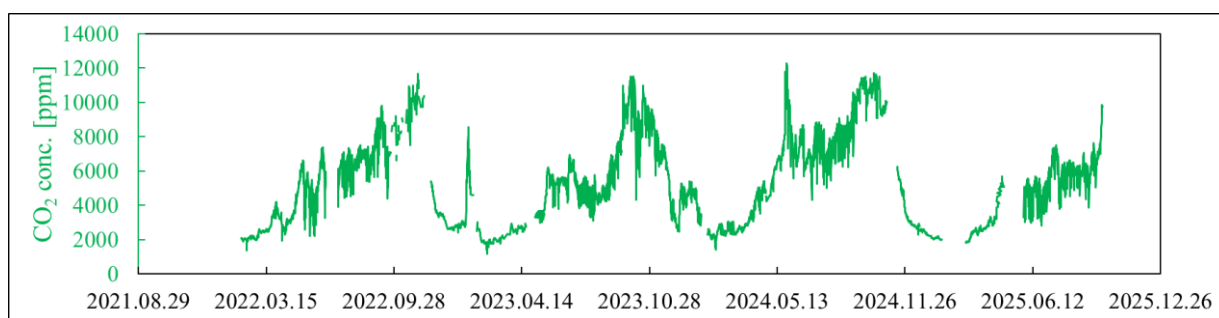
A *Béke-barlangban* mért CO_2 koncentráció erős szezonalitást mutatott, nyáron magasabb érték volt tapasztalható, míg télen alacsonyabb. Ez elsősorban a külső hőmérséklet változásával függ össze: amikor a külső hőmérséklet a barlang hőmérsékletét „metszi”, akkor következik be változás a barlangi legközrészben. Érdekes módon 2022-ben a nyári maximum (21000 ppm) elmaradt a 2023-as maximumtól (29 000 ppm) és a korábban mért maximum értékektől (2013-es és 2014-es évek; Czuppon et al., 2018). A 2025-ös évben is a maximum érték elmaradt a 2023-as év maximumától, bár fontos megjegyezni, hogy a 2025-ös évben a „Barlangnapok” előtt leszivattyúzták a vizet. Ennek hatására természetesen a CO_2 koncentrációja is jelentősen lecsökkent (5. ábra, piros nyíl). A szivattyúzás időszaka során (2025.06.14 és 2025.08.14. között) a CO_2 koncentráció 4400 ppm volt, amely a szivattyúzás végeztével újból, gyors ütembe emelkedett egészen a korábbi maximum értékig (22 400 ppm). Ezenfelül a szivattyúzás hatását a hőmérsékleti görbén is tetten lehet érni, mivel abban az időszakban alacsonyabb értékek voltak megfigyelhetők. Összeségében meg lehet állapítani, hogy a CO_2 és a hőmérséklet folyamatos monitoringja nemcsak a

barlang megismerését segíti, de érzékenyen rögzíti az emberi beavatkozás hatását és fontos információt nyújthat a barlang üzemeltetőjének.



5. ábra: CO₂ koncentráció változása a Béke-barlangban 2022-től. A maximum értékek a nyári félévben, míg az alacsony értékek a téli félévben jelentkeznek. 2025 nyarán bekövetkezett hirtelen CO₂ csökkenés (piros nyíl) a barlangi patak szivattyúzásának eredménye.

A Baradla-barlangban a CO₂ koncentráció szintén mutatott szezonalitást (6. ábra), bár kisebb mértékűt, mint a Béke-barlangban: télen 2 000-3 000 ppm, míg nyáron 11 000-12 000 ppm volt. Ezen felül a CO₂ görbe mintázata jóval bonyolultabb képet mutat, mint a Béke-barlangban, ahol a külső hőmérséklet (és nyomás) változásának köszönhetően tavasszal megemelkedik a koncentráció, télen pedig lecsökken. A Baradla-barlangban észlelt nagyobb változékonyság a barlang bonyolultabb szerkezetével, járatrendszerével magyarázható. Érdekes módon a nyári félévben megfigyelhető maximum a 2025-ös évben alacsonyabb volt, mint a megelőző években, hasonlóan Béke-barlanghoz. Ezt többek között a csapadék relatív csökkenésével hozható összefüggésbe.

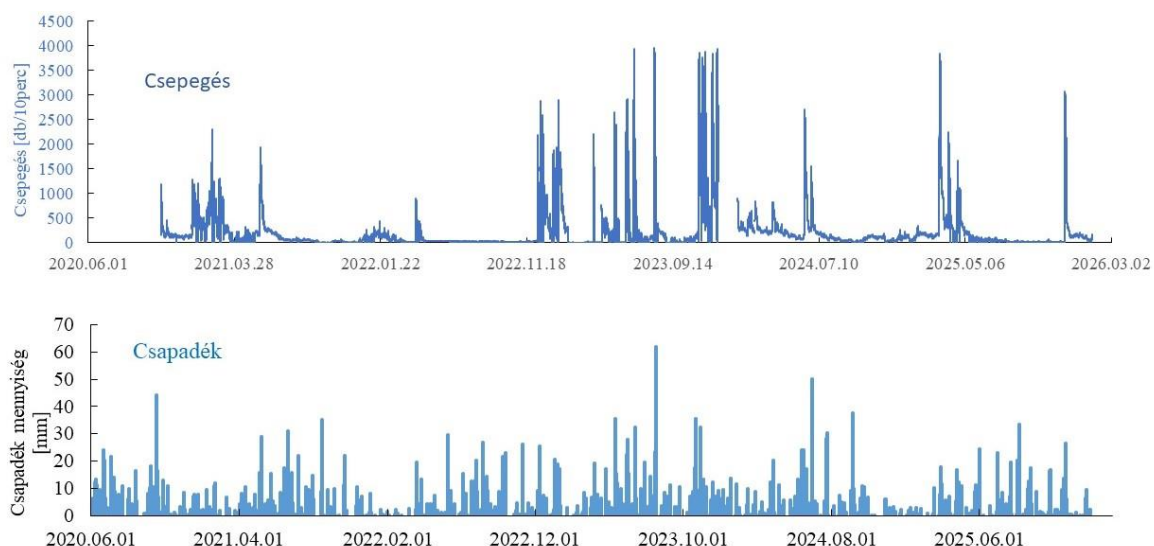


6. ábra: CO₂ koncentráció változása a Baradla-barlangban (Nehéz-út) 2022-től.

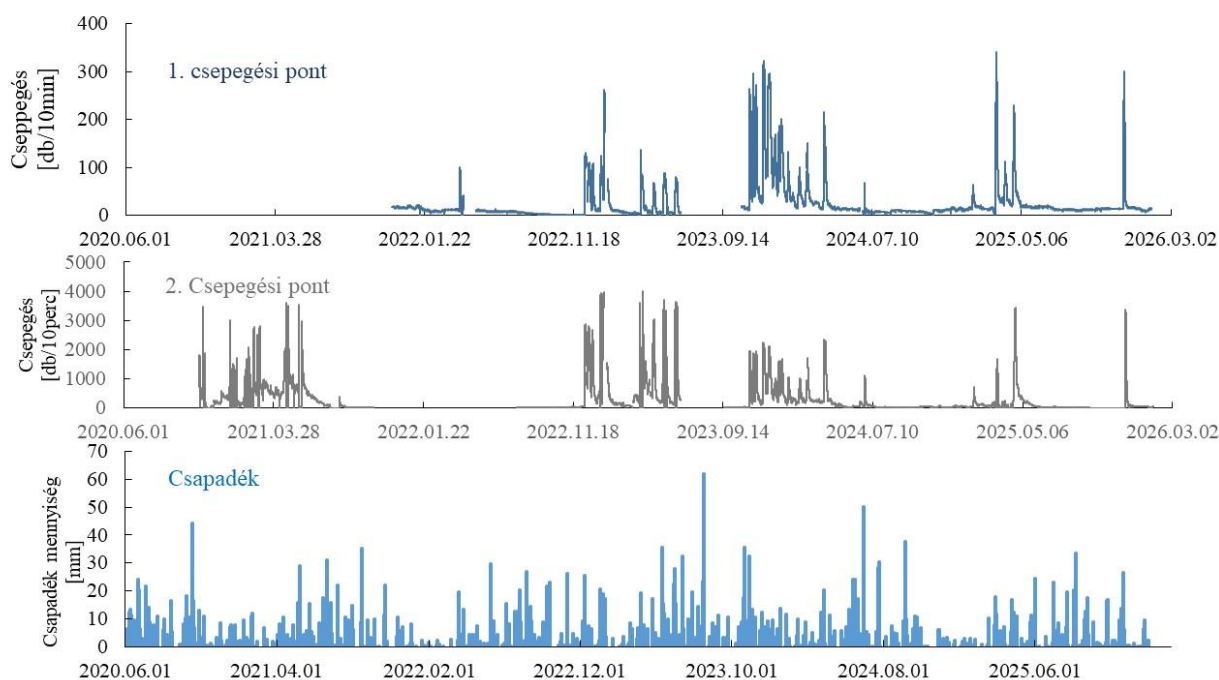
Csepegésintenzitás:

Mind a Béke-barlangban (7. ábra), mind a Baradla-barlangban (8. ábra) kihelyezett csepegésintenzitás mérők érzékenyen „reagáltak” a nagyobb csapadék eseményekre. Sok

esetben ezek a változások egybeestek a léghőmérséklet változásával is, mivel a nagy csapadék események nemcsak a csepegés intenzitását növelték meg, hanem a barlangi patakok szintjét is, ami befolyásolta a barlangi levegő hőmérsékletét. Érdekes módon a Baradla-barlangban két egymástól 15 cm-re lévő csepegési pontok intenzitása jelentősen eltér (egy nagyságrenddel), a görbék lefutás azonban rendikül hasonló.



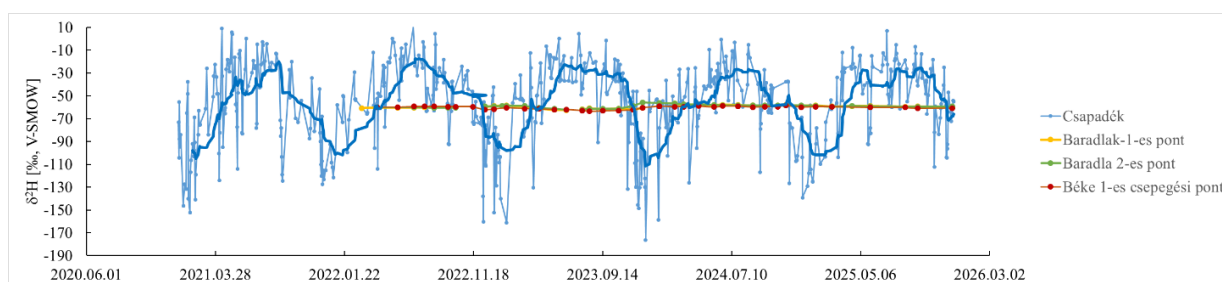
7. ábra: A csepegésintenzitás és a csapadék (legalsó diagramm) változása a Béke-barlangban.



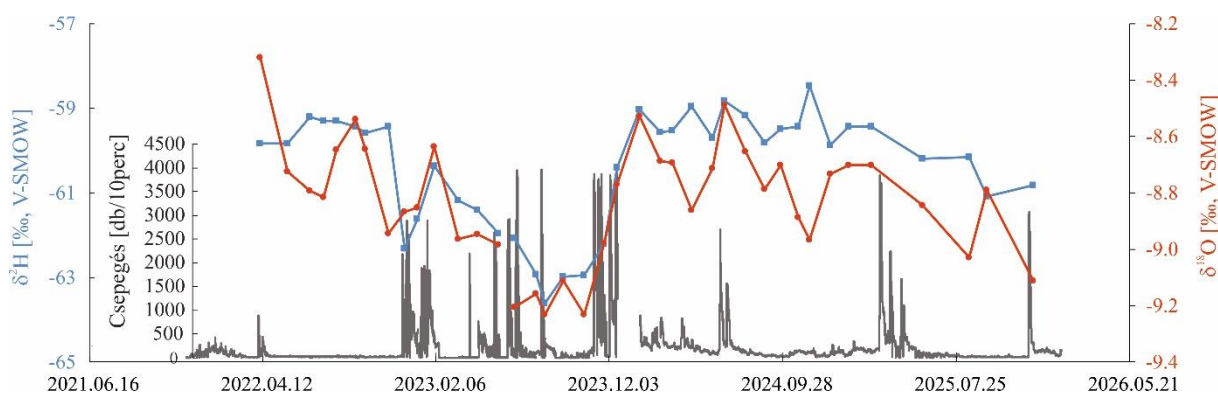
8. ábra: A csepegésintenzitás változása a Baradla-barlangban az 1-es és a 2-es csepegési helyeken és csapadék mennyiségének változásával (legalsó diagram).

Stabilizotópos eredmények:

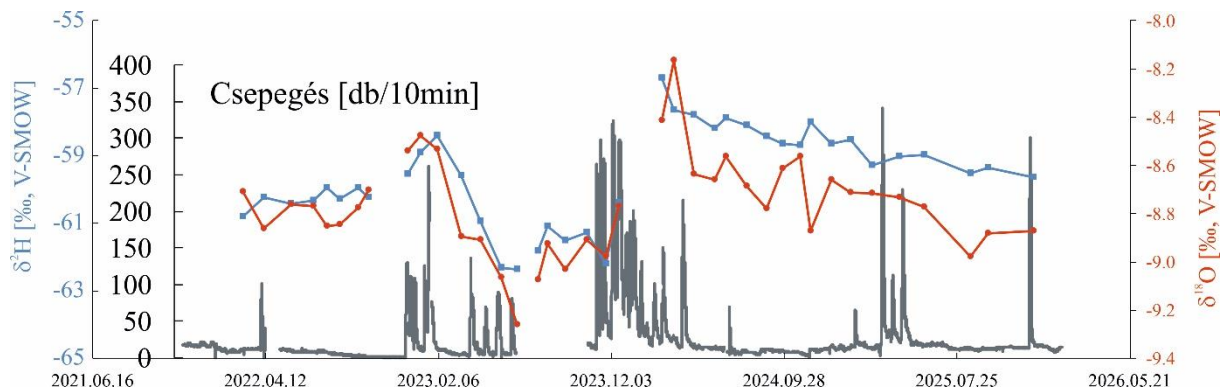
Jelen projekt keretében a csapadékvíz- és csepegővíz-minták stabilizotóp-összetételét 2020 illetve 2021 óta vizsgáljuk az Aggteleki karszt területén (9. ábra). A csapadék izotóp-összetételére erős szezonális jellemző: nyáron pozitívabb érték, míg télen negatívabb érték figyelhető meg. A csapadék stabilizotóp-összetételéhez képest a Béke- és a Baradla-barlangokban gyűjtött csepegővíz hidrogén- és oxigénizotóp-összetétele szűk tartományban változik (9. ábra). Mindazonáltal úgy tűnik, hogy a stabilizotóp-összetételben, szisztematikus, kismértékű változásokat lehet felfedezni (10. ábra, 11 ábra és 12. ábra). Ezek a változások visszatükrözik a karszt hidrológiájában bekövetkezett változásokat, amely szoros összefüggést mutat a nyári, téli csapadékelátottsággal.



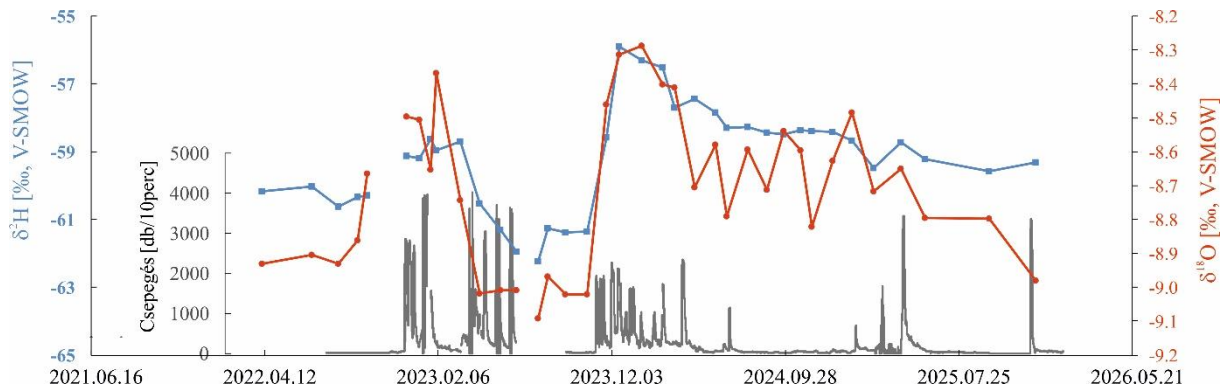
9. ábra: A Béke- és a Baradla-barlangban a vizsgált csepegési helyszínen gyűjtött csepegővizek stabil hidrogénizotóp- és oxigénizotóp-összetétele, valamint a csapadék stabilizotóp-összetétele (kék görbe).



10. ábra: A Béke-barlangban vizsgált 1-es csepegési pont stabilizotóp-összetétele, valamint csepegésintenzitása.



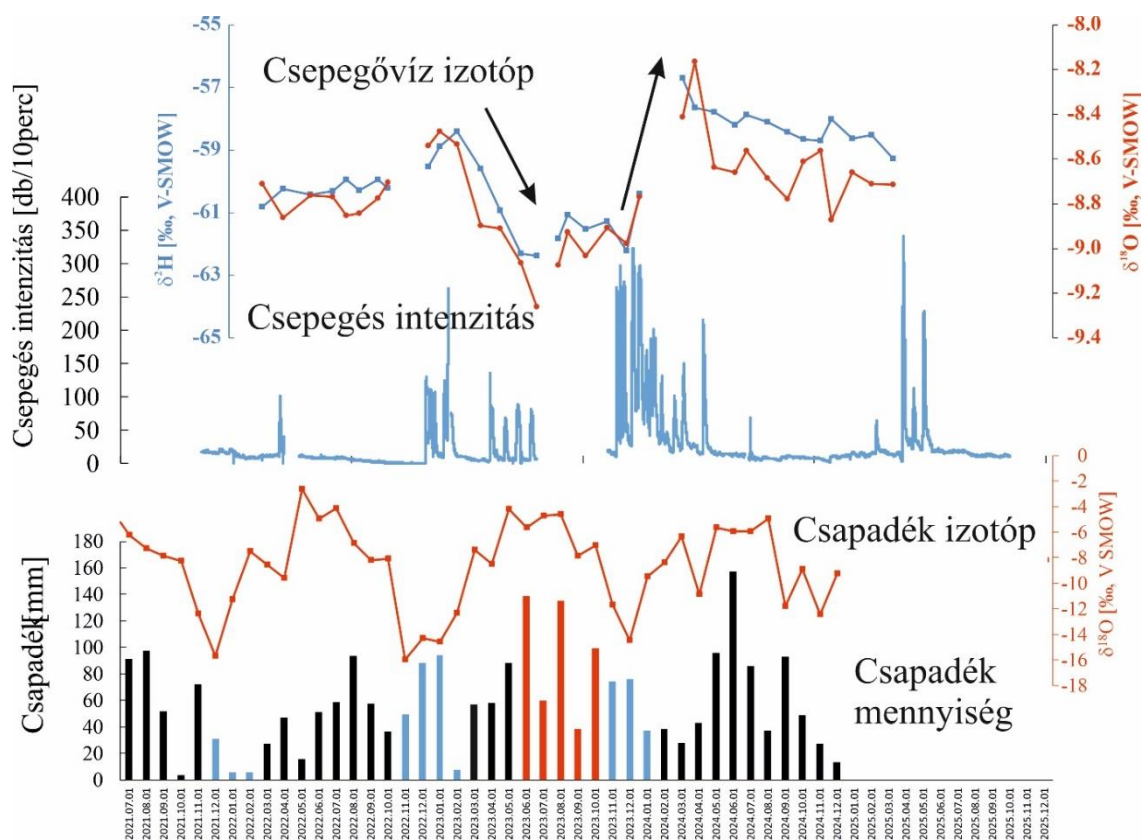
11. ábra: A Baradla-barlangban vizsgált 1-es csepegési pont stabilizotóp-összetétele, valamint csepegésintenzitása (szürke görbe).



12. ábra: A Baradla-barlangban vizsgált 2-es csepegési pont stabilizotóp-összetétele, valamint csepegésintenzitása (szürke görbe).

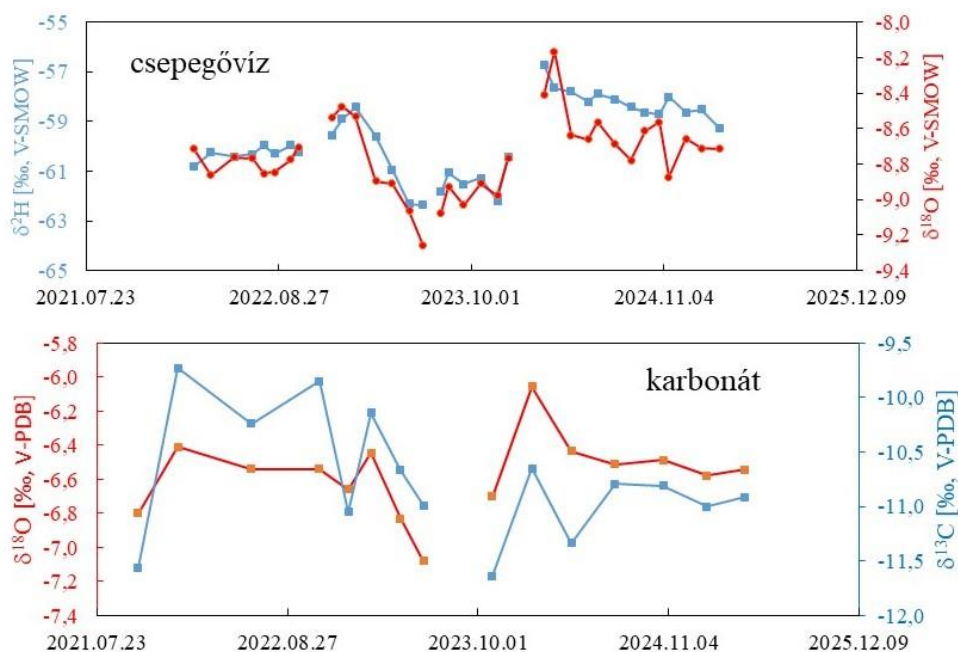
Csapadékmennyiség szezonális befolyásolja az adott évben beszivárgó csapadék izotóp-összetételét: ha több téli csapadék szivárog be, akkor negatívabb irányba mozdul el a beszivárgóvíz izotóp-összetétele, ha pedig arányaiban több a nyári csapadék, akkor pozitívabb irányba. Ennek az a magyarázata, hogy a téli csapadéknak izotóp-összetétele negatívabb, mint a nyárié (lásd 9. ábra). A 2022-2023 évek fordulóján a bőséges téli csapadéknak köszönhetően, - amely megmutatkozott a csepegésintenzitás növekedésében is -, a csepegővíz stabilizotóp-összetétele negatívabb irányba mozdult el. Fontos kiemelni, hogy ez a változás 3-4 hónapos késéssel jelentkezett. A negatív változás tehát a bőséges téli csapadék mennyiséggel függ össze. Mindazonáltal a 2023 évben nem csak a tél volt csapadékos, hanem a nyár is, így a csepegővíz-összetétele ezt követően (néhány hónapos késéssel) pozitív irányba mozdult el. A 2024-es és a 2025-ös években a csepegővíz izotóp-összetétele nem

mutatott ilyen mértékű fluktuációt, elsősorban azért, mert a csapadék mennyisége általánosságban kevesebb volt.



13. ábra: A Baradla-barlangban a csepegővíz izotóp-összetétele, és a csepegési pontra jellemző csepegésintenzitás, valamint a csapadék izotóp-összetétele és mennyisége (alsó diagrammok).

Úgy tűnik, hogy a kivált karbonátok stabilizotóp-összetétele (14. ábra) bizonyos mértékben visszatükrözi a csepegővíz izotóp-összetételében tapasztalt változásokat, amely szoros összefüggést mutat a csapadék és ezáltal a hidrológiai viszonyokban bekövetkezett változásokkal (13. ábra). Fontos megjegyezni azonban, hogy a kivált karbonát izotóp-összetételét nemcsak a csepegővíz-izotópösszetételében bekövetkezett módosulások befolyásolják, hanem önmagában a csepegésintenzitásában bekövetkezett változások is sok más tényező mellett (pl. barlangi légkörzés, hőmérséklet, ventilláció mértéke).



14. ábra: A Baradla-barlangban a csepegővíz stabilizotóp-összetétele (felső diagram) és a kivált karbonát stabilizotóp-összetétele (alsó diagram).

4. Összefoglalás:

A Béke- és a Baradla-barlangokban végzett monitoring segít megérteni a barlangok működését és a karbonát kiválásokat befolyásoló tényezőket. A projekt keretében részletes képet kaptunk a hőmérséklet és a CO₂ változásáról. Ez nemcsak az adott barlangból származó cseppkő összetételének megértése szempontjából fontos, hanem hasznos eszköznek bizonyul az emberi tevékenység nyomon követésére is. Továbbá a csepegésintenzitás mérések, valamint a stabilizotóp-összetéti adatok segítségével sikerült feltárni a csapadék és annak szezonálisában bekövetkezett változások hatását az egyes csepegési pontokra, valamint az ott kiváló karbonátokra.

Budapest, 2026. február 15.


Dr. Czuppon György


Dr. Leél-Össy Szabolcs

Barlangi kut. vez. ig. száma: 076