

Kutatási jelentés

A Szent István-barlangban (kataszteri szám: 5372-1)
2025. évben végzett paleoklimatológiai és monitoring
kutatásról

Készítette: Dr. Czuppon György

Alapadatok:

Barlang neve: *Szent István-barlang*

Kataszteri száma: *5372-1*

A kutatással érintett barlangszakasz(ok): *A Szent István-barlang fő ága a Pokol küszöbéig, és a Tordai-hasadékból induló kürtő*

A vagyonkezelői hozzájárulás jogosultja: *Bükk Nemzeti Park Igazgatóság*

Vagyonkezelői hozzájárulás kibocsátója, száma: -

Vagyonkezelői hozzájárulás lejárata: -

Vagyonkezelői hozzájárulás módosításának száma (ha van): -

Jelentés időszaka: *2025. január 1-től december 31-ig.*

Kutatásvezető: *Dr. Kereskényi Erika (Bükk Nemzeti Park Igazgatóság), Dr Csuppon György*

Kutatásvezető-helyettes: *Ferenczy Gergely*

A barlang hossza és vertikális kiterjedése a kutatás megkezdésekor (a jelentési időszakra vonatkoztatva): *1470 m*

A jelentés lezárásának időpontja: *2026. február 15.*

A jelentést összeállította: *Dr. Csuppon György*

Bevezetés:

A cseppkövekben fontos információk őrződhetnek meg a múltbeli környezetről, éghajlatról, melyek vizsgálatához kiváló alapot nyújtanak a cseppköveken végzett stabilizotóp-vizsgálatok. Mindazonáltal ahhoz, hogy a cseppkövekben található „közettani és geokémiai jellemzőket, jeleket” helyesen értelmezzük, tudnunk kell, hogy az adott környezetben ez, hogy megy végbe, milyen folyamatok játszódnak le a barlangban, „hogyan működik” a barlang. A monitoring keretében a barlangban és annak környezetében végzett vizsgálatok segítségével megállapíthatjuk azt a kapcsolatrendszert, amely a külső környezeti viszonyokat összeköti a barlangi folyamatokkal.

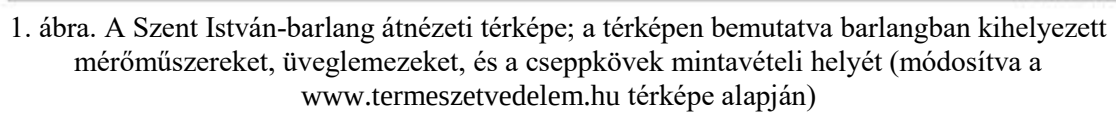
Az UNESCO abrden projekt által támogatott pályázat célja éppen ezért egyrészt az volt, hogy egy átfogó monitoring kutatást végezzünk a Szent István-barlangban, másrészt az ott megfűrt cseppkövek segítségével megértsük a múltbeli környezeti és éghajlati változásokat. A pályázat címe a Szent István-barlang paleo-klimatológiai rekonstrukciója és monitoring

tevékenysége, amely a *„Fenntartható fejlődés előmozdítása az UNESCO programjain és helyszínein keresztül”* projektsorozat harmadik éves ciklusába kapcsolódott be.

A kutatás keretében tehát egyrészt végeztünk egy barlangi monitoring vizsgálatot, másrészt elkezdtuk a 2024-ben megfűrt cseppkövek paleo-klimatológiai feldolgozását.

1. Barlangi monitoring: eredmények és értelmezés

A Szent István-barlang különböző pontjain kihelyezett mérőműszerek (loggerek, 1. ábra) 2024 szeptember óta rögzítették az adatokat, melyek kiolvasása havi szinten valósult meg. A barlang mikroklímájának megismeréséhez a kihelyezett műszerek folyamatos hőmérséklet és széndioxid mérése járult hozzá. A hőmérséklet méréséhez Tiny Tag Plus 2 (TGP-4017) típusú loggert használtunk, míg a CO₂ koncentráció meghatározásához STIEBER Levegőtisztaság-védelmi Bt. által gyártott Enviro 200 típusú műszert. A barlangban kijelölt pontokon (összesen 6 db) havonta történt a mintavétel csepegővizekből (1. ábra), mely során meghatároztuk a vizek pH-ját, elektromos vezetőképességét (2. ábra), valamint stabilizotóp összetételét. A csepegés intenzitását is vizsgáltuk, melyhez „Stalagmate” típusú műszert használtunk.



1. ábra. A Szent István-barlang átnézeti térképe; a térképen bemutatva barlangban kihelyezett mérőműszereket, üveglemezeket, és a cseppkövek mintavételi helyét (módosítva a www.termeszetvedelem.hu térképe alapján)

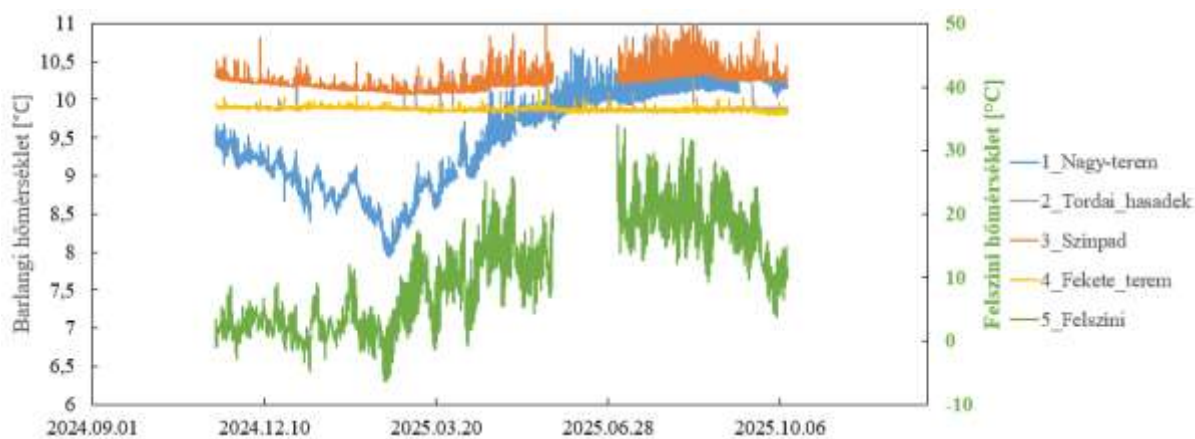


2. ábra. A: hőmérséklet –és csepegésintenzitás-mérő műszer (logger) kiolvasása a barlangban. B: a csepegő víz kémhatásának (pH) és vezetőképességének mérése. C: csepegővíz gyűjtésére kihelyezett 50 ml-es gyűjtőedény tölcsérrel. D: A barlangban kihelyezett csepegésintenzitás-mérő logger.

1.1. Hőmérséklet

A barlangban kijelölt mérési pontokon (Nagy-terem, Tordai-hasadék, Színpad-terem, Oszlopok-csarnoka és Fekete-terem előtt, 1. ábra) és a felszínen, a barlang bejáratának közelében elhelyezett mérőműszerek 10 percenként rögzítették a hőmérsékletet 2024.11.11.

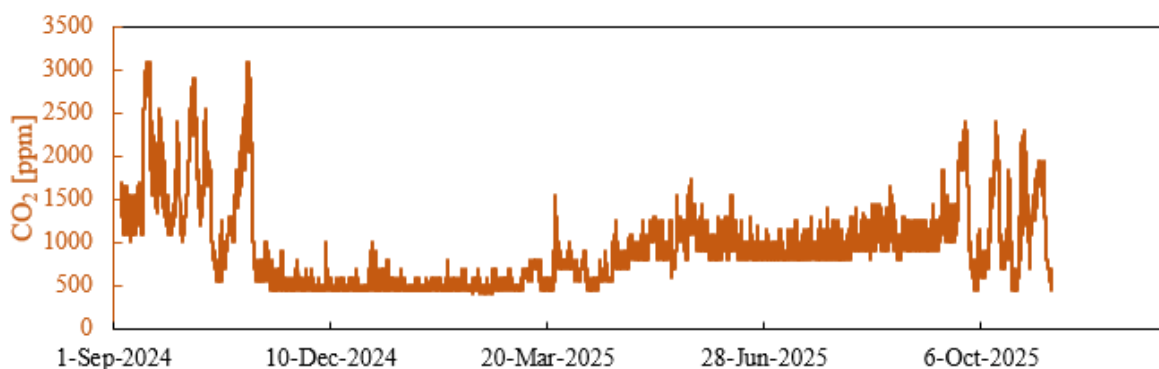
óta. A 3. ábrán látható szünetek azt jelzik, hogy a mérés során volt olyan időszak, amikor nagy valószínűséggel műszerhiba miatt nem mértek a Színpad-teremben és a felszínen elhelyezett loggerek. A vizsgált időszakban a legváltozatosabb hőmérsékleti értékeket a felszínen elhelyezett műszer mérte, hiszen itt ingadozik szezonálisan legjobban a hőmérséklet. A legmelegebb időszak 2025 nyarán volt, amikor a legmagasabb érték július elején majdnem elérte a 34 °C-ot. A vizsgált időszak során a leghűvösebb 2025. februárban volt, ekkor a leghidegebb hőmérséklet -6,2 °C alá süllyedt (február 19.). A barlangban mért hőmérsékleti értékek 7,9 °C (Nagy-terem) és 10,8 °C (Színpad-terem) között mozogtak, mely értékek sokkal kiegyenlítettebbek, mint a felszíniek. A Nagy-teremben volt megfigyelhető a legnagyobb ingadozás (3. ábra) a barlangon belül kijelölt mérési pontok közül ($\Delta T \approx 3^\circ\text{C}$), a legkisebb pedig a Tordai-hasadékban ($\Delta T \approx 0,6^\circ\text{C}$) és a Fekete-teremben ($\Delta T \approx 0,3^\circ\text{C}$). Mindazonáltal fontos megjegyezni, hogy látogatók nélkül ez az ingadozás még kisebb lenne, mivel a 3. ábrán látható apró csúcsok („tüskék”) egyértelműen a turistacsoportokhoz köthetők. A barlang megfigyelt legmagasabb átlaghőmérséklete a mért időszakban a Színpad-teremben (3. ábra) volt, egyedül itt haladta meg a 10 °C-t az átlaghőmérséklet. A Színpad-teremben a hőmérséklet ingadozása ($\Delta T \approx 1^\circ\text{C}$) kisebb volt, mint a Nagy-teremben, de nagyobb volt, mint a két másik helyszínen (Tordai-hasadék, Fekete-terem). Érdekes módon a Tordai-hasadék és a Fekete-terem helyszíneken a hőmérsékleti értékek szinte pontosan megegyeztek, átfednek egymással (9,6-9,9 °C) (10. ábra). Néhány kiugrástól eltekintve folyamatosan 10 °C körüli hőmérséklet volt itt.



3. ábra. A barlangban, és a barlang feletti felszínen rögzített hőmérsékleti értékek 2024. novembertől.

1.2. Széndioxid

A barlangban egy helyen, a Fekete-teremben került kihelyezésre szén-dioxid mérő, mely 2024.09.04. óta folyamatosan, 5 percenként rögzítette az adatokat. A CO₂ értékek 2024 és 2025 őszén is kiugróan pozitív értékeket mutattak (4. ábra). Az ekkor mért értékek elérték a 3000 ppm-et is időszakosan, majd ez visszacsökkent 450-1000 ppm-re, és ez ismétlődött 3-4x az ősz folyamán. A téli időszakban volt a legalacsonyabb, és talán a legstabilabb a CO₂ koncentrációja, csak néhány, egészen apró kiugrás mutatkozott. Ekkor az értékek 400-1000 ppm között mozogtak. Tavasszal emelkedni kezdett a CO₂ értéke, ami nyáron szintén beállt egy viszonylag állandó, 500-1500 ppm közötti értékre (4. ábra).



4. ábra. A Fekete-teremben mért szén-dioxid értékek 2024. szeptembertől.

1.3. Csepegésintenzitás

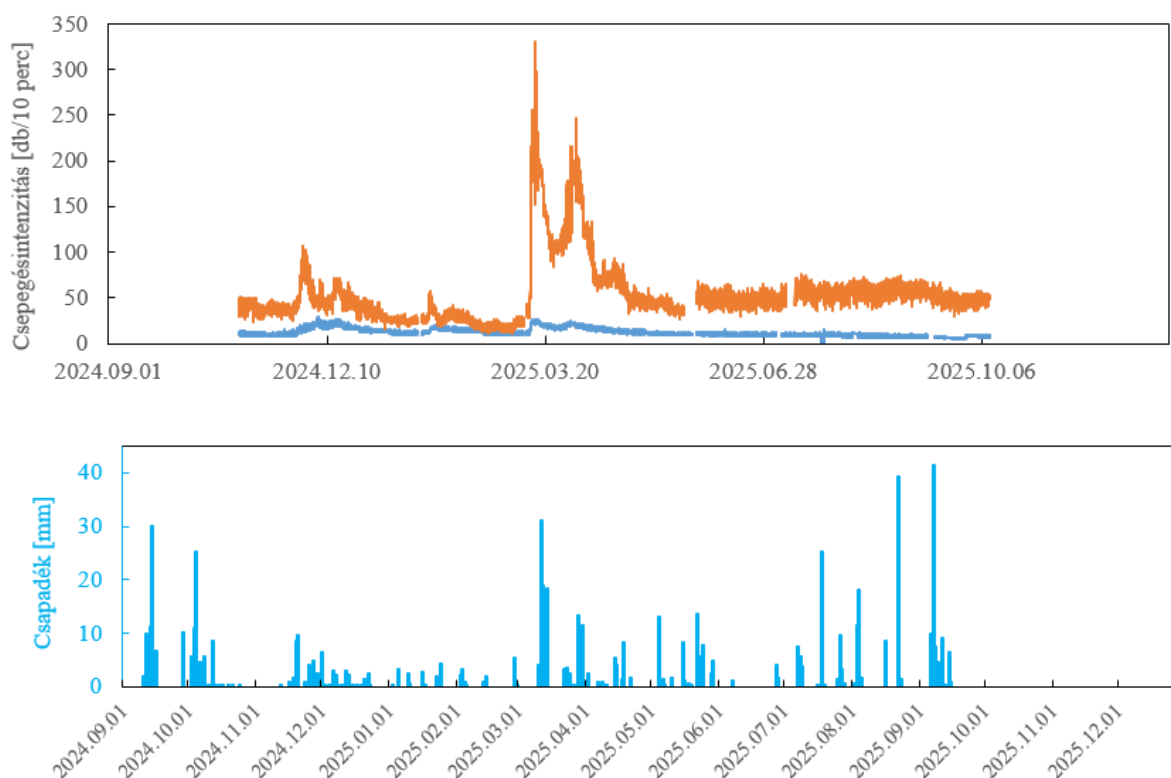
A csepegésintenzitás-mérő műszereket 2024.10.30-án helyeztük ki a Tordai-hasadékban és a Kupola-csarnokban (ahol a Barlang Szelleme nevű képződmény is megfigyelhető). A kihelyezett loggerek 10 percenként mérték a vízcseppek csepegésének intenzitását. Az 5. ábra diagramja szerint többször voltak kisebb szünetek mindkét műszer mérése során. Ez valószínűleg vagy amiatt történhetett, hogy a csepegésintenzitás-mérő ideiglenesen áthelyezésre került, vagy meghibásodott.

A Tordai-hasadékban és a Kupola-csarnokban mért értékek nagyon eltérő intenzitást mutattak. A Kupola-csarnok értékei nagyságrenddel meghaladták a Tordai-hasadékban mérteket (5. ábra narancssárga görbe).

A Tordai-hasadékban a csepegésintenzitás értékei rendkívül szűk és alacsony tartományban mozogtak, hiszen a mérések során a legalacsonyabb érték 0 csepp volt 10 perc alatt, és a legmagasabb érték is csak 30 csepp volt ugyanezen időköz során. Itt az átlagos csepegésintenzitás a mért időszakban 12 csepp volt 10 perc alatt (5. ábra kék görbe).

Ezzel ellentétben a Kupola-csarnokban sokkal változatosabb és magasabb értékek születtek, valamint kisebb-nagyobb kiugrások egyaránt megfigyelhetők voltak (5. ábra). A legalacsonyabb érték 11 csepp volt 10 perc alatt, míg a legmagasabb érték egy márciusi kiugrásnak köszönhető, amikor 10 perc alatt 330 vízcsepp cseppent az műszerre. Az átlagos intenzitás itt meghaladta a Tordai-hasadéokban mért maximális értéket is, hiszen a Kupola-csarnokban átlagosan 54 csepp hullott 10 perc alatt a vizsgált időszak során.

A csapadéértékeket a Szeleta látogatóközpontnál napi rendszerességgel rögzítettük. A 2025. tavaszi és a vizsgált időszak őszi időszakaiban (2024. és 2025.) hatalmas kiugrások voltak megfigyelhetők a csapadékmennyiségben, hiszen ezekben az évszakokban hullott a legtöbb, valamint a csapadékos napok számai is ekkor voltak a legmagasabbak (5. ábra). Összességében megállapítható, hogy a Kupola-csarnokban lévő csepegési pont nagyobb mértékű változást mutat a jelentős csapadékeseményekre a Tordai-hasadéokban vizsgált csepegési ponthoz képest. Továbbá nagyobb átlagos csepegésintenzitással is jellemezhető.

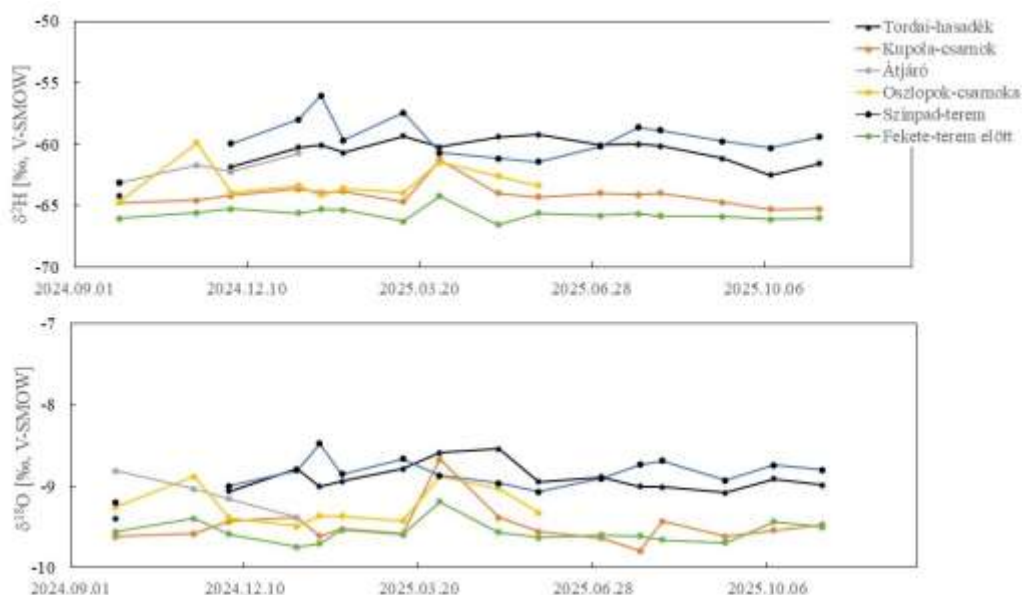


5. ábra. A csepegő vizek intenzitásának (narancssárga jelölés: Kupola-csarnok; kék jelölés: Tordai-hasadék) és a felszínen hullott csapadék mennyiségének, gyakoriságának kapcsolata.

1.4. Csepegővíz-minták stabilizotóp-összetétele ($\delta^2\text{H}$ és $\delta^{18}\text{O}$)

A barlangban kihelyezett mintavételi edényekben gyűjtött csepegővizeken elvégzett stabilizotóp vizsgálatok eredményét a 6. ábra mutatja. Az összes kijelölt mérési pontot figyelembe véve a $\delta^2\text{H}$ értékek -56,03‰ és -66,54‰ között mozogtak a vizsgált időszakban. A csepegővizek $\delta^{18}\text{O}$ értéke -8,48‰ és -9,79‰ közötti eredményeket mutatott. Ahogy az a 6. ábrán is látható, voltak adathiányos időszakok, hiszen volt olyan mérési időpont, amikor a barlangban kijelölt ponton nem gyűlt elegendő csepegő víz, így ekkor nem lehetett elvégezni a vizsgálatot.

A Kupola-csarnokban és a Fekete-terem felé gyűjtött csepegő vizeken mért stabilizotóp vizsgálat eredményei *hasonló mintázatot mutattak* a $\delta^2\text{H}$ és a $\delta^{18}\text{O}$ esetében is. Mindkét esetben az izotóp-összetételek közel stagnáló értékeket mutattak ($\delta^2\text{H} \approx -64$ és -65‰ ; $\delta^{18}\text{O} \approx -9,5$ és $-9,6\text{‰}$) az áprilisi mérés kivételével, mivel ekkor egy nagyobb kiugrás volt megfigyelhető pozitív irányban ($\delta^2\text{H} \approx -61\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} \approx -8,7\text{‰}$). Összességében megállapítható, hogy a teljes mérési időszakot figyelembe véve *az itt mért átlagos izotópterékek voltak a legalacsonyabbak*.



6. ábra. A barlang különböző pontjain gyűjtött csepegővizek hidrogén és oxigén-stabilizotópok vizsgálatának eredményének értékei

Az Oszlopok-csarnokában csak 2025 májusáig gyűlt elegendő csepegő víz, azóta nem állt rendelkezésre adat erről a mérési pontról. Az itt mért hidrogén –és oxigénizotóp értékek **szinte teljesen ugyanolyan mintázatot mutattak**, mint a Fekete-terem előtti, illetve a Kupola-csarnokban lévő mérési ponton. A mért izotópterékek is hasonlóak voltak, de meg kell jegyezni, hogy általában kissé pozitívabb értékeket mutattak ($\delta^2\text{H} \approx -63\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} \approx -9,5 - -9,6\text{‰}$) a két másik ponthoz képest. További eltérés az volt, hogy az Oszlopok-csarnoka adatsorában volt egy kiugró érték 2024 novemberében.

Az Átjáróban 2025. január óta nem gyűlt csepegő víz, így az addig összegyűlt 4 db vízminta eredményéből lehetett csupán következtetéseket levonni. Ennek alapján úgy tűnik, hogy a $\delta^{18}\text{O}$ és $\delta^2\text{H}$ értékek általában **pozitívabb értéket mutatnak az előbbi három ponthoz képest** (Kupola-csarnok, Oszlopok-csarnoka, Fekete-terem).

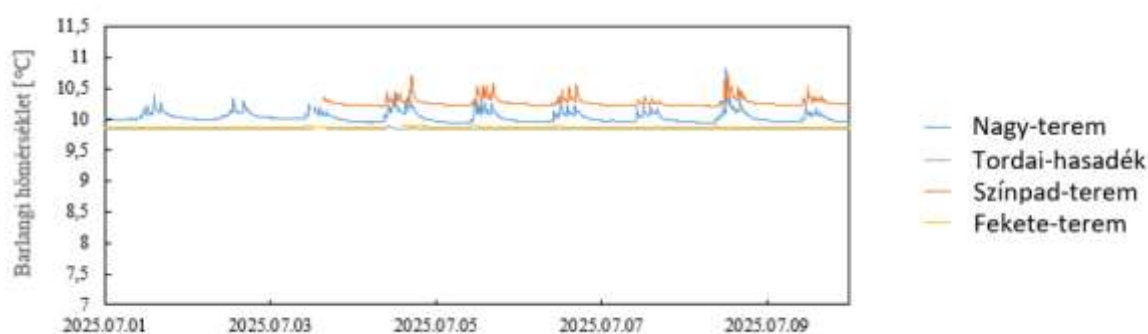
A vizsgált időszakban **a legmagasabb stabilizotóp értékek** a Tordai-hasadék és a Színpad-terem csepegővizeiben voltak megfigyelhetők ($\delta^2\text{H} \approx -60 - -59\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} \approx -8,8 - -8,9\text{‰}$). Ezekről a pontokról 2024 decembere óta folyamatosan rendelkezésre álltak adatok a mérési periódusban. Az előbbi pontokhoz képest ennek a két helyszínnek az izotópos idősorában nem fedezhető fel az a pozitív csúcs, amely 2025 áprilisában volt megfigyelhető. Ezzel szemben megjelennek más csúcsok, illetve a görbe lefutása is változatosabb képet mutat (6. ábra).

1.5. Monitoring adatok értelmezése: mikroklima

A felszínen hatalmas ingadozás volt megfigyelhető a hőmérsékletet tekintve, hiszen az évi hőingás meghaladta a 40 °C -t. A barlangon belül viszont ez az érték jelentősen lecsökkent, hiszen a felszíni szélsőségek nem jutnak be a barlangba.

A barlangon belül mért hőmérsékleti értékek sokkal szűkebb tartományon belül változtak, az éves felszíni középhőmérsékletet tükrözik vissza. Ez a barlangi mikroklima egyik legfontosabb sajátossága. *Egyedül a Nagy-terem értékeiben mutatkoztak meg a külső éghajlati változások, mivel ez a mérési pont található legközelebb a bejárathoz.* A beljebb található pontokon már kevésbé (Színpad-terem), vagy szinte egyáltalán nem (Tordai-hasadék, Fekete-terem) is tükröződtek a felszíni ingadozások. A két legbelsőbb terem (Tordai-hasadék, Fekete-terem), amelyek viszont egymástól legtávolabb vannak, hőmérséklete pontosan megegyezik. Érdekes módon, térben a kettő között található Színpad-terem hőmérséklete szisztematikusan magasabb ehhez a két teremhez képest. Ennek pontos oka nem ismert, feltételezésünk szerint valamely oldalág, járat lehet esetleg hatással rá, további vizsgálatok javasoltak.

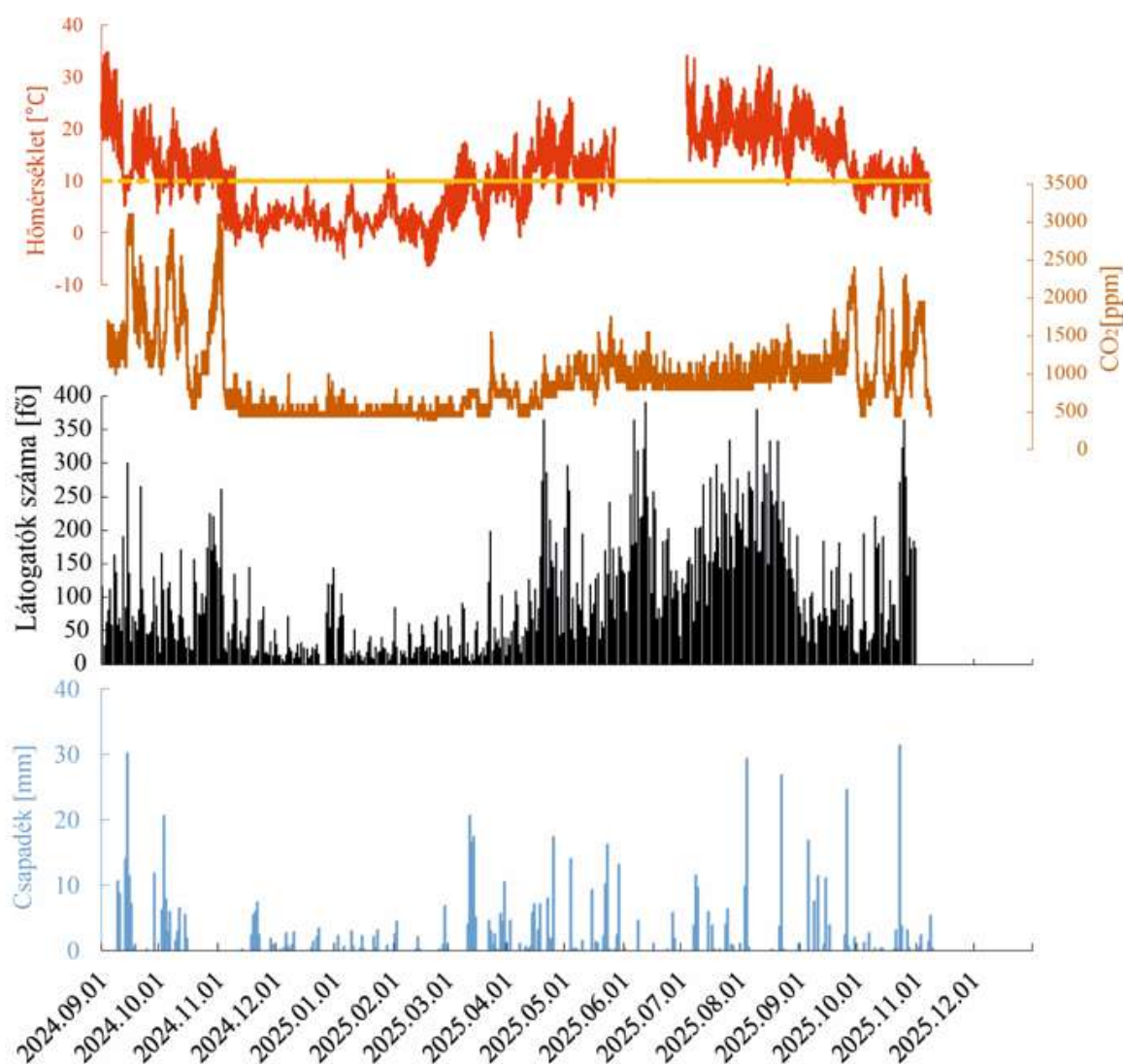
A hőmérsékleti adatsorok másik különlegessége, hogy apró, tűszerű kiugrások vannak. Ezek egyértelműen a látogatók, turistacsoportok hatását mutatja. A Tordai-hasadékban ritkábban vannak vezetett túrák, illetve a Fekete-teremben is ritkábban vannak terápiás kezelések, így ezekben az adatsorokban kevesebb ilyen csúcsot lehet felfedezni, valamint ezek a csúcsok általában kisebbek a főág közepén elhelyezkedő Színpad-terem görbáját jellemző csúcsokkal összehasonlítva. Utóbbi esetben a kiugrás mértéke elérheti a 0,5 °C-t. Hasonló mértékű kiugrást lehet tapasztalni a Nagy-terem esetében is. Összeségében megállapítható, hogy **a turistacsoportoknak viszonylag jelentős hatása van a barlangi léghőmérsékletre rövidtávon**, de ez viszonylag hamar „lecseng”, még aznap éjjelre visszaáll az eredeti hőmérséklet (7. ábra).



7. ábra. Néhány napos hőmérsékleti adatsor a vizsgált időszakon belül, ahol kirajzolódnak az egy napon belüli változások. A túrástok okozta kismértékű hőmérséklet emelkedés lecseng az adott nap végére (éjfélig).

A barlangi mikroklíma másik fontos paramétere a CO₂-koncentráció. Más hazai barlangokban (pl. Béke-barlang, Baradla-barlang, Vacska-barlang; Czuppon et al., 2018 és Czuppon et al., 2022) megfigyelhető a CO₂ évszakos változása: télen alacsonyabb, míg nyáron magasabb koncentráció volt észlelhető. Ezek a változások a külső hőmérsékleti (és nyomás) változásokhoz kapcsolódnak, mértékük pedig a barlang morfológiájával hozható összefüggésbe (Czuppon et al., 2018). A Szent István-barlangban is megfigyelhető volt, hogy a CO₂ szintje télen alacsonyabb (500 ppm), nyáron pedig ennél kicsit magasabb (800-900 ppm) értékeket mutatott. Mindazonáltal ez a változás messze kisebb ahhoz képest, amit a Baradla –vagy Béke-barlangokban figyeltek meg (Czuppon et al., 2018). Ezen túlmenően **a Szent István-barlangban megfigyelt CO₂ görbe fő érdekessége az őszi időszakokban megfigyelt 4-5x is megjelenő csúcsok, amelyek messze meghaladják (2500-3000 ppm) az általában megfigyelt értéket** (8. ábra). Az első kiugró CO₂ értékeket mutató időszak 2024. szeptember közepe és

november eleje között volt. Az ezt követő időszakban is előfordultak kiemelkedések, de ezek ritkábbak és kisebb mértékűek voltak. Majd ezt követően 2025 októberében, az előző évhez hasonló nagy kiugrások ismét megjelentek. Ez arra utal, hogy ezek a kiugró értékek évenként ismétlődő mintázatot mutathatnak. Az adatok alapján feltételezhető, hogy a **felszíni hőmérséklet csökkenése, valamint a csapadékesemények is hatással lehetnek a barlangi CO₂ koncentráció változásaira**. A vizsgált időszakban ezek a tényezők többször is együtt játszottak szerepet (intenzívebb csapadékeseményhez társuló lehűlés) a CO₂ értékek változásában (8. ábra). Emellett a 2024 őszi időszakban a CO₂ értékek kiugrása részben összhangban volt a látogatók számával is, hiszen sok esetben a magasabb CO₂ csúcsok esetében a látogatók száma is magas volt, így feltételezhető, hogy ennek is volt hatása a változásban.



8. ábra. A felszínen mért hőmérséklet és csapadék, valamint a barlang látogatóinak összefüggése a Fekete-teremben mért szén-dioxid értékeivel 2024. szeptember és 2025. november között

Azonban a hosszabb adatsoroknak köszönhetően látható az is, hogy voltak olyan időszakok, amikor extrém magas volt a látogatók száma, de ahhoz nem tartozott olyan magas CO₂ csúcs (8. ábra). Ezért megállapítható, hogy ***a látogatók „csak” hozzátektek a kiugrás mértékéhez, de alapvetően a legtöbb esetben nem ők adták a kiugró magas értékek alapját.*** A magas CO₂ értékek esetében közrejátszhatott a háttérkarszt gáz kiürülésének folyamata, mely során a nyári időszakban felhalmozódott CO₂ ősszel távozott a rendszerből, és a külső hőmérséklet csökkenésének köszönhetően ez a CO₂ forrás fokozatosan kiürült.

Összességében elmondható, hogy a CO₂-ban tapasztalt változásokat egy összetett jelenségnek és hatások eredőjének lehet tekinteni, ahol ***a felszíni meteorológiai paraméterek (hőmérséklet, légnyomás, csapadék) mellett a karsztrendszer telítettségi állapota is meghatározhatja a barlangban ősszel jelentkező kiugróan magas CO₂ értékeket.***

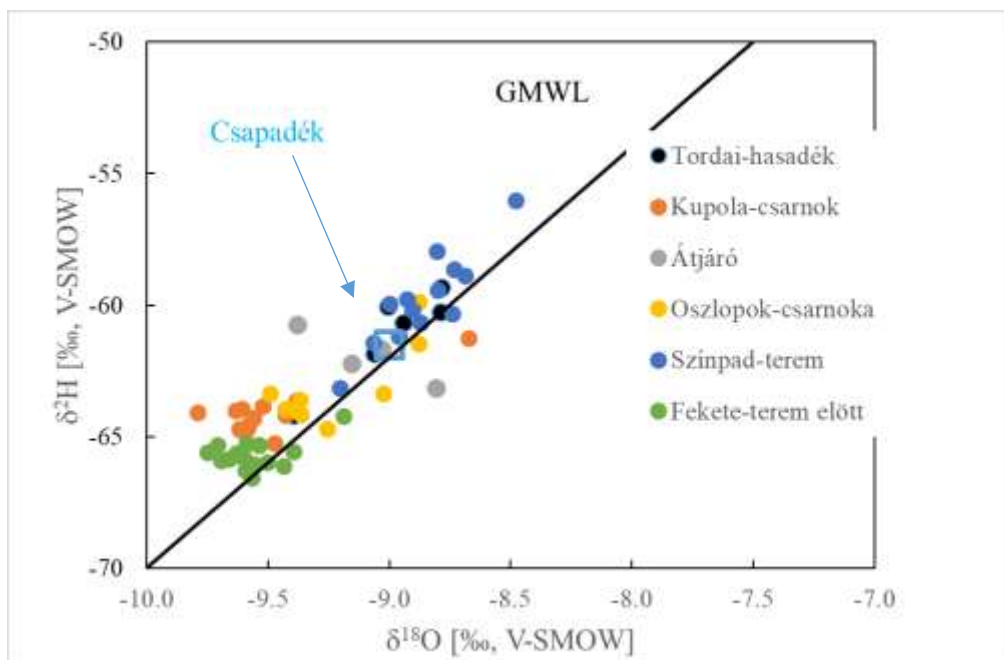
1.6. Monitoring adatok értelmezése: csapadék és a csepegővíz kapcsolata

A Tordai-hasadéokban és a Kupola-csarnokban kihelyezett csepegésintenzitás-mérő műszerek adatainak köszönhetően látható, hogy a barlang különböző pontjai eltérően reagáltak a csapadékeseményekre. A Tordai-hasadéokban a csepegésintenzitás egyenletes volt és csak ritkán fordultak elő magasabb értékek. A vizsgált időszakban itt kettő kisebb kiemelkedés volt (2024. december és 2025. március), de ezeken kívül a csepegésintenzitás stabil volt, ami arra utal, hogy ez a mérési pont nem nagyon reagált a külső csapadékviszonyokra. Ezzel ellentétben, ***a Kupola-csarnokban lévő csepegés sokkal érzékenyebben reagált a külső csapadékeseményekre.*** Ebben a csepegésintenzitás sokkal szorosabb kapcsolatot mutatott a felszíni csapadékos időszakokkal, így a 2024. decemberi és 2025. márciusi nagyobb csapadékesemények a Kupola-csarnokban lévő ponton sokkal nagyobb és összetettebb változást idéztek elő.

A csapadék és a csepegővíz viszonyára a csepegésintenzitás mellett a vizek stabilizotóp-összetétele is fontos információt nyújt. Az Ómassán gyűjtött felszíni csapadék éves, mennyiséggel súlyozott stabilizotóp összetétele $\delta^{18}\text{O} = -9,0\text{‰}$ és $\delta^2\text{H} = -61,52\text{‰}$ értékekkel volt jellemezhető. Ehhez képest a barlang különböző pontjain gyűjtött csepegővizek izotóppösszetétele változatos értékeket mutattak (9. ábra). A Kupola-csarnok, az Átjáró, a Fekete-terem előtt, valamint az Oszlopok-csarnoka csepegési pontok csepegővizeinek stabilizotóp összetétele ***a felszíni csapadék átlagához képest negatívabb*** $\delta^{18}\text{O}$ és $\delta^2\text{H}$ értékeket mutatott. Ezek a pontok a Csapadékvízvonal alsóbb szakaszán helyezkednek el, ami arra utal,

hogy *ezen a helyszíneken elsősorban a téli csapadék beszivárgása a meghatározó*. Ezzel szemben a Színpad-terem és a Tordai-hasadék csepegővizeinek izotóptartalma kevésbé negatív, a *felszíni csapadék átlagánál pozitívabb értékeket mutatnak*. Ezek az értékek a Csapadékvízvonal felső szakaszán helyezkednek el, ami arra utal, hogy *itt a nyári csapadék hozzájárulása jelentősebb*. Összehasonlítva más magyarországi barlangokban vizsgált csepegővizek izotóp-összetételével ez egy különlegesség, hiszen mind az aggteleki (Baradla – és Béke-barlangok), mind a pilisi barlangokban (Vacska-barlang) egyértelmű téli dominancia jellemezte a beszivárgó vizeket (Czuppon et al., 2018; Czuppon et al., 2022).

Emellett fontos kiemelni, hogy a csepegővizek izotóp-összetétele viszonylag szűk tartományban változik, és a csapadék izotóp-összetételében megfigyelt jelentős, évszakos változások nem figyelhetők meg. Ez arra utal, hogy a beszivárgó csapadékvíz hosszabb időt tartózkodik az epikarsztban (több, mint 1 év), és az egyes csapadékesemények vize nem közvetlenül jelenik meg a csepegési ponton, hanem egy „kiátlagolt” értéket vesz fel az epikarsztban végbemenő folyamatok hatására.



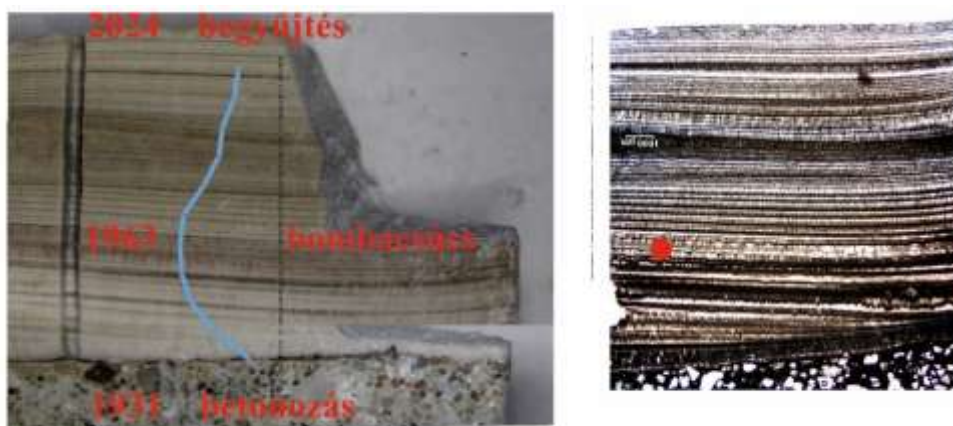
9. ábra. Összán gyűjtött súlyozott átlagos éves csapadék $\delta^{18}\text{O}$ és $\delta^2\text{H}$ értékeinek (kék négyzet) összehasonlítása a barlang különböző pontjain gyűjtött csepegővizeknek az értékeivel. GMWL a globális csapadék vízvonalat jelöli.

2. Az SZT-CSP-2 cseppkő izotópos és kormeghatározási eredményei és azok értelmezése

A számos megfűrt cseppkőminta közül részletes vizsgálatok elvégzése céljából a legperspektivikusabb az SZT-CSP-2 jelű cseppkő volt, mivel a belső szerkezete tömörnek mutatkozott már a makroszkópos megfigyelések során, valamint a növekedési laminák is jól követhetőnek tűntek a vékonycsiszolati képeken. Az SZT-CSP-2 cseppkő az Oszlopok-csarnokában a lépcső beton felszínén kezdett növekedni.

2.1. SZT-CSP-2 cseppkő kormeghatározása

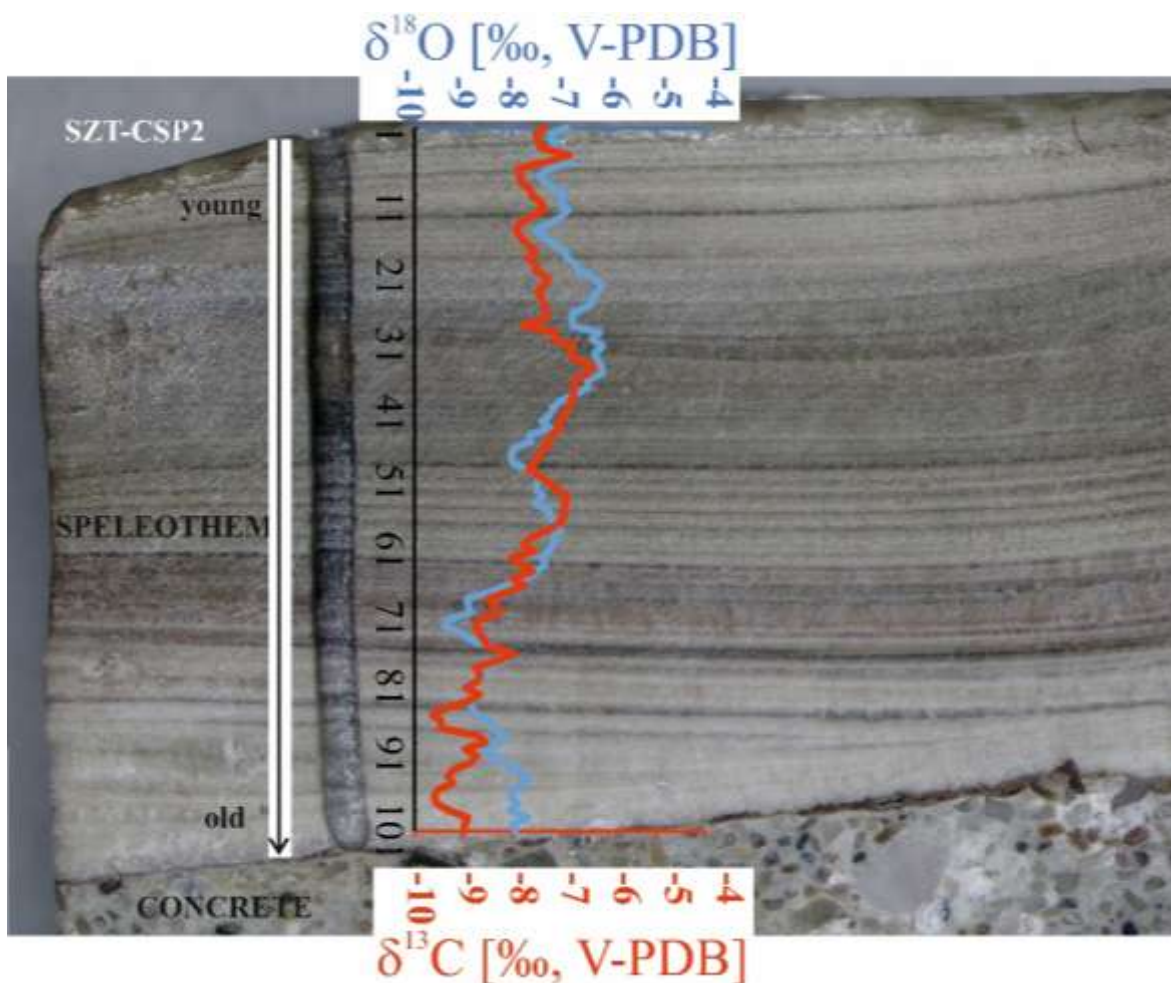
A vizsgált SZT-CSP-2 cseppkőre kapott ^{14}C kormeghatározás eredményeit az 1963-ra tehető bombacsúcs (bomb peak) megkeresésére használtunk a cseppkőmintában. A 11 db minta mérési eredményeinek köszönhetően **sikerült meghatározni a bombacsúcsot a cseppkőben** (10. ábra), melyet a legmagasabb pMC (Percent Modern Carbon; modern szén jelenléte) (10. ábra kék görbe) érték jelölt. Ez az SZT-CSP-2 cseppkő esetében a 38. mintavételi pont volt, melynek értéke 122,02 pMC. Ehhez a réteghez viszonyítva, alatta és felette számoltuk meg a laminákat, így hozzávetőlegesen megkapva, hogy milyen idős a cseppkő. A cseppkő sötét és világos lamináiból álló párosokat éves rétegekként értelmeztük a rétegszámlálás során. A laminaszámlálást 2x-es nagyítású mikroszkóp alatt készült fényképeken végeztük. Ezenfelül fontos megjegyezni, hogy a bombacsúcs ideje a cseppkőben nem feltétlen egyezik meg a légkörivel, hiszen akár több év is eltelhet, mire a „jel” lejut a barlangba és „beépül” a cseppkőbe. Mind ezek **a bizonytalanságok figyelembevételével az SZT-CSP-2 számított kora körülbelül 75 - 85 év. Tehát a cseppkő 1940 és 1950 között kezdhetett el növekedni.**



10. ábra. Az SZT-CSP-2 radiokarbon kormeghatározása és annak során megkapott 1963-as bombacsúcs, jelölése az ábrán. A ^{14}C kormeghatározás során kapott pMC értékeinek görbéje látható kék színnel ábrázolva, aminek legmagasabb pontja jelöli a bombacsúcs idejét.

2.2. SZT-CSP-2 cseppkő stabil szén- ($\delta^{13}\text{C}$) és oxigénizotópos ($\delta^{18}\text{O}$) vizsgálata

Az SZT-CSP-2 cseppkőn nagyfelbontású ($\sim 0,1\text{mm}$) szén és oxigén stabilizotóp-mérések történtek. A $\delta^{13}\text{C}$ értékek $-9,63\text{‰}$ és $-6,31\text{‰}$, a $\delta^{18}\text{O}$ értékek $-9,38\text{‰}$ és $-6,11\text{‰}$ között változtak (11. ábra). Mind a szén-, mind az oxigénizotóp görbe jelentős változásokat mutat: a korai időszakra (cseppkő alja) általában negatívabb értékek jellemzőek, míg a későire (cseppkő teteje) pozitívabb értékek.



11. ábra. Az SZT-CSP-2 cseppkőn végzett szén és oxigén stabilizotóp-vizsgálat eredményei jelölve a mintavételi pontokkal

2.3. Az SZT-CSP-2 cseppkő izotópos és kormeghatározási eredményeinek értelmezése

Az SZT-CSP-2 cseppkő esetében a cél az volt, hogy az ismert meteorológiai paraméterek függvényében megnézzük a szén- és oxigénizotóp-összetétel változását. Ehhez szükséges volt a cseppkő korának, kormodelljének minél pontosabb meghatározása és a lehető legnagyobb

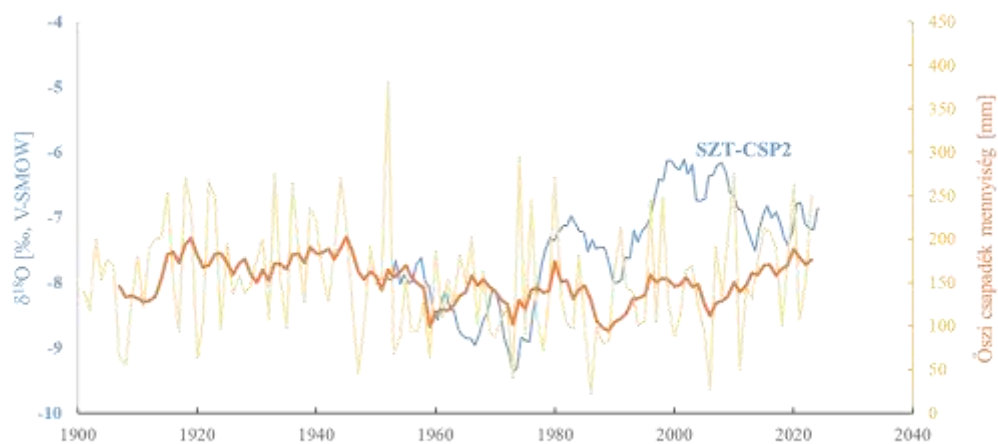
felbontású stabilizotóp-vizsgálatok. Kormeghatározásra a radiokarbon módszer volt a legalkalmasabb, hiszen ez a fiatal cseppkövek esetében hatékony, mivel lehetővé teszi a bombacsúcs kimutatását is. *A vizsgált cseppkő az 1960-as években már aktívan növekedett, hiszen a bombacsúcs idejét tükröző lamina már az SZT-CSP-2 esetében is megfigyelhető volt.* A ^{14}C kormeghatározást laminaszámlálással kiegészítve úgy tűnik, hogy a cseppkő valamikor 1940 és 1950 között kezdett el növekedni, tehát nem közvetlenül a betonlépcső elkészítését követően (1931).

A kormeghatározás mellett az stabilizotóp (oxigén –és szénizotóp) vizsgálatok fontos információval szolgálnak a múltbeli környezet viszonyairól. A cseppköveken végzett oxigénizotópos ($\delta^{18}\text{O}$) méréseket széles körben használják, mert ennek segítségével következtetni lehet a múltbeli éghajlatváltozásokra, többek között fontos információkat nyújtanak a múltbeli csapadék mennyiségéről és a csapadékot szállító légtömegek útvonaláról is (Douglas et al., 2016). Az oxigénizotóp-összetételt leginkább a képződés során lévő hőmérséklet és a víz összetétele határozza meg, de a gyors kiválás miatti kinetikus frakcionálódás és (erős szellőzés estén) a barlangi képződmények felszínén végbemenő párolgás is hatással van rá.

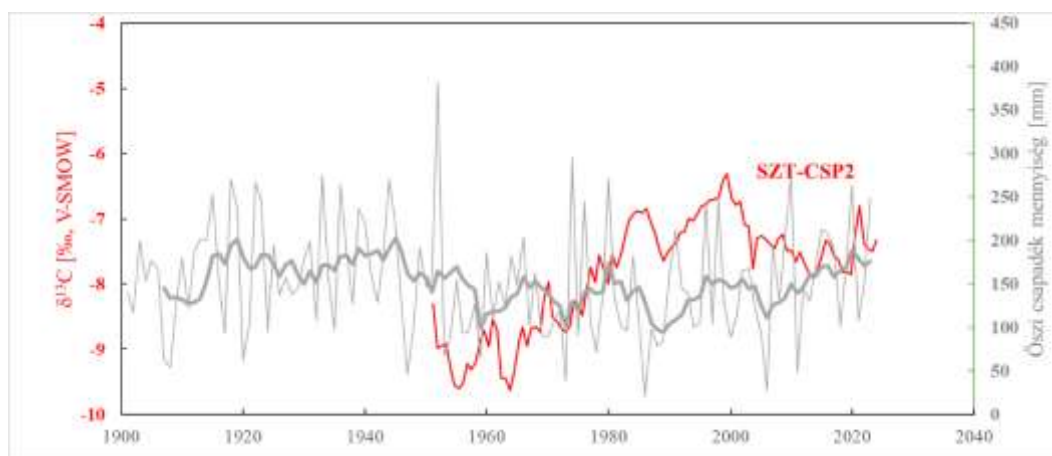
A cseppköveken gyakoriak a szénizotópos ($\delta^{13}\text{C}$) vizsgálatok is. A cseppkő $\delta^{13}\text{C}$ értékét a csepegő vízben oldott szervesetlen szén $\delta^{13}\text{C}$ értéke határozza meg, mely részben tükrözi a felszín feletti növényzet izotópos jellegét. A cseppkő szénizotóp értékeit a hidrológiai folyamatok és a talaj szén-dioxid cseréje is befolyásolja (Douglas et al., 2016).

Az általunk vizsgált cseppkő oxigén és szénizotóp-összetétele összetett képet mutat. A jelenleg használt kormodell alapján, 1975 után történt egy jelentős változás: mind az oxigén-, mind a szénizotóp-összetétel viszonylag jelentős pozitív irányú eltolódást mutat. Ezt a változást nem tudjuk összefüggésbe hozni a meteorológiai paraméterekben bekövetkezett változással. Azt valószínűsítjük, hogy a barlangüzemeltetésben volt változás, amely befolyásolta a szellőzést, a hőmérsékletet és ezáltal a cseppkőképződést.

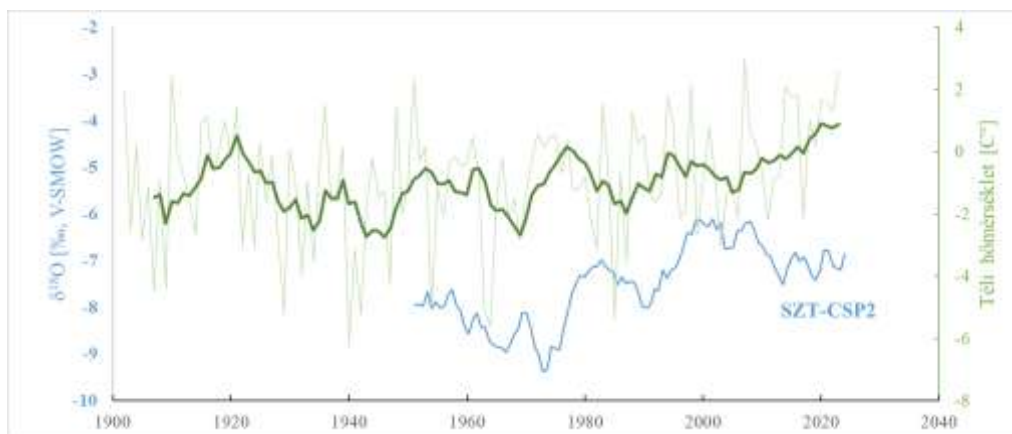
Ezentúl a megjelenő csúcsok viszonylag jó korrelációt mutatnak a csapadék mennyiségben bekövetkezett változással, különösen az őszi csapadékot tekintve (12. és 13. ábra). Emellett mindkét izotóp viszonylag jó összefüggést sejtet az őszi-téli hőmérsékletváltozással is (14. és 15. ábra).



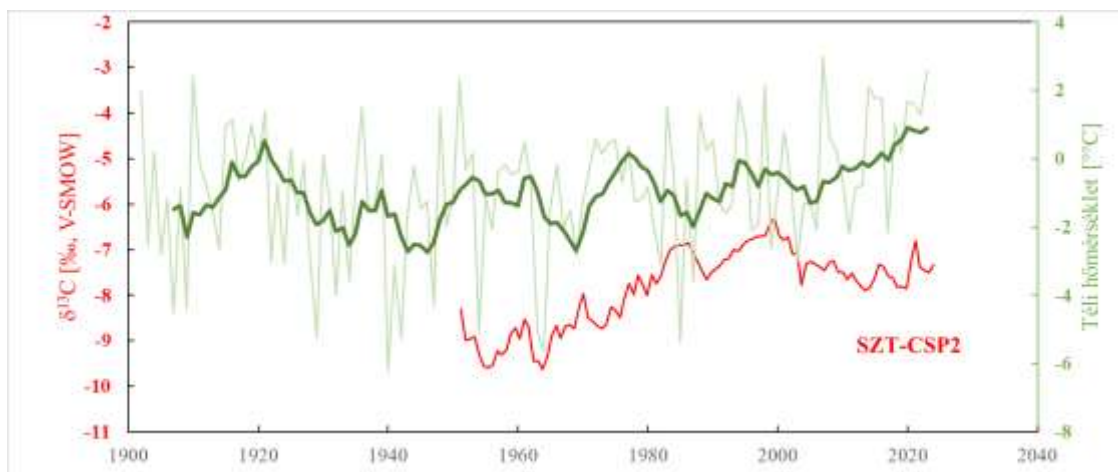
12. ábra: Az SZT-CSP-2 cseppkő oxigénizotóp-összetétele és az őszi csapadékmennyiség változása.



13. ábra: Az SZT-CSP-2 cseppkő szénizotóp-összetétele és az őszi csapadékmennyiség változása



14. ábra: Az SZT-CSP-2 cseppkő oxigénizotóp-összetétele és a téli csapadékmennyiség változása



15. ábra: Az SZT-CSP-2 cseppkő szénizotóp-összetétele és a téli csapadékmennyiség változása

3. Összefoglalás

A kutatás célja a barlang mikroklímájának, a csepegésintenzitásának és a csepegő vizek stabilizotóp-összetételének vizsgálata és értelmezése. Továbbá egy, a barlangból származó, az elmúlt 100 évben képződött cseppkő stabilizotópos és kormeghatározási adatainak elemzése.

A barlangban 2024 ősztől kezdődően zajlik rendszeres barlangi monitoring. A barlangban előre kijelölt pontokon hőmérséklet, szén-dioxid és csepegésintenzitás mérések történtek, valamint havi rendszerességgel csepegővíz gyűjtésére került sor. A gyűjtött vízmintákon stabilizotóp-mérések, valamint pH és elektromos vezetőképesség vizsgálatok történtek.

A mérések alapján a barlang hőmérséklete a felszínihez képest sokkal kiegyenlítettebb, egyedül a bejáráshoz leközelebb eső Nagy-terem mutatott markáns összefüggést a felszíni változásokkal. A többi mérési ponton a hőmérséklet stabil értékeket mutatott. A barlangban mért szén-dioxid értékek általában télen alacsonyabb, nyáron magasabb értékeket mutattak, hasonlóan sok más magyarországi barlanghoz. A legmagasabb értékek érdekes módon ősszel jelentek meg a CO₂ adatsorban, amikor markáns pozitív kiugró csúcsok (3000 ppm) voltak megfigyelhetők. Ezeket a kiugrásokat valószínűleg a külső hőmérséklet és csapadékviszonyok, a háttérkarszt telítettsége, illetve kiürülése, valamint kismértékben a látogatók száma határozta meg.

A barlangban két helyen történt csepegésintenzitás-mérés, melyek közül a Tordai-hasadék csepegése nem, a Kupola-csarnokban pedig érzékenyen reagált a

csapadékeseményekre. A Kupola-csarnokban a csepegés intenzitása jelentősen megnövekedett a nagy mennyiségű lehullott csapadékoknak köszönhetően (2024. december és 2025. március). Az Ómassán gyűjtött éves felszíni csapadék stabilizotóp eredményeihez képest a vizsgált csepegővizek összetétele eltérő értékeket mutatott. Míg a Színpad-terem és a Tordai-hasadék esetében a nyári, addig a Fekete-terem előtt, az Átjárónál és az Oszlopok-csarnokában a téli csapadék beszivárgása volt jelentős.

A barlangból gyűjtött vizsgált cseppkövön radiokarbon kormeghatározás történt, mellyel sikerült kimutatni az 1963-as bombacsúcsot. A cseppkő pontosabb korának meghatározására laminaszámlálást alkalmaztunk, melyet a bombacsúcshoz viszonyítva számoltunk. Ezen módszerek alapján megkaptuk, hogy a cseppkő 1940 és 1950 között kezdett növekedni. A cseppkövön stabilizotóp-vizsgálatok is történtek, mely alapján úgy tűnik, hogy a cseppkő stabilizotóp-összetételét jelentősen befolyásolják a hidrológiai viszonyok, különösen az őszi csapadék mennyisége és az abban bekövetkezett változások. Továbbá a (őszi-) téli hőmérséklet is összefüggést mutat a cseppkő izotóp-összetételével.

Figyelembe véve a monitoring és a cseppkő-vizsgálatok eredményeit megállapítható, hogy a Szent István-barlangban képződött cseppkövek rögzíthetik az egykori éghajlati és környezeti változásokat, így az innen származó cseppkövek alkalmasak egy esetleges jövőbeli paleoklíma kutatáshoz.