

Jelentés a Csodabogyós-barlang végzett tudományos kutatásokról

Czuppon György

2026.02.15.

Bevezetés:

A barlangi cseppkő 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 Csodabogyós-barlangban, amely során vizsgáltuk a barlangi klímát, a csepegővizet és frissen kiváló karbonátokat különös tekintettel azok kémiai és izotópösszetételére. 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.

Vizsgálatok:

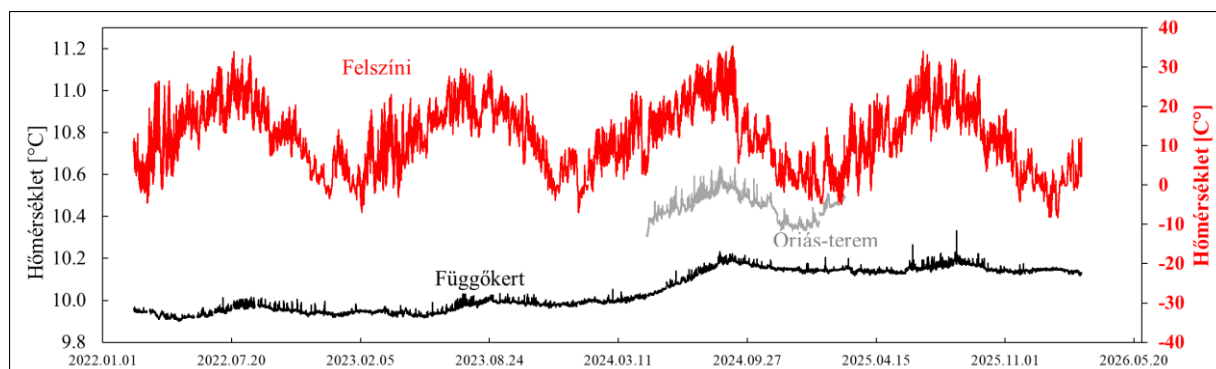
Folytattuk az előző években megkezdett vizsgálatokat a Csodabogyós-barlangban. Ennek megfelelően havi két havi rendszerességgel ereszkedtünk le a „Függő-kert” nevű terembe, amely során kiolvastuk a hőmérsékletet, csepegésintenzitást és CO₂ koncentrációt regisztráló loggerek által rögzített adatokat. Továbbá gyűjtünk három csepegési pontból csepegővizet stabilis hidrogén-, oxigénizotóp-elemzésre, Ca/Mg izotópelemzésre, valamint nyomelem-összetétel meghatározásra. Ezenfelül a helyszínen meghatározzuk a csepegő víz pH-ját, elektromos vezetőképességét. Évszakos felbontásban pedig begyűjtöttük a csepegésintenzitás loggerekre kihelyezett üveglemezeket, amelyek a csepegővízből kivált karbonátokat vizsgáljuk.

Eredmények:

Barlang klimatológiai adatok:

A barlangi **hőmérséklet** alakulása és mérése több szempontból is fontos. Egyrészt a barlangi hőmérséklet általában a területre jellemző éves átlaghőmérsékletet tükrözi, másrészt megváltozása jelezheti esetleges antropogén beavatkozást. A hőmérséklet ezen túl fontos a karbonát kiválása szempontjából is, mivel a képződő karbonát (cseppkő) izotóp-összetétele különböző hőmérsékleteken más és más lesz.

Hőmérséklet regisztráló loggert nemcsak a „Függő-kert” nevű teremben helyeztünk el, hanem az „Óriás-teremben” (1. ábra). Sajnos az utóbbi meghibásodott márciusban. Mindkét teremben a hőmérséklet szűk tartományban változott. Mindazonáltal a látszólagos állandóság mellett felfedezhető a felszíni hőmérsékletet követő évszakosság, azaz télen kis mértékben csökken a hőmérséklet, míg nyáron kis mértékben nő (1. ábra). A Függőkert hőmérsékleti adatsorában felfedezhető egy emelkedés ($\sim 0,5$ °C) 2024 tavaszán, amely túlmutat az évszakos változás mértékén. Figyelemre méltó, hogy ez a korábbi átlagértéktől való „ugrás” a 2025-ös évben megmaradt, azaz nem csökkent vissza a 2022-2023-as értékre. Ezenfelül a barlangban mért hőmérsékleti görbén felfedezhetők kisebb-nagyobb, rövid-ideig tartó, a trendből „kiugró” magasabb értékek. Ezek valószínűsíthetően a turisták látogatásaival vannak összefüggésben.

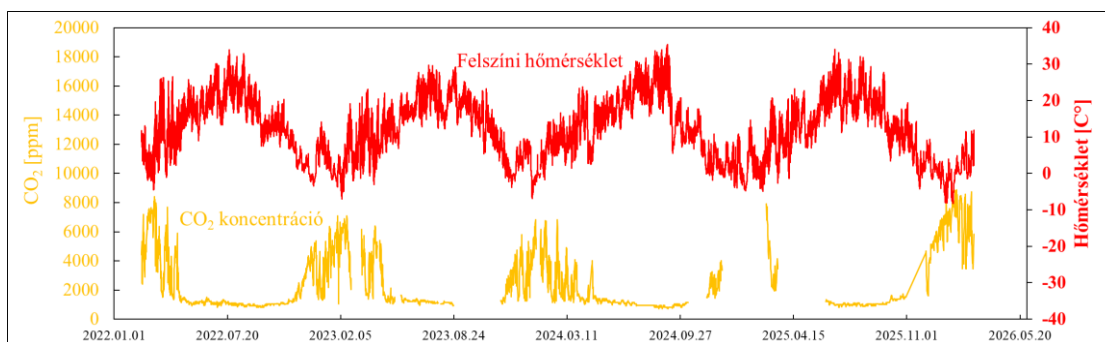


1. ábra: Csodabogyós-barlangban mért barlangi hőmérsékletek a Függőkertben (fekete görbe) és az Óriás-teremben (szürke görbe), valamint barlang felett mért felszíni hőmérséklet (piros).

A **CO₂** vizsgálata a barlangi monitoring során azért fontos, mert segít megérteni a barlang levegőjének összetételét és a mikroklima változásait. A szén-dioxid mennyisége hatással van a cseppkővek képződésére és annak izotóp-összetételére, mivel befolyásolja a kalcium-karbonát oldódását és kiválását. Emellett a CO₂ szintje jelezheti a barlang szellőzésének állapotát, valamint az élőlények és a látogatók hatását a barlangi környezetre. A mérések így fontosak a barlangok védelme és fenntartható kezelése szempontjából.

A képződő cseppkövek izotóp-összetételének változása szempontjából is különös jelentőséggel bír, hisz általában az az elképzelés, hogy magasabb CO₂ koncentráció esetében erősebb CO₂ kigázosodás várható a csepegővízből a lecseppenést követően, amely nagyobb izotóp frakcionációt eredményez.

A barlangban mért CO₂ koncentráció erős szezonalitást mutat, nyáron alacsonyabb értékkel jellemezhető (900-1200 ppm), míg télen magasabb (5000-8000 ppm). Ez ellentétes azzal, amit Aggteleki-hegységben található Béke-barlangban és Baradla-barlangban, valamint a Pilis-hegységben található Vacska-barlangban tapasztaltunk (Czuppon et al., 2018; 2022a, 2022b). A Csodabogyós-barlangban általában, akkor növekszik meg a CO₂ koncentrációja, amikor a kinti hőmérséklet 10 °C alá csökken úgynevezett „kéményhatásnak” köszönhetően.



2. CO₂ koncentráció és a felszíni hőmérséklet változása a „Függő-kert” nevű teremben.

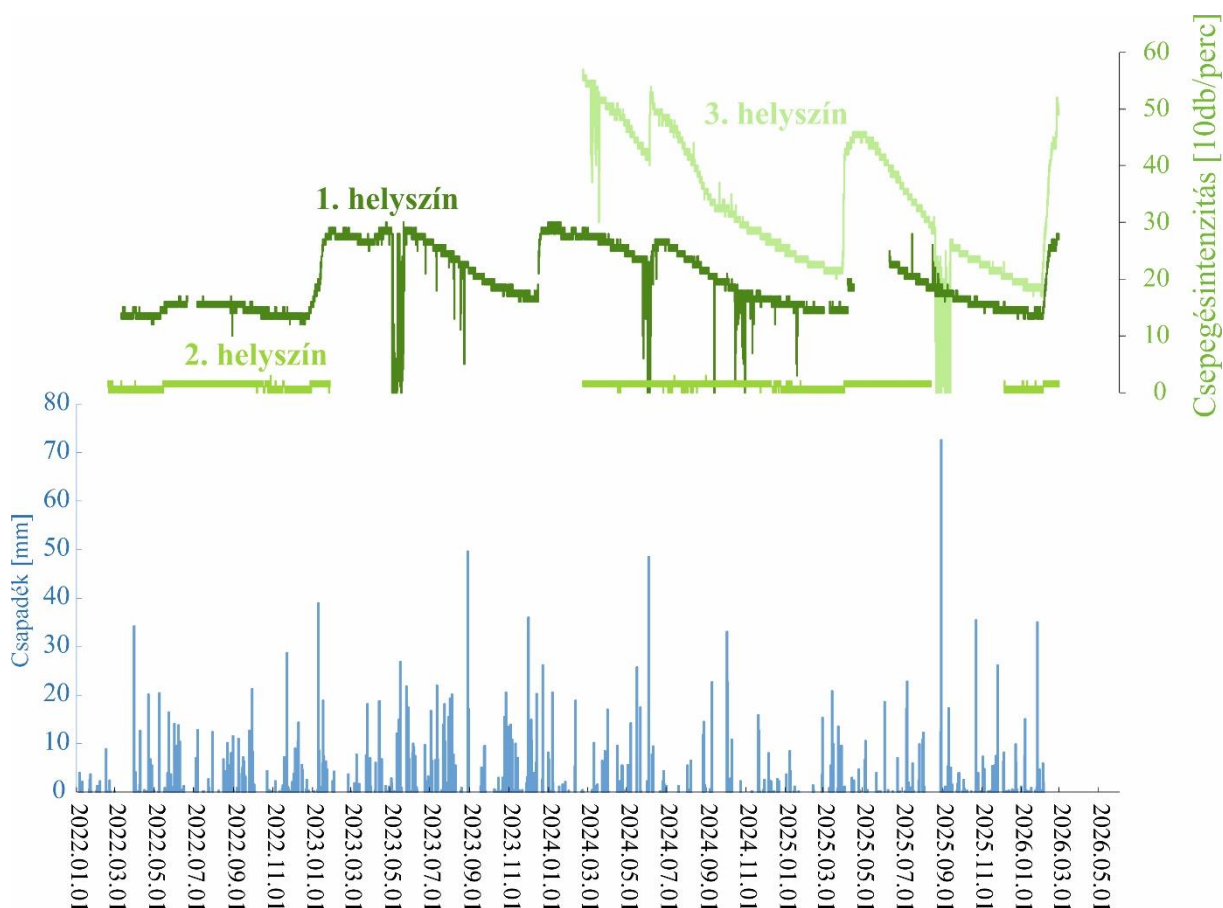
A 2025-ös év különleges volt a CO₂ koncentráció alakulása szempontjából, hiszen a 2025/2026 telén lehetett megfigyelni az eddigi legmagasabb CO₂ értékeket (8200 ppm feletti), amely összefüggésben lehet azzal, hogy ez volt 2022 óta a leghidegebb tél (a hőmérsékletet és a fagyos napok számát tekintve).

Csepegésintenzitás:

A **csepegésintenzitás** fontos információt nyújt a csapadék beszivárgási folyamatokról. A csepegés időbeli változása alapján megállapítható, hogy a csapadék hogyan és milyen késéssel jut el a felszínről a telítetlen zónába vagy a barlangi üregekbe. Az adatok segítségével következtetni lehet a kőzet repedezettségére, a vízáramlási útvonalakra és a vízmozgás sebességére is. A csepegés intenzitásának változása gyakran jelzi a felszín alatti víztárolók feltöltődését vagy kiürülését, valamint a szezonális hidrológiai folyamatokat. Emellett a hosszú

idősorok lehetővé teszik a csapadék és a beszivárgás közötti kapcsolat, valamint a felszín alatti vízutánpótlás feltételeinek vizsgálatát. Emellett a csepegés

A csepegésintenzitás mérőket a „Függő-kert” nevű teremben helyeztünk ki. Három csepegési pont lett kiválasztva egymástól 1-1 méter távolságra. A mért változásokat a 3-es ábra mutatja. Általánosságban elmondható, hogy a téli-tavaszi időszakban nő meg a csepegésintenzitás (adott időegység alatt a csepegések száma), majd a nyár-ősz folyamán fokozatosan csökken. Úgy tűnik, hogy a nagyobb csapadék események rövid időszakra a megzavarják a csepegést lecsökkentve azt. Elképzelhető, hogy a nagyobb csapadékesemény hatására az addig működő vízáramlási útvonalak időlegesen és részlegesen blokkolódnak agyag/homok szemcsék által. Mindazonáltal az is elképzelhető, hogy rövid időre a jelentős csapadék mennyiségnek köszönhetően más áramlási útvonalakon szivárog a víz.



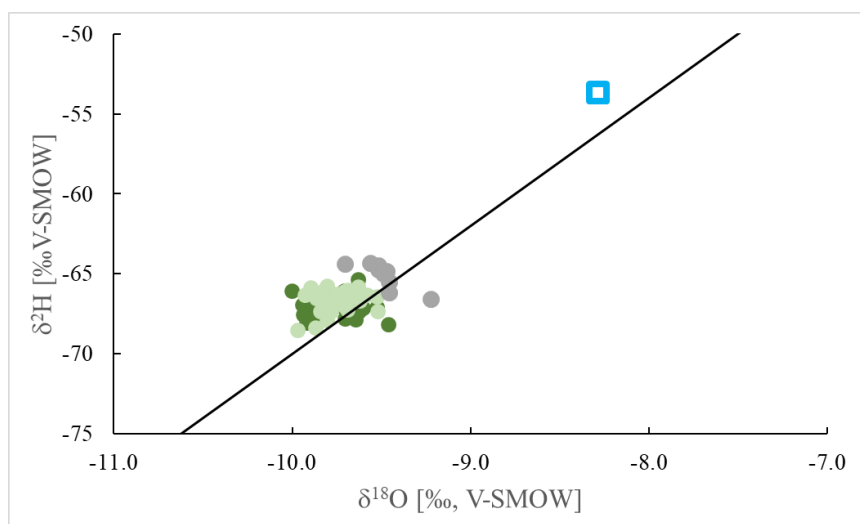
3. ábra: A „Függőkert” nevű teremben mért csepegésintenzitás változása három csepegési ponton 2022-től.

Összeségében azonban megállapítható, hogy általában a csepegésintenzitás változása nem olyan hirtelen és „élesen” változik mind a Baradla- és a Béke-barlangokban, hanem sokkal egyenletesebben. Továbbá a változás mértéke is kisebb a csapadékeseményt követően, mint az aggteleki barlangok esetében (Baradla-, Béke-), ahol akár két nagyságrenddel is változhat az intenzitás rövid időn belül. Mindez arra utal, hogy a Csodabogyós-barlang befogadó kőzetére inkább a diffúz beszivárgás jellemző, szemben repedésessel, ahol gyorsabban „szalad át” a víz a rendszeren.

Stabilizotópok:

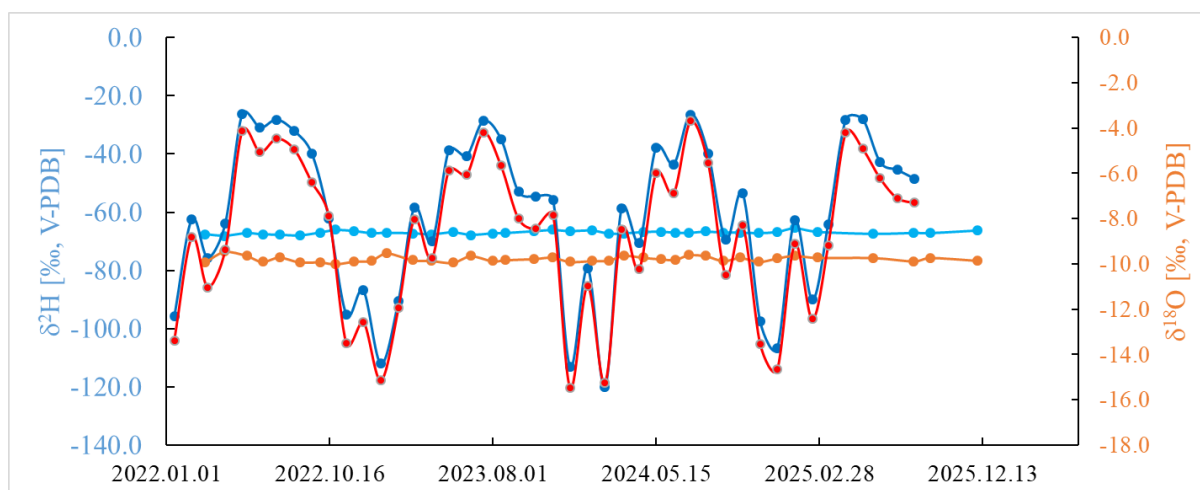
Az egyes csepegési pontokon nemcsak a csepegésintenzitást mértük, hanem a barlanglátogatások alkalmával a Függőkertben mindhárom csepegési ponton gyűjtöttünk csepegővizet **stabilizotóp** elemzés céljából. Ezenfelül a csepegésintenzitás számlálókra kitettünk üveglemezeket, hogy évszakosan be tudjuk gyűjteni az üveglemezeken kivált karbonátokat stabil szén- és oxigénizotóp-elemzés céljából.

2022-től kezdve a három helyszínen gyűjtött csepegővizek stabilizotóp-összetételét a 4. ábra mutatja. Az 1-es és a 2-es helyszínen gyűjtött csepegővizek stabil hidrogén- és oxigénizotóp-összetétele nem különbözik egymástól, míg a harmadik csepegési helyszín izotóp értékei valamivel pozitívabb értéket mutatnak. Mindez arra utal, hogy a 3. csepegési pont eltérő beszivárgással rendelkezik. Mindazonáltal megállapítható, hogy mindhárom csepegési pont izotóp-összetétele negatívabb, mint a csapadék mennyiséggel súlyozott éves izotóp-összetétele, amely arra utal, hogy a fő beszivárgási időszak télen van.



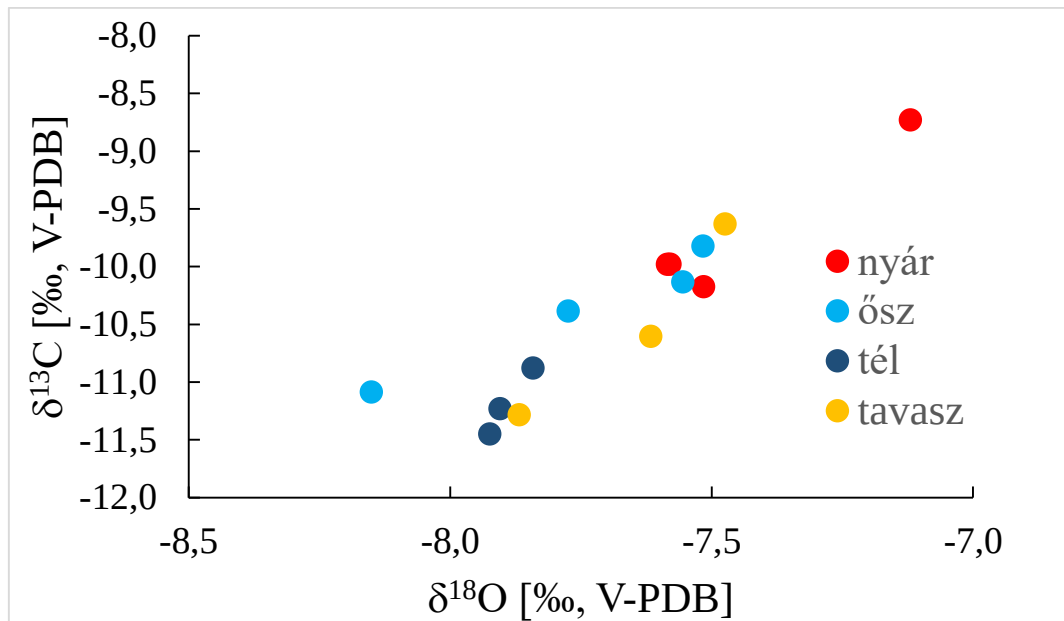
4. ábra: A vizsgált helyszíneken a csepegővíz stabilis hidrogén- és oxigénizotópösszetétele (1-es helyszín: sötétzöld, 2-es helyszín: világos zöld, 3-as helyszín: szürke). A fekete egyenes vonal a globális csapadékvízvonalat jelöli (GMWL), míg a kék négyzet a csapadék éves, mennyiséggel súlyozott izotóp-összetételét jelzi.

Fontos továbbá megjegyezni, hogy az egyes csepegési pontokon nem látni a csapadékra jellemző nagy évszakos változékonyságot (5. ábra). A csapadékra nyáron pozitívabb $\delta^2\text{H}$ és a $\delta^{18}\text{O}$ érték jellemzőek, míg télen negatívabb. Ez arra utal, hogy a csepegési pontok feletti epikarszt jelentős pufferként működik, a lehulló csapadék izotópos jellege „eltűnik/elmosódik” a beszivárgás során, az izotópjel tranzit ideje több, mint egy év.

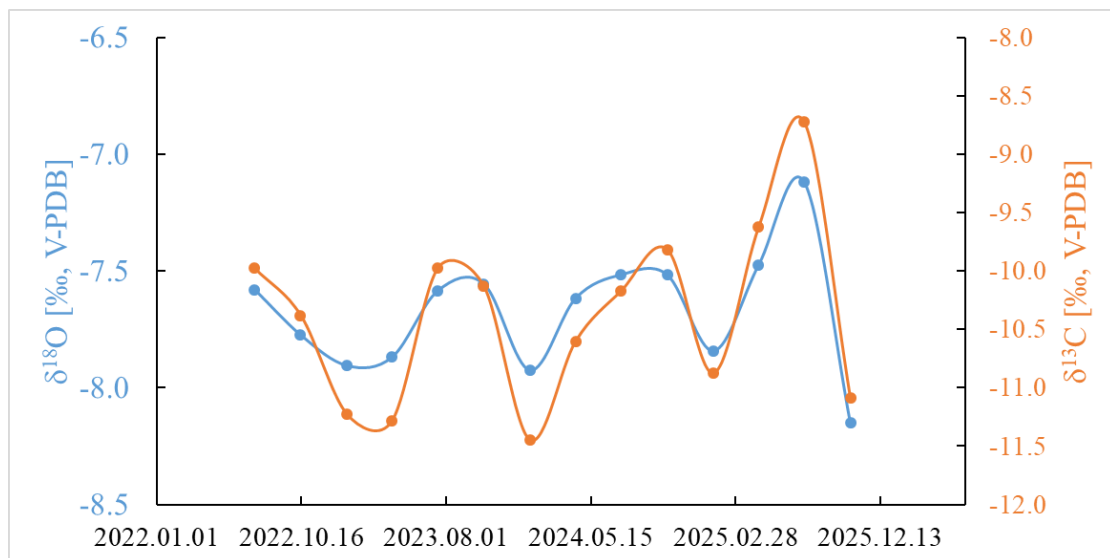


5. ábra: A csapadékvíz stabil hidrogén- (sötétkék) és oxigénizotóp-összetételének (piros) évszakos változékonysága. A világoskék görbe, valamint a narancssárga görbe a csepegővíz stabil hidrogén, illetve oxigénizotóp-összetételét mutatja.

A csepegővizekkel ellentétben az 1-es és a 2-es csepegési ponton, évszakosan gyűjtött karbonátok izotóp-összetétele jelentős változékonyságot mutat (6. ábra). Az eredmények alapján úgy tűnik, hogy az egyes évszakok során kivált karbonátok C- és O-izotóp-összetétele különbözik, szezonalitást mutat (7. ábra). Ez a változékonyságot számos tényező okozhatja: csepegővíz-összetételének, a barlangi hőmérsékletnek, a csepegésintenzitásnak megváltozása, illetve a csepegővízből a CO_2 eltérő mértékű kigázosodása a karbonát képződése során.



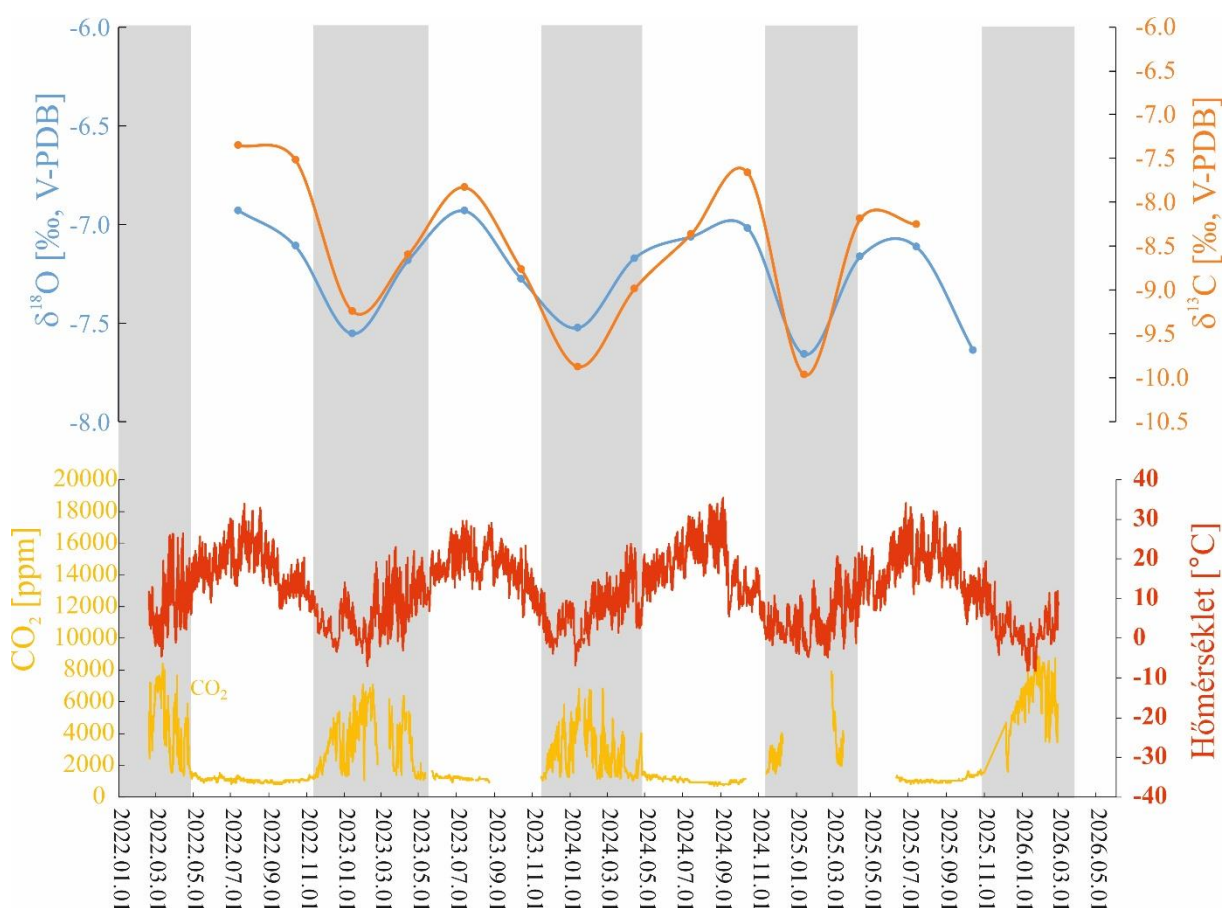
6. Az üveglemezen kivált karbonátok stabil szén- és oxigénizotóp-összetétele. Az egyes színek a különböző évszakokban képződött karbonát izotóp-összetételét reprezentálják.



7. Az üveglemezen kivált karbonátok stabil szén- és oxigénizotóp-összetétele 2022-től. Az üveglemezek évszakonként lettek begyűjtve.

Az üveglemezen kivált karbonátok („cseppkő”) izotóp-összetételének változékonysága ($\delta^{18}\text{O}_{\text{nyár-tél}}$: $\sim 1\text{‰}$; $\delta^{13}\text{C}_{\text{nyár-tél}}$: $\sim 2\text{‰}$) nem a csepegővízre vezethető vissza, mivel abban nem figyelhető meg változékonyság, izotóp-összetételük szűk tartományban mozog. Továbbá, a hőmérséklet megváltozásával sem lehet megmagyarázni, mivel a barlangban mért hőmérséklet gyakorlatilag állandónak tekinthető. A csepegésszintézis változása elméletileg okozhat kinetikus frakcionációt a

karbonát képződése során: alacsony csepegésintenzitás eredményeképpen erősebb kinetikus hatás van, amelynek köszönhetően a kiváló karbonát izotóp-összetétele pozitívabb lesz, míg gyorsabb csepegés esetén a kinetikus hatás kisebb, közelebb lesz az elméleti, egyensúlyi kiváláshoz. Jóllehet a csepegésintenzitásban tapasztalható volt változás a négy év során, azonban ez a változás nem mutatott korrelációt a kiváló karbonátokban megfigyelt változással. Úgy tűnik, hogy a karbonátok évszakos (tél-nyár) izotóp-összetételében lévő különbségnek a fő kiváltója a barlangi levegőben lévő CO₂ koncentráció változása (8.ábra). Télen, amikor magasabb a CO₂ koncentrációja a barlangi levegőben kisebb a csepegővíz kigázosodásának mértéke, amelynek eredményeképpen a kinetikus frakcionáció is alárendeltebb. Ennek köszönhetően a kiváló karbonát izotóp-összetétele negatívabb. Nyáron, amikor a CO₂ koncentrációja alacsonyabb, ennek az ellenkezője játszódik le, azaz erősebb kinetikus hatás következtében a kicsapódó karbonát stabilizotóp-összetétele pozitívabb irányban tolódik el.



8. Az üvegelemzen kivált karbonát stabilizotóp-összetételének (narancs és kék) évszakos változása összefüggésben a barlangi levegőben megfigyelt CO₂ (sárga) koncentráció változással, amelyet végső soron a külső hőmérséklet (piros) és barlangi hőmérséklet viszonya határoz meg.

Összeségében megállapítható, hogy a Csodabogyós-barlangban végzett monitoring nemcsak abban segít, hogy megértsük a karbonátkiválást (cseppkőképződést) befolyásoló folyamatokat, hanem abban is, hogy megismerjük a barlang működését, szellőzőtségének éves, évszakos alakulását, a hidrológiai viszonyoknak a csapadékellátottság függvényében való megváltozását különös tekintettel a beszivárgás módjára és időbeliségére.