

## A Nagyharsányi- és a Beremendi-kristálybarlang és képződményeik genetikai vizsgálata

VIGASSY Tamás<sup>1</sup>, LEÉL-ÓSSY Szabolcs<sup>2</sup>, DEMÉNY Attila<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Organic Chemistry, Swiss Federal Institute of Technology, ETH Hönggerberg, CH–8093 Zürich, Switzerland

<sup>2</sup> Eötvös Loránd Tudományegyetem, TTK Földtani Tanszék, 1117 Budapest Pázmány Péter sétány 1/c

<sup>3</sup> MTA Geokémiai Kutatólaboratórium, 1112 Budapest Budaörsi út 45.

---

### *The crystal caves of Nagyharsány and Beremend, and genetic investigation of their precipitations*

#### Abstract

The present paper examines 2 crystal caves (which were discovered only a few years ago) of the Villány Hills, situated in the southern part of Hungary. Here there are favourable conditions for the mixture of corrosion on the rims of big basins covered by water-tight strata and the mountains which consist of karstifiable rocks. In order for the caves to form, the existence of tectonic fissures was necessary, because this is where the stream and mixture of solutions could start (JAKUCS 1948, LEÉL-ÓSSY S. 1957). In line with TAKÁCSNÉ BOLNER, in SZÉKELY (2003), on the basis of the observations of the present investigation the Beremend Crystal Cave is a typical hydrothermal (thermal karst) cave system; it originated due to a mixture of corrosion with a labyrinth-type network of passages characterized by sudden changes of size, by frequent niches and by an extraordinarily rich and variegated ensemble of minerals and forms; the latter were partly a result of hydrothermal effects. The crystal cave covers a small area and has no big chambers. The passages reach the current karst water level in the Tavas-terem (Lake Chamber). The traces of the thermal influence were proved by stable isotope measurements.

The evaporation of the warm karst water provided the possibility for the creation of corrosional niches, and these have also recently appeared in the upper sections of the cave. The active corrosional effect can be observed in the upper part of the cave, close to the surface, where a weathered crust and the absence of formations on the cave walls are typical. The lower, recently developed part of the cave is abounds with minerals produced by precipitations. Aragonite (precipitated from the aerosol) and huntite — as the last products of the hydrothermal crystallization — are typical for the cave system.

During the research, the mineral precipitations were studied in thin sections and, by using of X-ray diffraction, stable isotope and optical emission measurements (in addition to the percolation conditions) were analyzed.

The investigations were especially extensive in the Nagyharsány Crystal Cave. The upper section of the cave is of an essentially tectonic origin, characterized by big chambers bordered by straight lines. Its lower section came into being alongside the sliding of a bedding plane. Following the strong tectonic preformation, the thermal karst corrosion played role in cave forming and mineral genesis.

The connection with the thermal waters in the Nagyharsány Crystal Cave is verified by the temperature of the air of the cave, which is higher than the annual average temperature at the surface. The level of the thermal water in the cave is not known, but the temperature gradually increases towards the deeper levels.

The upper section is characterized both by niches and angular forms, while in the lower sections niches and rounded surfaces are evident. On the upper level more generations of the formations can be distinguished. The surfaces of these different generations of formations are mainly covered by glass-ball peastones, these determine the character of the upper section of the cave. The ceiling of the cave is not rich with formations but straw stalactites linked with the fissures are present.

The tectonic preformation of the investigated two caves can be proved. The thermal water mineral associations verify the thermal connection. In the Beremend Crystal Cave, the cave galleries have their origins in the corrosion caused by thermal water flowing along tectonic lines. On the other hand, in the Nagyharsány Crystal Cave the recently discovered sections are the result of the tectonic movements themselves. This is the fundamental difference between the two caves.

*Keywords: Nagyharsány, Beremend, crystal caves, Nagyharsány Limestone, thermal springs, mixing corrosion, isotope geochemical analysis*

---

#### Összefoglalás

Tanulmányunkban a Villányi-hegység, ill. a Beremendi-rög két, közelmúltban felfedezett kristálybarlangját vizsgáljuk. A nagy, vízzáró rétegekkel fedett medencék és a karsztosodó kőzetekből álló hegységek peremén kedvezőek a

lehetőségek a keveredési korrózió kialakulására. A barlangok keletkezéséhez szükséges a tektonikus kőzethasadékok jelenléte, ahol megindulhat az oldatok áramlása és keveredése (JAKUCS 1948, LEÉL-ŐSSY S. 1957). Megfigyeléseink szerint (összhangban TAKÁCSNÉ BOLNER, in SZÉKELY 2003) a Beremendi-kristálybarlang keveredési korrózióval létrejött, típusos hidrotermás (termálkarsztos) üregrendszer, amire jellemző a labirintusos, több szintben kifejlődött járáshálózat, a hirtelen méretváltozás, a gömbfülkék gyakorisága és a változatos, kivételesen gazdag, részben hidrotermás hatásra keletkezett ásvány- és formaegyüttes. A kristálybarlang kis területen alakult ki, nagy termék nem jöttek létre benne. A járatok a Tavas-teremben elérik a recens karsztvízszintet. A termálhatás nyomait stabilizotópos méréseinkben is kimutattuk.

A meleg karsztvíz párolgása még ma is biztosítja a barlang felső szakaszán a korróziós gömbfülkék kialakulásának lehetőségét. Ezt az aktív korrodáló hatást megfigyelhetjük a barlang felső, felszín közeli szakaszán, ahol a barlangfalakat vastag málladékkéreg és képződményhiány jellemzi. A barlang ma is épülő, alsó szakasza gazdag kiválásokban. Az aerosolból kiváló aragonit és a hidrotermás kristályosodás utolsó termékeként megjelenő huntit jellemzi a rendszer.

Munkánk során az ásványkiválásokat csiszolatban, valamint röntgendiffrakciós, stabilizotópos és optikai emissziós mérések alkalmazásával tanulmányoztuk, emellett elemeztük a beszivárgási viszonyokat is.

Vizsgálataink különösen a Nagyharsányi-kristálybarlang esetében voltak jelentősek. A kristálybarlang felső szakaszának kialakulásában a tektonikának volt döntő szerepe. Ezt egyenes vonalakkal határolt nagyméretű termék jelzik. Alsó szakasza egy réteglap megcsúsztatása mentén alakult ki. Az erős tektonikus preformálódást követően a termálkarsztos korrózió vette át az üregalakító és ásványképző szerepet.

A Nagyharsányi-kristálybarlang termálvizekkel való kapcsolatát igazolja a barlang légtérének az évi középhőmérsékletet meghaladó hőmérséklete. A termálvíz szintje a barlangban nem ismert, de a mélyszint felé fokozatosan nő a hőmérséklet.

A felső szintet a szögletes formák mellett gömbfülkék is díszítik, míg az alsó szintre a gömbfülkék és a lekerekített felületek túlsúlya a jellemző. A barlang felső szintjén több képződménygenerációt különítettünk el. A különböző képződménygenerációk felületét nagyrészt a barlang felső szakaszának jellegét meghatározó üveggömb borsókövek borítják. A barlang mennyezete meglehetősen képződményszegény, kivételt képeznek a repedésekhez kapcsolódó szalmaceppkövek.

A vizsgált két barlang tektonikus preformáltsága bizonyítható. A termálkarsztos barlangokra jellemző ásványtársulás a termális kapcsolatot igazolja. A két barlang közötti alapvető különbség abban nyilvánul meg, hogy míg a Beremendi-kristálybarlangnál a termálvizes korrózió hozta létre a barlangjáratokat tektonikus zónák mentén, addig a Nagyharsányi-kristálybarlang eddig ismert szakaszát elsősorban tektonikus mozgások alakították ki.

*Tárgyszavak: Nagyharsány, Beremend, kristálybarlangok, Nagyharsányi Mészkö, termálvíz, keveredési korrózió, izotóp geokémia*

## Bevezetés

Az általunk vizsgált kristálybarlangokban kutatásunk során a különböző képződmények mind szélesebb körű vizsgálatára törekedtünk. A formák és szpeleotémák morfológiai megfigyelésén és fényképes dokumentációján túl ezek ásványtani, nyomelem-összetételi és stabilizotópos mérését is elvégeztük. A műszeres vizsgálatokat az ELTE Ásvány- és Ércleptani Tanszékén, az ELTE Közvetlen-Geokémiai Tanszékén, Budapesten az Országos Közegészségügyi Intézetben, a Vituki Rt-nél és az MTA Geokémiai Kutatóintézetének Stabilizotóp Laboratóriumában végeztük el.

Paleofeszültség-rekonstrukciók segítségével megállapítottuk, hogy a pleisztocén során létrejött két eltérő időben képződött repedéshálózat mentén alakult ki a barlangrendszer: 1. NyÉNy–KDK, irányú, amit a késő-pleisztocén elején lerakódott üledékekkel töltődött ki, és 2. ÉÉNy–DDK irányú, amit ennél fiatalabb, de szintén késő-pleisztocén üledék töltött ki. A híres villányi faunaegyüttest egy további barlangi lelőhely felfedezésével gazdagítottuk, melynek vizsgálata a jövő feladata (VIGASSY 1999).

A Nagyharsányi-kristálybarlang a Villányi-hegység délkeleti részén a Nagyharsányi-pikkely tektonikailag kiemelt részében helyezkedik el. A még ma is működő szársomlyói mészkőbánya (a BCM kezelésében) területén több, jelentéktelen üreget letermeltek már, de fokozott védelem alá helyezték ezt az 1995-ben napvilágot látott barlangot.

Hasonlóan fokozott védelem alatt áll a Beremendi-kristálybarlang is. Ez a barlang hazánk legdélebbi mezozoos felszíni kibukkanásában (a Beremendi-pikkelyben) működő mészkőbányában vált ismertté 1984 őszén. Mindkét barlang a Duna-Dráva Nemzeti Park felügyelete alá tartozik. A Nemzeti Park engedélyével nyílt lehetőségünk a kristálybarlangok barlangi vezető kíséretében történő bejárására és a vizsgálatokhoz szükséges korlátozott számú minta vételére. A korlátozott mintaszám és mennyiség, bizonyos képződmények esetében, a mélyreható vizsgálatoknak is gátat szabott.

A két kristálybarlang a felszíni közelség és az azonos befogadó kőzet ellenére különböző genetikájú képződményekkel jellemezhető. A kristálybarlangok kialakulásában alapvetően két hatótényező osztozik. Beremenden jóval erősebben dominál a hévizes jelleg a tektonikai preformáltságot követve, míg Nagyharsányban a tektonikus eredetű járatrendszert kevésbé formálták a hévizes folyamatok.

## Kutatástörténet

A Villányi-hegység a Villány–Bihari szerkezeti övbe tartozik. A szűkebb terület kutatásával már a múlt század vége óta foglalkoznak neves kutatók. Az első őslénytani gyűjtések a hegység területén már a 19. sz. közepén megtörténtek. A Villányi-hegységben TELEGGI ROTH (1937) és RAKUSZ (1937) végzett úttörő jellegű térképező munkát.

Őslénytani, rétegtani és szerkezetföldtani vizsgálatokat TELEGGI ROTH (1937), NOSZKY (1957), FÜLÖP (1966), GÉCZY (1973), NAGY E. & NAGY I. (1976), WEIN (1969), BERGERAT & CSONTOS (1988), CSÁSZÁR (1992, 2002), FÜLÖP (1994), HAAS (1994), HÁMOR (1997), HAAS & HÁMOR (1998), BENKOVICS (1997) végeztek.

A két barlangot magába foglaló nagy tisztaságú Nagy-harsányi Mészke Formáció kőzetét még ma is több helyen bányásszák és ezek a mesterséges feltárások jó lehetőséget nyújtanak a formáció vizsgálatára. A képződmény litológiai tagolásával NOSZKY (1957), FÜLÖP (1966), CSÁSZÁR (1989, 1992) foglalkozott, üledékképződési és fejlődéstörténeti rekonstrukcióját CSÁSZÁR (2002) készítette el.

A Beremendi-kristálybarlangról és a már folyamatban lévő vizsgálatokról TAKÁCSNÉ BOLNER (1986) készített beszámolót és írt rövid összefoglalót hazánk fokozottan védett barlangjainak kézikönyvébe (SZÉKELY szerk. 2003). Ugyan- ebben a könyvben találjuk a szintén TAKÁCSNÉ BOLNER által írt egyetlen eddig ismert publikációt a Nagy-harsányi-kristály- barlanggal kapcsolatban is. A terület hidrodinamikai helyzete ALFÖLDI et al. (1977) foglalkozott, az áramlásrendszerek és a szerkezeti zónák kapcsolatáról TAKÁCSNÉ BOLNER & KRAUS (1989) tettek fontos magállapításokat. A felfelé áramló és hűlő termálvizek oldó hatásával általánosságban FORD (1988, 1995) foglalkozott, míg a különböző összetételű és hőmérsékletű vizek keveredésekor fellépő potenciális oldó- hatást BÖGLI (1963, 1965), PLUMMER (1975) és BALÁZS (1966) írták le. A témáról jó áttekintést ad CULVER & WHITE (2005).

### **Hidrodinamikai helyzet és áramlási rendszerek a Villányi-hegység D-i előterében**

A Nagy-harsányi-kristálybarlang orográfiailag kiemel- tebb helyzetben van, mint a Beremendi-kristálybarlang. A Harsány-hegy kopár, erősen karsztosodott felszíne jelentős vízgyűjtő terület. A barlang bejárata 162 m Bf magasságban nyílik. A KvVM Barlangtani és Földtani Osztály felmérése alapján (1996) a K–Ny-i teremrendszer mélypontja a bejárat szintjénél 18–20 m-rel lejjebb található. A réteglap mentén húzódó keleti ág ma ismert legmélyebb pontja pedig kb. 58 m-rel van a bejárat szintje alatt. Ez a mélység összevetve a Beremendi-kristálybarlang termálvízszintjével, 10–15 m- rel feljebb van. A barlangban közvetlen termálvizes kap- csolat jelenleg nem ismert.

A Beremendi-kristálybarlangban ma is folyik vízszint- megfigyelés a Pro Natura Karszt és Barlangkutató Egye- sület keretein belül (pl. Pro Natura 1998). A barlang ma is közvetlen kapcsolatban van a termálvízzel. Ennek megfe- lelően DUBLJANSKI (1989) definíciója szerint a területet termálkarsztnak nevezhetjük.

ALFÖLDI et al. 1977-es térképe nem különíti el különálló karsztvízáramlási irányokat és rendszereket a Nagy-harsányi- és a Beremendi-pikkelyek között. Kútadatok alapján a Bere- mendi- és a Nagy-harsányi-pikkelyek karsztvízszintje közel azonos.

### **A Beremendi- és a Nagy-harsányi- kristálybarlang felfedezése**

1984. november 12-én a BCM által működtetett bere- mendi mészkőbánya középső, 116-os szintjén, az ÉK-i fron- ton a fal tövében mintegy 1 m átmérőjű nyílás tárult fel. 1985 márciusára a barlang ismert vertikális kiterjedése 53 m-re, hossza 700 m-re nőtt, így a Dél-Dunántúl második leghosz- szabb barlangjává lépett elő.

A feltárással párhuzamosan rögtön elkezdődött a barlang részletes ásványtani (BOGNÁR & KISS, 1985), őslénytani (JÁNOSSY és TOPÁL, in TAKÁCSNÉ BOLNER 1986) vizsgálata, és megkezdődtek a szerkezetföldtani és hidrogeológiai mérések is. A folyamatosan működő bánya miatt a barlang megmaradása kérdéses volt. A barlang alaprajzát és vetített hosszmetsetét KÁRPÁT (1985) készítette el. A barlang feltűnő szépsége miatt a Beremendi-kristálybarlang nevet kapta.

A Nagy-harsányi-kristálybarlang a Szársomlyó oldalá- ban, a BCM kezelésében lévő harsány-hegyi mészkőbánya második szintjén nyílt meg 1994 áprilisában. A barlang bejárata 162 m Bf-en, Ny-i végpontja 140 m-en van. A K-i ág mélyszintje ma 104 m Bf-ig ismert, de a mai végponton nem a kőzet, hanem az érzékeny képződmények védelme szab határt a további kutatásnak. A barlang valós méretei 1995 nyarán váltak ismertté, majd 1996 folyamán a barlang felmért hossza meghaladta az 556 m-t. A felméréseket a KvVM Barlangtani és Földtani Osztályának megbízásából készítették.

A barlang K-i ágának bejárata körül nagy mennyiségű, jól osztályozott kőzettörmelék található. Ennek pontos eredete nem tisztázott, de biztosan antropogén eredetű. Ellenőrizhetetlen szájhagyomány szerint a hivatalos meg- ismerés előtt már egy évtizeddel megnyílt a barlang, és ezzel a kőzettörmelékkel kívánták eltömedékelni. Ezen a részen, kőzetréseken keresztül ma is beszűrődik a napfény a barlangba.

### **A Nagy-harsányi- és a Beremendi- kristálybarlang formakincse**

A két barlang formakincsének együttes tárgyalását az teszi indokolttá, hogy mindkét barlang kialakításában hidrotermás folyamatok vettek részt. A Nagy-harsányi- kristálybarlang kialakulásában emellett a tektonika szerepe szembetűnő.

#### *A Nagy-harsányi-kristálybarlang formakincse*

A Nagy-harsányi-kristálybarlang üregrendszerének hévizes eredete nem egyértelmű. A barlangjáratok két szin- ten helyezkednek el: felső szintet a teremrendszer, a mély- szintre, a réteglap menti omlászónák és zegzugos járatok jellemzik. A felső szintet égtájak és jellegzetes képződmé- nyeik alapján osztottuk további egységekre. A következő részeket különítettük el:

— Ny-i nagyterem, aminek legnyugatibb része a Csontos-terem, ettől K-re nagy omlászóna van, amit a Vetős-terem követ.

— Átjáró rész, a barlang bejáratától a Ny-i nagyteremig terjedő rész.

— K-i ág, a barlang bejáratától K-re lévő egység, melynek felső szintjén a Csodák-terme található.

— K-i ág mélysztint (Cseppkőország).

A barlang tektonikai preformáltsága jóval szembe-tűnőbb, mint a környék más barlangjai (pl. a Beremendi-kristálybarlang) esetében. A Vetős-terem nevét is az ott található, közel 20–30 m<sup>2</sup>-es vetőkarcos falról kapta. A felső szintet nem a lekerekített, gömbölyded formák jellemzik, hanem a szögletes töréses formák és felületek. A réteglap menti elválások síklapjai, az ezekre közel merőleges szögletes rétegfejek, a cseppkőképződmények gazdagsága nem egy hidrotermás eredetű barlang képét tárja elénk. Ennek ellenére a hidrotermás tevékenység nyomai is megtalálhatók, elsősorban a mennyezeti részeken. A korróziós gömbfülkék több helyen őrzik a hidrotermás működés nyomait.

Az alsó szint a felső szintből egy réteglap mentén nyílik és hatol le meredeken (45–55° alatt), a rétegdőlésnek megfelelően gyakran széles omlászónákon keresztül a mélybe. Ez a mélysztint ma csak a K-i ágban ismert. A K-i ág formakincsében sokkal inkább megjelennek a hidrotermás nyomok (gömbfülkék, öblös oldásformák). Ezek közt gyakoriak az olyanok, melyek idős kalcittelérekbe maródtak bele. Megfigyeléseink alapján a mélysztint, egy réteglap menti tektonikusan preformált erős hidrotermás korrózió következtében alakult ki. A karsztos korrózió a réteglapok mentén fordított „d” alakú oldásformákat hozott létre.

Érdekes jelenséget figyeltünk meg a Nagyharsányi-kristálybarlang képződményeinek fényképezése közben. Az egészen fiatal legfelső bekérgezések, a kőzetpedéseket kitöltő kalciterek sávosan foszforeszkálnak.

### A Beremendi-kristálybarlang formakincse

FORD (1988) besorolása szerint a Beremendi-kristálybarlang a háromdimenziós járatrendszerű hévizes barlangok táborába tartozik. A FORD & WILLIAMS (2007) által leírt, csak hévizes barlangokra jellemző speciális bélyegek is megtalálhatók Beremenden:

- a háromdimenziós labirintus-szerkezet,
- a fluviatilis üledékek hiánya,
- a barlang nincs kapcsolatban a felszíni topográfiával,
- hidrotermás ásványkiválások jellemzik.

A barlangnak nemcsak térbeli szerkezete, hanem formakincse is hévizes eredetre utal. Meghatározók a lekerekített, gömbölyded felületek, a nagyméretű öblös oldásformák és az ezekből összeolvadt járatok. Gyakori formaelem a gömbfülke, amely általában 0,5–1,5 m sugarú fél- vagy harmadgömb. Gömbfülkék elsősorban a mennyezeti részeken találhatóak. A közel zárt gömbfülkék nem jel-

lemzőek, de az összeolvadt gömbfülkékből kialakult spirálisan csavarodó, kürtöket alkotó füzérek igen. Különösen érdekesek azok az oldásformák, amelyek a kőzetet átszelő, vastag, vöröses színű, idős kalcittelérekbe maródtak bele.

Az üreghrendszer fejlődéstörténete szempontjából fontos körülmény, hogy a járatok kupolás boltozatformái megszakítás nélkül folytatódnak a több helyütt észlelhető brecsazonákban is (TAKÁCSNÉ BOLNER 1986).

### A Beremendi-kristálybarlang termálvizének összetétele

A rendelkezésünkre álló adatok és saját méréseink (I. táblázat) alapján a következő megállapításokat tettük:

**I. táblázat.** A Beremendi-kristálybarlang termálvizén végzett kémiai elemzések adatai és oxigénizotópos értéke. (A vízkémiai vizsgálatok a Vituki Rt.-nél, a stabilizotópos mérések az MTA GKI-ban készültek.)

**Table I.** Data of chemical analyses of Beremend Crystal Cave's thermal water and its oxygen-isotope value, made by Vituki Ltd and Hungarian Academy of Science Institute for Geochemical Research

Fajlagos vezeték	mikrosimens/cm	665
pH		7,54
Kémiai oxigénigény KOIps	mg/l	0,80
Ammonium	mg/l	0,06
Nitrit	mg/l	0,01
Nitrát	mg/l	197
Klorid	mg/l	50
Szulfát	mg/l	13
Összes keménység (CaO)	mg/l	159
Kalcium	mg/l	43,7
Magnézium	mg/l	42,5
Nátrium	mg/l	22,0
$\delta^{18}\text{O}$ értéke	‰	-8,8

— a beremendi bányaudvarban feltárt hévizes üregek vizében 1957-től 1984-ig eltelt idő alatt közel másfélszeresére (TAKÁCSNÉ BOLNER 1986), majd 1998 decemberéig tovább növekedett a nitráttartalom, ami recens beszivárgásról tanúskodik,

— a Ca- és Mg-ionok közel azonos arányban vannak jelen, ami magyarázatot adhat egy hazánkban ritka ásvány, a huntit megjelenésére,

— a klorid iontartalom (talán az intenzív párolgás miatt) feldúsult,

— a „Nagy-tó” vizének  $\delta^{18}\text{O}$  értéke  $-8,8\text{‰}$ . Ez valószínűsíti egy idős és egy mai víz keveredésének lehetőségét.

Az Országos Közegészségügyi Intézet által végzett bakteriológiai vizsgálatok rendkívül magas Pseudomonas állományt mutattak ki. Koliform szervezetek szintén magas számban vannak jelen. A koliformok nem fekális eredetűek, magas számuk ilyen összetételű felszínközeli meleg vizekben nem kirívó (MÁRIALIGETI professzor szóbeli közlése, 1998).

## A Nagyharsányi- és a Beremendi-kristálybarlang ásványai

A kristálybarlang elnevezés már utal a rendkívül dús ásványkiválásra. A különböző képződményeken végzett röntgen-pordiffrakciós vizsgálataink alapján (melyek az ELTE Ásványtani Tanszék Siemens D500-as diffraktométerrel, Cu-sugárforrással készültek), és makroszkópos megfigyeléseink során 15 ásványt különböztettünk meg: kalcit, aragonit, huntit, ankerit, vasas dolomit, vasas magnezit, hematit/ goethit, szericit/illit, szmektit, gibbsit, kaolinit, klorit, kvarc, anortit, gipsz. Ezek között gyakoriságban mindkét kristálybarlangban a karbonátok dominálnak. Az ásványfajok bemutatásának sorrendjénél jelentőségüket, barlanggenetikai szempontokat, rendszertanukat és gyakoriságukat vesszük figyelembe.

### Agyagásványok

A mindkét kristálybarlangot magában foglaló Nagyharsányi Mészke Formáció >99,5%-a tiszta  $\text{CaCO}_3$  (II. táblázat). A Nagyharsányi-kristálybarlangban kevés helyen figyelhető meg agyagfelhalmozódás. A K-i ág alsó részén szinte kizárólag repedéskitöltésekre szorítkozik az agyagok (vörös) előfordulása. A felső szinten már több helyen megtalálható az erős mállás okozta kéreg, de ezek a röntgen diffrakciós vizsgálat szerint a mállás ellenére is szinte tiszta  $\text{CaCO}_3$ -ból állnak. A felső szint Ny-i végéről származó minta a következőket tartalmazta:

- kvarc,
- egy 10 Å-ös rétegszilikát (szericit/illit),
- kloritra utaló nyomok,
- szmektit,

— anortit (a maradék csúcsok alapján erősen bizonytalan).

Ez az ásványegyüttes biztosan nem a Nagyharsányi Mészke Formáció oldódási maradéka. Erre a kőzet oldási maradékán, a felületi málladékon és a repedéskitöltő anyagon elvégzett vizsgálatok (Rtg. Diff., OES) utalnak. Szintén külső behordásra utal a minta környezetében jelenlévő csontanyag is. Az agyag és a csontanyag behordódásának ideje a csontok alapján késő-pleisztocén–holocén (KORDOS László szóbeli közlése 1999), amikor a Csontos-terem feletti mennyezeten nyílás támadt a K–Ny irányú oldalelmozdulások hatására. Szericit/illitre utaló nyomokat a Beremendi-kristálybarlangban is találtunk.

### Kalcit

A Nagyharsányi- és a Beremendi-kristálybarlangban ez a leggyakoribb ásványkiválás. Formagazdagsága igen nagy. Optikai emissziós vizsgálataink alapján a mintákban lévő karbonátok nyomelemekben szegények, tiszták.

### Cseppkő

(álló és függő cseppkövek, cseppkőlefolyások)

A Nagyharsányi-kristálybarlangban a befoglaló mészke csekély agyagtartalma kedvez az üregek kioldódásának és a cseppkőképződésnek. A járatrendszer felső szintjét (K–Ny-i teremrendszer) alig 10–12 m vastagságú, erősen tektonizált, meredek rétegdőlésű kőzet fedi. Ez a gyors átszivárgás és a szeszélyes csapadékeloszlás, valamint a legyalult vékony talajréteg miatt jelenleg nem biztosítja a folyamatos csepegést. Az összefüggő talajtakaró hiánya és a gyér növényzet miatt az ún. „talajhatás” (ZÁMBÓ, 1986) gyengén érvényesül. A felszín közelségét jelzi a Csontos-terem D-i

II. táblázat. Barlangi üledékeken, barlangi karbonátos mintákon és barlangi ásványokon végzett OES (Optikai emissziós spektroszkópia) mérések táblázatos értékei

Table II. Optical Emission Spectroscopy (OES) values of measurements made on cave sediments, cave carbonate samples and speleothems

Minta szám	B	Ba	Co	Cr	Cu	Ga	Mn	N	Pb	Sr	Ti	V	Zn	Ag	As
N12	-	<100	-	<10	10	-	<10	-	-	400	<16	-	100	-	-
N13	-	-	-	<10	10	-	<10	-	-	160	<16	-	-	-	-
B1	-	-	-	<10	10	-	<10	-	-	250	<16	-	-	-	-
B2	-	<100	-	<10	16	-	<10	-	-	400	<16	-	-	-	-
B7	-	<100	-	<10	16	-	<10	<10	-	600	<16	-	-	-	-
N7	-	<100	-	<10	16	-	<10	-	-	100	<16	-	-	-	-
B8	<10	<100	-	<10	16	-	<10	-	-	400	<16	-	-	-	-
B4	<10	160	<10	25	16	10	400	16	10	100	250	-	-	-	-
B14	10	<100	-	10	16	-	250	<10	<1	300	<16	-	-	-	-
N8	16	<100	16	40	60	16	100	40	15	160	600	-	-	-	-
B13	16	<100	16	100	40	16	600	40	25	<10	500	60	160	-	-
N2	<10	<100	-	-	16	-	<10	-	-	600	<16	-	-	-	-
UB1	-	-	-	<10	16	-	<10	-	-	100	<16	-	-	-	-
UB2	-	-	-	<10	10	-	<10	-	-	160	<16	-	-	-	-
UB3	-	-	-	<10	16	-	<10	-	-	<10	<16	-	-	-	-
N5	60	400	10	100	25	16	600	40	20	160	400	100	160	-	ny
B6	60	1000	10	160	<10	25	400	25	40	600	1%	160	250	6	ny

mennyezeti részén megjelenő növényi gyökérzet is, amelynek gyökérlégzése az évszakos váltakozásnak megfelelően, a még zárt barlangrészekben CO<sub>2</sub> dús környezetet biztosít.

A K–Ny-i felső teremrendszer igen gazdag idős, nagyméretű (akár derékátmérőjű) álló cseppkövekben. Ezek egy része a bányarobbanások miatt (ezt igazolja friss törési felületük), más részük valószínűleg szerkezeti mozgások miatt (egyres törési felületeken borsókó kiválások figyelhetők meg) gyakran törött. A törési felületeket sokhelyütt borítják borsókókövek. Az idős cseppkőves képződmények színe csak a friss törési felületeken vizsgálható, mert minden oldalról vagy fiatalabb lefolyások, vagy borsókókövek takarják (1. tábla, 1–2.). A törési felületeken látható, hogy színük zónásan változik, a mindenkor Fe–Mn-tartalom és a behordott agyag függvényében. Az idős, korrodált cseppköveknél fiatalabb, áttetsző, halvány kávébarna színű, ökolnyi átmérőjű cseppkövek már egy megelőző borsókó-generációra nőttek rá. Ezek a barlangban sok helyen ma is fedő képződmények. A merőben eltérő morfortípusok egy-egy cseppkőképződési fázist képviselnek.

A barlang gazdag viszonylag gyorsan növekedő szalmacseppkövekben. Ezek a közelben működő bánya robbantási rezgése ellenére akár 1–1,5 m hosszúságúak is lehetnek.

A Beremendi-kristálybarlangban a tónál található cseppkövek. Ezeket gyakorlatilag minden oldalról vastag borsókó kiválás vonja be. A barlang védeltsége miatt vizsgálatukra nem kaptunk engedélyt.

### Barlangi borsókó

Mindkét barlangra a borsókó borítottság a jellemző. Törékeny kinézetüknek és csengésüknek köszönhető a barlang különleges hangulata. A K–Ny-i teremrendszer központi és Ny-i termében az aljzatot teljesen lefedik, és az oldalfalakat is változó magasságig borítják.

A Nagyharsányi- és a Beremendi-kristálybarlangból származó borsókómintákban röntgen-pordiffrakciós vizsgálattal csak kalcitot tudtunk kimutatni, aragonitot nem. Vékonycsiszolatos vizsgálatuk során sem találtunk aragonit utaló jeleket. Ezek már eredetileg kalcitként váltak ki, vagy már maradéktalanul átalakultak. Erre az aragonitácsba beépülő Mg katalitikus hatása ad lehetőséget. Geológiai szempontból gyorsan, néhány ezer év alatt is végbemehet ez a folyamat (LEÉL-ŐSSY Sz. 1997). Megfigyelhető volt azonban koncentrikus szerkezetük, a különböző vastagságú zónák egymásutánisága és színbeli eltérése is. A borsókó KRAUS (1991) által elkülönített 13 változata közül több is előfordul itt.

**Közönséges borsókó.** A Beremendi-kristálybarlangban ez a leggyakoribb típus, de a Nagyharsányi-kristálybarlang alsó szakaszán is több helyen fedí a kőzetfelületet. Az ilyen helyeken diónyi–öklömnyi halmazokat alkot, és a halmazok között is borsószem nagyságú, hófehér képződmények borítják a falat. Több helyen megfigyeltük, hogy az ilyen típusú képződmények a barlang falán csak egy bizonyos szintig terjednek. LEÉL-ŐSSY S. (1957) és KRAUS (1991) szerint ezek idős képződmények, melyek a járatokat összefüggően kitöltő melegvízből váltak ki. Az újabb publikációk ezt a kiválás típust légteres képződményként írják le

(pl. FORD 1995, HILL & FORTI 1997). A borsókó kiválások gyakran rendeződnek vonalakba. Ez hajdani beszívárgó helyeket jelöl, és valószínű, hogy a kiszellőztetés javulás, ill. a vízbeszívárgás csökkenése miatt megnőtt a párolgás szerepe. Ilyenkor nem cseppkó, hanem borsókó válik ki. (KRAUS szóbeli közlés, 2010). Ez lehet a Nagyharsányi-kristálybarlangban is a cseppkó-borsókó váltakozás magyarázata. A Nagyharsányi-kristálybarlangban ezt a szinthez köthető kiválást nem figyeltük meg.

**Szögletes borsókó.** A Beremendi-kristálybarlang gazdag kiválásai között a TAKÁCSNÉ BOLNER (1981) által leírt képződménytípus is megjelenik. A hófehér, messzebről gömbszerűnek tűnő képződményt 0,5 cm alatti élhosszúságú romboédes lapok határolják. A nem sugaras felépítésből arra következtettek, hogy ezek melegvízből váltak ki (TAKÁCSNÉ BOLNER 1981, LEÉL-ŐSSY Sz. 1997). Ma már ezeket is inkább légteres kiválásnak tartják mind a külföldi (HILL & FORTI, 1997), mind a hazai szerzők (TAKÁCSNÉ BOLNER Katalin szóbeli közlése 2009). Ezzel ma már magunk is egyetértünk. (Ilyen típust a Nagyharsányi-kristálybarlangban nem észleltünk).

**Korall borsókó.** HILL & FORTI (1997) nevezéktanát alkalmazva, ezek apró, vékony, kusza, elágazó halmazokból állnak. Ilyen képződményt láttunk 1984-ben a Beremendi-kristálybarlang bejárati részén. Sajnos, ez a képződmény ma már nincs a barlangban. A Nagyharsányi-kristálybarlangban a K-i ág mélyszintjén több helyen is találtunk ilyen morfológiájú borsókókat.

**Cseppkó borsókó.** A Nagyharsányi-kristálybarlang Ny-i termének középső omlásházájában található ez a LEÉL-ŐSSY Sz. (1997) által leírt morfortípus. Itt is cseppkőes környezetben jelennek meg ezek a szokatlanul nagy, 2–5 cm átmérőjű, gömbös szerkezetű borsókókövek.

**Üveggömb borsókó.** Elsősorban a Nagyharsányi-kristálybarlangra jellemző képződmény. A mennyezeti zónát és az oldalfalak felső harmadát kivéve gyakorlatilag mindenhol megtalálható ez a LEÉL-ŐSSY Sz. (1997) által elnevezett képződmény. Sárgásbarna színű, üvegszerűen áttetsző, a közönséges borsókónál sokkal szabályosabb, gömbszerű kiválás. Képződése a telített, hideg vizes oldatokot lefolyás közben ért mechanikai hatásnak tulajdonítható.

**Borsókóoszlop** (HILL & FORTI nevezéktanára szerint logomit). Ez a különleges képződmény a Nagyharsányi-kristálybarlang K-i ágának felső részében (a Csodáktermében) és a végpont környékén fordul elő. Az akár 20–30 cm magasságú, cseppkóoszlop habitusú képződményt különleges belső szerkezete miatt különítjük el. Szerkezete abban tér el az eddig megismert borsókótípusoktól, hogy mind kifelé, mind pedig a belső üregben befelé sugaras megjelenésű. A képződmény egésze hálózatos szerkezetű, egyes alkotóelemei leginkább az üveggömb borsókó típushoz hasonlítanak. Képződésükért a lecsepegő víz kemizmusának megváltozása lehet felelős. A kialakult borsókóhalmazt agresszív becsepegő vizek (általában) középen kioldották, majd ebben a belső eróziós üregben ismételt borsókó kiválás indult meg, de most már középpontos szimmetriával. A Beremendi-kristálybarlangban nem fordul elő.

### Több generációs kalcitkéreg

A Beremendi-kristálybarlangban nem jellemző, ahol találtunk ott is meglehetősen korrodált állapotban volt. A Nagyharsányi-kristálybarlangból több helyről gyűjtöttük be ezt a képződményt (1. tábla, 3.). Ez a meleg vizű tavak oldalában-aljában, a vízfelszín közelében kiváló kéreg nem azonos a nemzetközi szakirodalomban flowstone-nak nevezett, légtér üregben kialakult cseppkőlefollyással (ellentétben LEÉL-ŐSSY Sz. 1997 álláspontjával). A vágott felületeken jól látható a néha több cm vastag és a mm-es zónák váltakozása. Ehhez hasonló szerkezetű, de eltérő genetikájú ráfolyás (cseppkőlefollyás) fedi a Ny-i ág Csontos-termében lévő csontanyag egy részét is. Az ilyen típusú képződmények korának ismerete fontos lehet a barlang keletkezésének meghatározásakor, mert ezek általában az első, befoglaló kőzetet fedő képződmények (DUBLJANSKI 1995). A Nagyharsányi-kristálybarlangban felületük ma erősen korrodált.

### Telérkalcit

A telérkalcit-előfordulások a nagyméretű barlangrendszer kialakulásánál idősebb képződmények. A befoglaló Nagyharsányi Mésző Formációnak ezen zónájában extrém vastagságot is elérhetnek. A repedés, hasadék oldalával közel párhuzamos, hajladozó lefutású, tömör szövötű telérkitöltések a folyamatos mozgást követve, akár 1–1,5 m vastagok is lehetnek. A vastag zónák gyakran különböző színű sávokból tevődnek össze. Színük a teljesen színtelen átlátszótól a hófehéren keresztül a vörösig változhat. Ezekbe gyakran egész gömbfülkerészletek is belemaródtak. A belemaródások helyén a felületek szálasan, túszerűen széthullanak (a Nagyharsányi-kristálybarlangban ez általános, de a Beremendi-kristálybarlangban is előfordul).

### Aragonit

A Beremendi-kristálybarlangból BOGNÁR & KISS (1985) ismertette először az aragonitot. Makroszkópos megfigyeléseink és röntgenvizsgálataink is több helyen igazolták az aragonit jelenlétét (1. tábla, 4–5.). Elemzésünk szerint alkotóeleme a járatok alját borító mosóporszerű, huntitos törmeléknek is. Az aragonitot a Nagyharsányi-kristálybarlangból is sikerrel mutattuk ki (VIGASSY 1999). Önállóan is megjelenik, elsősorban a K-i ág mélyszintjén. Védett zugokban, az 1–2 cm átmérjű sündisznószerű félgömbök mellett, a fenyőfaszerűen elágazó nagyobb kristályok és a visszaoldott tühegyek is jól megfigyelhetők.

### Dolomit, vasas dolomit

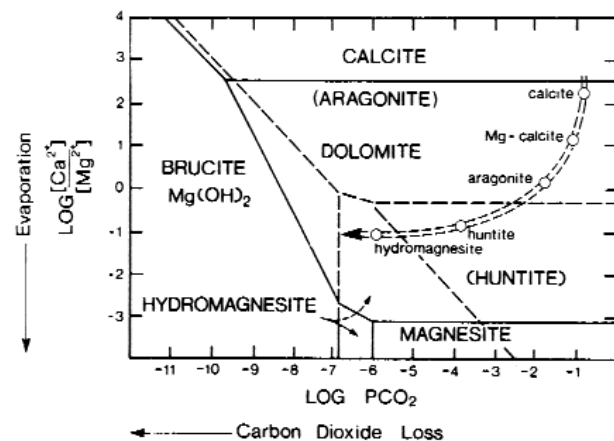
A Beremendi-kristálybarlangban a Mosóporos-ág képződményei között jelenléte valószínű (BOGNÁR 1985), de méréseink során a „mosóporos” mintákból nem tudtuk kimutatni. A Nagyharsányi-kristálybarlangban (K-i ág, mélyszint), fehér poranyagú törmelék mintában vasas dolomitot mutattunk ki.

### Magnezit, vasas magnezit

A magnezit egy vasdús változatát a Beremendi-kristálybarlang Mosóporos-ágából származó mintában sikerült kimutatni. A röntgen-pordiffrakciós vizsgálat a morzsalékos anyagban, a tömeges huntit mellett kimutatási határhoz közeli mennyiségben jelzi ezt az ásványt.

### Huntit

A Beremendi-kristálybarlang nagy szenzációnak számító felfedezése után, 1986-ban BOGNÁR László egy innen származó mintából írta le hazánkban (KOBLENCZ & NEMECZ 1953 után) másodikként ezt az ásványt (Azóta megtalálták már a József-hegyi, a Szemlő-hegyi-barlangban, valamint a 2007-ben felfedezett Citadella-kristálybarlangban is). A barlang több helyéről származó mintákban is találtunk huntitot. Közülük a borsókő felületéről gyűjtött minta csaknem teljes tömegében huntit. A Nagyharsányi-kristálybarlangból még 1998-ban elsőként nekünk sikerült kimutatni a huntit jelenlétét (VIGASSY 1999), szintén borsókő felületéről gyűjtött mintákban (Lényegében egyidőben TÓTH 1998 munkájával). Megfigyeléseink és méréseink szerint a huntit függőleges, vagy már áthajló borsókővel borított felületeken, a borsókő csúcsán található aragonit társaságában. A hévizes



1. ábra. A barlangi hidrotermás folyamatok végső fázisát indikáló huntit keletkezési körülményeit bemutató fázisdiagram (FORD & WILLIAMS 2007 nyomán)

Figure 1. Phase diagram showing circumstances of origin of the huntite (after FORD & WILLIAMS 2007)

eredetű aragonit és a hidrotermás kristályosodás utolsó termékeként megjelenő huntit a Mg-ionban dús barlangi aerosolból válhatott ki. Kiválási körülményeit az 1. ábra mutatja be.

### Gipsz

A Nagyharsányi-kristálybarlang K-i ágában az alsó szakaszon sikerült gipszet is találnunk. Mennyisége csekély, 1–2 m<sup>2</sup>-es felületen 1–2 mm-es bekegézést alkot.

### Más, műszerezen kimutatott ásványok

A kvarc szennyezőként több mintában is megjelenik. A Beremendi-kristálybarlang bejáratánál gyűjtött bauxitszerű mintában a kalcit mellett *gibbsit* és *kaolinit* fordul elő. Ez az ásványos összetétel nem azonosítható a Harsányhegyi Bauxit Formációval, hanem a CSÁSZÁR & FARKAS (1982) által leírt felsőbb bauxitszinttel hozható kapcsolatba. Fő jellemzője, hogy bauxitásványként túlnyomórészt gibbsitet tartalmaz. Ez a minta tartalmaz még makroszkóposan észlelhető *goethit* is.

A Nagyharsányi-kristálybarlang Csontos-termében az ÉNy-i fal tövéből származó agyagos minta *klorit* fázisra és *anortitra* utaló nyomokat tartalmaz. Eredetük feltehetően terrigén, de pontosabb származási helyük nem tisztázott. Az egyik, csaknem teljesen tiszta huntitos mintában *ankeritre* utaló csúcsokat is észleltünk.

### Stabilizotópos vizsgálatok

A Beremendi- és Nagyharsányi-kristálybarlangokban folytatott vizsgálataink során több, makroszkóposan és mikroszkóposan hasonló megjelenésű képződménytípust különítettünk el. A csupán morfológia alapján történő osztályozás nem ad lehetőséget genetikai következtetések levonására, ezért ennek kiegészítésére stabilizotópos elemzéseket végeztünk.

Vizsgálatainkban a különböző morfortípusú borsókövek és azok zónái között próbáltunk különbséget tenni, illetve egy, a Nagyharsányi-kristálybarlangból származó cseppkő zónánkénti vizsgálatát végeztük el.

#### Analitikai módszerek

A pormintákat a MCCREA (1950) valamint DEMÉNY & FÓRIZS (1991) által leírt módszer szerint készítettük elő. Az előkészítés során a karbonátminták feltárásához vízmentesített foszforsavat használtunk. A keletkező szén-dioxidot vákuum-desztillációval tisztítottuk tovább. A  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  és  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  arányok meghatározását az MTA Geokémiai Kutatóintézetének Stabilizotóp Laboratóriumában egy Finnigan MAT delta S tömegspektrométerrel végeztük. A mért értékeket a V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite) standardhoz viszonyítva ‰-ben adtuk meg az alábbi összefüggés alapján:

$$\delta = (R_1/R_2 - 1) \times 1000$$

ahol  $R_1$  és  $R_2$  a mintában, illetve a standardban mért izotóparány. A  $\delta^{13}\text{C}$  és  $\delta^{18}\text{O}$  adatok reprodukálhatósága jobb, mint  $\pm 0,15\%$ .

#### A $\delta^{13}\text{C}$ és a $\delta^{18}\text{O}$ értékeket befolyásoló tényezők és folyamatok

A barlangi kiválások szén- és oxigénizotóp-arányát több tényező is befolyásolja. A karsztos korrózióban elsősorban a

szénsavas oldás vesz részt (a szerves savak oldó hatásától most eltekintünk). Ennek megfelelően a felszínre hulló és a talajba beszivárgó csapadék, majd a karsztba bejutó vizek mind különböző helyekről és módon veszik fel a széndioxidot (MAHLER et al. 2004). A barlangi karbonátok  $\delta^{13}\text{C}$  értékét elsősorban az alábbi folyamatok befolyásolják (a víz útját követve):

1. Légköri  $\text{CO}_2$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  értéke  $-7\%$ -es (KEELING 1958).
2. Felszínre lehulló és beszivárgó csapadék, átlagos  $\delta^{13}\text{C}$  értéke  $-12\%$  (DEÁK 1995).
3. A beszivárgó vizek a talajban felveszik az ott termelt biogén eredetű (gyökérlégzésből, biológiai aktivitásból származó)  $\text{CO}_2$ -t, így az oldott anyag szénizotóp-összetétele erősen negatív irányban tolódik el.
4. A savas pH-jú víz megkezdje a talajkarbonátok, majd a kőzet oldását. A karsztos területek többségét tengeri karbonátos kőzetek alkotják, melyek szénizotóp-összetétele  $0\%$  körüli (HOEFS 1987), ezért a beoldott karbonát az oldat szénizotóp-összetételét a nulla érték felé tolja el.
5. A párolgási folyamatoknak igen nagy jelentőségük van nyílt rendszerek esetében. A felszínre hulló csapadék beszivárgási valószínűségét a felszíni párolgási viszonyok határozzák meg. Zárt barlangi térben (ahol a páratartalom megközelítőleg mindig maximális) a párolgás nem meghatározó jellegű.
6. A karsztrendszerekbe beszivárgó vizek oldó hatástukat kifejtve oldják a karbonátos kőzeteket. A keletkezett üregek, járatok, járathálózatok (barlangok) falán a kőzetből kilépő víz jelentősen megváltozott körülmények közé kerül (nyomás és hőmérséklet tekintetében). A fizikailag oldott (tartozékos)  $\text{CO}_2$  eltávozhat, ami karbonátkiváláshoz vezet. A távozó  $\text{CO}_2$   $^{12}\text{C}$ -ben dúsul (FRIEDMAN & O'NEIL 1977), ami a visszamaradó oldat, majd az abból kicsapódó karbonát szénizotóp-összetételét pozitív irányba tolja el.
7. Termálvizek esetén az oldatok több, a bezáró kőzetből kioldott karbonátot tartalmaznak, ami az oldat  $\delta^{13}\text{C}$  értékének pozitív irányba történő eltolódását eredményezheti.

A szeleotómák és azok elkülönülő zónáinak  $\delta^{18}\text{O}$  értékeit alapvetően két tényező határozza meg:

1. Idősoros mérések alapján a beszivárgó víz  $\delta^{18}\text{O}$  értéke  $1\text{ }^\circ\text{C}$ -os átlagos klímaromlás hatására  $-0,4\%$ -el tolódik el [ $\delta^{18}\text{O} = 0,37 \cdot T - 12,8$ ] { $T = \text{ }^\circ\text{C}$ -ban} (DEÁK 1995).
2. A barlangi kiválási hőmérséklet alapvetően meghatározza a kalcit-víz rendszerben a frakcionációs tényezőt, aminek hőmérsékletfüggésére FRIEDMAN & O'NEIL (1977) a következő képletet adta meg:

$$\Delta^{18}\text{O} = \delta^{18}\text{O}_{\text{kalcit}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{víz}} = 2,78 \cdot 10^6/T^2 - 2,89.$$

Ebből következően átlagos havi hőmérsékletekkel számolva  $1\text{ }^\circ\text{C}$  hőmérsékletcsökkenés  $+0,2\%$ -es eltolódást eredményez a kiváló kalcitban. Ez az összetételváltozási becslés összhangban van SCOFFIN (1987) eredményeivel, amelyek szerint minden  $1\%$ -es  $\delta^{18}\text{O}$  értékváltozás  $4,3\text{ }^\circ\text{C}$ -os kiválási hőmérsékletkülönbségnek felel meg. Mint látható a két tényező egymás ellen hat. Az eltolódások mértéke azt mutatja, hogy klímaváltozás esetén a kiváló kalcit  $\delta^{18}\text{O}$  eltolódását a víz oxigénizotóp-összetételének változása szabja meg.



Az adatok tárgyalásakor a felszíni eredetű csapadékvíz mellett figyelembe kell venni a hidrotermás rendszerek hatását is. A hőhatás a barlang felső zónáját két irányból is érheti. Ezek hatását az oxigénizotópos görbéken követhetjük nyomon. A szénizotópos összetétel változásáért elsősorban az oldott C eredete és a külső környezet, a klíma a felelős. A klímaváltozás jelentős mértékben befolyásolja a mindenkori növényzetet és a talaj termelt biológiai eredetű CO<sub>2</sub>-jének a mennyiségét. Azonban a klímaváltozás hatása ennél jóval összetettebb. A fent említett módon túlmenően a klímaváltozás a csapadék átlagos hőmérsékletének megváltozásán keresztül az oxigénizotópos összetételt is befolyásolja. A klímaváltozás hosszabb távon a termálvízszint-mozgásokat is befolyásolhatja a beáramló csapadék mennyiségi és időbeli eloszlásának megváltozásával. Eszerint egy hosszabb szárazabb periódus a termálvízszintet csökkentheti. A csökkenő termálhatás a kiválási hőmérsékletet befolyásolva állandó vízösszetétel mellett a kalcit  $\delta^{18}\text{O}$  értékének pozitív irányú eltolódását eredményezi.

#### Mérési eredmények, az adatok értelmezése

A Nagyharsányi-kristálybarlangból származó cseppkő zónánkénti vizsgálata során a kapott  $\delta^{18}\text{O}$  értékek  $-11,6\text{‰}$  és  $-10,4\text{‰}$ , a  $\delta^{13}\text{C}$  értékek  $-10,7\text{‰}$  és  $-7,2\text{‰}$  között szórnak. A Beremendi-kristálybarlangban korlátozottabb volt a mintavételi lehetőség. Ezen minták vizsgálata során kapott  $\delta^{18}\text{O}$  értékek  $-10,4\text{‰}$  és  $-8,6\text{‰}$ , a  $\delta^{13}\text{C}$  értékek  $-9,2\text{‰}$  és  $-8,9\text{‰}$  között mozognak. A kristálybarlangokból származó borsóköveken elvégzett vizsgálatokból származó  $\delta^{18}\text{O}$  értékek  $-11,4\text{‰}$  és  $-9,5\text{‰}$  között, míg a  $\delta^{13}\text{C}$  értékek  $-9,9\text{‰}$  és  $-8,4\text{‰}$  között szórnak. Ezeket az adatokat a III. táblázat és a 2–3. ábra szemlélteti.

#### Borsókövek, bekérgezések

A BERE1-2-3-as mérési adatok a Beremendi-kristálybarlang egy többgenerációs képződményéből származnak. A BERE1-es zóna az alapkőzetre nőtt rá borsóköveknek megfelelő morfológiával, ezt egy több rétegből álló bekérgező kalcitlefolyás borítja be (BERE2). A minta legkülső, a barlang légtére felé eső részét adja a BERE3-as minta.

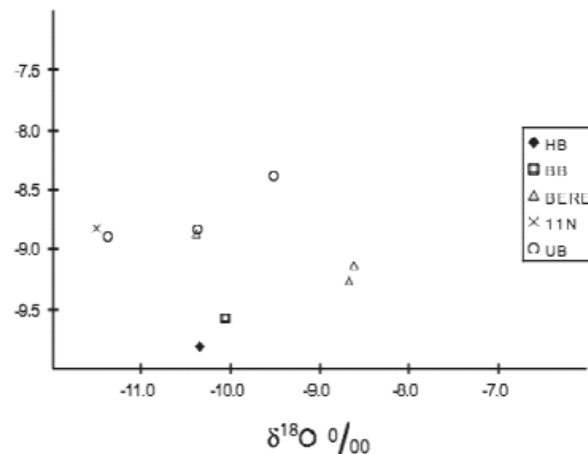
Mint láttuk, az oxigénizotópos összetételbeli változásokat egyrészt a kiválási hőmérséklet, másrészt a vízösszetétel változása — tehát a felszíni klíma változása — okozhatja. Számításaink alapján a  $-1,7\text{‰}$ -es  $\delta^{18}\text{O}$ -eltolódást egy  $4,5\text{--}5\text{ °C}$  átlagos klímaromlás okozhatja. Tehát a BERE1-2-es mintához képest a BERE3-as minta a felszínről behatoló vízkomponens változását tükrözi. A klímaromlás csökkenti a biológiailag termelt CO<sub>2</sub> mennyiségét is, ami magyarázatot ad a  $\delta^{13}\text{C}$  pozitív irányú elmozdulására is a keletkező kalcitban.

A  $\delta^{18}\text{O}$  negatív irányú elmozdulását megnövekedett termálhatás (számításaink alapján  $+8,8\text{ °C}$ -os kiválási hőmérsékletemelkedés) is okozhatja, mert a kalcit-víz rendszer frakcionációs értéke megnövekedett hőmérsékleten kisebb lesz (O'NEIL et al. 1969, FRIEDMAN & O'NEIL

III. táblázat. A Beremendi- és a Nagyharsányi-kristálybarlangból származó karbonátos mintákon elvégzett, stabilizotópos mérési eredmények (MTA Geokémiai Kutatóintézet)

Table III. Stable isotope data of the carbonatic samples from crystal caves of Beremend and Nagyharsány (Hungarian Academy of Science Institute for Geochemical Research)

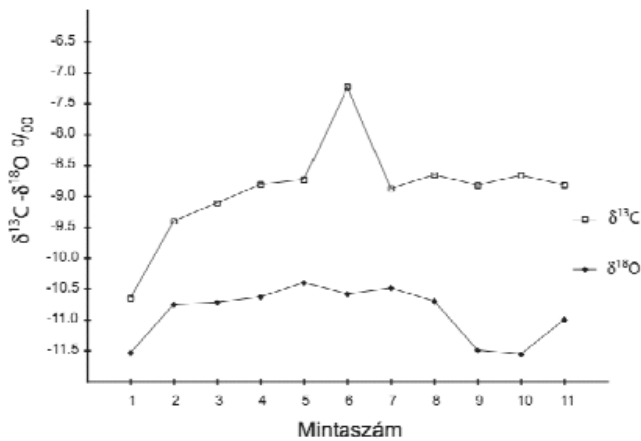
Mintaszám	$\delta^{18}\text{O(PDB)}$	$\delta^{13}\text{C(PDB)}$
1N	-11,5	-10,7
2N	10,8	9,4
3N	-10,7	-9,1
4N	10,6	8,8
5N	-10,4	-8,7
6N	10,6	7,2
7N	-10,5	-8,9
8N	10,7	8,7
9N	-11,5	-8,8
10N	11,6	8,7
BERE1	-8,6	-9,1
BERE2	8,7	9,2
BERE3	-10,4	-8,9
BB	10,0	9,6
BBB	-3,1	3,3
UB1	10,4	8,8
UB2	-9,5	-8,4
UB3	-11,4	-8,9
HB	10,3	9,9
11N	-11,0	-8,8



2. ábra. A Beremendi- és a Nagyharsányi-kristálybarlangból származó, feltehetően hidegvízes eredetű képződmények,  $\delta^{13}\text{C}$  és  $\delta^{18}\text{O}$  méréseinek diagramja. Jelmagyarázat: HB = hidegvízes borsókö, BB = közönséges borsókö Beremendről, BERE = kalcitlefolyás különböző zónái Beremendről, 11N = Nagyharsányi-kristálybarlangból származó cseppkő legkülső bekérgezése, UB = „üvegömb borsókö” egymást követő zónáinak mérési eredményei

Figure 2. Diagram of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  measurements on formations of the Beremend and Nagyharsány Crystal Caves originated from presumably cold water

Legend: HB = popcorn from cold water, BB = ordinary popcorn from Beremend, BERE = different zones of flowstone from Beremend, 11N = outer encrustation of dripstone from Nagyharsány, UB = results of measurements of following zones of “glassball popcorn”



3. ábra. A Nagyharsányi-kristálybarlangból származó cseppkő, belülről kifelé haladó, zónánkénti vizsgálatának eredményei (MTA Geokémiai Kutatóintézet).

Figure 3. Results of investigations of dripstones zone by zone inside moving out (Hungarian Academy of Science Institute for Geochemical Research)

1977). Ez a megnövekvő termálhatás a szénizotóp pozitív irányú elmozdulását is indokolhatja, mert a kiválási környezetben jelenlévő vízben több lesz a termálvizes, mészkő-oldódásból származó komponens.

$$T(^{\circ}\text{C}) = 16,9 - 4,38 (\delta^{18}\text{O}_{\text{kalcit}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{víz}}) + 0,10 (\delta^{18}\text{O}_{\text{kalcit}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{víz}}).$$

Más a helyzet az UB1, UB2, UB3-as minták esetében. Ezek a borsókövek az úgynevezett „üveggömb” borsókövek. A Nagyharsányi-kristálybarlangból származó képződmény morfológiailag különböző, három egymást követő zónáját mintáztuk meg. Itt a morfológiai különbözőséget a mért értékek is jelzik. Az UB1-es belső zóna izotópos összetételét kialakító környezetet alapul véve, az UB2 zóna kalcitja pozitív  $\delta^{13}\text{C}$  és  $\delta^{18}\text{O}$  eltolódást okozó környezetben jött létre. A pozitív  $\delta^{13}\text{C}$  eltolódás oka a biológiai eredetű  $\text{CO}_2$  mennyiségének csökkenése, míg a pozitív  $\delta^{18}\text{O}$  változás az oldat  $^{18}\text{O}$ -dúsulásának és vagy a kiválási hőmérséklet csökkenésének tulajdonítható. A kiválási hőmérséklet csökkenése a felszíni csapadékvíz mennyiségének növekedéséhez vagy klímaromláshoz köthető, ami viszont az oldat negatív irányú  $\delta^{18}\text{O}$  elmozdulását jelentené. Mindezek alapján a legvalószínűbb magyarázatot a csapadékvíznél pozitívabb  $\delta^{18}\text{O}$  értékkel jellemzett (a Beremendi-kristálybarlang termálvizének  $\delta^{18}\text{O}$  értéke  $-8,8\%$ ) termálvíz feláramlása adhatja meg, ami a pozitív  $\delta^{13}\text{C}$  változást is magyarázhatja. Morfológiai megfigyeléseink is a termálvízszint oly mértékű megemelkedését sejtetik, hogy az UB2-es zóna az egykori termálvízszint szintjében keletkezett (tányér, tálcaszerű morfológia).

Az UB3-as zóna kalcitjának  $\delta^{13}\text{C}$  értéke megegyezik az UB1-es zónáéval, tehát az eredeti (UB1-es zónának megfelelő) csapadékvíz-termálvíz arány állhatott vissza. A  $\delta^{18}\text{O}$  érték negatív eltolódását a negatív  $\delta^{18}\text{O}$  értékű csapadékvíz és a visszavonuló termálvíz által megemelt hőmérséklet együttes hatása okozhatta.

A 11N jelű minta, amit az általunk vizsgált cseppkő felületéről gyűjtöttünk, stabilizotópok szempontjából igen

jól közelíti az UB3-as zóna értékeit ( $\delta^{13}\text{C} = -8,8\%$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -11,0\%$ ). A fizikai közelség és a makroszkópos hasonlóság is a képződési környezet hasonlósága mellett szól.

Ezekhez képest a BB jelű borsókő, amit tipikusan légtérnek tartanak (FORD 1995),  $^{13}\text{C}$ -ben szegényebb környezetet jelez ( $\delta^{13}\text{C} = -9,6\%$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -10,0\%$ ). A párolgási folyamatok (hasonlóan a kigázosodáshoz) a tömegarányok miatt elsősorban a szénizotóp-összetételt befolyásolják. A párolgás folyamán a gázfázis az oldathoz képest több könnyű izotópot tartalmaz. A pára kicsapódása után ismét párolgás szükséges, hogy az ásványkiválás megindulhasson. Ez a párolgási frakcionáció alakíthatta ki a BB jelű minta  $\delta^{13}\text{C}$  értékét. Hasonló folyamatok alakíthatták ki a HB jelű minta (hidegvizes borsókő) izotópos értékeit ( $\delta^{13}\text{C} = -9,9\%$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -10,3\%$ ) de más körülmények között. Míg a BB jelű borsókővet kialakító közeg termálvíz eredetű, addig a HB (hideg vizes borsókő) jelű minta felszíni eredetű vizekből vált ki. Erre a következtetésre elsősorban a terepi megfigyeléseink utalnak, de a mért értékek ezt alátámasztják. A HB jelű borsókőtípus ugyanis elsősorban cseppkőves környezetben fordul elő.

Az ásványkiválást megelőző párolgás jelentős mértékben eltolhatja a kiváló kalcit izotópos összetételét. Ugyanakkor ennek vizsgálatát a jelenleg rendelkezésre álló mintaszám nem teszi lehetővé, így a BB és a HB jelű mintákban észlelt stabilizotópos értékek más módszert (terepi megfigyelést) figyelmen kívül hagyó magyarázata csak hipotézis értékű lenne.

### Cseppkő

A Nagyharsányi-kristálybarlangból származó cseppkődarabon zónánként végeztük el a vizsgálatot. A megmintázott zónák  $\delta^{13}\text{C}$  és  $\delta^{18}\text{O}$  értékeit a 3. ábra mutatja be. A szénizotópos összetétel a cseppkő központi részétől kifelé haladva kezdetben erősen emelkedik, a 6N számú minta (zónában) erősen megugrik, majd ezt követően hibahatáron belül ingadozik. A 6N zóna jelentős eltérését nem mérési hiba, hanem egy hirtelen esemény okozhatta. Erre utal az oxigénizotóp nem jelentős eltérése is.

A növekvő  $\delta^{13}\text{C}$  értéket az 1N zónától az 5N zónáig a gyökérlégzésből származó  $\text{CO}_2$  csökkenő hatásának tulajdonítjuk. A 6N minta szénizotópos összetétele jelentős eltérést mutat. Ha az oldat gyökérlégzésből származó  $\text{CO}_2$ -ot is tartalmaz, akkor a beoldott tengeri mészkő 0% körüli szénizotópos összetételét a gyökérlégzésből származó szén-dioxid negatív irányban tolhatja el. Ez több módon is adódhat:

1. A 6N minta időtartamát reprezentáló időre tényleg olyan mértékben lecsökkent a biológiai aktivitás, hogy csak  $-7\%$ -ig tolja el a beoldott tengeri eredetű mészkő izotópos összetételét. Ezt azonban nem tartjuk valószínűnek, mert az oxigénizotóp-összetétel nem jelez jelentős változást és a környező zónák ilyen változásra nem utalnak.

2. Véleményünk szerint valószínűbb megoldást jelent, hogy a beszívargó víz izotópos összetétele a talajlevegőből a biológiai eredetű szén-dioxid felvétele után a kőzet repedéshálózatába kerülve fokozatos izotópeltolódást szenved. Ez a víz, ami a 6N zóna kiválását okozhatta, jóval hosszabb időt

tölthetett el a kőzet belsejében, így több ideje volt izotópcserére a bezáró kőzettel. Egy hirtelen esemény (pl. tektonikai mozgás) hatására a felnyílt hasadékokban utat talált a barlang belseje felé, ahol kicsapódott belőle a karbonát.

A 6N mintát követő zónákban a  $\delta^{13}\text{C}$  értékei  $-8,8\%$ -es érték körül mozognak, ami stabil környezetre utal.

A Kárpát-medencében a pleisztocén–holocén folyamán lezajlott klímaváltozások hűvös–száraz meleg-csapadékos periódusokkal jellemezhetők. Ha csökken a csapadék, csökkenni fog áttételesen a mindenkori karsztvízszint is, ami a hidrotermás bázist is lesüllyeszti. Tehát a barlang felsőbb zónáiban a normál hideg vizes képződmények (cseppkövek, hideg vizes borsókövek) lesznek az uralkodóak. Ilyen változást tükrözhet az 1N zónától 5N zónáig tartó emelkedés, majd a 10N zónáig tartó csökkenés a  $\delta^{18}\text{O}$  görbén.

A Nagyharsányi-kristálybarlangból származó cseppkő-minta legkülső zónáját képező bekéregzés más típusú. A 11N zónát a cseppkővet bekéregző borsókőszerű képződmény alkotja. Ennek szénizotópos összetétele hasonló mind a BERE1, BERE2, UB1, UB2, UB3 értékekhez, de az oxigénizotóp-összetétel tekintetében leginkább az UB3-as üvegömb borsókő mintához hasonlít (lásd feljebb).

A képződmények stabilizotópos összetételéből fontos információt kaptunk a genetikai környezetre. Részletes további vizsgálatokkal egy-egy ásványtípus vagy képződménytípus pontos keletkezési körülményeit lehet meghatározni a kialakító folyamatok megismerésén keresztül. A kapott részadatok megerősítését és további körülmények tisztázását további mintavételezés és elemzés tenné lehetővé, amihez a Duna-Dráva Nemzeti Park újabb engedélye és segítsége szükséges.

### A csiszolatok, katódlumineszcens vizsgálatok

A cseppkövekből és borsókövekből készült vékony-csiszolatok mikroszkópos vizsgálata során megállapítottuk, hogy a kivált zónák között gyakoriak a korróziós felületek. Ezen korróziós felületek mindegyike egy-egy környezet-változást jelez. A katódlumineszcens vizsgálattal szerencsés esetben a kiválási környezet redoxpotenciál-változásáról kaphatunk információt.

Az üvegömb borsókő csiszolatán jól megfigyelhetők a különböző színű zónák. A zónákat alapvetően két típusú kalcit alkotja: az egyik mikrokristályos, enyhén barna színű, a másik makrokristályos kalcit. A gömbös szerkezetű borsókő zónás (barna) továbbnövekedése, majd bizonyos fokú korróziója után a makrokristályos kalcit sugarasan veszi körbe. Ebben is megfigyelhető bizonyos zonalitás.

Az ún. hideg vizes borsókőnél a korróziós felületek sokkal gyakoribb ismétlődése figyelhető meg. A finom zónás kiválásokat egy korróziós szakasz erodálja, majd egy széles, világos színű zónát épít, ami fokozatosan finomodó rétegzésbe megy át, majd újabb korróziós felület következik. A különböző zónák között a határ nem mindig éles, gyakran széles átmenet van.

A borsókőves cseppkőből készült csiszolaton jól látható a két, különböző típusú képződmény összenövése. A borsókőves cseppkő központi zónájában mozaikszövetű kalcit található, amely az egykori szalmacseppkővet képviseli. Ettől kifelé különböző vastagságú bekéregzések következnek, majd éles színváltás után morfológiai váltás is következik. A csiszolaton is jól látszik a külső bekéregző borsókővek morfológiája.

A vizsgálat során lumineszcens jelenséget nem, vagy csak igen kevés korróziós felületen tapasztaltunk, ami két dologra utalhat:

— az oxidációs-redukciós viszonyok nem változtak a kiválás során,

— nincs olyan Fe-Mn jelen a rendszerben, ami belépne a kalcitrácsba.

Az optikai emissziós méréseink alapján a karbonátok meglehetősen elemszegények, ezért az utóbbit tartjuk valószínűnek.

### Diszkusszió

A nagy, vízzárórétegekkel fedett medencék és a karsztosodó kőzetekből álló hegységek peremén kedvezőek a lehetőségek a keveredési korrózió kialakulására (v.ö. a Budai-hegység termálkarsztjával). A keveredési korrózió barlangalakító hatása régóta ismert (BÖGLI 1965, ERNST 1965, BALÁZS 1966). A barlangok keletkezéséhez szükséges a közhasadékok, tektonikus hasadékok jelenléte, ahol megindulhat az oldatok áramlása és keveredése (JAKUCS 1948, LEÉL-ŐSSY S. 1957). Ez a tektonikus preformáló hatás még a jellegzetesen hidrotermás gömbfülkékkel gazdagon díszített Beremendi-kristálybarlangban is megfigyelhető (TAKÁCSNÉ BOLNER 1986).

A Beremendi-kristálybarlangban a jellegzetes formavilág és ásványos összetétel alapján hamar felismerték a barlang melegvizes eredetét és a jellegzetes, páratlan szépségű ásványkiválások vizsgálata is nagyon hamar, szinte közvetlenül a feltárás után megkezdődött (TAKÁCSNÉ BOLNER 1986, BOGNÁR & KISS 1985).

Ebben a barlangban nem különíthető el két olyan, markánsan eltérő barlangszint, mint a Nagyharsányi-kristálybarlangban, bár a szerény méretű cseppkövesedés inkább az alsóbb járatokban, a tő közelében figyelhető meg, az aragonit tükristályok halmaza pedig inkább a felső részekre jellemző.

Munkánk során az ásványkiválásokat csiszolaton, valamint röntgendiffrakciós, stabilizotópos és optikai emissziós mérések alkalmazásával tanulmányoztuk, emellett elemeztük a beszivárgási viszonyokat. Vizsgálataink különösen a Nagyharsányi-kristálybarlang esetében voltak jelentősek, hiszen erről az objektumról még csak egy rövid ismertetés jelent meg (TAKÁCSNÉ BOLNER in SZÉKELY szerk. 2003). A barlangot Magyarországon példátlanul védik, a teljesen kiépítetlen K-i ágba gyakorlatilag nem adnak ki leszállási engedélyt sem.

A meleg karsztvíz párolgása még ma is biztosítja a barlang felső szakaszán a korróziós gömbfülkék kialakul-

lásának lehetőségét. Ezt az aktív korrodáló hatást ma is megfigyelhetjük a barlang felső, felszínközeli szakaszán, ahol a barlangfalakat vastag málladékkéreg és képződményhiány jellemzi. A barlang ma is épülő, alsó szakasza gazdag kiválásokban. Az aerosolból kiváló aragonit és a hidrotermás kristályosodás utolsó termékeként megjelenő huntit és magnezit jellemzi a rendszert.

A barlang alsó és felső szakaszán megtalálhatók a hideg vizes jellegre utaló cseppkövek, de ezeket a borsókő képződmények vastagon fedik. Ez arra utal, hogy egykoron a ma ismert termálhatás jóval gyengébb lehetett.

A Nagyharsányi-kristálybarlang termál jellegét igazolja a barlang légterének az évi középhőmérsékletet meghaladó hőfoka. A termálvíz szintje a barlangban nem ismert, de a mélység felé fokozatosan nő a hőmérséklet. A mélység felé növekvő termálhatást a barlangi képződményeken is megfigyeltük. A felső szinten sok, kalcittal kitöltött repedés, tektonikus hasadék és normál vető is látható. Az alsó szint, ami egy réteglap mentén alakult ki, már jóval több hidrotermás bélyeget hordoz. A felső szintet a szögletes formák mellett gömbfülkék is díszítik, míg az alsó szintre a gömbfülkék és a lekerekített felületek túlsúlya a jellemző.

A barlang mennyezete meglehetősen képződményszegény, kivételt képeznek a repedésekhez kapcsolódó szalmacseppkövek. A barlang alsó szintjén a cseppkövek felületén, a Beremendi-kristálybarlanghoz hasonlóan „hévizes eredetű” borsókövek találhatók. Ezen a szinten a jellegzetes hidrotermás ásványok (aragonit, magnezit, huntit) a mélység felé egyre gyakoribbá válnak.

A vizsgált két barlang tektonikus preformáltsága egyértelműen bizonyítható. A hévizes ásványtársulás a termális kapcsolatot igazolja. A két barlang közötti alapvető különbség abban nyilvánul meg, hogy míg a Beremendi-barlangnál a termálvizes korrózió hozta létre a barlangjáratokat tektonikus zónák mentén, addig a Nagyharsányi-kristálybarlang eddig ismert szakaszát elsősorban tektonikus mozgások alakították ki.

Ezek alapján mindkét barlang hazánk legjelentősebb földtani értékei közé tartozik. Képződménygazdagságuk és érintetlenségük okán méltán kerültek fel a fokozottan védett barlangok listájára.

## Eredmények

1. Megfigyeléseink szerint a Beremendi-kristálybarlang keveredési korrózióval létrejött, típusos hidrotermás üregrendszer, amire jellemző a labirintusos, több szintben kifejlődött járathálózat, a hirtelen méretváltozás, a gömbfülkék gyakorisága és a változatos, kivételesen gazdag, részben hidrotermás hatásra keletkezett ásvány- és formaegyüttes. A Beremendi-kristálybarlang kis területen alakult ki, nagy termék nem jöttek létre benne. A járatok a Tavas-teremben elérik a recens karsztvízszintet. A termálhatás nyomait stabilizotópos méréseinkben is kimutattuk.

2. A cseppköveken, a falakat bekérgező borsóköveken elvégzett  $\delta^{13}\text{C}$  és  $\delta^{18}\text{O}$  méréseink alátámasztják a gyakorlati

megfigyeléseket, miszerint ezek a borsókövek egy változó, de termálhatás alatt álló környezetben alakultak ki. A BERE1-2-3 -as mintákon elvégzett mérésorozat utal a lehetséges klímahatásra is, de ennek pontos eldöntésére a korlátozott mintaszám nem ad lehetőséget.

3. A Beremendi-kristálybarlangban morfológiai megfigyeléseink alapján a barlangra jellemző hófehér borsókő-együttesek idős képződmények, melyek még a barlangjárat meleg vizes kitöltöttsége idején keletkezettek. Ezek külső zónáját mind makroszkópos megfigyeléseink, mind stabilizotópos méréseink alapján légtér képződmények alkotják.

4. A Beremendi-kristálybarlangban makroszkóposan három, műszeres vizsgálatokkal további hét ásványt határoztunk meg. Ezek az ásványok a következők: huntit, dolomit, magnezit, böhmít, szericit/illit, kvarc, hematit/goethit. Ezek az ásványok nagyrészt csak kis koncentrációban vannak jelen. Ezzel szemben huntitot nagy tömegben tudunk kimutatni a Mosóporos-ágban. Az alumínium tartalmú ásványok a barlang bejáratánál és a belső üregekben szórtan (behullott darabok formájában) fordulnak elő. Ásványos összetételük alapján (böhmittartalom, CSÁSZÁR & FARKAS 1982), a felső bauxitos szinthez tartoznak. A kvarc itt is csak szennyezőként fordul elő.

5. A Nagyharsányi-kristálybarlangban makroszkóposan három ásványt ismertünk fel, műszeres vizsgálattal további kilenc ásvány jelenlétét állapítottuk meg. Ezek az ásványok a következők: dolomit, vasas dolomit, huntit, magnezit, kvarc, szericit/illit, böhmít, kandit, klorit. Ezek közül a kvarc szennyezőként volt jelen több mintában is, az agyagok a barlangok mélyedéseiben halmozódtak fel, a huntit az alsó szinten a borsókövek felületén keletkezett, a dolomit a hullott huntitos mintákban nyomokban fordul elő a magnezittel együtt.

6. A Nagyharsányi-kristálybarlang felső szakasza alapvetően tektonikus eredetű, egyenes vonalakkal határolt nagyméretű termék jellemzi. Alsó szakasza egy réteglap megcsúsúzása mentén alakult ki. Az erős tektonikus preformáltságot követően a termálkarsztos korrózió vette át az üregalakító és ásványképző szerepet.

7. A Nagyharsányi-kristálybarlang felső szintjén több képződménygenerációt különítettünk el. A legidősebbnek tartott bekérgezéseken idős, ma már erősen korrodált cseppkő-generáció alakult ki. Ezek korrodált, visszaoldott felszínét a barlang felső szakaszának jellegét meghatározó, legfiatalabbnak tartott borsókő-generáció növi be. Az ilyen típusú (UB) képződményekből zónánként végzett  $\delta^{13}\text{C}$  és  $\delta^{18}\text{O}$  méréseink egyértelműen a változó termálhatás jelenlétére utalnak. A második, már fiatalabb cseppkő-generációt kisebb termetű nem erodált felszínű képződmények alkotják. Ennek a generációnak egy darabján (N1–10-ig) elvégzett zónánkénti stabilizotópos vizsgálatunk eredménye klímaváltozási jegyekre utal. A harmadik, egyben a legfiatalabb cseppkő-generációt tömör halvány kávébarna színű képződmények jelentik. A különböző képződmény-generációk felületét nagyrészt a barlang felső szakaszának jellegét meghatározó üveggömb borsókövek borítják.

8. A Nagyharsányi-kristálybarlangban a cseppkövek és a borsóköves periódusok váltakozását stabilizotópos méréseink alapján klimatikus okokra vezettük vissza. Megfigyeléseink szerint a felső szakaszon ma ismét a meteorikus eredetű vizek a dominánsak, olyannyira, hogy egyes képződmények korróziója is megkezdődött már.

### Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a Duna-Dráva Nemzeti Park előző igazgatójának, IVÁNYI Ildikónak, ill. HAVASI Ildikó osztályvezetőnek, akik részünkre a kristálybarlangok bejárását, a korlátozott számú mintavételezést engedélyezték és

mindehhez a kiszállások idejére PARRAGH Tibor személyében barlangi vezetőt is biztosítottak részünkre. A mintákon elvégzett röntgen-pordiffrakciós vizsgálatok kiértékelésében LOVAS György volt segítségünkre, az optikai emissziós színképelemzési eredmények kiértékelését NAGY Bélánéval (ELTE) végeztük, a vékonycsiszolatok katód-lumineszcens vizsgálatát MINDSZENTY Andrea (ELTE) segítségével készítettük el. A vízminta elemzéseket KAVERO István (VITUKI), BOGNÁR Csaba (OKI), és FÓRIZS István (MTA GKI) készített számunkra. A bakteriológiai elemzés kiértékelésében MÁRIALIGETI Károly (ELTE) volt segítségünkre. A lelkiismeretes lektori munkát TAKÁCSNÉ BOLNER Katalinnak (KvVM) és SZAKÁLL Sándornak (ME) köszönjük. Köszönjük az OTKA T 049713 támogatását.

### Irodalom — References

- ALFÖLDI L., BÖCKER T. és LORBERER Á. 1977: Magyarország repedezett hévíztárolóinak hidrogeológiai jellemzése. — In: Magyarország hévízkutatás katasztere VITUKI I. Vízrajzi Intézet kiadványa, 49 p.
- BALÁZS D. 1966: A keveredési korrózió szerepe a karsztosodásban. — *Hidrologiai Közlemények* **1966/4**, 179–184.
- BENKOVICS, L. 1997: Étude structurale et géodynamique des Monts Buda, Mecsek et Villány (Hongrie). — PhD. Thesis, Univ. Lille, 148 p.
- BERGERAT, F. & CSONTOS, L. 1988: Brittle tectonics and paleo-stress filled in the Mecsek and Villány Mts. (Hungary): Correlation with the opening mechanism of the Pannonian Basin. — *Acta Geol. Hung.* **31**, 81–100.
- BOGNÁR L. & KISS J. 1985: Kutatási jelentés a Beremendi-kristálybarlang ásványtani vizsgálatáról. — Kézirat, ELTE Ásványtani Tanszék, Budapest, 37 p.
- BÖGLI, A. 1963: Beitrag zur Entstehung von Karsthöhlen. — *Die Höhle* **14/3**, 63–68.
- BÖGLI, A. 1965: The role of corrosion by mixed water in cave forming. — In: STEKL, O. ed.: *Problems of the Speleological Research*. Czechoslovak Academy of Science, Prague, 125–131.
- CULVER, C. C. & WHITE, W. 2005: *Encyclopedia of Caves*. — Elsevier, California, 654 p.
- CSÁSZÁR, G. 1989: Transgressive Urgonian Sequence with black “pebbles” from the Villány Mountains, Hungary. — *Acta Geol. Hung.* **31/1–2**, 3–29.
- CSÁSZÁR, G. 1992: Urgonian facies of the Tisza Unit. — *Acta Geol. Hung.* **35/3**, 263–285.
- CSÁSZÁR, G. 2002: Urgan formations in Hungary. — *Geologica Hungarica series Geologica* **25**, 209 p.
- CSÁSZÁR G. & FARKAS L. 1982: Újabb bauxitszintre utaló indikációk a Villányi-hegységben. — MÁFI Évi Jelentése az 1982-es évről, 237–244.
- DEÁK J. 1995: *A felszín alatti vizek utánpótlódásának meghatározása izotópos módszerekkel az Alföldön*. — Vituki Zárójelentése, Budapest, 74 p.
- DEMÉNY, A. & FÓRIZS, I. 1991: On some preparation methods in stable isotope mass spectrometry and their geochemical applications. — *Rapid Communications in Mass Spectrometry* **11**, 524–526.
- DUBLJANSKI, Y. 1989: The main principles of development and the diagnostic criteria of a carbonate hydrothermal karst. — Proceedings, 10th International Congress of Speleology, Budapest, 77–79.
- DUBLJANSKI, Y. 1995: Speleogenetic history of the Hungarian hydrothermal karst. — *Environmental Geology* **25**, 24–35.
- ERNST, L. 1965: A keveredési korrózió kérdéséhez. — *Karszt és Barlang* **1965/1**, 61–63.
- FORD, D. C. 1988: Characteristics of Dissolutional Cave System in Carbonate Rocks. — In: CHOQUETTE, P. W. & JAMES, N. P. eds: *Paleokarst*. Springer-Verlag, New York. 25–57.
- FORD, D. C. 1995: Some thoughts on hydrothermal caves. — *Cave and Carst Science* **22/3**, 107–118.
- FORD D. C. & WILLIAMS, P. W. 2007: *Karst Geomorphology and Hydrology*. — Wiley, West Sussex 562 p.
- FÓRIZS, I. 1995: Rétegvizek eredete és a hozzájuk keveredő friss talajvíz kimutatása stabilizotóp mérésekkel. — Kézirat. Egyetemi doktori dolgozat, Kossuth Lajos Tudományegyetem, 109 p.
- FRIEDMAN, I. & O’NEIL, J. R. 1977: Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest. — In: Paper ed, Data of Geochemistry 6th, 440-KK.
- FÜLÖP J. 1966: A Villányi-hegység kréta időszaki képződményei. — *Geologica Hungarica series Geologica* **15**, 131 p.
- FÜLÖP J. 1994: *Magyarország geológiája Paleozoikum II*. — Akadémiai Kiadó, Budapest, 445 p.
- GÉCZY B. 1973: Lemeztektonika és paleogeográfia kelet-mediterrán mezozoos térségben. — *Geonómia és Bányászat, MTA X. Osztály Közleményei* **6/1–4**, 219–225.
- HAAS J. 1994: *Magyarország földtana: mezozoikum*. — Egyetemi jegyzet. ELTE, Budapest, 384 p.

- HAAS J. & HÁMOR G. 1998: Magyarország területe, szerkezetfejlődésének összefoglalása. — In: BÉRCZI I. & JÁMBOR Á. (szerk.): *Magyarország geológiai képződményeinek rétegtana*. MOL–MÁFI, Budapest, 45–54.
- Hámor G. 1997: A magyarországi miocén fejlődéstörténete és ősföldrajza. — In: Haas J. (szerk.): *Fülöp József emlékkönyv*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 231–250.
- HILL, C. A. & FORTI, P. 1997: *Cave minerals*. — Huntswill, Alabama, USA, 463 p.
- JAKUCS L. 1948: A hévforrásos barlangkeletkezés földtani és fizikai tényezői. — *Hidrológiai Közöny* **28**, 53–58.
- KÁRPÁT J. 1985: A Beremendi-kristálybarlang térképe. — Kézirat. Országos Barlangnyilvántartás, Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, Barlangtani és Földtani Osztály, 3 p.
- KEELING C. D. 1958: The concentration and isotopic abundance of atmospheric carbon dioxide in rural areas. — *Geochimica Cosmochimica Acta* **13**, 322–334.
- KLIMCHOUK, A. B., FORD, D. C., PALMER, A. N. & DREYBRODT W. 2000: *Speleogenesis*. — Huntsville, Alabama, 528 p.
- KOBLENCZ V. & NEMECZ E. 1953: Huntit előfordulása Dorogon. — *Földtani Közöny* **83**, 391–395.
- KRAUS, S. 1991: A budai barlangok hévizes karbonátkiválásai. — *Karszt és Barlang* **1990/II**, 91–96.
- KRAUS, S. 1993: A Szemlő-hegyi-barlang vízszintváltozása. — *Karszt és Barlang* **1993/I–II**, 47–53.
- LEÉL-ÓSSY S. 1957: A Budai-hegység barlangjai. — *Földrajzi Értesítő* **6**, 155–167.
- LEÉL-ÓSSY Sz. 1997: A József-hegyi-barlang (Budapest) termálkarsztos keletkezése és fejlődése. — Kézirat. Kandidátusi értekezés, ELTE, Budapest, 114 p.
- MAHLER, B. J. PERSONNÉ, J.-C., LYNCH, F. L., VAN METRE, P. C. in SASOWSKY, I. D. & MYLROIE, J. 2004: Sediment and sediment-associated contaminant transport through karst. — In: SASOWSKY, I. D. & MYLROIE, J. (eds): *Studies of Cave sediments*. — Kluwer, New York, 23–46.
- MCCREA, J. M. 1950: On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. — *The Journal of Chemical Physics*. **18**, 849–857.
- NAGY E. & NAGY I. 1976: A Villányi-hegység triász képződményei. — *Geologica Hungarica series Geologica* **17**, 111–228.
- NO SZKY J. 1957: Kiértékelő jelentés az 1952-ben Villányi-hegységben végzett reambuláló földtani vizsgálatokról. — Kézirat. MÁFI Adattár.
- O'NEIL, J. R., CLAYTON, R. N. & MAYEDA, T. K. 1969: Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. — *The Journal of Chemical Physics* **51**, 5547–5558.
- PLUMMER, L. N. 1975: Mixing of seawater with calcium carbonate groundwater. — *Geol. Soc. Amer. Memoirs* **142**, 219–236.
- Pro Natura Karszt- és Barlangkutató Egyesület 1998: Jelentés az 1997-es kutatási évről. — Kézirat. Magyar Karszt és Barlangkutató Társulat, 43 p.
- RAKUSZ Gy. 1937: Adatok a Harsány-hegy bauxit szintjének ismeretéhez. — *MÁFI Évi Jelentés 1929–1932-ről*, 215–233.
- SCOFFIN, T. P. 1987: *An introduction to carbonate sediments and rocks*. — Blackie, USA, 274 p.
- SZÉKELY K. (szerk.) 2003: *Magyarország fokozottan védett barlangjai*. — Mezőgazda, Budapest, 426 p.
- TAKÁCSNÉ BOLNER K. 1981: Új feltárások a Pál-völgyi-barlangban. — *Karszt és Barlang* **1980/I**, 87–92.
- TAKÁCSNÉ BOLNER K. 1986: A Beremendi-kristálybarlang. — *Karszt és Barlang* **1985/I–II**, 3–12.
- TAKÁCSNÉ BOLNER K. & KRAUS S. 1989: A melegvizes eredetű barlangok kutatásának eredményei. — *Karszt és Barlang* **1989/I**, 61–66.
- TELEGDI ROTH K. 1937: Jelentés az 1930. és 1931. években a Bakony-hegységben és a Villányi-hegységben végzett bauxitkutatásokról. — *MÁFI Évi Jelentés 1929–1932-ről*, 197–213.
- TÓTH M. 1998: Magyarországi barlangok ásványtársulásainak kutatása. — Kézirat. MTA Geokémiai Kutatóintézet 53 p.
- VIGASSY T. 1999: A Nagyharsányi- és a Beremendi-kristálybarlangok és képződményeinek genetikai vizsgálata. — Kézirat, Egyetemi diplomamunka. ELTE-TTK, Általános és Történelmi Földtani Tanszék, Budapest, 135 p.
- WEIN Gy. 1969: Újabb adatok a Villányi-hegység szerkezetéhez. — *Földtani Közöny* **99**, 47–59.
- ZÁMBÓ L. 1986: A talaj-hatás jelentősége a karszt korróziós fejlődésben. — Kézirat, Kandidátusi értekezés. MTA, Budapest, 150 p.
- ZENTAL, P. 1967: Spectrochemical methods for geochemical purposes. — *Acta Chim. Acad. Sci. Hung.* **53/4**, 323–333.
- Kézirat beérkezett: 2008. 11. 25.

## I. tábla — Plate I

- 1-2. Cseppkő és borsókőgenerációk váltakozása a Nagyharsányi-kristálybarlangban
- 1-2. *Changing of dripstone and popcorn generations in the Nagyharsány Crystal Cave*
3. Aragonittűk kalcitkérgen a Beremendi-kristálybarlangban
3. *Aragonite needles on calcite crust in the Beremend Crystal Cave*
4. Vízcepek az aragonittűkön a Beremendi-kristálybarlangban
4. *Dripping water on aragonite in the Beremend Crystal Cave*
5. Aragonitbokor a Beremendi-kristálybarlangban
5. *Aragonite brush in the Beremend Crystal Cave*

Fotó: Kovács Richárd

Photo: Richárd Kovács

I. tábla — Plate I

