

MTA doktori értekezés  
TÉZISEK

**Barlangi jégüledékből nyert koradatok és  
geokémiai paraméterek értelmezése európai  
példákon**



**Kern Zoltán**

Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont  
Földtani és Geokémiai Intézet

Budapest, 2023

*címlapon: Jégcseppkőre települt zúzvara. Kungur-jégbarlang (Oroszország, 2009. május 13.). Az alakzat magassága kb. 1 m.*

## Bevezetés

A krioszféra (azaz a földi rendszer fagyott része) szinte minden észlelhető mérőszáma az utóbbi évtizedekben a fagyvilág zsugorodásáról és melegedéséről tanúskodik (AMAP, 2011; IPCC, 2019). A mennyiségi és hőmérsékleti változások mellett azonban a jégvilág számos egyéb fizikai és kémiai paramétert kínál a napjainkban zajló és a múltban lezajlott környezetváltozások kutatásához.

Bár egyes becslések szerint a mérsékelt övi barlangok mintegy 10%-ában találkozhatunk többéves vagy évszakos jégfelhalmozódással (Mavlyudov 1989), mégis a krioszféra talán egyik legkisebb és legkevésbé ismert szegmensét képviselik a barlangi jégfelhalmozódások. Többéves jégüledéket rejtő barlangok gyakran fordulnak elő olyan területeken, ahol nincs felszíni jégborítás és a felszíni éves középhőmérséklet jóval fagypont felett alakul. Ezek a jégfelhalmozódások így különösen érzékenyek a felszínközeli melegedésre.

A barlangi jégösszletek felhalmozódási idejének keltezését célzó újabb erőfeszítések igazolták, hogy akár a kora holocén idejéből megőrződött jégrétegekre is számíthatunk egyes barlangokban (Perşoiu et al., 2017; Sancho et al., 2018; Racine et al., 2022). Az elmúlt évek kutatásai feltárták, hogy a barlangi jégfelhalmozódások az éghajlati és környezeti proxy információk (pl. a jég

stabilizotópos paramétereit, kifagyásos karbonátok, növényi makro- és mikrofoszfátok stb.) gazdag kincsestárát rejtik (Turri et al., 2009; Perşoiu, 2018). A barlangi jégben a növényi makro- és mikrofoszfátok kitűnő megőrzését, valamint a kinyert maradványok alapján a barlangkörnyéki területen lezajlott növényzeti változások rekonstrukciójának nagyszerű lehetőségét egyre több új kutatás is megerősíti (Feurdean et al., 2011; Leunda et al., 2019; Jelonek et al. 2020). A barlangi jégüledékek geokémiai szempontú vizsgálata, a kinyerhető geokronológiai és glaciokémiai információk alkalmazása éghajlati és környezeti rekonstrukciókban még nemzetközi téren is új kutatási iránynak számít.

Az elmúlt mintegy 20 évben öt ország kilenc jégbarlangjában folytattam terepi és labormódszereket is alkalmazó kutatásokat. A kutatómunka elsősorban barlangi monitoring vizsgálatokat, valamint a jégösszetételből gyűjtött minták geokémiai és geokronológiai elemzését foglalta magába. Ezek közül a jégbarlangi projektek közül két kiemelt helyszínen, amelyekhez több évnyi kutatómunka kapcsolódik, a horvátországi Velebit (Kern et al., 2011a, 2018a; Kern és Perşoiu 2022) és az ausztriai dachsteini Mammuth-barlang (Kern et al., 2011b, 2018b; Kern és Perşoiu 2022). Ezeket választottam, hogy az összegyűjtött adatokat és ismereteket szintetizálva esettanulmányokon keresztül bemutathassam az elvégzett kutatómunka fontosabb eredményeit.

## Eredmények, Tézisek

A barlangi jégüledékek kutatásának területén a PhD fokozat megszerzése óta eltelt időszakban elért új, az értekezésben részletezett tudományos eredményeket az alábbiakban összegzem.

A barlangi jégfelhalmozódások sokéves térfogatváltozásait számszerűsítő információk kiértékelésével rámutattam, hogy **(T1) az elmúlt mintegy 120 évben a jégbarlangok világszerte drasztikus jégtömegvesztést szenvedtek el.** Ez a folyamat sarkallta a kutatói közösséget, hogy élénkebb erőfeszítéseket tegyen a barlangi jégben tárolt környezettörténeti adatok feltárására.

**(T2) A Velebit három barlangi jéglelőhelyéről származó radiokarbon adatok azt mutatják, hogy a vizsgált barlangi jégösszletek közül kettő a Dinári-karszton korábban dokumentálnál idősebb szerves anyagot őriz.** Sőt, a Vukušić-jégbarlang alsó rétegeiben nagy valószínűséggel akár 3500 évnél is idősebb jégrétegek őrződtek meg.

**(T3) A Vukušić-jégbarlang esetében a vízjég stabil hidrogén- és oxigénizotópos-összetételének (röviden jelölve  $\delta^2\text{H}$  és  $\delta^{18}\text{O}$ ) ingadozási tartománya, mind a jégből származtatott  $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$  adatok kovarianciáját jellemző ú.n. izotópos vízvonal lényegesen jobban egyezik a helyi csapadék megfelelő paramétereivel, mint a Ledena-akna esetében. Ez a tény azt vetíti előre, hogy a**

két barlangi jégüledék közül a **Vukušić-jégbarlang jégösszletéből nyerhető stabilizotópos adatok alkalmasabbak lehetnek paleoklimatológiai vizsgálatokhoz**, bár a bonyolult sztratigráfia komoly kihívás elé állítja a kutatást.

A Vukušić-jégbarlang padozati jegéből mért elemkoncentrációk és elemarányok alapján arra a következtetésre jutottam, hogy **(T4a) jégbarlangi környezetben csak azok a kémiai elemek őrizhetnek megbízható légköri ülepedési jeleket, amelyek nem korrelálnak a kalciummal**. Ez más barlangi jégösszletek glaciokémiai elemzésekor is hasznos értelmezési eszköz lehet. Valamint, hogy **(T4b) a Vukušić-jégbarlang esetében a Cr, a Cu, a Pb és a Zn koncentrációváltozásai valószínűleg a múltbeli légköri ülepedés változásait tükrözik**.

A Saarlalle jégblokkból kiemelt jégfurat stabilizotópos jellemzői alapján bizonyítottam, hogy **(T5a) a kis elektrolitikus vezetőképességgel jellemzett jéggrétegek nem képződhettek a vízgőz kondenzációjával**, valamint kimutattam, hogy **(T5b) ez a barlangi jégüledék feltehetően az idősebb karsztvíz és a frissen beszivárgó csapadékvíz keveredésével, nyílt rendszerben zajló fagyással gyarapodó rendszer terméke**. A kevert eredet miatt a szelvény mentén tapasztalható stabilizotópos összetételbeli változások paleoklimatológiai vagy paleokarszthidrológiai értelmezése problémás.

A jégolvadékból és az oldhatatlan szerves szénfrakcióból nyert radiometrikus adatok együttes értelmezése alapján arra a következtetésre jutottam, hogy **(T6) a Saarahalle-jégblokk felhalmozódása i. e. 2378 és 1590 között** (95,4%-os valószínűségi tartomány) **kezdődött és 2009. szeptemberében az i. sz. 1970-es évek végén hullott csapadék alkotta a jégtömb felszíni rétegét.** Ezzel a Saarahalle-jégtömb az Alpok legidősebb barlangi jégösszletei közé tartozik.

A barlangi jégüledékből származó saját és irodalmi stabilizotóp-összetétel adatok kiértékelése során gyűjtött tapasztalataim alapján **(T7) javasoltam a  $\delta^2\text{H}$  – d-többség kapcsolat figyelembevételét a környezetrekonstrukció alkalmazására való alkalmasság értékelésekor.**

A barlangi jegekkel kapcsolatos kutatómunka fenti eredményeinek jelentősége az, hogy a világszerte megfigyelt olvadási folyamat okán egy eltűnéssel fenyegetett ám szinte teljesen kiaknázatlan környezeti archívumról szolgáltat alapszintű adatokat. Fontos, hogy nagyobb tudományos figyelmet szenteljünk a barlangi jégüledékek komplex vizsgálatának, hogy a jégképződmények eltűnése előtt még kiolvassuk és megmentsük a bennük tárolt és mindmáig nagyrészt kiaknázatlan őskörnyezeti információkat.

## Irodalomjegyzék

**A téziseket alátámasztó publikációk** (a PhD fokozatszerzés óta)

- Kern, Z., Széles, E., Horvatinčić, N., Fórizs, I., Bočić, N., Nagy, B. (2011a) Glaciochemical investigations of the ice deposit of Vukušić Ice Cave, Velebit Mountain, Croatia. *The Cryosphere* 5: 485–494.
- Kern, Z., Fórizs, I., Pavuza, R., Molnár, M., Nagy, B. (2011b) Isotope hydrological studies of the perennial ice deposit of Saarahalle, Mammuthöhle, Dachstein Mts, Austria. *The Cryosphere* 5: 291–298.
- Kern, Z., Perşoiu, A. (2013) Cave ice – the imminent loss of untapped mid-latitude cryospheric palaeoenvironmental archives. *Quaternary Science Reviews* 67: 1–7.
- Kern, Z. (2018) Dating cave ice deposits. In: Perşoiu, A. and Lauritzen, SE (eds) *Ice Caves*, Elsevier pp.109–122.
- Kern, Z. Bočić, N., Sipos, Gy. (2018a) Radiocarbon dated vegetal remains from the cave ice deposits of Velebit Mt., Croatia. *RADIOCARBON* 60: 1391–1402.
- Kern Z., Molnár, M., Palcsu, L., Pavuza R. (2018b) Age estimates on the deposition of the cave ice block in the Saarahalle Dachstein-Mammoth Cave (Mammuthöhle, Austria) based on  $^3\text{H}$  and  $^{14}\text{C}$ . *RADIOCARBON* 60: 1379–1389.
- Kern, Z., Perşoiu A. (2022) Review of ice core drilling in cave environment – challenges, achievements and future directions. *Front. Earth Sci.* 9:720038.



további hivatkozott irodalom

- AMAP (2011) Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norvégia. xii + 538 p.
- Feurdean, A., Perşoiu, A., Pazdur, A., Onac, B. P. (2011) Evaluating the palaeoecological potential of pollen recovered from ice in caves: A case study from Scărişoara Ice Cave. Romania. *Review of Palaeobotany and Palynology* 165: 1–10.
- IPCC (2019) IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. In: Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer N.M. (szerk.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 755 p.
- Jelonek, M., Zelinka, J., Gradziński, M., Madeja, J. (2020) Age and pollen analysis of cave ice, Dobšiná Ice Cave, Slovakia. *Aragonit* 25: 43.
- Leunda, M., González-Sampériz, P., Gil-Romera, G., et al. (2019) Ice cave reveals environmental forcing of long-term Pyrenean tree line dynamics. *J Ecol.* 107: 814–828.
- Mavlyudov, B. R. (1989) Caves glaciation. In: *Proceedings of the 10th International Congress of Speleology*, vol. 1, pp. 298–300.
- Perşoiu, A., Onac, B.P., Wynn, J.G., Blaauw, M., Ionita, M., Hansson, M. (2017) Holocene winter climate variability in Central and Eastern Europe. *Sci. Rep.* 7: 1196.

- Perşoiu, A. (2018) Paleoclimatic significance of cave ice. In: Perşoiu, A. és Lauritzen, S.E. (szerk.) *Ice Caves*, Elsevier, pp.189–198.
- Racine, T.M.F., Reimer, P.J., Spötl, C. (2022) Multi-centennial mass balance of perennial ice deposits in Alpine caves mirrors the evolution of glaciers during the Late Holocene. *Sci Rep* 12: 11374.
- Sancho, C., Belmonte, Á., Bartolomé, M., Moreno, A., Leunda, M., López-Martínez, J. (2018) Middle-to-late Holocene palaeoenvironmental reconstruction from the A294 ice-cave record (Central Pyrenees, northern Spain). *Earth Planet. Sc. Lett.* 484: 135–144.
- Turri, S., Maggi, V., Bini, A. (2009) Ice caves as natural archives in the palaeoclimatic studies. *Data Glac Stud (Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy)* 107: 163–169.



