

# O STAROSTI I RECENTNOJ DINAMICI LEDA U SPELEOLOŠKIM OBJEKTIMA VELEBITA



Vukušić sniježnica | Foto: Neven Bočić

## Neven Bočić

Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geografski odsjek, Zagreb, Hrvatska

U speleološkim objektima koji zadovoljavaju određene uvjete mogu nastati sezonske, višegodišnje i trajne pojave leda. U Hrvatskoj ih je najviše na Velebitu. U ovom se radu daje pregled novijih istraživanja o recentnoj dinamici leda te o njegovoj starosti u nekoliko odabranih lokaliteta na područja Srednjeg i Sjevernog Velebita. Glavni zabilježeni trend je naglo topljenje leda te smanjivanje njegove količine. Gubitak u ledenoj jami u Lomskoj dulibi u razdoblju 1955.-2017. procjenjuje se na oko 8000 m<sup>3</sup>. Uzorci organskog materijala uklopljenog u špiljski led datirani su radiokarbonskom metodom. Najveća zabilježena starost takvog materijala je oko 3200 godina što je podatak o trenutnoj najvećoj poznatoj starosti leda u hrvatskom te cijelom Dinarskom kršu.

**Ključne riječi:** speleologija, led, ledenice, datiranje leda, klimatske promjene, Velebit, Hrvatska

**Keywords:** speleology, ice, ice caves, ice dating, climate change, Velebit, Croatia

## ► Uvod

Speleolozima su poznate špilje i jame u kojima se trajno zadržava led. U Hrvatskoj se najčešće nazivaju ledenice (*eng. ice caves*). U kršu Hrvatske trenutno ih je poznato preko 320, od čega ih je na području Velebita zabilježeno 230 (Buzjak i dr., 2018). Dinamika špiljskog leda je vrlo složena pa on često predstavlja i opasnost za speleologe (npr. Bočić, 1997; Jelinić, 1999; Bočić, 2014; Rnjak i Bakšić, 2019). Speleolozi u Hrvatskoj već nekoliko desetljeća primjećuju smanjivanje količine leda u speleološkim objektima. Dok se spuštaju niz ledene naslage i prolaze između stijena i slojeva leda speleolozi se često zapitaju koliko je taj led star. U ovom članku se daje kratki pregled novijih spoznaja o recentnoj dinamici i starosti špiljskog leda u hrvatskom kršu, a na temelju nekoliko primjera s područja Velebita.

## ► Led u speleološkim objektima

Led u speleološkim objektima se može pojavljivati sezonalno, višegodišnje i trajno. U ovom članku fokus je na trajnom ledu. Mnogi su preduvjeti potrebni da bi došlo do stvaranja leda u speleološkim objektima. Mavlyudov (2018) naglašava značaj vanjskih uvjeta, podzemne klime, speleomorfologije i hidroloških uvjeta. Od vanjskih uvjeta najvažnije da je temperatura zraka bar dio godinje negativna. Također, temperatura špiljskog zraka mora biti negativna što je moguće ako s površine u speleološki objekt pritiče ohlađeni zrak i/ili ako se u njima akumulira snijeg i led. Akumuliranje leda se događa u speleološkim objektima sa specifičnom morfologijom: (i) u horizontalnim špiljama s dva ili više ulaza na različitim visinama, (ii) u špiljama s kanalima nagnutim od ulaza te (iii) u vertikalnim jamama. Od hidroloških uvjeta od presudnog je značaja ulazi li voda u speleološki objekt.

Led u speleološkim objektima može nastati kongelacijom (zaleđivanjem vode), sublimacijom (stvaranje

kristala leda iz vodene pare), akumulacijom snijega te njegovom promjenom (metamorfizmom, dijagenozom) u firn i led (Mavlyudov, 2018). Ovisno o uvjetima ovi procesi se mogu kombinirati. Bella (2018) je na temelju morfologije i nastanka sve pojave leda u speleološkim objektima podijelio u 12 tipova. Veliki blokovi leda u velebitskim jamama najčešće su nastali akumulacijom i dijagenozom snijega u kombinaciji sa zaleđivanjem tekuće vode. Zbog svoje uslojenosti takvi ledeni blokovi su povoljni za datiranje. Datiranje tj. određivanje starosti leda nije lak zadatak. Starost leda najčešće se određuje indirektno. Najviše se koristi radiokarbonska metoda tj. mjerenje koncentracije radioaktivnog izotopa ugljika  $C^{14}$  (Kern, 2018). Ova se metoda primjenjuje na uzorke organskog porijekla tj. na ostatke vegetacije (debla, grane, lišće) koji su upali u speleološki objekt te ostali uklopljeni u naslagama leda. Koncentracija izotopa ugljika  $C^{14}$  se nakon smrti organizma uslijed radioaktivnog raspada smanjuje. Mjerenjem trenutne koncentracije  $C^{14}$  iz uzorka i usporedbom s početnom koncentracijom može se utvrditi koliko je prošlo vremena od smrti organizma. Uz pretpostavku da je organski materijal ostataka vegetacije odmah upao u jamu podatak o njegovoj starosti govori nam o minimalnoj starosti sloja leda koji se nalazi ispod.

Brojni istraživači primijetili su ubrzano otapanje leda u speleološkim objektima u posljednjih 20-30 godina (Peršoiu, 2018a). Značajnije otapanje leda u pojedinim speleološkim objektima u Hrvatskoj iznenada je omogućilo i njihovo daljnje speleološko istraživanje (Jelinić i dr., 2001). Međutim te pojave su povećale zabrinutost zbog utjecaja klimatskih promjena. Led u speleološkim objektima također je i arhiv podataka o paleoklimi i paleookolišu (Peršoiu, 2018b) koji se uslijed topljenja biva trajno uništen.

## ► Istraživanja leda u speleološkim objektima u Hrvatskoj

U Hrvatskoj je dosad proveden veći broj istraživanja špiljskog leda koja su imala za cilj utvrditi geografski raspored špilja i jama ledenica, starost leda te njegove geokemijske karakteristike i geomorfološki značaj. Najdetajniji pregled istraživanja jamskog i špiljskog leda u kršu Hrvatske dan je u poglavlju *Ice Caves in Croatia* N. Buzjaka i suradnika (Buzjak i dr., 2018) u okviru najsveobuhvatnije knjige o toj temi - *Ice Caves*, urednika Aurela Peršoiu i Stein-Eriika Lauritzena (Peršoiu i



Lauritzen, 2018). Znatno kraća verzija, ali na hrvatskom jeziku, može se pronaći kao poglavlje *Geografska rasprostranjenost i značajke speleoloških objekata sa snijegom i ledom* (Buzjak i dr. 2019) u knjizi *Speleologija* (Rnjak, 2019). Nakon toga objavljeno je još nekoliko radova koji se prvenstveno bave starosti i dinamikom leda u izabranim speleološkim objektima u Hrvatskoj. Kern i suradnici (Kern i dr. 2018, 2020) datiranjem ostataka organskog materijala određuju starost leda u odabranim jamama Velebita dok Peršoiu i suradnici istražuju naglo topljenje leda u Crnoj lednici na Biokovu (Peršoiu i dr., 2018, 2021). Buzjak i

dr. (2018) istražuju mikroklimatske uvjete u Crnoj lednici na Biokovu.

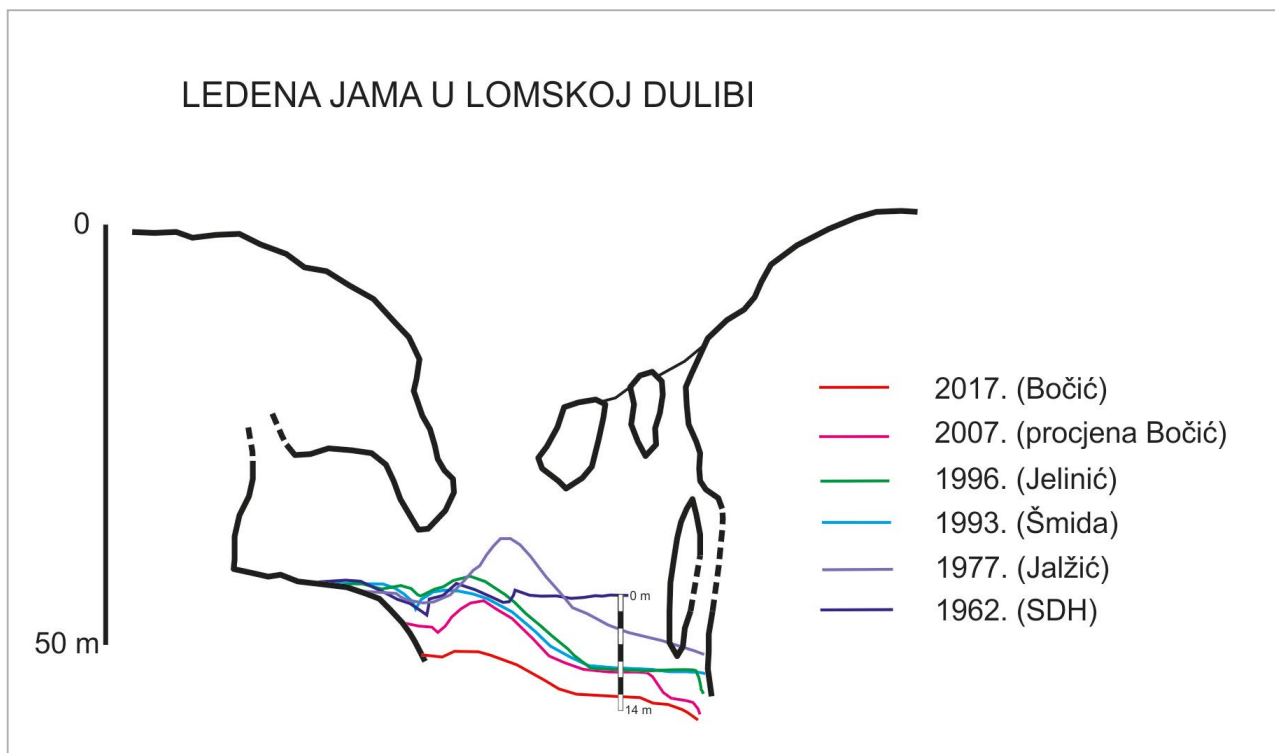
### ► Recentna dinamika leda u speleološkim objektima Velebita

Hrvatski speleolozi koji često istražuju speleološke objekte s trajnim ledom zapazili su njegovu izraženu dinamiku. Situacija s razinom i količinom leda gotovo niti na jednom istraživanju nije ista kao na prethodnom. Većinom su uočena smanjivanja količine leda. Ponekad je u nekim jamama uočeno i povećanje razine leda, ali to je vjerojatno povezano

s njegovim pomicanjem i urušavanjem te tako zatvaranjem prolaza i mijenjanjem mikroklimatskih i morfoloških uvjeta. Jedna od metoda istraživanja dinamike razine i količine trajnog leda je usporedba zabilježenog stanja na više generacija nacрта istog objekta. S obzirom na veći broj različitih nacрта, za primjenu ove metode odabrana je Ledena jama u Lomskoj dulibi (slika 1, o jami vidi u Jelinić, 1999). Uspoređeni su svi dostupni podaci s nacрта u razdoblju od 1962. do 2017. (slika 2). Izuzetak je 2007. godina za koju je napravljen procjena na temelju fotografija. Za mjerenja stope promjene izabrana je lokacija u jugoistočnom dijelu



**Slika 1.** Istraživanje promjena količine leda i geomorfoloških posljedica istoga u Ledenoj jami u Lomskoj dulibi. | Foto: Dinko Stopić



**Slika 2.** Razina leda u Ledenoj jami u Lomskoj dulibi zabilježene na temelju više topografskih izvora.

jame, tamo gdje je gornja površina ledenog bloka relativno ravna i međusobno usporediva (skala 0 – 14 m na slici 2).

Iznos promjena razine leda na temelju grafičkih informacija prikazan je na slici 3. Vidljivo je da je izmjerena razina leda u razdoblju od 55 godina (1962.-2017.) pala za 12,2 m što je prosječna stopa od 0,22 m/godišnje. Naravno intenzitet promjene nije bio konstantan što se vidi iz oblika krivulje na slici 3. Ipak, za točnije i detaljnije spoznaje o ovoj pojavi trebalo bi više podataka. Također, ova metoda ima svoje nedostatke. Nacrte su izrađivali različiti autori u većim vremenskim razdobljima, a vjerojatno su korištene različite tehnike i oprema za snimanje. Razlikuju se i stupnjevi detaljnosti i preciznosti koji su korišteni pri snimanju. Osim toga, vjerojatno nisu svi nacrti izrađivani u isto doba godine niti su sve godine imale jednaku akumulaciju snijega. Npr. na nacrtu iz 1977. vidljivo je veliko konusno uzvišenje koje je možda posljedica većeg osipavanja ili čak i neke lavine. Takav konus nije vidljiv na nacrtu iz 1962. Ove činjenice navode nas na oprez pri donošenju zaključaka

pogotovo u vezi promjena intenziteta snižavanja razine leda. Međutim, generalno sigurno možemo zaključiti da je gubitak mase leda velik (možemo ga procijeniti na čak 8000 m<sup>3</sup>) te da je on posebno intenzivan u posljednje desetljeće ili dva. To pokazuju istraživanja i u obližnjoj Vukušić sniježnici (sniježnici) gdje je od 1962. do 2008. zabilježen pad razine leda od oko 20 cm, a od 2008. do 2018. za više od 1,2 m.

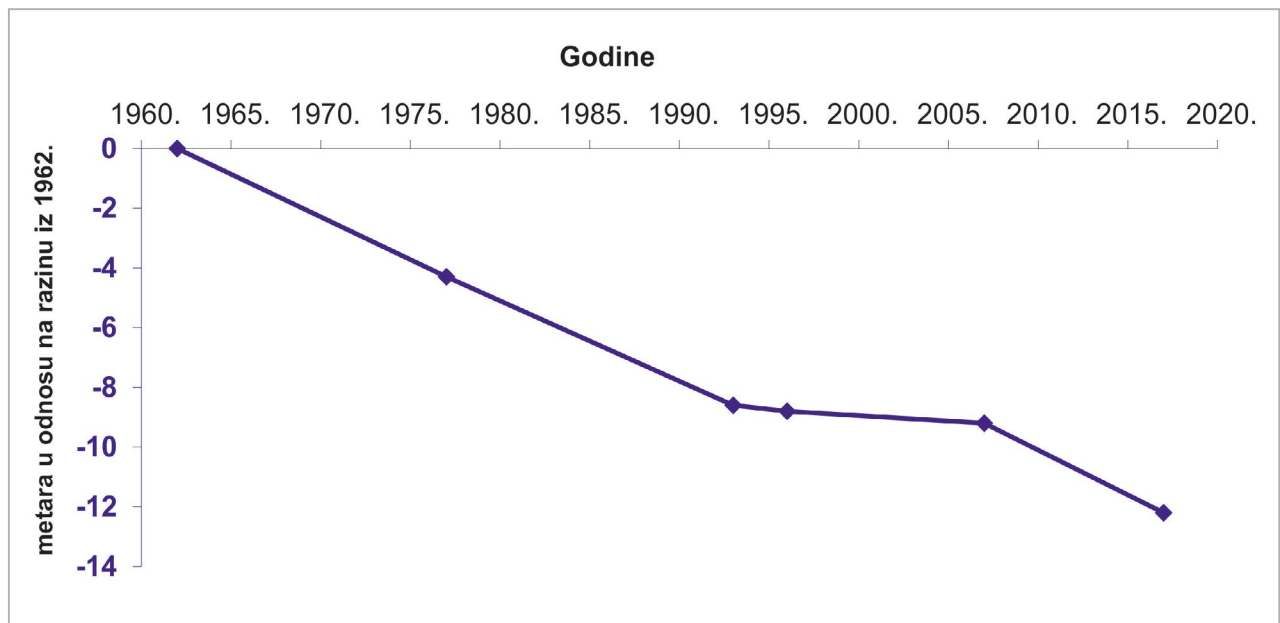
Ovaj trend se još jače nastavio i nakon mjerenja 2017. Za usporedbu, u Crnoj ledenici na Biokovu je samo tijekom ljeta 2019. izgubljeno 150-200 m<sup>3</sup> leda što je prvenstveno uzrokovano natprosječnim ljetnim oborinama (Peršoiu i dr., 2021). Možemo zaključiti da je nagli gubitak velike količine leda u speleološkim objektima najvjerojatnije posljedica recentnih klimatskih promjena.

#### ► Starost leda u speleološkim objektima Velebita

Prva istraživanja starosti leda u speleološkim objektima u Hrvatskoj

vršena su u Ledenoj jami u Lomskoj dulibi (Jelinić i dr., 2001). Na temelju koncentracije izotopa tricija u ledu pretpostavljen starost ledenog čepa određena je na 470 – 670 godina. Dvije grane se dubine 15 i 40 m od gornje razine leda datirane su radiokarbonskom metodom na 150 +/- 100 godina i 140 +/- 90 godina. Nadalje, u okviru jednog drugog istraživanja, analiza starosti uzorka drveta iz Lukine jame – Trojame radiokarbonskom metodom pokazala je starost od 410 +/- 75 godina dok je uzorak iz Ledene jame u Lomskoj dulibi, datiran istom metodom pokazao starost od 525 +/- 40 godina (Paar i dr., 2013).

Novija istraživanja u Vukušić sniježnici (Sjeverni Velebit) i Kuginoj ledenici (Srednji Velebit) pokazala su nešto veću starost leda (Kern i dr. 2018). U Kuginoj ledenici na Srednjem Velebitu (nedaleko Kugine kuće) uzeti su uzorci lišća i grana iz četiri sloja organskog materijala unutar velikog ledenog bloka. U Vukušić sniježnici uzeto je pet uzoraka ostatka grana. Dva su također bila uklopljena u tanke slojeve organskog materijala unutar ledenog bloka dok za tri nije



**Slika 3.** Promjene razina leda u Ledomoj jami u Lomskoj dulibi u odnosu na 1962. godinu. Podaci su dobiveni na temelju mjerenja visinske razlike razina leda zabilježenih na više topografskih izvora (vidi sliku 2).

**Tablica 1.** Starost ostataka lišća i grana u slojevima leda u Kuginoj ledenici i Vukušić sniježnici prema C<sup>14</sup> metodi (prema Kern i dr. 2018 i Kern i dr. 2021)

Speleološki objekt	Uzorak	Starost uzorka (godina prije sadašnjosti)
Kugina ledenica (Srednji Velebit)	KG1	915 ± 25
	KG2	935 ± 25
	KG3	735 ± 25
	KG4	705 ± 30
Vukušić sniježnica (Sjeverni Velebit)	VUK11	3245 ± 30
	VUK12	330 ± 30
	DVK-1/18	146 ± 32
	DVK-2/18	112 ± 32
	DVK-3/18	1829 ± 34

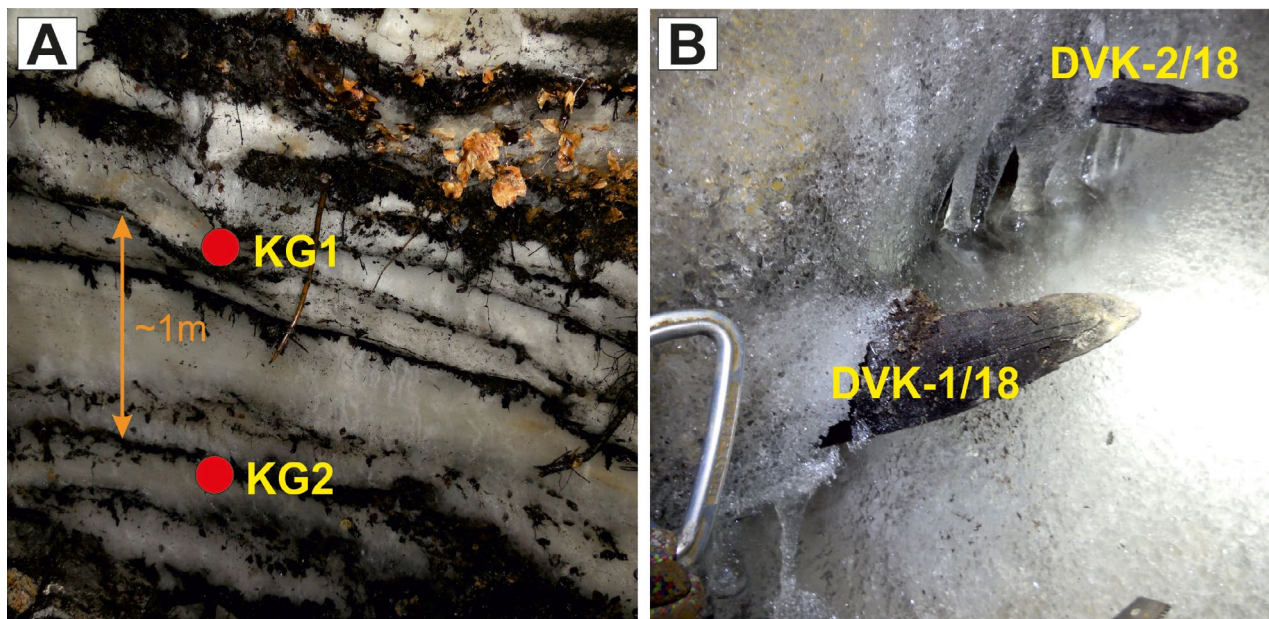
bilo sigurnih pokazatelja stratigrafskog položaja. U obje špilje uzorci su uzimani u prirodno nastalom profilu u prostoru između ledenog bloka okolne stijene. Svi uzorci su obrađeni u Radiokarbonskom laboratoriju Sveučilišta u Szegedu. Rezultati određivanja starosti u okviru ovih istraživanja prikazani su u tablici 1.

Rezultati pokazuju da su analizirani slojevi organskog materijala u ledu Kugine ledenice stari oko 900 tj. 700 godina, odnosno da su se istaložili

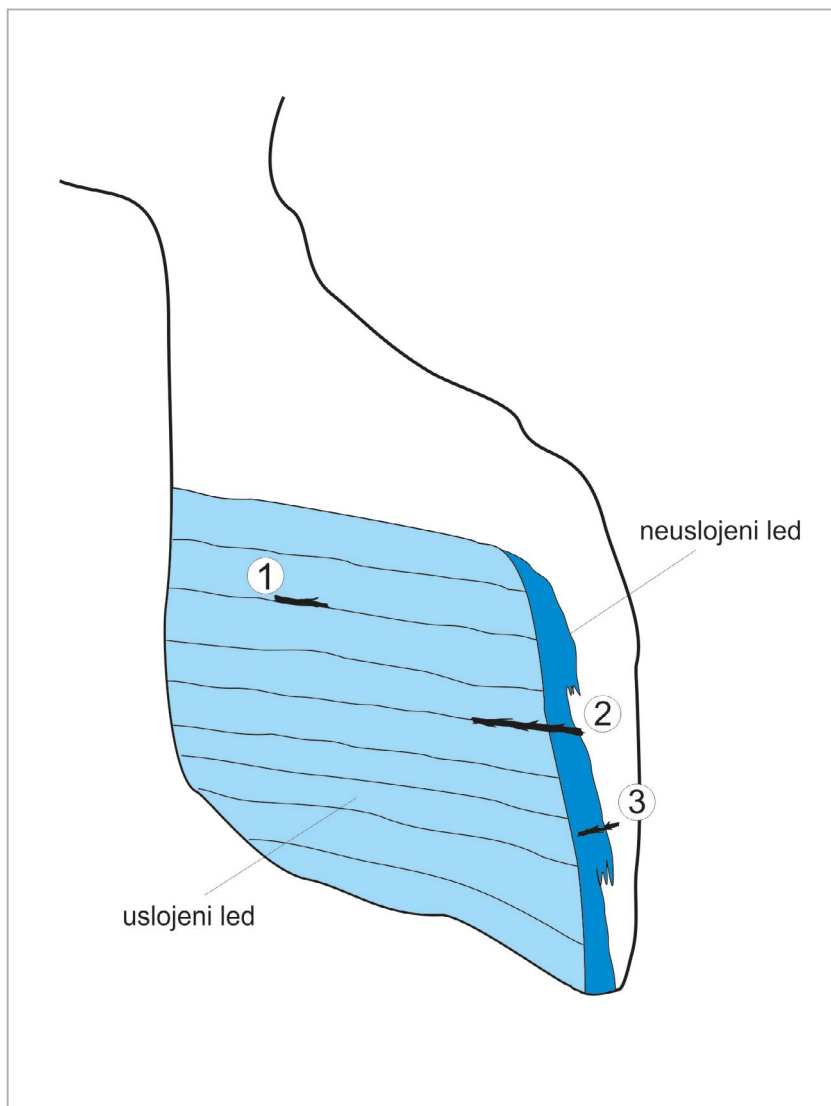
između 11. i 13. stoljeća. Uzorci iz Vukušić sniježnice imaju puno širi raspon starosti. Tri najmlađa su u rasponu od 100 do malo više od 300 godina starosti. Ostala dva uzorka su znatno starija. Jedan je star preko 1800 godina (2 st.), a najstariji uzorak je stariji od 3200 godina star. Nakon kalibracije njegova se akumulacija procjenjuje na 15.-16. st. prije Krista (Kern i dr. 2018, Kern i dr. 2021).

Što nam ovi podaci govore? Mjesta uzorkovanja uglavnom su odabrana

nasumično. Gotovo jedini uvjet je bila dostupnost tj. dohvatljivost mjesta uzorkovanja (bilo „pješice“, bilo na užetu). U istraživanim speleološkim objektima sigurno postoje slojevi leda i organskog materijala koja su iznad i ispod ovih uzoraka. Osim toga, cilj je bio po mogućnosti dohvatiti najniži mogući organski sloj. Pod uvjetom da je uzorkovani materijal iz stratigrafski uklopljenog organskog sloja koji se nalazi između slojeva leda (slika 4, pozicija 2) tada s velikom sigurnošću možemo zaključiti



Slika 5. A - Mjesta uzorkovanja iz stratigrafski dobro uklopljenog organskog sloja u Kuginoj ledenici, B – uzorci nesigurnog stratigrafskog položaja uzoraka u Vukušić sniježnici. | Foto: Neven Bočić



Slika 4. Položaj organskog materijala (potencijalnih uzoraka) u odnosu na okolni led: 1 - stratigrafski uklopljeni organski materijal unutar slojeva leda, ali teško dostupan za uzorkovanje, 2 - stratigrafski uklopljeni organski materijal unutar slojeva leda, ali dostupniji za uzorkovanje, 3 - organski materijal koji ne može poslužiti za određivanje starosti slojeva leda.

da su slojevi leda iznad uzorka mlađi, a slojevi leda ispod uzorka stariji od samog uzorka. Za neke uzorke smo sigurni da jesu iz stratigrafski uklopljenog organskog sloja (uzorci KG 1, KG2, VUK 11 i VUK 12, slika 5A). Za ostale uzorke nismo potpuno sigurni jesu li stratigrafski uklopljenog ili su to ostaci koji su upali u pukotine u ledu ili u prostor između leda i stijene (slika 4, pozicija 3, slika 5B). To znači da je led u Kuginoj ledenici star barem oko 900 godina, a vjerojatno i znatno stariji jer ispod mjesta uzorkovanja ima još slojeva leda. Također, led u Vukušić sniježnici star je barem oko 3200 godina, a vjerojatno i puno više. Na pretpostavku da je led star i znatno više upućuje nas to da je i ispod ovog uzorka (tj. organskog sloja) puno veće dubina leda (vjerojatno više od 10 m) nego što je to iznad njega. No zasad je to podatak o najvećoj poznatoj starosti leda u hrvatskom te cijelom Dinarskom kršu.

### ► Zaključak

Recentna dinamika leda u speleološkim objektima Velebita je vrlo složena, ali glavni trend je naglo topljenje leda te smanjivanje njegove količine što je vidljivo u većini istraživanih speleoloških objekata. Gubitak leda u Ledenoj jami u Lomskoj dulibi u razdoblju 1955.-2017. procjenjuje se

na oko 8000 m<sup>3</sup>, ali je primjetno ubrzavanje smanjivanja količine leda u najnovijem razdoblju. Devet uzoraka organskog materijala uklopljenog u špiljski led u dva speleološka objekta datirano je radiokarbonskom metodom. Najveća zabilježena starost takvog materijala tj. posredno najveća zabilježena starost špiljskog leda je oko 3200 godina u Vukušić sniježnici. To je trenutno najveća poznata starost leda u hrvatskom te cijelom Dinarskom kršu. Zbog ubrzanog topljenja leda uslijed klimatskih promjena dolazi do naglog i nepovratnog gubitka prirodnih arhiva paleoklimatskih podataka. Zbog toga bi istraživanja špiljskog leda trebalo ubrzati i intenzivirati.

## ► Literatura

- Bella, P. (2018): Ice surface morphology. U: Perşoiu, A., Lauritzen, S.-E. (eds.): Ice Caves. Elsevier, 69-96
- Bočić, N. (1997): Nesreća u Ledenoj jami na Velebitu. *Speleožin* 7, str. 39, Karlovac.
- Bočić, N. (2014): Klimatske promjene i opasnosti u speleologiji. Zbornik sažetaka Skupa speleologa Hrvatske, Lepoglava 2014., Lepoglava, str. 38
- Buzjak, N., Bočić, N., Paar, D., Bakšić, D., Dubovečak, V. (2018): Ice Caves in Croatia. U: Perşoiu, A., Lauritzen, S.-E. (ur.): Ice Caves. Elsevier, 335-369
- Buzjak, N. Persoiu, A., Butorac, V. (2018b): Microclimate and ice deposits research in Crna ledenica ice cave (Biokovo Nature Park, Croatia) 2016–2019. *Aragonit* 25/1, 38-39
- Buzjak, N., Paar, D., Bakšić, D. (2019): Geografska rasprostranjenost i značajke speleoloških objekata sa snijegom i ledom. U: Rnjak, G. (ur.): *Speleologija*. II izdanje, SD Velebit-HPS-HGSS, Zagreb, 679-684
- Jelinić, I. (1999): Ledena jama u Lomskoj dulibi. *Speleolog* 46/47, 17–22
- Jelinić, I., Horvatinčić, N., Božić, V. (2001): Ledena jama u Lomskoj dulibi. *Senjski zbornik* 28, 5-19
- Kern, Z. (2018): Dating cave ice deposits. U: Perşoiu, A., Lauritzen, S.-E. (ur.): Ice Caves. Elsevier, 109-122
- Kern, Z., Bočić, N., Sipos, G. (2018): Radiocarbon-dated vegetal remains from the cave ice deposits of Velebit mountain, Croatia. *Radiocarbon* 60/5, 1391-1402
- Kern, Z., Bočić, N., Bartyik, T., Sipos, G. (2020): New radiocarbon ages from the ice block of Vukušić Ice Cave Velebit Mt., Croatia. *Aragonit* 25/1, 44-45.
- Paar, D., Buzjak, N., Sironić, A., Horvatinčić, N. (2013): Paleoklimatske arhive dubokih jama Velebita. *Knjiga sažetaka 3. znanstvenog skupa Geologija kvartara u Hrvatskoj*. HAZU, Zagreb, 39–40
- Perşoiu, A., Lauritzen, S.-E. (Eds) (2018): Ice Caves. Elsevier, 729 pp
- Perşoiu, A. (2018a): Ice dynamics in caves. U: Perşoiu, A., Lauritzen, S.-E. (ur.): Ice Caves. Elsevier, 97-108
- Perşoiu, A. (2018b): Paleoclimatic significance of cave ice. U: Perşoiu, A., Lauritzen, S.-E. (ur.): Ice Caves. Elsevier, 189-198
- Perşoiu, A., Buzjak, N., Onaca, A., Pennos, Ch., Sotiriadis, Y., Ionita, M., Zachariadis, S., Styllas, M., Kosutnik, J., Hegyi, A., Butorac, V. (2021): Record summer rains in 2019 led to massive loss of surface and cave ice in SE Europe. *Cryosphere*, 15/5, 2383-2399
- Perşoiu, A., Buzjak, N., Onaca, A., Pennos, Ch., Sotiriadis, Y., Ionita, M., Zachariadis, S., Kosutnik, J., Butorac, V. (2020): Accelerated loss of cave ice in SE Europe related to heavy summer rains. *Aragonit* 25/1, 52-52
- Rnjak, G. (Ur.) (2019): *Speleologija*. II izdanje, SD Velebit-HPS-HGSS, Zagreb, 789 str.
- Rnjak, G., Bakšić D. (2019): Opasnosti u speleološkim objektima. U: Rnjak, G. (ur.): *Speleologija*. II izdanje, SD Velebit-HPS-HGSS, Zagreb, 173-192

## On age and recent ice dynamics in speleological objects of Velebit Mt

Seasonal, perennial and permanent ice features can appear in speleological objects which meet certain requirements. In Croatia, most of them are on Velebit Mt. This article gives an overview of the latest research on recent ice dynamics and age in several selected localities in the Middle and Northern Velebit. The main recorded trend is the sudden melting of ice and the reduction of its volume. The loss of ice in Ledena jama u Lomskoj dulibi from 1955 - 2017 is estimated at 8000 m<sup>3</sup>. Radiocarbon dating has been applied on the samples of organic material enclosed within the ice. The oldest material is 3200 years old, which is currently the oldest known ice in Croatia and the entire Dinarides.