



# Sige kao svjedoci klimatskih promjena u prošlosti: zapisi iz Nove Grgosove spilje

Iva Palatinuš

Hrvatski geološki institut, Zagreb  
Speleološki klub Ozren Lukić, Zagreb

## ► Uvod

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća značajno je porastao interes za proučavanjem klimatskih promjena u prošlosti uslijed brzih i intenzivnih promjena u recentnoj klimi na Zemlji (IPCC, 2022). Klimatske oscilacije koje danas promatramo rezultat su interakcije prirodne varijabilnosti klime i antropogenog utjecaja. Paleoklimatologija je znanstvena disciplina koja proučava klimatske promjene u geološkoj prošlosti,

oslanjajući se na posredne pokazatelje (*proxy*) u prirodnim klimatskim arhivima poput ledenih jezgra, godova drveća, marinskih i jezerskih sedimentata te sige. Budući da su instrumentalni podatci o klimatskim uvjetima dostupni tek posljednjih, otprilike, 150 godina, znanstvenici se za dublje razumijevanje dugoročnih klimatskih trendova oslanjaju na prirodne zapise. Takav pristup omogućava preciznije modeliranje i projekcije klimatskih promjena u budućnosti.

Sige (speleotemi) sekundarni su karbonatni sedimenti koji krasi krško podzemlje. Osim što plijene pažnju svojom estetskom raznolikošću, sige kriju dragocjene podatke o klimatskim uvjetima iz vremena kada su formirane (Fairchild i sur., 2006). Rasprostranjene su u gotovo svim klimatskim zonama, a krški oblici u kojima se formiraju – spilje i jame – odlikuju se relativno stabilnim mikroklimatskim uvjetima koji omogućuju dobro očuvanje sige i klimatskog signala u njima. Ipak, njihova

je najveća prednost mogućnost preciznog i pouzdanog apsolutnog datiranja radiometrijskim tehnikama (U-Th, U-Pb), te ponekad relativnim metodama poput brojanja godišnjih lamina koje pružaju podatke na visokoj vremenskoj rezoluciji (Hellstrom, 2003; Bajo i sur., 2012).

### ► Što povezuje sige s klimom?

Speleogeneza je dio procesa okršavanja do kojega dolazi uslijed otapanja stijene, najčešće vapnenca ili dolomita. Meteorska voda (oborina, tekućica) otapa ugljični dioksid iz atmosfere i u kontaktu s tlom, uslijed čega nastaje slaba ugljična kiselina. U kontaktu s karbonatnom matičnom stijenom dolazi do otapanja i prijenosa otopljenih iona kroz pukotine u stijeni do unutrašnjosti spilje. U trenu kada otopina dosegne unutrašnjost spilje, naziva se prokapnicom (slika 1). Kada je koncentracija ugljičnog dioksida u prokapnici viša od one u spiljskom zraku, višak CO<sub>2</sub> oslobodit će se iz prokapsnice te će se istaložiti siga, najčešće kalcitnog ili aragonitnog sastava. Da bi klimatski zapis u novonastaloj sigi vjerno odražavao klimatske promjene na površini, mora biti taložen u izotopnoj ravnoteži s prokapnicom. Dakle, glavna poveznica površinskog i potpovršinskog sustava odnosno sige i klime meteorska je voda.



Slika 1. | Aktivno formiranje speleotema u Novoj Grgosovoj spilji. | Foto: Iva Palatinuš

### ► Klimatski signal (posredni pokazatelji, proxy)

Paleoklimatski podatci pohranjeni su u fizikalnim i geokemijskim svojstvima sige, poznatim kao posredni pokazatelji (*proxy*). Riječ je o komponentama klimatskog zapisa koje nam neizravno otkrivaju informacije o prošlim promjenama u klimatskim i okolišnim uvjetima. Najznačajniji i najčešće korišteni posredni pokazatelji stabilni su izotopi kisika čiji omjer u sigi može odražavati temperaturu i količinu oborine u vrijeme kada je siga nastala. Stabilni izotopi ugljika pružaju uvid u lokalne promjene u vegetaciji i biološkoj aktivnosti u tlu.

Koncentracije elemenata u tragovima, poput magnezija, stroncija, barija i uranija, također su od velikog značaja te služe kao pokazatelji promjena u kemijskim svojstvima prokapsnice iz koje je formirana siga, a koje su odraz okolišnih uvjeta. Važno je spomenuti i druge metode poput analize fluidnih inkluzija, koje predstavljaju mikroskopske zamke u kojima je zarobljena fosilna prokapnica. Ova je metoda vrlo značajna u paleotermometriji jer omogućava rekonstrukciju apsolutnih temperatura pri kojima je siga taložena. Nadalje, petrografske karakteristike sige

značajne su u kronološkom smislu, za prepoznavanje prekida u taloženju sige koji mogu biti klimatski uvjetovani, ali također mogu biti i rezultat promjena u hidrološkim uvjetima. U paleoklimatskim istraživanjima poželjno je koristiti takozvani *multi-proxy* pristup koji uključuje upotrebu više različitih posrednih pokazatelja za rekonstrukciju klimatskih i okolišnih uvjeta. Kombiniranje različitih posrednih pokazatelja omogućava pouzdaniju i detaljniju rekonstrukciju prošlih klimatskih i okolišnih uvjeta, te povećava vjerodostojnost paleoklimatskih interpretacija.

## ► Istraživanja u Novoj Grgosovoj spilji

Zahvaljujuću obilju speleoloških objekata, područje Hrvatske pruža veliki potencijal za paleoklimatska istraživanja. Jedan od iznimno perspektivnih objekata u kontinentalnoj Hrvatskoj jest Nova Grgosova spilja, smještena na području Otruševca kraj Samobora. Ova turistička spilja otkrivena je slučajno 2004. godine uslijed eksploatacije vapnenca za proizvodnju vapna. Duljine je 97 metara i dubine 14 metara, ali unatoč skromnim dimenzijama, obiluje fosilnim i aktivno rastućim spiljskim ukrasima što ju svrstava među najljepše krške fenomene kontinentalne Hrvatske.

Znanstvena vrijednost ovoga lokaliteta prepoznata je još 2014. godine kada su počela sustavna istraživanja na ovome području (Surić i sur., 2018, 2021), a njihovi rezultati potaknuli su interes i za daljnja, opsežna znanstvena istraživanja. Od 2022. godine provodi se kontinuirani monitoring površinskih i podzemnih uvjeta, ključan za točnu i pouzdanu interpretaciju klimatskih posrednih pokazatelja u sigama iz ove spilje (slike 2 i 3). Osim različitih oblika (stalaktiti, stalagmiti, makaroni, stupovi, saljevi), sige karakterizira različiti raspon starosti pa tako dosadašnje datacije pokazuju da neke dosežu starost od oko 41 000 godina, a podatci upućuju i na kontinuirani klimatski zapis tijekom posljednjih oko 13 000 godina.

Kasni holocen, točnije posljednja dva tisućljeća, često se opisuje kao razdoblje relativne klimatske stabilnosti. Međutim, diljem svijeta zabilježene su brojne kratkotrajne klimatske anomalije. Zbog nedostatka konsenzusa o njihovom trajanju i prostornom rasprostriranju (Neukom i sur., 2019), posebno su važni paleoklimatski zapisi visoke rezolucije. Za paleoklimatske rekonstrukcije najčešće se koriste stalagmiti, zbog njihove jednostavne geometrije i načina formiranja u uvjetima bliskima izotopnoj ravnoteži. Posebno vrijedan nalaz iz ove spilje predstavlja stalagmit NG-2



Slika 2. | Monitoring u Novoj Grgosovoj spilji. Foto: Petra Bajo

(slika 4) koji pokazuje klimatski zapis visoke vremenske rezolucije, rijedak ne samo u regionalnim već i u globalnim razmjerima. Ovakvi zapisi omogućuju rekonstrukciju kratkotrajnih (višedesetljetnih) i naglih klimatskih događaja, lokalnih klimatskih uvjeta te razlikovanje prirodne klimatske varijabilnosti od ljudskog utjecaja. Kalibracija tih podataka s dostupnim instrumentalnim zapisima omogućuje testiranje točnosti i poboljšanje klimatskih modela za predviđanje budućih klimatskih promjena.

Prvi rezultati trenutnog sustavnog

monitoringa u Novoj Grgosovoj spilji pokazali su da sige u ovoj spilji najintenzivnije rastu tijekom zimskih mjeseci, uslijed pojačane infiltracije oborina i otplinjavanja ugljičnog dioksida iz prokapnice u CO<sub>2</sub>-osiromašenu spiljsku atmosferu (Bajo i sur., 2024). Sukladno tomu, omjeri stabilnih izotopa kisika u analiziranoj sigi vjerojatno odražavaju klimatske uvjete hladnijega dijela godine. Starosni model ove sige vrlo je precizan jer je za njegovu konstrukciju osim radiometrijskog datiranja uranij-torij (U-Th) metodom primijenjena i metoda relativne kronologije odnosno

Slika 3. | Članovi projektne  
tims UNLOCK-CAVE u Novoj  
Grgosovoj spilji. | Foto: Iva  
Palatinuš





**Slika 4.** | Stalagmit NG-2 iz Nove Grgosove spilje

brojanja godišnjih lamina. Trenutni rezultati pokazali su da je siga rasla kontinuirano tijekom posljednjih otprilike 1500 godina, a naročito je zanimljiv podatak da je usporeno rasla i tijekom Malog ledenog doba (Palatinuš i sur., 2025). Ovo istraživanje kombinira detaljan monitoring recentnih uvjeta u cjelokupnom spiljskom sustavu te *multi-proxy* pristup kako bi se utvrdili klimatski procesi i mehanizmi koji su oblikovali okolišne uvjete tijekom geološke prošlosti. Istraživanje je od ključne važnosti jer predstavlja jedinstveni klimatski zapis visoke rezolucije na području Hrvatske, ali i regije.

#### ► Zaključak

Brojnost, raznolikost i očuvanost siga u Novoj Grgosovoj spilji, uz perspektivne rezultate recentnog monitoringa, otvaraju mogućnosti za daljnja istraživanja koja sežu duboko u Zemljinu klimatsku prošlost. Takvi nalazi od velike su važnosti za razumijevanje regionalnih klimatskih uvjeta kroz vrijeme, te značajno doprinose globalnim naporima u rekonstrukcijama klimatske povijesti Zemlje.

*Istraživanja u Novoj Grgosovoj spilji provode se u sklopu uspostavnog istraživačkog projekta Hrvatske*

*zaklade za znanost: „Istraživanje paleoklimatske varijabilnosti visoke rezolucije pomoću posrednih pokazatelja u sigama iz Nove Grgosove spilje“ (UNLOCK-CAVE, HRZZ-UIP-2020-02-7355; voditeljica P. Bajo) te internog istraživačkog projekta Hrvatskog geološkog instituta, praćenog od strane Ministarstva znanosti i obrazovanja Republike Hrvatske; sredstva iz Nacionalnog plana oporavka i otpornosti 2021. – 2026. – NextGenerationEU: „Paleookolišna i paleoklimatska istraživanja klastičnih i kemogenih sedimenata iz Grgosovih spilja – GRGA“ (voditeljica P. Bajo).*

## ► Literatura

- Bajo, P., Drysdale, R., Woodhead, J., Hellstrom, J. and Zanchetta, G. (2012): High-resolution U-Pb dating of an Early Pleistocene stalagmite from Corchia Cave (central Italy). *Quaternary Geochronology*, vol. 14, pp. 5-17.
- Bajo, P., Briški, M., Benutić, A., Piplica, A., Brčić, V., Marcuš, B., Palatinuš, I., Stroj, A. (2024). Seasonality in cave dripwater and air properties – implications for speleothem palaeoclimatology, Nova Grgosova Cave (Croatia). *Geologia Croatica*, 77(3), 243–251.
- Fairchild, I. J., Smith, C. L., Baker, A., Fuller, L., Spötl, C., Matthey, D., McDermott, F. (2006). Modification and preservation of environmental signals in speleothems. *Earth-Science Reviews*, 75(1–4), 105–153.
- Hellstrom, J. (2003). Rapid and accurate U/Th dating using parallel ion-counting multi-collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 18, 1346-1351.
- IPCC (2022). *Climate change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- Neukom, R., Steiger, N., Gómez-Navarro, J. J., Wang, J., Werner, J. P. (2019). No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. *Nature*, 571, 550–554.
- Palatinuš, I., Bajo, P., Brčić, V., Briški, M., Cheng, H., Drysdale, R. N., Hellstrom, J., Hopley, P., Spötl, C., Surić, M., Treble, P., Vonhof, H., Xue, J. (2025). Multi-proxy speleothem record from continental Croatia as an archive of Late Holocene palaeoclimate variability, EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May 2025, EGU25-15801, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-15801>.
- Surić, M., Lončarić, R., Bajo, P., Columbu, A., Bočić, N., Lončar, N., Drysdale, R. N., Hellstrom, J. C. (2021). Holocene hydroclimate changes in continental Croatia reconrded in speleothem  $\delta^{13}C$  and  $\delta^{18}O$  from Nova Grgosova Cave. *The Holocene*, 31 (9), 1401–1416.
- Surić, M., Lončarić, R., Bočić, N., Lončar, N., Buzjak, N. (2018). Monitoring of selected caves as a prerequisite for the speleothem-based reconstruction of the Quaternary environment in Croatia. *Quaternary International*, 494, 263–274.

## Speleothems as witnesses of past climate change: records from Nova Grgosova Cave

Speleothems are secondary carbonate cave deposits that can yield data on past climate and environmental conditions during the time of their growth. Due to their numerous advantages in comparison to other natural climate archives, they have become of key importance in palaeoclimate studies. Palaeoclimate information is stored in proxy records, i.e. various physical and (geo)chemical properties. This type of research is also conducted in Croatia, with the cave Nova Grgosova spilja in continental Croatia as a notable example. This cave is rich in speleothems, offering significant potential for studying past climate variability.