

Sezonska dinamika temperature zraka i CO₂ u spilji Samograd, Pećinski park Grabovača (prosinac 2022. – veljača 2024.)

Spilja Samograd | Foto: Nenad Buzjak

Nenad Buzjak

Geografski odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu
Speleološki klub Samobor, Samobor

► Uvod

Spilja Samograd u Pećinskom parku Grabovača (Značajni krajobraz Risovac-Grabovača) jedan je od lokaliteta na kojemu su još 2012. godine uspostavljena kontinuirana istraživanja mikroklimе u suradnji Geografskog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta i Javne ustanove Pećinski park Grabovača (Škuljević i dr., 2013). Istraživanja su od studenog 2022. nastavljena kroz bilateralni znanstveni slovensko-hrvatski projekt Cardikarst. Interpretacija podataka u ovome

radu bazira se na satnim podacima temperature zraka, relativne vlažnosti i temperature rosišta s pet lokacija razmještenih od površine do najdubljih dijelova spilje, mjerenim u razdoblju od 1. prosinca 2022. do 29. veljače 2024. Zbog dinamike bilo je interesantno obuhvatiti dvije zime i razdoblje proljeća, ljeta i jeseni među njima. U analizi se koriste i mjesečna mjerenja koncentracije CO₂ iz istoga razdoblja, bez ulaženja u dubinu procesa, kako bi se ilustrirala opća dinamika spiljskog okoliša. Cilj je prikazati raznolikost i sezonsku dinamiku spiljske mikroklimе koja nije statična

i stabilna (kako to pojedinci i danas još uvijek pogrešno pišu i tumače, najčešće na temelju prostorno i vremenski vrlo ograničenih mjerenja), nego može, ovisno o više čimbenika, biti snažno zonirana u horizontalnom i vertikalnom smjeru.

Istraživanje mikroklimе speleoloških pojava (spilja i jama) od ključne je važnosti za razumijevanje prirodnih procesa te za planiranje održivog upravljanja ovim osjetljivim podzemnim geosustavima. Zašto geosustavima? Zato što su nam spiljski i jamski kanali jedino dostupni dijelovi

ogromne mreže podzemnih pukotina i šupljina koje čine povezani geomorfološki, hidrološki, mikroklimatski i ekološki sustav krša pod velikim utjecajem termičkih i hidroloških svojstava stijena (Badino, 2010). Podatci meteoroloških opažanja i mikroklimatskih istraživanja nisu bitni samo znanstvenicima i upraviteljima – bitni su i speleolozima. Mikroklima izravno utječe na uvjete istraživanja, mogućnost napredovanja, zatim na stabilnost uvjeta potrebnih za razvoj i opstanak sigaa, dugoročno očuvanje paleookolišnih zapisa u sedimentima te razmještaj i razvoj podzemne faune. U kontekstu turističkih spilja ili jama, kontinuirano praćenje mikroklimata omogućuje procjenu potencijalnih utjecaja posjetitelja na prirodnu ravnotežu, osobito u odnosu na zagrijavanje zraka i emisije CO₂. Na temelju relevantnih podataka može se odrediti nosivi kapacitet u smislu dnevnog broja posjetitelja i upravljanja posjećivanjem kako bi se sačuvao ekosustav i kako bi posjetitelji bili zadovoljni ne samo doživljajem, nego i spoznajom da postoji uprava koja vodi računa o održivosti te da su i oni sami, pridržavanjem mjera, doprinijeli očuvanju. Naravno, tu su i koncesionari kojima je u interesu da prirodni uvjeti budu očuvani što im daje prednost i predstavlja privlačan faktor za posjetitelje.

U istraživanjima čiji se rezultati koriste u ovom članku, uz autora su sudjelovali: dr. sc. Suzana Buzjak (Hrvatski prirodoslovni muzej); Helena Varga, izv. prof. dr. sc. Dalibor Paar; Ivana Živković (Speleološki klub Samobor); Marko Danilović i Nikola Uremović (JU PP Grabovača). Također zahvaljujem Speleološkom klubu Samobor na pomoći u obliku speleološku opreme te JU Pećinski park Grabovača na podršci.

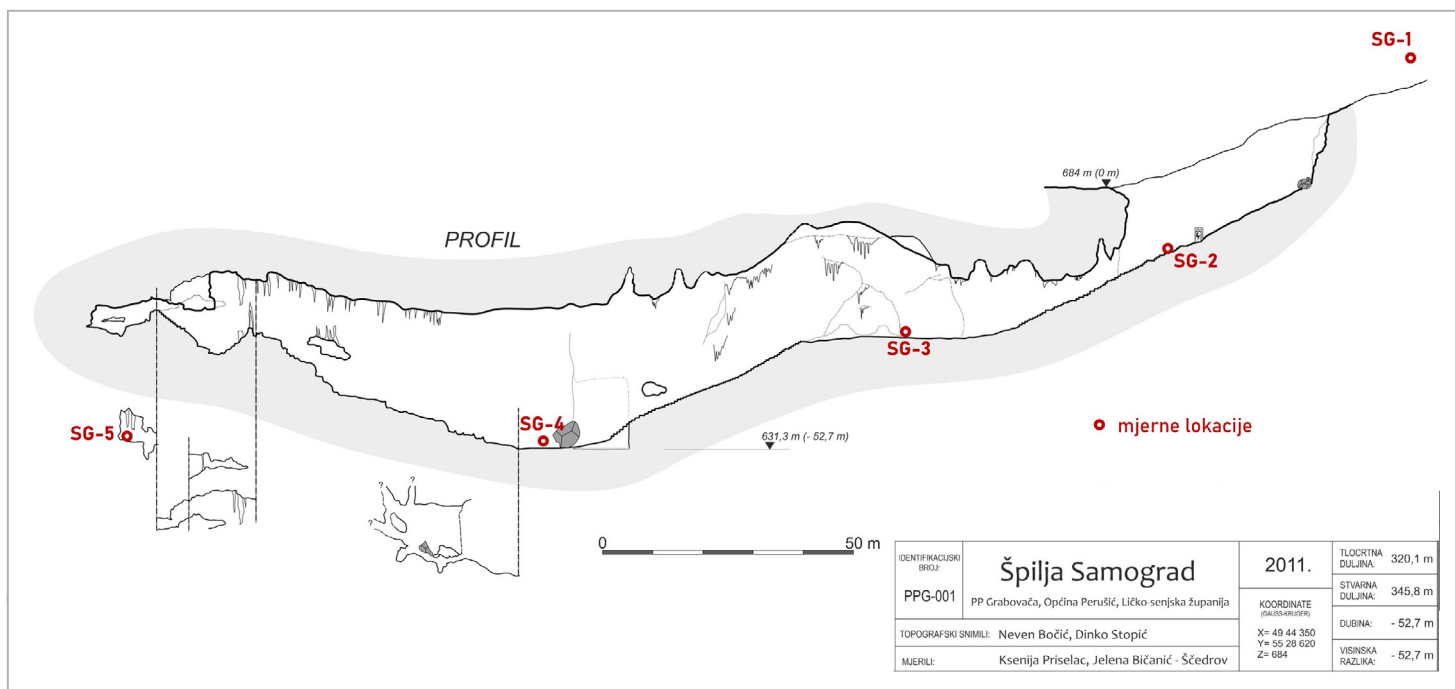
Ovaj je rad sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom „Dinamika i raspodjela CO₂ u krškoj vadozi i epifreatskoj zoni (CARDIKARST)“ (IPS-2022-02-2260).

► Metode istraživanja

Mjerenja su obavljena memorijskim termohigrografima Onset HOBO U23 Pro v2 (model U23-001A; u nastavku logeri), postavljenima na površini, ispred ulaza i na tri lokacije duž uzdužnog presjeka spilje (slika 1). Instrumenti su radili u satnom intervalu tijekom cijeloga razdoblja od 1. prosinca 2022. do 29. veljače 2024. pa je svaki logger zabilježio ukupno 10 944 mjerenja po parametru. To je veliki skup podataka koji omogućuje valjane statističke analize.

Lokacija i odabir mjernih točaka

Nadmorska je visina ulaza Samograda 684 m. Ulaz je smješten u dnu urušne ponikve, SZ ekspozicije, izduženog polukružnog presjeka širine 16 i visine do 5 m. Kanal je dug 346 m i od površine do najniže točke dubine su 53 m; širine je do 25 m i visine do 32 m. Mjerne lokacije od SG-1 do SG-5 odabrane su tako da obuhvate sve ključne mikroklimatske zone: površinu, ulaz i spilju (slika 1). Odabir takvog prostornog rasporeda mjernih lokacija omogućio je praćenje prijelaza od uvjeta na površini do minimalno varijabilnih spiljskih uvjeta te detekciju sezonskih promjena. Svi logeri bilježili su temperaturu zraka (°C), relativnu vlažnost (%) i temperaturu rosišta (°C). U prikazu rezultata mjerenja i interpretaciji naglasak je na temperaturi zraka, dok se druge varijable navode informativno. Logeri su postavljeni na stalne točke na plastičnu podlogu radi izolacije od utjecaja stijene, zaštićeni od kapanja vode i izravnog strujanja zraka kako bi se izbjegle anomalije. Svi uređaji bili su postavljeni približno na 0,5 m iznad tla, osim SG-1 koji je bio na 2 m visine zbog konfiguracije terena. Odvajanje mjernog instrumenta od stijene bitno je zbog fizikalnih zakonitosti izmjene topline između stijene i zraka (Paić, 1994).



Slika 1. | Profil spilje Samograd s lokacijama mjernih točaka.

Memorijski termohigrograf Onset HOBO U23 Pro v2 (slika 2) karakteriziraju dobra pouzdanost, preciznost, točnost i stabilnost u negostoljubivim okolišima te se pokazao puno pouzdanijim od logera sljedeće generacije (oznake modela MX23xx). Nažalost starog modela više nema u prodaji. U spiljskim uvjetima najvažnije je zadržavanje funkcionalnosti pri relativnoj vlažnosti > 90 %. Prosječno trajanje baterija je do dvije godine. Poznata boljka ovog kao i sličnih uređaja jest kondenzacija na senzoru zbog čega se u uvjetima visoke vlažnosti senzor ne može osušiti pa često prikazuje vlagu koja je ~100 %.

Radi ilustracije dinamike mikroklimatike Samograda, u interpretaciju su uključeni i mjesečni podatci o koncentraciji CO₂ izvučeni iz trenutačnih mjerenja. Iako su mjerenja obavljena na većem broju lokacija, za potrebe ovoga članka koriste se samo podatci za mjerne točke na kojima su instalirani logeri. Koncentracije CO₂ (ppm) mjerene su prijenosnim mjerjačem AZ77535 (AZ Instrument Corp., Taiwan; slika 2) jednom mjesečno.

Nakon svakog preuzimanja podataka i mjerenja provedena je provjera valjanosti i integriteta podataka.

Podatci svih logera objedinjeni su u jedinstvenu radnu tablicu radi usporedne analize. Vizualizacija podataka temeljila se na grafičkim prikazima, distribucijama i paralelnim usporedbama logera, čime je omogućeno prepoznavanje cjelovitih trendova i sezonskih obrazaca unutar sustava. Za speleologe koji se susreću s mikroklimatskom analizom, kratak pregled osnovnih statističkih parametara može biti koristan okvir razumijevanja podataka (tablica 1). Detaljnija pojašnjenja moguće je naći u udžbenicima statistike kojih na hrvatskom jeziku ne nedostaje, od temeljne do ekspertne razine.



Slika 2. | Memorijni termohigrograf Onset HOB0 U23 Pro v2 i ručni mjerjač AZ77535. Na loger je korisno staviti vremensku oznaku s datumom izmjene baterije te ga fizički odvojiti od podloge.

Tablica 1. | Statistički pokazatelji korisni u mikroklimatskim istraživanjima.

STATISTIČKI POKAZATELJ	ULOGA U ANALIZI MIKROKLIME
Minimum, maksimum i raspon	Pokazuju ekstremne događaje i ukupni sezonski raspon između njih
Srednja vrijednost	Procjena općeg stanja tijekom razdoblja
Medijan	Stabilna središnja vrijednost, otporna na kratke poremećaje
Q1 i Q3	Prvi (Q1) i treći kvartil (Q3) određuju granice unutar kojih se nalazi 25 % odnosno 75 % podataka te opisuju položaj donjeg i gornjeg dijela raspodjele u istim mjernim jedinicama kao i varijabla.
IQR	Interkvartilni raspon (IQR) mjeri širinu središnjih 50 % podataka, kao razliku između Q3 i Q1, i pokazatelj je raspršenosti bez utjecaja ekstremnih vrijednosti.
Standardna devijacija	Najvažniji pokazatelj stabilnosti i varijabilnosti. Izražava prosječno odstupanje vrijednosti od sredine u istim mjernim jedinicama kao i promatrana varijabla.
Koeficijent varijacije	Prikazuje relativnu varijabilnost podataka u postocima, čime omogućuje usporedbu veličina različitih mjernih jedinica.

Termini prozračivanje – provjetravanje – ventilacija; diskusija i prijedlog za hrvatsku speleološku terminologiju

Kako je jedna od tema ovoga članka varijacija mikroklimatskih pokazatelja kao posljedica strujanja i izmjene zraka između površine i spilje, pojavila se potreba napisati nešto o terminologiji. U domaćoj i stranoj literaturi koriste se tri pojma: ventilacija (engl. *ventilation*), prozračivanje i provjetravanje. Međutim, u hrvatskoj stručnoj terminologiji njihova upotreba nije uvijek jednoznačna, a određena terminološka nesustavnost u izvorima u kojima su definirani, dodatno komplicira odabir najprikladnijeg naziva za speleološki, mikroklimatski, kontekst.

Tehnički leksikon (<https://tehnicki.lzmk.hr/Projekt>) navodi termine „prozračivanje“ i „ventilacija“. Pod pojmom „prozračivanje“ kao sinonimi navode se „provjetravanje“ i „aeracija“ te navodi definicija vezana uz biotehnologiju – „uvođenje zraka (ili kisika) u bioreaktore za aerobne biološke procese“. U natuknici „ventilacija“ kao sinonim se navodi već definirano „prozračivanje“ što djeluje zbunjujuće zbog definicije koja slijedi: „izmjena istrošenoga zraka svježim zrakom“. To je teško povezano s ranije navedenom definicijom „prozračivanja“ kao zasebne enciklopedijske natuknice i pojma vezanog za točno određeni tehnološki postupak. Dalje se ventilacija dijeli na dvije vrste koje možemo klasificirati kao (kasnije spomenuta) „prinudna ventilacija“: na *klimatizacijsku* ili *konformnu* te *industrijsku ventilaciju*. Za obje je značajka da je to ciljana i strojevima izazvana izmjena zraka u prostoru (ventilatorima kao samostalnim uređajima ili dijelovima drugih uređaja poput klimatizacijskih uređaja, ovlaživača i sl.). U nastavku natuknice kao podvrsta se navodi i „prirodna ventilacija“, definirana kao „izmjena zraka kroz raspore na prozorima, vratima i drugim otvorima zgrada te kroz porozne zidove, a uzrokovana je razlikom tlakova zbog strujanja zraka ili razlikom temperature (termosifonsko ili uzgonsko strujanje)“. Ako

zanemarimo činjenicu da je u definiciji izvrnut uzročno-posljedični odnos (jer strujanje zraka nije uzrok razlike tlakova, već razlika tlakova uzrokuje strujanje zraka), mehanizam je sličan onome koji se javlja u spiljama poput Samograda ili kod efekta dimnjaka. Slijedi definicija „prinudne ventilacije“ koja je već definirana i kroz prethodne pojmove pa je terminološka zbrka potpuna.

Na mrežnoj stranici proizvođača Daikin, nakon što autor teksta zaključuje: „Glagoli *provjetriti*, *prozračiti* i *pročistiti* nisu sinonimi kada je u pitanju nadopunjavanje zraka u vašem domu“, navode se tri načina osvježavanja zraka, „...ali postoje bitne razlike“. U nastavku slijede objašnjenja:

a) „Ventilacija stambenog prostora je kontinuirani proces koji se odvija danonoćno. Korištenjem ventilacijskog sustava, ustajali unutarnji zrak se izvlači iz kuće i zamjenjuje svježim, zdravim zrakom.“

b) „Provjetravanje je privremena mjera koja se sastoji od stvaranja strujanja zraka unutar vaše kuće. Kada otvorite svoje prozore i/ili vrata, ustajali zrak se izvlači i sa sobom nosi štetne tvari koje sadrži.“ (Daikin, 2025).

Dakle ventilacija je strojno vođeni proces, dok je provjetravanje bazirano na korištenju prirodnih mehanizama za prozračivanje prostora.

Prema Aniću i Goldsteinu (2007) *ventilacija* je (1) dovođenje svježeg i odvođenje istrošenog zraka iz zatvorenih prostora prirodnim putem ili umjetno pomoću uređaja ili (2) sustav uređaja za provjetravanje.

S obzirom da je termin „ventilacija“ u hrvatski jezik došao izvana (posuđenica), te da se u engleskoj stručnoj terminologiji koristi i za izmjenu zraka u speleološkim pojavama, korisno je konzultirati i strane izvore. Prema rječniku Cambridge Dictionary (n. d.) pod ventilacijom se podrazumijeva (1) kretanje svježeg zraka po zatvorenom prostoru ili (2) ventilacijski sustav. U Merriam-Webster Dictionary

(n. d.) navodi se da je ventilacija izlaganje zraku, a posebno struji svježeg zraka radi pročišćavanja, liječenja ili osvježavanja. Rječnik je definira kao posuđenicu iz latinskog – *ventilāre* „izložiti zraku, prozračiti“. Prema Oxford English Dictionary (n. d.), koji daje najviše objašnjenja, ventilacija je (1) gibanje zraka; povjetarac, također figurativno, zastarjelo; (2) radnja puhanja zraka na ili kroz nešto, posebno u svrhu hlađenja ili sušenja; sredstvo ili metoda kojom se to postiže; (3) radnja pčela korištenjem krila za upuhivanje svježeg zraka u gnijezdo; zamjena ustajalog zraka svježim zrakom unutar pčelinjeg gnijezda putem ove akcije; (4) radnja ribe ili druge vodene životinje kojom se usmjerava protok kisikom obogaćene vode kroz ili preko gnijezda, jazbine itd.; (5) prirodno, slobodno kretanje zraka (u upotrebi od 1605. godine); (6) dovod odgovarajuće količine svježeg zraka (u zatvoreni prostor) radi zamjene ustajalog ili štetnog zraka ili za hlađenje ili sušenje prostora; sredstvo ili metoda kojom se to postiže; također u kasnijoj upotrebi: uklanjanje štetnog zraka ili drugih zagađivača (iz zatvorenog prostora). Uz ova objašnjenja navode se i dva iz medicine koja svjedoče koliko je pojam ventilacije širok i višeznačan te ga se koristi i za kretanje drugih fluida, a ne samo plinova i zraka.

Može se zaključiti da je ispravno koristiti sva tri pojma: *provjetravanje*, *prozračivanje* i *ventilacija*. U ovome se radu naginje prema, te se u hrvatskoj speleološkoj terminologiji **predlaže korištenje pojma provjetravanje** budući da se radi o **prirodnom strujanju zraka** kojeg definiramo kao vjetar (Šegota i Filipčić, 1996). U slučaju korištenja pojma ventilacija ili prozračivanje bilo bi uputno koristiti oblik „prirodna ventilacija“ ili „prirodno prozračivanje“. Naime i u spiljama se povremeno primjenjuje kontrolirana prirodna ili pak prinudna ventilacija radi utjecaja na prirodne procese ili zaštite ekosustava – ciljana postizanje željenih mikroklimatskih uvjeta ili kvalitete zraka. Primjer je kontrola provjetravanja u spilji-lede-nici Eisriesenwelt radi usmjeravanja

procesa zaleđivanja (Obleitner i Spötl, 2011) ili održivo upravljanje posjećivanjem u Waitomo Caves u uvjetima rasta koncentracije CO₂ (Earth Science New Zealand, 2005).

► Temperatura zraka

Spilja Samograd ima izraženu **sezonsku bimodalnost mikroklimae**, odnosno dva različita režima koja se manifestiraju kroz razlike u temperaturama zraka i koncentracijama CO₂. Zimi padom temperature na površini počinje prodor gustog, hladnog zraka koji pokreće provjetravanje duž uglavnom strmog silaznog kanala do najniže točke (SG-4). Hladni zrak ulazi u topliju spilju gdje se zagrijava i uz strop struji prema ulazu. Znak tog hladnog prodora nastanak je ledenih sigaa oko linije ulaza, hlađenje unutrašnjosti i smanjenje koncentracije ugljikovog dioksida u većem dijelu spilje. U toplijem dijelu godine zbog zagrijavanja površine provjetravanje se smiruje i dobrim dijelom staje (posebno ljeti); uspostavlja se stabilan mikroklimatski režim. Spilja zbog konkavnog profila kanala i prestanka provjetravanja tada funkcionira kao klopka za zimi nakupljani hladniji zrak. Konkavni profil onemogućuje kretanje hladnog zraka prema ulazu jer se taj gušći zrak prirodno zadržava u dubljim i nižim dijelovima ispod razine ulaza. Zbog zaustavljanja provjetravanja koncentracija CO₂ raste zbog unosa prirodnog CO₂, a u određenoj mjeri i posjećivanja tijekom turističke sezone (Buzjak i dr., 2024). U zoni ulaza, naročito ljeti, formira se izražena *termoklina* – zona koja razdvaja hladni zrak spilje i topli zrak koji leži na njemu te zbog manje gustoće ne prodire dublje, tj. niže.

Kako bi se ovi sezonski procesi jasnije razumjeli i kvantificirali, u nastavku se navode mikroklimatske značajke pojedinih lokacija duž spilje.

Lokacija SG-1, smještena u šumi na površini iznad urušne ponikve Samograda, očekivano ima najširi temperaturni raspon (od -9,95 °C do 34,02 °C ili ukupno 43,97 °C) i najveću standardnu devijaciju (SD=7,99

°C) među svim lokacijama (slika 3 i 4, tab. 1). Stoga SG-1 predstavlja referentnu točku bitnu za usporedbu s unutarnjim točkama te ispitivanje utjecaja površinskih promjena na dinamiku spiljske atmosfere. Za bimodalnu mikroklimu Samograda upravo su niske zimske temperature bitan faktor koji uvjetuje velike promjene. Na lokaciji SG-2 temperaturni je raspon manji nego na SG-1 (32,6 °C); amplitude i standardna devijacija smanjene su (SD=6,15 °C). Prosječne temperature niže su od površinskih i to osobito ljeti, što odražava zaklonjen položaj u urušnoj ponikvi i zasjenu vegetacijom koja je djelomično gusta. Relativna vlažnost vrlo je visoka, a rosište je stabilnije nego na SG-1. SG-2 stoga pokazuje prijelaz s izrazito površinskog na modificirani režim utjecan mikroklimom ponikve.

Sljedeće lokacije su u Samogradu. SG-3 smještena je u silaznom spiljskom kanalu direktno nasuprot ulaza. Zbog toga je pod direktnim utjecajem hladnih valova pa je tu zabilježena najniža temperatura u spilji, -1,3 °C. Raspon temperatura je, zbog kombiniranog utjecaja blizine ulaza i termalnog učinka stijena 8,5 °C (SD=1,59 °C), a prosječna je temperatura 5,1 °C. Relativna je vlažnost tijekom većeg dijela godine vrlo blizu 100 %, a rosište tek povremeno odstupa od temperature zraka. Podatci upućuju na to da SG-3 predstavlja prijelaznu zonu.

Iako bi se zbog udaljenosti od ulaza (130 m) očekivalo da lokacija SG-4 ima potpuno stabilne uvjete, temperature se u cijelom promatranom razdoblju kreću u rasponu od približno 1,5 do 6,5 °C. To je za duboku spiljsku zonu relativno velik raspon i jasan pokazatelj sezonskog hlađenja. Srednja temperatura je 5,1 °C, dnevne su amplitude većinom male, no zimske epizode hlađenja vanjskim zrakom u cjelini dovoljno su izražene da povećaju ukupni raspon vrijednosti između zime i ljeta. Relativna vlažnost zraka gotovo je trajno vrlo visoka, a razlika između temperature zraka i rosišta mala, što potvrđuje dugotrajno zasićenje zraka vlagom.

Na SG-5, u najvišoj unutarnjoj zoni (u odnosu na dno), temperatura se mijenja u znatno užem rasponu (od oko 7,6 do 8,6 °C), uz vrlo malu standardnu devijaciju i vrijednosti blisku 8 °C tijekom cijele godine. U usporedbi sa SG-4, lokacija SG-5 pokazuje znatno veću stabilnost; relativna vlažnost uvijek je oko 100 %, a rosište praktički jednako temperaturi zraka, pa se u statističkim pokazateljima sezonski signal manje prepoznaje.

Analiza mikroklimatskih podataka, s fokusom na temperaturu zraka, pokazuje jasnu prostornu i vremensku strukturu u kojoj se hladni zimski prodori i stabilni ljetni uvjeti odražavaju na različite načine duž profila spilje (slika 3 i 4). Usporedba lokacija potvrđuje da položaj u odnosu na ulaz, visinske razlike, konkavni uzdužni profil i termički utjecaj stijena čine temeljnu podlogu za razumijevanje strujanja zraka i razvoja temperaturnih režima među zonama. Da bi se ta dinamika precizno kvantificirala, korišten je skup osnovnih statističkih pokazatelja: minimum, maksimum, raspon, srednja vrijednost, medijan, standardna devijacija i kvantili. Minimalne i maksimalne vrijednosti prikazuju ekstremne događaje i sezonski raspon parametara, srednja vrijednost daje pregled općeg stanja, a medijan predstavlja stabilnu središnju vrijednost koja je manje osjetljiva na kratke poremećaje. Standardna devijacija posebno je važna jer pokazuje stupanj stabilnosti ili varijabilnosti na pojedinoj lokaciji. Uz navedene pokazatelje korisni su i kvantili, osobito prvi (Q1) i treći kvartil (Q3). Q1 predstavlja vrijednost ispod koje se nalazi 25 % svih mjerenja, dok Q3 označuje vrijednost iznad koje se nalazi 25 % podataka, gdje se pojavljuju topliji periodi. Kada se kombiniraju s minimumom, maksimumom, medijanom i standardnom devijacijom, omogućuju uvid u to kako su temperature tijekom godine raspoređene oko tipičnog režima te koliko su pojedina odstupanja učestala.

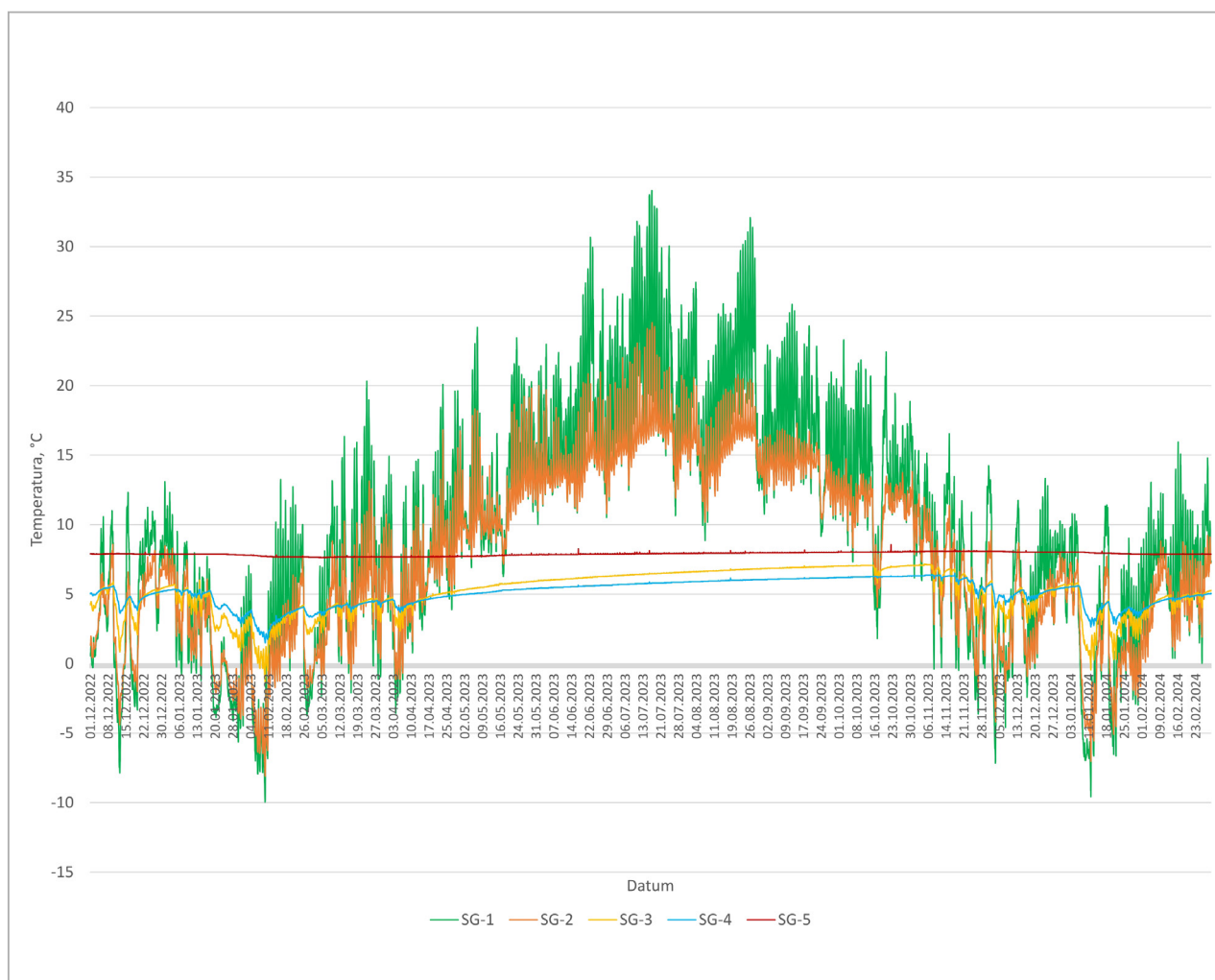
Primjena ovih pokazatelja na cjelokupnom skupu podataka jasno je pokazala da se niz podataka na površini

(SG-1) odlikuje najvećom varijabilnošću, dok se prema unutrašnjosti oscilacije postupno smanjuju jer utjecaj s površine postupno slabi i ima izraženi sezonski karakter (ljet-zima). SG-2 je zbog svog položaja pod snažnim utjecajem vanjskih atmosferskih uvjeta, ali zbog zaklonjenog položaja na dnu ponikve u prigušenoj formi. SG-3 otkriva jasnu prijelaznu zonu gdje vanjski utjecaji slabe, no jak je utjecaj zimskog strujanja hladnoga zraka. Na SG-3 raspodjela temperature kroz cijelo promatrano razdoblje pokazuje da je minimalna vrijednost $-1,33\text{ }^{\circ}\text{C}$ zabilježena samo tijekom najintenzivnijih zimskih prodora, dok su srednja vrijednost ($5,12\text{ }^{\circ}\text{C}$) i medijan ($5,39\text{ }^{\circ}\text{C}$) stabilno smješteni oko $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, što odražava tipično stanje ulazne dvorane tijekom većega dijela godine (slika 4). Vrijednost $Q1 = 4,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ relativno je visoko jer

vrlo niske temperature nisu konstanta, nego izuzetci povezani s povremenim utjecajem izvana. U kombinaciji s maksimalnom vrijednošću od $7,17\text{ }^{\circ}\text{C}$, ovakva raspodjela potvrđuje da je SG-3 prijelazna zona – dovoljno blizu ulaza da bilježi kratkotrajne i sezonske promjene, ali udaljena toliko da je pod utjecajem unutrašnjeg mikroklimatskog režima u uvjetima miješanja zraka različitih toplinskih svojstava i termičkog utjecaja stijena. Na sličan način, prema podatcima iz tablice na slici 4. moguće je interpretirati temperaturni režim SG-4. Iz $Q1$ i minimalne temperature, koja odstupa od prosjeka i maksimalne zabilježene temperature, vidljivo je da je povremeno pod utjecajima zimske cirkulacije hladnog zraka. S druge strane, situacija u drugim godišnjim dobima utječe na privid ukupne stabilnosti. SG-5 izvan je dosega

snažnijih vanjskih utjecaja i održava najstabilniji režim.

Razlika između vanjske i unutarnje temperature (slika 3) pokazala se kao važan pokretač zimskog strujanja u Samogradu. Kada je zrak na površini znatno hladniji od zraka u spilji, on postaje gušći i teži te se slijeva niz urušnu ponikvu i prema ulaznom dijelu kanala. Dalje prodire u spilju i spušta se prema dnu, utječući na SG-2, SG-3, a kroz cijelu zimu i na SG-4. Time dolazi do sezonskog hlađenja dubljih dijelova i stvaranja uvjeta za nastanak leda, no danas samo u zoni ulaza. Prema usmenim podatcima starijih stanovnika Perušića, za nekadašnjih hladnih ličkih zima, kada bi temperatura na površini najmanje 14 dana u nizu bila niža od -10 ili $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (prema različitim usmenim izvorima), smrzavala se voda u



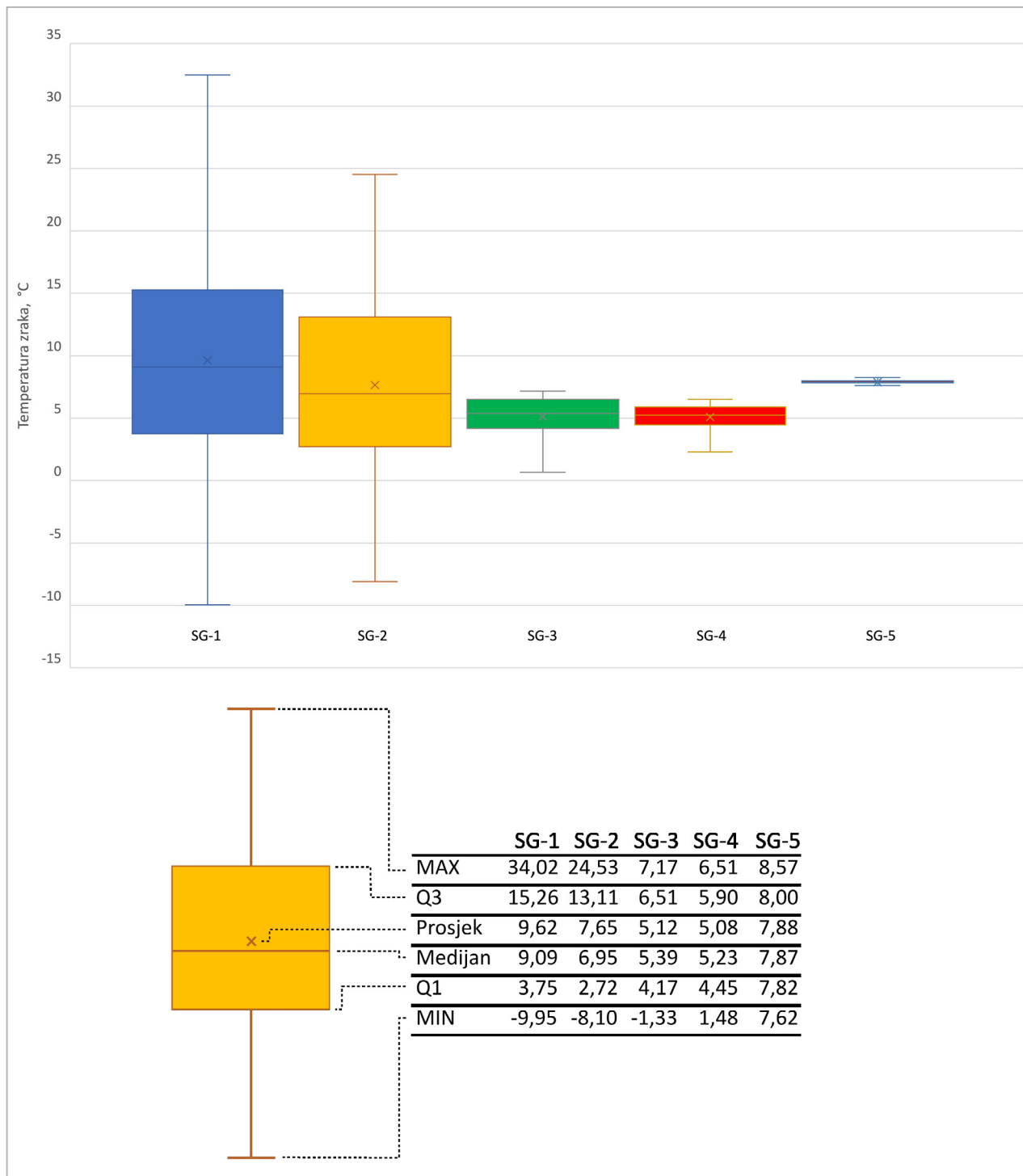
Slika 3. | Hod temperatura zraka na mjernim lokacijama spilje Samograd

jezercu i na dnu spilje (SG-4). O tome djelomično svjedoče i tragovi mehaničkog trošenja (ljuštenja) siga. S obzirom da je u spilji tada toplije nego na površini zbog toplinskog utjecaja stijena, hladni se zrak grije. Zagrijani spiljski zrak podiže se i povremeno

struji uz strop i samo u gornjoj zoni ulaza. Ovaj proces lako je prepoznati: nedostatak ledenih stalaktita na stropu u ulaznome dijelu potvrđuje da gornji sloj ulaznog prostora ostaje topliji, dok se ledene sige stvaraju na tlu uz koje struji hladni zrak. Samo

ispred ulaza, izvan domašaja cirkulacije toplijeg spiljskog zraka na prevjesnim stijenama nastaju ledeni stalaktiti i manji ledeni saljevi.

Ova razdvojenost strujanja i stratifikacija na hladan zrak koji se spušta



Slika 4. | Kutijasti dijagram (boxplot) s rasponima temperatura zraka po lokacijama te tumač dijagrama sa statističkim vrijednostima nizova po lokacijama. Ova vrsta dijagrama omogućuje brzi uvid u temeljne statističke pokazatelje, ali i opće trendove po lokacijama.

prema dnu i zadržava se niže, te topliji zrak koji struji u povratnom smjeru uz strop te povremeno izlazi kroz gornji dio ulaza, stvarajući kružno kretanje koje nazivamo *konvekcijskom ćelijom*. Konvekcijske ćelije obrasci su kretanja fluida (tekućine ili, u ovome slučaju, zraka) uzrokovani razlikama u njihovoj gustoći zbog razlike u zagrijanosti. U ćelijama se topliji, manje gusti fluid diže, a hladniji, gušći fluid tone, stvarajući kružnu ili cikličku struju koja prenosi toplinu i vlagu. Utjecaj na prijenos vlage bitan je, a vidljiv je u formiranju stalnih ili povremenih ploha snažne kondenzacije koje se na nekoliko mjesta u Samogradu pružaju od 3. dvorane do ulaza. U ulaznoj zoni, gdje su stijene stropa pod utjecajem vanjskih niskih temperatura hladnije od toplog spiljskog zraka koji preko njih struji, na stijeni i na mahovinama koje ih mjestimično obraštaju kondenziraju se kapljice vode. No, ćelija nije stalna ni jednolika, nego se aktivira samo sa zahlađenjima i epizodično, čak i zimi, ovisno o temperaturnoj razlici između vanjskog i spiljskog zraka. Kada je ta razlika velika, hladan zrak prodire dublje u kanal i može doseći najnižu točku (SG-4) te napuniti spilju, uzrokujući pad temperature zraka i rosišta te smanjenje koncentracije CO₂. Kada razlika nije dovoljna, provjetravanje se smanjuje i ostaje ograničeno na kraću zonu bliže ulazu. Najstabilniji dijelovi zone oko SG-5 ostaju potpuno izvan dosega zimskog zraka. Provjetravanje hladnim zrakom u tim epizodama uopće ne dopire do najviših unutarnjih dijelova, pa SG-5 tijekom cijele godine zadržava relativno stalnu temperaturu i vlagom trajno zasićen zrak. S obzirom na zime koje više nisu obilježene dugotrajnim niskim temperaturama ispod 0 °C te na vrlo česte izmjene toplih i hladnih epizoda, zimski režim u Samogradu temperaturno više nije kontinuiran, nego se može opisati kao niz različito intenzivnih i različito trajnih ciklusa hlađenja. Ljeto donosi obrnuto stanje – provjetravanje se potpuno zaustavlja, ulazni dio stabilizira i formira se termoklina duž koje se može

pojavit maglica.

Dakle, temperaturni podatci pokazuju da Samograd ima izrazito jasnu sezonsku bimodalnost i snažnu zonaciju u kojoj se razlikuju: (1) ulazna zona s povremenim zimskim epizodama provjetravanja i rashlađivanjem zbog kojeg se zaleđuje prokapnica i cijednica, a gdje se ljeti formira termoklina i jasna vertikalna stratifikacija hladnog spiljskog i toplog zraka s površine; (2) prijelazna zona s jakim utjecajem zimskih prodora hladnog zraka i stabilnijim uvjetima ljeti; (3) središnja zona ujedno najnižeg dijela spilje u kojemu se zimski impulsi zbog pada temperature zraka zorno uočavaju, dok je ljeti hladnije, ali stabilnije uslijed prekida provjetravanja i (4) stabilna, od ulaza najudaljenija unutarnja zona koja tijekom promatranog razdoblja u cjelini ostaje temperaturno gotovo nepromijenjena zahvaljujući povišenom položaju u odnosu na najniži dio spilje.

► Zapažanja o dinamici koncentracije CO₂

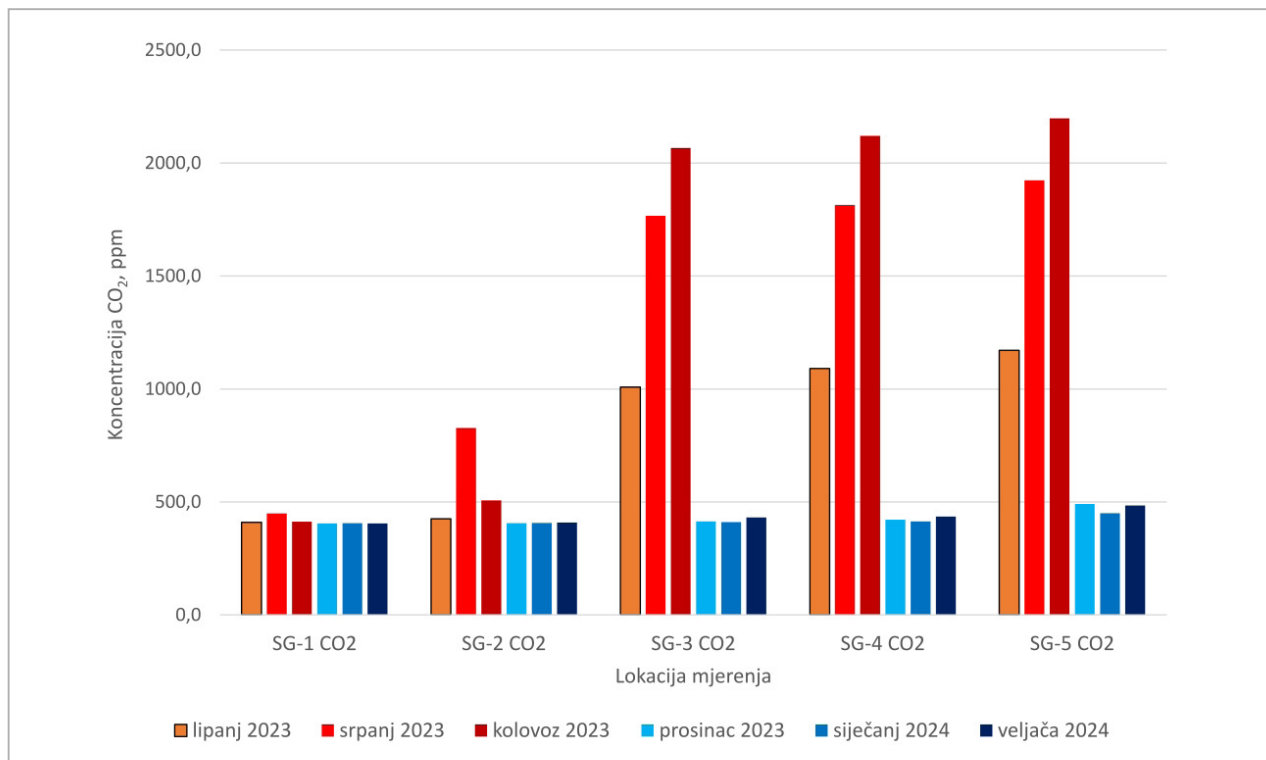
Podatci o koncentraciji CO₂ koriste se s ciljem da se utvrdi jesu li sezonski obrasci provjetravanja površinskim zrakom vidljivi i u dinamici koncentracije toga plina te kao potvrda konvekcijske ćelije. Za razliku od podataka o temperaturi zraka koji imaju satnu rezoluciju, podatci o CO₂ prikupljeni su mjesečnim trenutnim mjerjenjima na pet lokacija, što znači da CO₂ prikazuje stanje u trenutku mjerenja, a ne puni kontinuitet. Mjerenja za ilustraciju procesa u ovom članku obavljena su ljeti: 17. lipnja 2023., 16. srpnja 2023., 18. kolovoza 2023., te zimi: 16. prosinca 2023., 16. siječnja 2024., 14. veljače 2024. godine. Trenutačna mjerenja korisna su jer prikazuju smjer promjene i amplitude te prostorne obrasce između razdoblja aktivnog provjetravanja i razdoblja stagnacije. Izvori CO₂ prirodni su i antropogeni. Samograd je turistička spilja s relativno malim brojem posjetitelja (između 500 i 2000 u proljetnoj i ljetnoj

sezoni; izvor JU PP Grabovača) pa se, prema dosad obrađenim podacima, dinamički odnos između vanjskih temperatura, zimskog strujanja i morfologije kanala pokazao ključnim za razumijevanje režima CO₂. Za dublji uvid bit će potrebno napraviti detaljnije analize.

Koncentracije CO₂ tijekom istraživanog razdoblja pokazuju jasnu sezonsku bimodalnost te time potvrđuju ranije, pomoću temperature zraka, utvrđene obrasce (slika 5). Tijekom zimskih mjeseci koncentracija CO₂ u dijelovima spilje zahvaćene provjetravanjem smanjuje se na vrijednosti jako slične onima na površini (~420-450 ppm), dok se spiljski zrak s malo višom koncentracijom CO₂ zadržava u najdaljem uzlaznom dijelu spilje (~450-520 ppm). CO₂ se ne može spustiti u dublje dijelove kanala jer je dio toplijeg zraka koji zbog manje gustoće ostaje iznad sloja gušćeg hladnog zraka nižih dijelova spilje. Izmjena CO₂ tada se odvija molekularnom difuzijom koja je vrlo spor proces i ne dovodi do značajnijih promjena u prostornim mjerilima spilje. U slučaju turbulentne difuzije, koja se javlja s provjetravanjem, izmjene bi bile dinamičnije (Šegota i Filipčić, 1996). Zato se javlja fenomen da je koncentracija CO₂ u višim dijelovima kanala oko SG-5 nešto viša u odnosu na SG-4 gdje bi, zbog nižeg položaja u kanalu, očekivali više koncentracije.

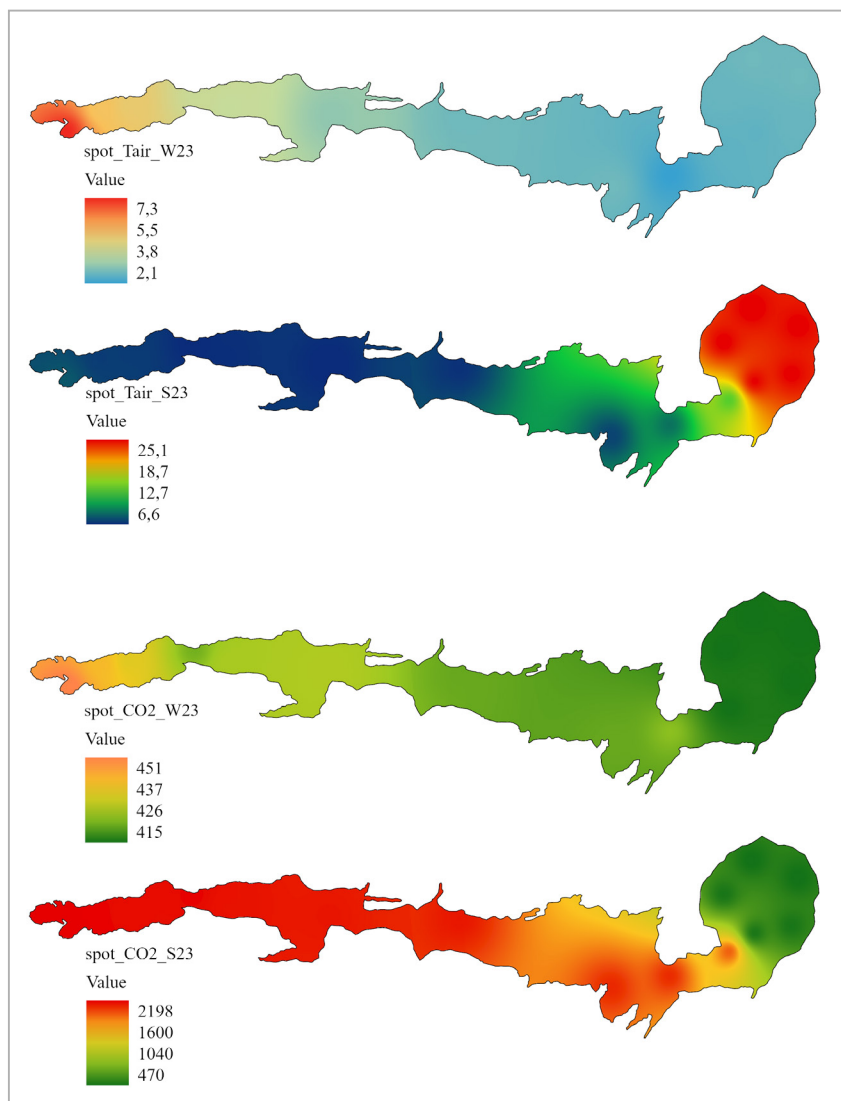
U toplome dijelu godine provjetravanje se znatno smanjuje ili potpuno prestaje. CO₂ se tada akumulira i doseže najviše vrijednosti (>1700 ppm). Glavni izvori CO₂ u tom razdoblju uključuju biološku aktivnost u tlu i pukotinama stijena i disanje posjetitelja. CO₂ se podjednako akumulira u svim zonama spilje počevši od SG-3 do SG-5 jer nema dovoljno jakog gradijenta gustoće koji bi potaknuo prirodnu izmjenu zraka (Buzjak i dr., 2024).

Ovakva dinamika CO₂ potvrđuje ključnu ulogu provjetravanja



Slika 5. | Usporedba koncentracija CO₂ dobivenih trenutačnim mjerenjima ljeti 2023. i zimi 2023./2024.

Samograda (slike 5 i 6). Zimi se provjetranjem CO₂ učinkovito uklanja, a ljeti se u stabilnim mikroklimatskim uvjetima akumulira. Morfologija kanala, posebno konkavni uzdužni profil i geometrijski odnos ulaznih i daljih dijelova (SG-4 i SG-5), određuju koliko se duboko zimski utjecaji mogu spustiti i koliko daleko mogu doprijeti. Najstabilniji dijelovi, osobito oni udaljeni od ulaza, zadržavaju CO₂ dulje od ulaznih dijelova, što je u skladu s njihovom izraženijom općom mikroklimatskom stabilnošću. Ovaj odnos kod nekih spilja može biti važan za turističko korištenje i zaštitu jer omogućuje procjenu potencijalnih učinaka u toplijim razdobljima kada je provjetranje minimalno. No ti su učinci ovisni o brojnim parametrima koji mogu modificirati uvjete od slučaja do slučaja pa ih treba proučavati odvojeno i bazirano na nizovima kvalitetnih okolišnih podataka.



Slika 6. | Primjer prostorne distribucije koncentracije CO₂ u sloju zraka na razini tla na temelju trenutačnih mjesečnih mjerenja ručnim mjeračem u Samogradu. (S = ljeto, W = zima. Broj uz slovo označava godinu)
Izvor: Buzjak i dr., 2024.

Prostorni raspored CO₂ od ulaza prema unutrašnjosti pokazuje jasnu zonaciju koja u potpunosti odgovara modelu provjetravanja utvrđenom na temelju temperature zraka i potvrđuje konvekcijsku ćeliju (slika 6 i 7). U zimskom razdoblju koncentracije CO₂ najniže su na ulaznim lokacijama (SG-2 i SG-3), gdje je učinak provjetravanja najjači. Na SG-4, najnižoj točki spilje, dinamika CO₂ slijedi sezonski obrazac s odmakom i manjim amplitudama. Zimi, kada su impulsi provjetravanja dovoljno jaki, koncentracije CO₂ smanjuju se u skladu s padom temperature zraka. No, u razdobljima slabijeg provjetravanja SG-4 pokazuje tendenciju zadržavanja CO₂ zbog stabilnog mikrookruženja i ograničene izmjene zraka. To rezultira višim minimalnim vrijednostima nego na SG-3, ali i postupnim porastom CO₂ tijekom duljeg razdoblja ljetne stagnacije. Interesantno je da temperaturno najstabilniji dio spilje, SG-5, za razliku od temperature pokazuje značajne sezonske promjene CO₂ što ukazuje da sezonsko provjetranje jače utječe na CO₂, nego na temperaturu zraka. To je posljedica smanjene biološke aktivnosti zimi koja utječe na smanjenu produkciju, ali i procesa koji se odvijaju među pojedinim zonama spilje čiji je CO₂ vrlo zanimljiv indikator.

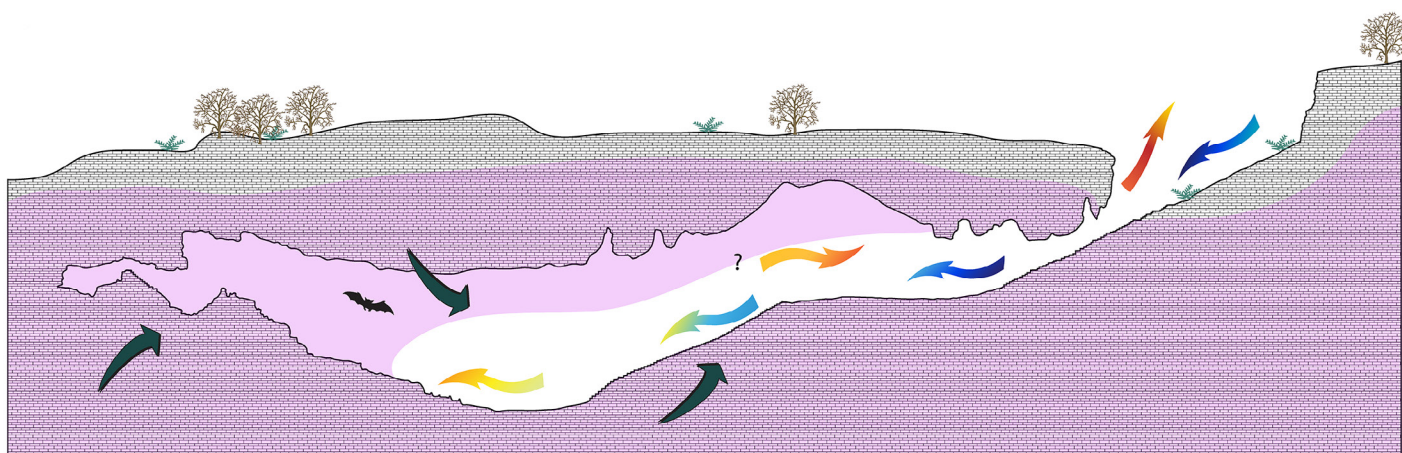
► Zaključak

Istraživanje mikroklima spilje Samograd provedeno od prosinca 2022. do veljače 2024. omogućilo je uvid u sezonske dinamike temperature zraka i CO₂. Rezultati potvrđuju postojanje snažne sezonske bimodalnosti s dva dominantna režima. Tijekom zime, kada je vanjski zrak znatno hladniji od unutarnjeg, dolazi do spuštavanja hladnih zračnih masa u urušnu ponikvu i ulazni dio spilje, stvaranja konvekcijske ćelije i povremenog hlađenja do najnižih dijelova kanala. Ovi impulsi uzrokuju kratkotrajna sniženja temperature i koncentracije CO₂, pojavu magle i razvoj ledenih sigaa u zoni ulaza, što predstavlja jasan indikator zimskog režima provjetravanja. Ljeti provjetranje gotovo prestaje, unutrašnjost spilje zadržava zimi akumulirani hladan zrak, a mikroklima se stabilizira uz trajno zasićenje zraka vlagom i minimalne temperaturne promjene. Koncentracija CO₂ raste, a glavni je izvor produkcija i prijenos iz tla i stijenja oko spilje.

U okviru projekta CARDIKARST provedeno istraživanje, osim znanstvene, ima još jednu važnu dimenziju. Podatci i tumačenja dobiveni kontinuiranim praćenjem mikroklima u

Samogradu vraćaju se upravo onoj zajednici koja omogućuje najveći dio terenskog rada – speleolozima. Rezultati pružaju alat za bolje razumijevanje sezonskih procesa, lakše prepoznavanje znakova provjetravanja na terenu i sigurnije planiranje speleoloških aktivnosti. Istodobno, istraživanje potvrđuje koliko je suradnja znanstvenika i speleologa ključna za napredak spoznaja o podzemnim sustavima. Ovakvi projekti jačaju vezu između terenskog iskustva i znanstvenih analiza te doprinose očuvanju hrvatskog krškog podzemlja u kojem upravo speleolozi imaju nezamjenjivu ulogu.

Važan dio diseminacije rezultata odnosi se i na upravljače zaštićenim područjima i lokalitetima Natura 2000, u čijoj je nadležnosti velik broj spilja i jama Hrvatske. Zaposlenici javnih ustanova mogu biti, ali (zbog brojnih administrativnih obaveza, prema log broja zaposlenih ili neulaženja u speleološke pojave) nisu uvijek prvi koji prepoznaju promjene u osjetljivim podzemnim sustavima, već do tih spoznaja dolaze u suradnji sa speleolozima i znanstvenicima. No, oni imaju mogućnosti osigurati uvjete za kvalitetna istraživanja i održivo upravljanje. Upravo se ta njihova aktivnost može snažno unaprijediti



Slika 7. | Konceptualni model konvekcijske ćelije u Samogradu zimi (nacrtao A. Peršoiu). Ljubičasta boja predstavlja zonu stijena u kojoj je koncentracija CO₂ veća zbog bioprodukcije u odnosu na neobojane zone (Buzjak i dr., 2024). Plave strelice = hladni zimski zrak, narančasto-crvene strelice = topliji spiljski zrak. Nijanse boja u strelicama označavaju postupno zagrijavanje zraka u spilji.

kvalitetnim i znanstveno utemeljenim mikroklimatskim podacima. Ovakva istraživanja pružaju im pouzdane pokazatelje stanja, pomažu u procjeni utjecaja posjetitelja, omogućuju donošenje informiranih upravljačkih odluka ili njihovi rezultati podižu razinu interpretacije u direktnim kontaktima s posjetiteljima ili indirektno putem medija i publikacija. Posebno je važno naglasiti da se upravljanje podzemnim fenomenima ne može temeljiti na površnim tumačenjima niti na pristupima koji zanemaruju geomorfološke, hidrološke, fizikalne i ekološke procese. Suradnja s kvalificiranim i iskusnim znanstvenicima ključna je kako bi se izbjeglo oslanjanje na kvaziznanje i komercijalno motivirane interpretacije kojima je materijalna korist važnija od zaštite prirode. Uključivanje znanstvene zajednice pruža javnim ustanovama metodološku sigurnost, pouzdane podatke i dugoročno održive smjernice za očuvanje krških podzemnih sustava.

► Literatura

- Anić, V., Goldstein, I. (2007). Rječnik stranih riječi. Novi liber, Zagreb.
- Badino, G. (2010). Underground meteorology – what's the weather underground? *Acta Carsologica*, 39(3), 427–448. <https://doi.org/10.3986/ac.v39i3.74>
- Buzjak, N., Gabrovšek, F., Peršoiu, A., Pennos, C., Paar, D., Bočić, N. (2024). CO₂ Emission from Caves by Temperature-Driven Air Circulation - Insights from Samograd Cave, Croatia. *Climate*, 12 (2024), 12: 199-214, doi: 10.3390/cli12120199
- Cambridge Dictionary n.d. Ventilation. <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/ventilation> (1. 12. 2025.)
- Daikin n. d.: Ventiliranje, provjetravanje, pročišćavanje. Koje su razlike? https://www.daikin.hr/hr_hr/za-vas-dom/inspiration/articles/difference-ventilate-ventilate-purify.html (30. 11. 2025.)
- Earth Science New Zealand n. d.. Subterranean sensing. <https://niwa.co.nz/news/subterranean-sensing> (1. 12. 2025.)
- Merriam-Webster Dictionary n. d. Ventilation, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/ventilation#dictionary-entry-1> (1. 12. 2025.)
- Obleitner, F., Spötl, C. (2011). The mass and energy balance of ice within the Eisriesenwelt cave, Austria. *The Cryosphere*, 5, 245–257, doi:10.5194/tc-5-245-2011
- Oxford English Dictionary n. d. Ventilation, <https://www.oed.com/dictionary> (1. 12. 2025.)
- Paić, M. (1994). Toplina i termodinamika. Školska knjiga, Zagreb.
- Šegota, T., Filipčić, A. (1996). Klimatologija za geografe. Školska knjiga, Zagreb.
- Škuljević, P., Buzjak, S., Buzjak, N. (2013). Mikroklimatske i florističke značajke urušne ponikve i špilje Samograd kod Perušića (Lika, Hrvatska). U: Alegro A., Boršić I. (ur.): 4. Hrvatski botanički simpozij s međunarodnim sudjelovanjem, knjiga sažetaka, Split, 27. – 29. 9. 2013., Hrvatsko botaničko društvo, Zagreb, 111-112.

Seasonal dynamics of air temperature and CO₂ concentration in cave Samograd, Grabovača Cave Park (Dec 2022 – Feb 2024)

The research into the microclimate of the Samograd cave (Grabovača Cave Park) conducted from December 1, 2022 to February 29, 2024, provided a detailed insight into the seasonal dynamics of air temperature and CO₂ concentration along five measurement points distributed from the surface to the end of the cave. Hourly data from memory thermohygrographs, combined with monthly instantaneous CO₂ measurements, revealed a complex, clearly zoned system that cannot be considered stable or homogeneous, but rather extremely dynamic, stratified and seasonally conditioned. The winter period is marked by the penetration of cold, denser air and the formation of a convection cell. The consequences of this process include a decrease in air temperature, the formation of icicles at the entrance, and a drop in CO₂ concentration. During the warm part of the year, ventilation decreases and almost ceases, establishing a stable regime characterized by pronounced vertical stratification in the entrance zone, accumulation of colder air in deeper zones, and a continuous increase in CO₂ concentration, primarily due to biological production and reduced ventilation.