

Spremljanje turistično manj obiskane jame v JV Sloveniji kot referenčne točke za segrevanje jamskega okolja

Monitoring of not heavy – visited show cave in SE Slovenia as a reference point of cave environment warming

Stanka Šebela *

Povzetek

V Kostanjeviški jami, ki na leto sprejme okrog 10.000 obiskovalcev, izvajamo mikro-klimatski monitoring (temperatura zraka, zračni tlak) v urnih intervalih od 16. januarja 2020. V manj turistično obremenjenem jamskem okolju je lažje razlikovati med naravnimi in antropogenimi vplivi na jamsko mikro-klimo. Na podlagi skoraj 5 letnih urnih meritev temperature zraka na dveh mestih smo pridobili dokaze, da zunanje klimatske spremembe vplivajo na kraško podzemlje. Antropogeni vpliv se opazi v dnevni temperaturnih nihanjih (za +0.1 °C na KC 1 in za +0.06 °C na KC 2) v toplem obdobju leta, ko je jama odprta za turizem. Takšna temperaturna nihanja ne morejo značilno vplivati na jamsko atmosfero. Dvig temperature za +0.32 °C na KC 1 v obdobju od januarja 2020 do avgusta 2024 kaže vplive zunanjih klimatskih sprememb na jamsko atmosfero. Dva temperaturna dviga na KC 2 v avgustu 2023 in juniju 2024 sta nenadni, kratkotrajni posledici dviga zunanje temperature saj sta bili poletji v letu 2023 in 2024 najtoplejši v zadnjih letih. Raziskava je pokazala, da so tudi predeli jame, ki so bolj globoko v kraškem masivu kot je mesto KC 1, ki ima bolj stabilne temperature, saj ima letna nihanja 0.18 °C v letu 2020, 0.32 °C v letu 2021, 0.26 °C v letu 2022 in 0.21 °C v letu 2023, podvrženi segrevanju zaradi zunanjih klimatskih sprememb.

Ključne besede: mikro-klimatski monitoring, temperatura zraka, Kostanjeviška jama, Slovenija.

Abstract

In Kostanjevica Cave, which receives about 10,000 visitors per year, micro-climatic monitoring (air temperature and air pressure) at hourly intervals are organized sites since January 16, 2020. In such not heavy – visited cave environment, it is easier to distinguish between natural and anthropogenic influences on the cave microclimate. Based on almost 5 years of hourly air temperature data at two cave sites, we have obtained evidence that external climatic changes have an impact on the cave subsurface. The anthropogenic influence is evident in the form of daily temperature fluctuations (+0.1 °C at KC 1 and +0.06 °C at KC 2) only during the warm period when the cave is open to visitors. Such fluctuations cannot add significant heat to the cave atmosphere. The temperature increase of +0.32 °C at site KC 1 for the period from January 2020 to August 2024 shows the effects of external climatic changes on the cave atmosphere. The two temperature peaks at the KC 2 site in August 2023 and June 2024 are sudden, short-term reactions to the rise in external temperature, as the summers of 2023 and 2024 have been described as extremely warm in recent years. The study has shown that even more remote parts of the cave system such as the KC 1 site with stable temperature conditions and annual fluctuations of 0.18 °C in 2020, 0.32 °C in 2021, 0.26 °C in 2022 and 0.21 °C in 2023, are experiencing warming due to external climate change.

Keywords: microclimatic monitoring, air temperature, Kostanjevica Cave, Slovenia

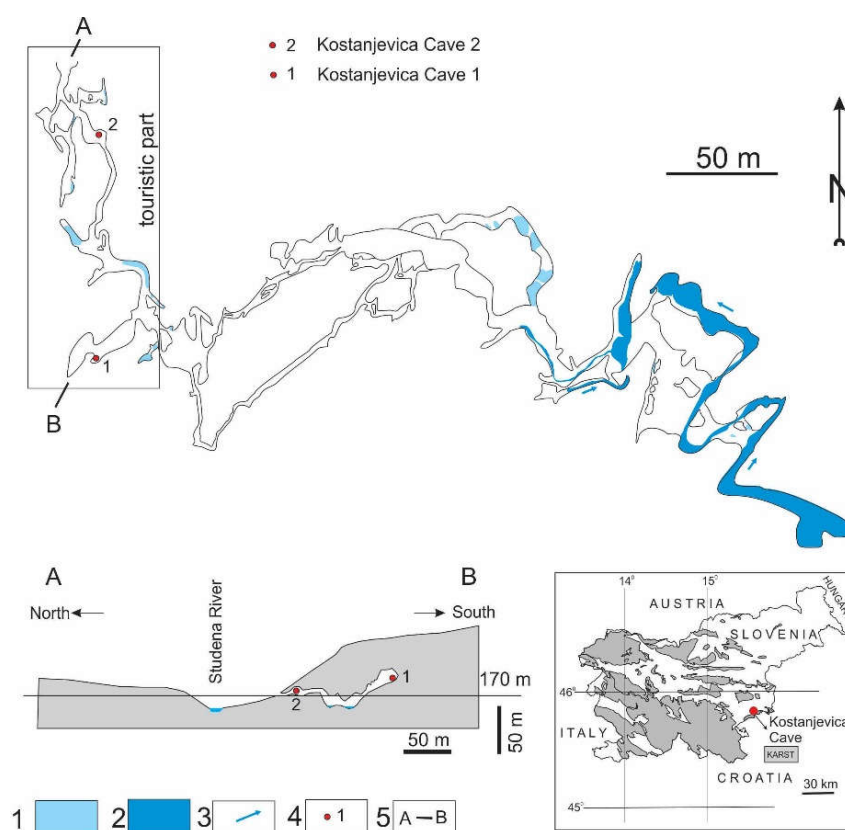
* Inštitut za raziskovanje kraska ZRC SAZU, Titov trg 2, 6230 Postojna,

Uvod

V turistično zelo obiskanih kraških jamah se spremljanje vpliva turizma na jamsko okolje izvaja s terenskimi meritvami, kot npr. mikro-klimatskim in biološkim monitoringom (Mulec in sod. 2017, Pipan in sod. 2019, Šebela in Turk 2022, Mulec in sod. 2023, Tomazin in sod. 2023). V številnih turističnih jamah pa ni vedno preprosto ločiti med vplivom obiskovalcev in naravnimi procesi, ki vplivajo na spremembo mikro-klime (Šebela in Novak 2024). Zato smo za spremljanje temperature zraka in zračnega tlaka izbrali Kostanjeviško jamo v JV delu Slovenije, kjer se urne meritve opravljajo od 16. januarja 2020 na dveh mestih (Sliki 1 in 2). Kostanjeviška jama je med manj turistično obiskanimi jamami saj sprejme 10.300 obiskovalcev na leto (Tičar in sod. 2018).

Klimatske spremembe, ki so bile dokazane že tudi v kraškem podzemlju (Mammola in sod. 2019) lahko vodijo do značilnega zmanjšanja podzemeljskih habitatov (jame, podtalnica) (Vaccarelli in sod. 2023).

Namen študije je bil tudi pridobivanje večletnih podatkov mikro-klimatskih parametrov (temperatura zraka in zračni tlak) iz turistično manj obiskane jame na osnovi FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) podatkov (<https://www.go-fair.org/fair-principles/>) in vključevanje le-teh v baze podatkov kot so: Karst Metadata Portal (IZRK Metadata Portal, 2021-) in EPOS Near Fault Observatories portal (<http://fridge.ingv.it/>).

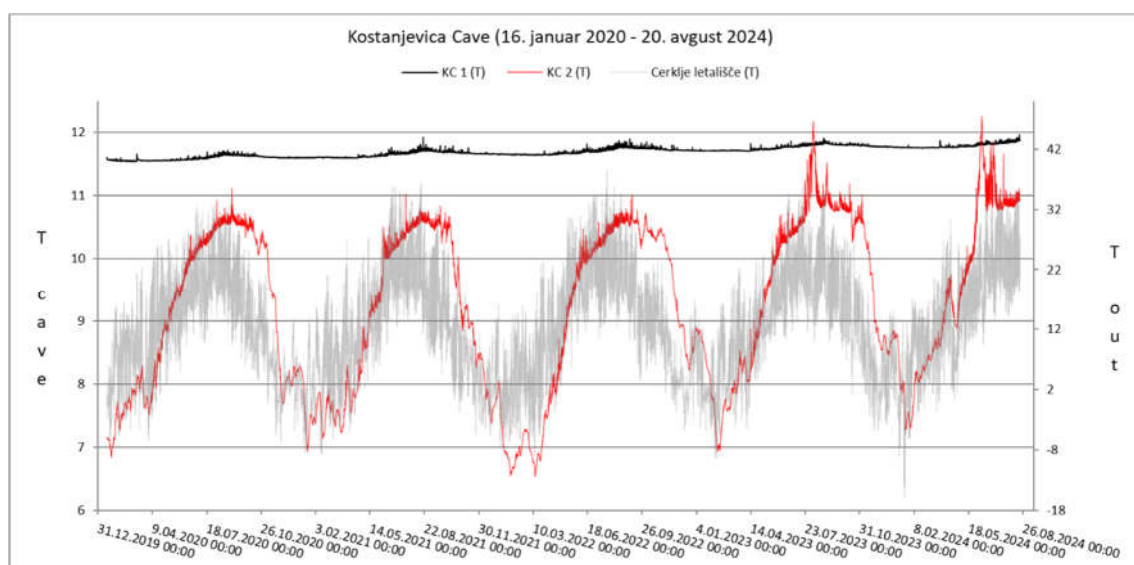


Slika 1 – Tloris Kostanjeviške jame in vzdolžni profil AB. 1-stoječa voda, 2-vodni tok, 3-smer vodnega toka, 4-lokacija merilnih mest (1=Kostanjeviška Cave 1 – KC 1, 2=Kostanjeviška Cave 2 – KC 2), 5-vzdolžni profil AB (kartografija: S. Šebela).

Rezultati meritev temperature zraka v Kostanjeviški jami

Ventilacija v jamah je lahko povezana s konvekcijskimi zračnimi tokovi ali barometrično ventilacijo (Badino 2010). Konvekcijska ventilacija je vezana na razliko v temperaturi med jamo in zunanostjo (Badino 1999). Povprečna letna temperatura zraka v jamah naj bi bila v naših zemljepisnih širinah primerljiva s povprečno zunanjo temperaturo (Badino 2010).

V jamskih rovih, ki se dvigujejo (kot je primer merilnega mesta Kostanjevica Cave 1-KC 1) se nabira relativno toplejši zrak poleti, ki se, zaradi jamske morfologije, značilno ne ohladi niti pozimi (Badino 2010). Med zimsko ventilacijo, ko je $T_{out} < T_{cave}$, takrat vlažen, težji in hladnejši zrak prodira v jamo pri dnu jamskega vhoda (Smithson 1991). V rovih, ki se spuščajo, se pozimi nabira hladen zrak z značilnostmi hladne vreče (Killing-Heinze in sod. 2017), kar je vidno na merilnem mestu Kostanjevica Cave 2-KC 2.



Slika 2 – Podatki temperature zraka v °C za dve merilni mesti v Kostanjeviški jami (Kostanjevica Cave 1-KC 1 in Kostanjevica Cave 2-KC 2) in primerjava z zunanjo temperaturo (postaja Cerklje letališče, ARSO, 2024).

Povprečna letna temperatura (Preglednica 1) na KC 1 je 2.2 do 2.6 °C višja kot na KC 2. Povprečna letna temperatura na KC 1, je primerljiva s povprečno letno zunanjo temperaturo (ARSO 2024) in predstavlja stabilnejše mikro-klimatske pogoje v jami.

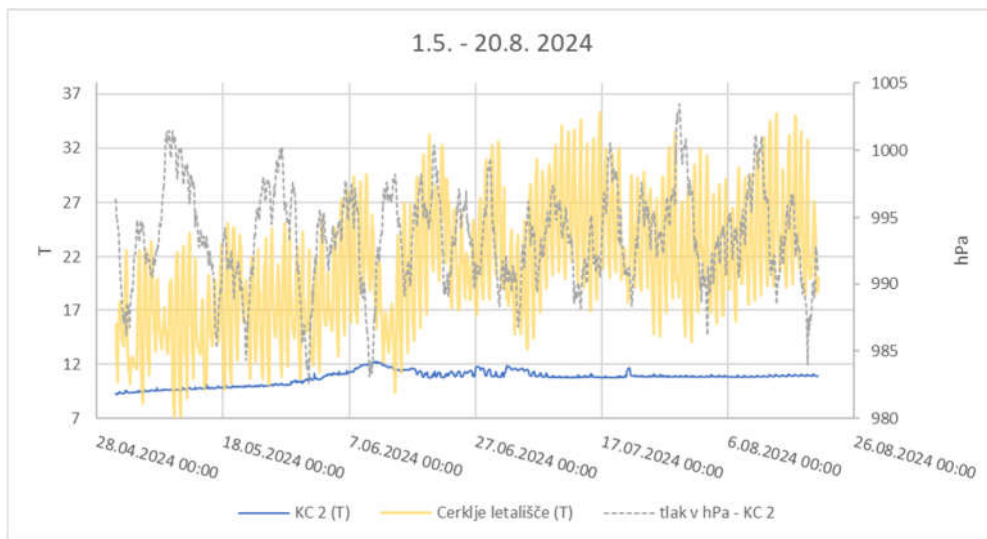
Preglednica 1. Povprečne letne temperature zraka (°C) v Kostanjeviški jami in na meteorološki postaji Cerklje letališče (ARSO, 2024).

	Kostanjevica Cave 1 – KC 1	Kostanjevica Cave 2 – KC 2	T - Cerklje letališče
2020	11,59	9,18	12,27
2021	11,64	8,99	11,26
2022	11,69	9,05	12,34
2023	11,76	9,53	12,32

Povprečna letna temperatura na KC 2, ki je bližje jamskemu vhodu, je bila 9.18 °C v letu 2020, 8.99 °C v letu 2021, 9.05 °C v letu 2022 in 9.53 °C v letu 2023 (Preglednica 1). Ker je povprečna letna temperatura na KC 2 za 2.2 – 3.2 °C nižja kot zunanja temperatura (ARSO 2024), to kaže na značilnosti hladne vreče, ko zunanji zimski zrak prodira na KC 2.

Opazimo tudi, da sta bili poletji 2023 in 2024 (Slika 3) na mestu KC 2 temperaturno značilno višji kot v obdobju 2020 – 2022 (Slika 2). To povezujemo z višjimi zunanjimi temperaturami in ne s številom obiskovalcev.

Dnevne spremembe temperature (do 0,1 °C) na KC 1 so povezane z obiskovalci. Med oktobrom in majem, ko je jama zaprta za obiskovalce, dnevna nihanja na KC 1 niso izrazita. Dvig temperature za + 0,32 °C v nočnem času v obdobju od januarja 2020 do avgusta 2024 na KC 1 ima lahko dva vzroka. Prvič (1) gre lahko za segrevanje jamskega zraka zaradi vpliva segrevanja zunanjega zraka in drugič (2) je lahko povezano z napako v meritvah. Ker temperatura na KC 1 pozimi značilno ne narašča, menimo, da ne gre za napako v meritvah. Dvig temperature ponoči za +0,05 do 0,06 °C na leto na KC 1 je verjetno povezan z vplivom segrevanja zunanjega ozračja in ni odvisen od turističnega obiska.



Slika 3 – Podatki temperature zraka v °C za obdobje 1.5. – 20.8.2024 za KC 2 ter primerjava z zunanjo temperaturo (postaja Cerklje letališče, ARSO, 2024) in zračnim tlakom (hPa) na KC 2.

Med junijem in oktobrom (ko je jama odprta za turizem) temperatura na KC 2 kaže za okrog +0.06 °C višje vrednosti podnevi kot ponoči. Ta razlika v temperaturi je povezana z obiskovalci, saj v zimskem obdobju, ko je jama zaprta, te razlike ni. Ker je letno nihanje temperature na KC 2 večje (4 – 5.25 °C) kot na KC 1 (0.18 – 0.32 °C), naraščanje temperature na KC 2 ni tako izrazito, kot ga vidimo na KC 1. Vendar pa poleti opazimo izrazit dvig temperature za +1.29 °C v avgustu 2023 in za +1.35 °C (junij do avgust 2024) na mestu KC 2. Ker število obiskovalcev poletij 2023 in 2024 ni bilo značilno različno kot v prejšnjih letih, je potrebno ta ekstrem pripisati vplivu zunanjega segrevanja v povezavi z jamsko ventilacijo.

Zaključki

Ugotovitve lahko strnemo v štiri (1 – 4) glavne točke:

(1) Antropogeni vpliv na jamsko mikro-klimo, ki se vidi v dnevni nihanji temperature (+0.1 °C na KC 1 in +0.06 °C na KC 2), je opazen le v toplem delu leta, ko je Kostanjeviška jama odprta za obiskovalce.

(2) Za obdobje od januarja 2020 do avgusta 2024, dvig temperature za +0.32 °C na KC 1, predstavlja vpliv zunanjih klimatskih pogojev na jamsko okolje. Segrevanje za +0.05 do 0.06 °C na leto (ponoči) je povezano s segrevanjem zunanjega ozračja. Pozimi temperatura na KC 1 ne narašča.

(3) Običajno je temperatura na KC 2 nižja kot na KC 1, vendar pa sta temperaturna viška na KC 2 preseгла temperaturo na KC 1, in sicer med 5.-8. avgustom 2023 za +0.4 °C in za +0.44 °C v obdobju od 8.-12. junija 2024, kar je povezano s spremembo ventilacije in dejstvom, da sta bili poletji 2023 in 2024 najtoplejši v zadnjih letih.

(4) Turistično manj obiskane jame (kot je primer Kostanjeviške jame) lahko služijo kot referenčne točke za primerjavo z masovno obiskanimi jamami, saj je v prvih antropogeni vpliv zaradi turizma zanemarljiv.

Zahvala

Raziskava je bila del: bilateralnega projekta "Mikro-klimatski monitoring v turističnih jamah, primerjava Grand Canyon Caverns s slovenskimi jamami" (ARIS BI-US/22-24-074); Infrastrukturnega programa "Sofinanciranje izvajanja mednarodnega infrastrukturnega projekta EPOS" (ARIS I0-E017); programa "Raziskovanje krasa" (ARIS P6-0119); RI-SI-EPOS projekta; HORIZON Research and Innovation Actions projekta EPOS ON in HORIZON-INFRA projekta TRANSFORM².

Literatura

- ARSO (2024). <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/>, Accessed 13. 8. 2024
- Badino, G. (1999). Il clima sotterraneo. La venta Association – Members Writtings E-Archives, 1–49, www.laventa.it
- Badino, G. (2010). Underground meteorology – »what's the weather underground?«. Acta Carsologica, 39/3, 427–448. doi: 10.3986/ac.v39i3.74
<http://fridge.ingv.it/>, Accessed 14. avgust 2024
<https://www.go-fair.org/fair-principles/>, Accessed 19. avgust 2024
- IZRK metadata portal (2021-). Aljančič, M. (Ur), Kafol, Ž. (Ur), Pipan, T. (Ur), Šebela, S. (Ur), Čeligoj Biščak, J. (Ur), Ravbar, N. (Ur). Postojna: Karst Research Institute ZRC SAZU, <https://metadata.izrk.zrc-sazu.si/srv/eng/catalog.search#/home>.
- Killing-Heinze, M., Pflitsch, A., Furian, W., Allison, S. (2017). The importance of air temperature as a key parameter to identify climatic processes inside Carlsbad Cavern, New Mexico, USA. Journal of Cave and Karst Science, 79, 3, 153–167. doi: <https://dx.doi.org/10.4311/2014IC0119>.
- Mammola, S., Piano, E., Cardoso, P., Vernon, P., Domínguez-Villar, D., Culver, D.C., Pipan, T., Isaia, M. (2019). Climate change going deep: the effects of global climatic alterations on cave ecosystems. The anthropocene review, 6, 2, 98–116. doi: [10.1177/2053019619851594](https://doi.org/10.1177/2053019619851594).
- Mulec, J., Oarga-Mulec, A., Šturm, S., Tomazin, R., Matos, T. (2017). Spacio-Temporal Distribution and Tourist Impact on Airborne Bacteria in a Cave (Škocjan Caves, Slovenia). Diversity, 9, 3, 28. <https://doi.org/10.3390/d9030028>

- Mulec, J., Skok, S., Tomazin, R., Letić, J., Pliberšek, T., Stopinšek, S., Simčič, S. (2023). Long-Term Monitoring of Bioaerosols in an Environment without UV and Desiccation Stress, an Example from the Cave Postojnska Jama, Slovenia. *Microorganisms*, 11, 3, 809. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030809>
- Pipan, T., Petrič, M., Šebela, S., Culver, D.C. (2019). Analyzing climate change and surface-subsurface interactions using the Postojna Planina Cave System (Slovenia) as a model system. *Reg. Environ. Chang.*, 19, 379–389. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1349-z>
- Šebela, S., Turk, J. (2022). Comparison of historical and current temperatures in show caves (Slovenia). *SN Appl. Sci.*, 4, 1. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04881-1>
- Šebela, S., Novak, U. (2024) Attenuating Anthropogenic Impact on Subterranean Micro-Climate: Insights from the Biospeleological Station in Postojna Cave. *Geosciences*, 14, 3, 87. <https://doi.org/10.3390/geosciences14030087>
- Smithson, P.A. (1991). Inter-relationship between cave and outside air temperatures. *Theoretical and Applied Climatology*, 44, 65-73.
- Tičar, J., Tomić, N., Breg Valjavec, M., Zorn, M., Marković, S. B., Gavrilov, M. B. (2018). "Speleotourism in Slovenia: balancing between mass tourism and geoheritage protection". *Open Geosciences*, 10, 1, 344-357. <https://doi.org/10.1515/geo-2018-0027>
- Tomazin, R., Simčič, S., Stopinšek, S., Kopitar, A.N., Kukec, A., Matos, T., Mulec, J. (2023). Effects of Anthropogenic Disturbance and Seasonal Variation on Aerobiota in Highly Visited Show Caves in Slovenia. *Microorganisms*, 11, 2381. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11102381>
- Vaccarelli, I., Colado, R., Pallarés, S., Galassi, D.M.P., Sánchez-Fernández, D., Di Cicco, M., Meierhofer, M.B., Piano, E., Di Lorenzo, T., Mammola, S. (2023). A global meta-analysis reveals multilevel and context-dependent effects of climate change on subterranean ecosystems. *One Earth*, 6, 11, 1510-1522, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.09.001>.