

Sortirana tla v jamah – pokazatelj podobnosti med jamami in periglacialnim okoljem

Matej Blatnik^{1,4}, Jaroslav Obu^{2,4}, Jure Košutnik^{3,4}, Alojzij Blatnik⁴, Simon Filhol², Luc Girod², Simon Zwieback⁵, Paul Overduin⁶, Julia Boike^{7,6}

Povzetek

Sortirana tla so geomorfološki pojav, ki se običajno pojavlja v periglacialnih okoljih zaradi ponavljajočih se ciklov zmrzovanja in tajanja, pri čemer se različno veliki delci tal stalno premeščajo in tvorijo različne geometrijske vzorce. Ustrezne pogoje za nastanek takšnih tal je moče najti tudi v nekaterih kraških jamah. V pričujoči študiji smo se osredotočili na dve jami – Ledenica pod Hrušico in Barka, ki sta relativno plitvi, prostorni in odprti proti površju, kar ustvarja mikroklimo z nizkimi temperaturami v zimskem obdobju. V obeh jamah se nahaja tako grobozrnat grušč kot fin sediment, ki se ob stalnem zmrzovanju in tajanju premešča v menjajoče se pasove na nagnjenih pobočjih oziroma sortirane kroge na ravnih površinah. V obeh jamah smo neprekinjeno merili temperature zraka in sedimenta več kot pet let (obdobje=?). Več samodejnih merilnikov je bilo postavljenih na različnih globinah v tleh in ob jamskih stenah, da bi ugotovili dinamiko prenašanje toplote in širjenje temperaturnega signala z globino. Jamo Barka smo dodatno opremili s tremi fotoaparati za samodejen zajem fotografij, iz katerih bomo lahko izdelali 3D modele z urno ločljivostjo in tako analizirali dinamiko spreminjanja sortiranih tal in spremembo njihovega volumna ter spremljali premikanje posameznih delcev. Prvi niz meritev je pokazal, da se v hladni polovici leta ponovi več ciklov zmrzovanja in tajanja, zmrzal pa lahko prodre do okoli 40 cm globine. Detajlne analize premikov delcev nam bodo omogočile boljše razumevanje nastanka in dinamike sortiranih tal ter tudi procesa krioturbacije, ki je ključen proces v Arktičnem ogljikovem ciklu.

Ključne besede: sortirana tla, cikli zmrzovanja in tajanja, past hladnega zraka, jamska klima

Key words: sorted patterned ground, freeze-thaw cycles, cold air trap, cave climate

Uvod

Kraške jame in sortirana tla sta dva geomorfološka pojava, ki običajno nista povezana med seboj. Sortirana tla so namreč najbolj značilna za periglacialna okolja, kjer se vlažen fin sediment in grobi delci v tleh tekom številnih ciklov zmrzovanja in tajanja reorganizirajo v sortirana tla (Matsuoka et al., 2003; Hallet, 2013). Pojavljajo se v različnih oblikah, kot na primer sortirani krogi na ravnih tleh ali kot sortirani pasovi na nagnjenem terenu (Kessler & Werner, 2003). Sortirana tla se lahko razvijejo tudi v kraških jamah na

¹ ZRC SAZU Inštitut za raziskovanje krasi, Titov trg 2, 6230 Postojna

² Univerza v Oslu, Problemveien 7, 0315 Oslo, Norveška

³ Univerza v Novi Gorici, Vipavska cesta, 5000 Nova Gorica

⁴ Društvo za raziskovanje jam Ljubljana, Luize Pesjakove 11, 1000 Ljubljana

⁵ Univerza na Aljaski, Fairbanks, 505 S Chandalar, Fairbanks, AK 99775, ZDA

⁶ Alfred Wegener Institut, Helmholtz Center for Polar and Marine Research, Am Handelshafen 12, 27570 Bremerhaven, Nemčija

⁷ Humboldt Universität, Unter den Linden 6, 10117 Berlin, Nemčija

območjih z zmernim podnebjem, in sicer v primeru, ko se v jamah vzpostavi posebna mikroklima (Obu et al., 2018).

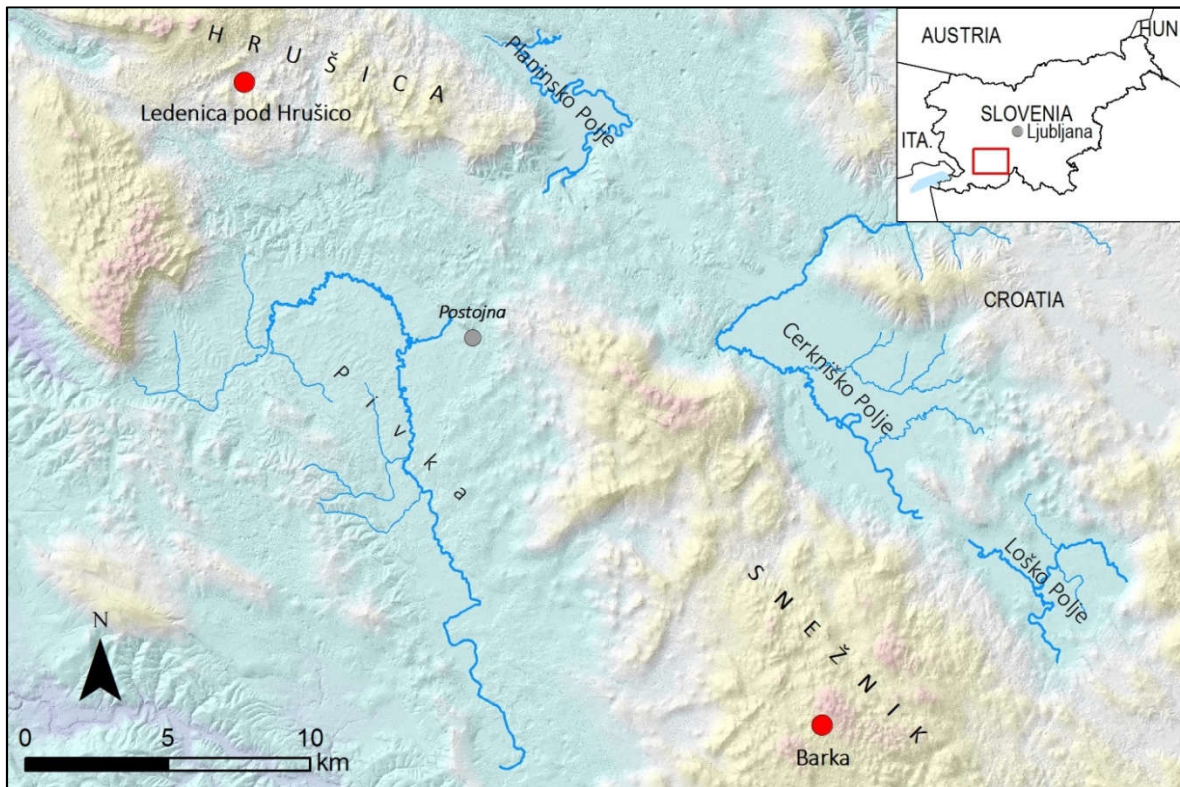
Jame imajo običajno visoko vlažnost in stabilno temperaturo, ki odraža povprečno letno temperaturo okolice. Vendar se pa številni dejavniki, kot so število jamskih vhodov, oblikovanost jame in prisotnost vode, odražajo v bolj kompleksni temperaturni dinamiki, v aktivnem kroženju zraka, spremenljivi vlažnosti in drugih s tem povezanih procesih (Badino, 1995; Luetscher & Jeannin, 2004; Covington & Perne, 2015).

Pričujoč članek je posvečen jamam Barka in Ledenica pod Hrušico, v katerih spremljamo dinamiko sortiranih tal. Obe jami imata precej preprosto obliko - velik vhod in prostorno dvorano neposredno pod vhodom. Takšna oblikovanost omogoča, da v zimskem obdobju težji hladen zrak enostavno vstopa v jamo in povzroča zmrzovanje tal. Ugodna struktura jamskega sedimenta in prisotnost ciklov zmrzovanja in tavanja omogočajo nastanek sortiranih tal.

Do sedaj je bilo objavljenih že veliko študij o sortiranih tleh, ki opisujejo njihovo razprostranjenost, obliko in sestavo, kako se razvijajo in druge dejavnike, ki vplivajo na njihov nastanek. Manj je raziskav, ki so posvečene sortiranim tlam v jamah. Študije opisujejo takšne jame z območja Alp, Karpatov in Dinarskega gorstva (Pulinowa & Pulina, 1972; Mitter, 1983; Luetscher et al., 2005; Zupan Hajna, 1997; Žák et al., 2013). Oblikovanost tal, temperaturno dinamiko in strukturo sedimentov so analizirali Urbančič & Mihevc (2019) v Skedneni jami ter Obu s sodelavci (2018) v Ledenici pod Hrušico v Sloveniji. Pričujoč članek opisuje nadaljnje delo v jami Ledenica pod Hrušico in razširitev meritev temperature zraka in sedimenta ter samodejni zajem fotografij za podrobnejše spremljanje sortiranih tal v jami Barka.

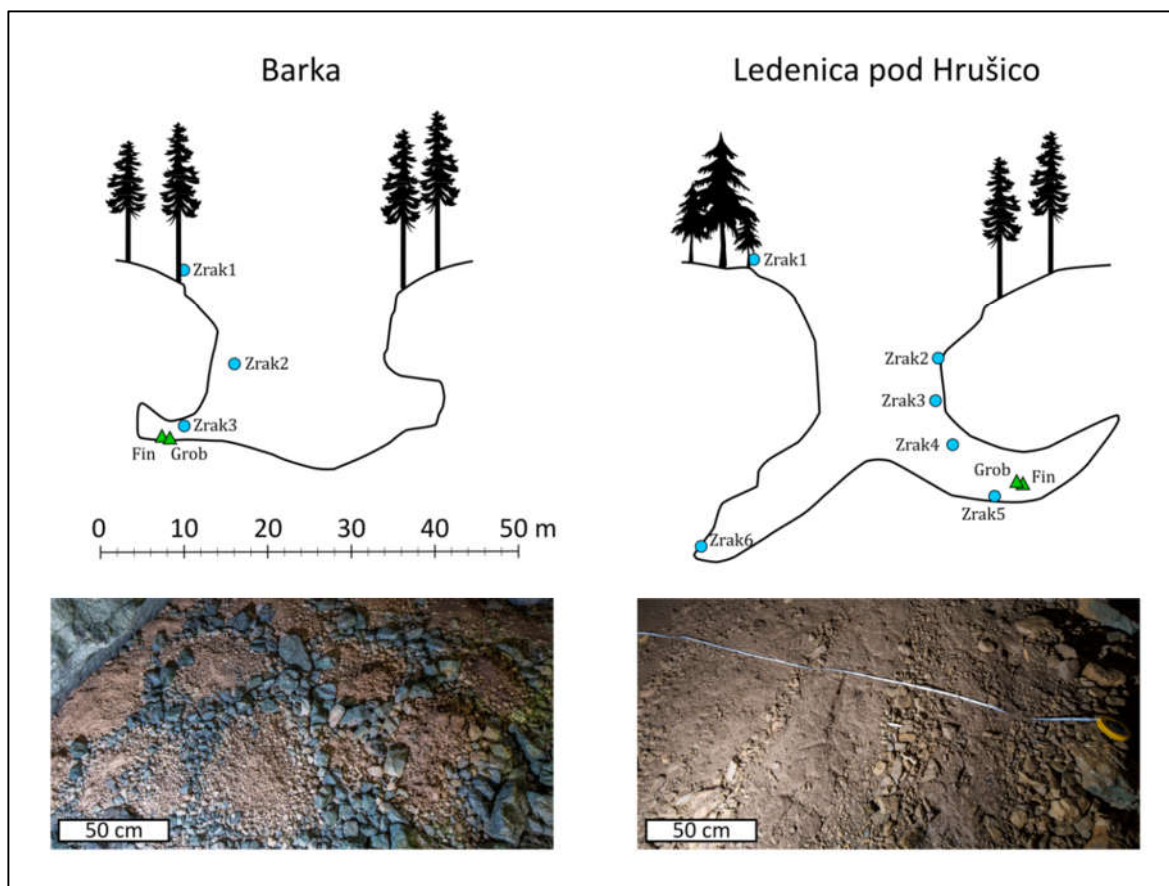
Območje proučevanja

V raziskavi sta zajeti dve območji s sortiranimi tlemi, in sicer kraški jami Barka in Ledenica pod Hrušico. Ledenica pod Hrušico leži na planoti Hrušica (Slika 1) na nadmorski višini 764 m. Vhod z 20 m premera se nadaljuje s prostorno dvorano z dnom na globini 28 m (Slika 2). Na dnu sta dva kratka stranska rova; na S najnižji del jame s podornimi bloki in občasnim ledom, na JV strani pa pobočje z naklonom 10–20° in s približno 10 m dolgimi in 70 cm širokimi sortiranimi pasovi (Obu et al., 2018). Jama Barka leži na planoti Snežnik (Slika 1) z vhodom na 1147 m nadmorske višine. Gre za 30 m široko, 50 m dolgo in 20 m globoko podolgovato kotanjo s previsnimi stenami (Zupan Hajna, 1997). Na JZ strani je majhen spodmol, kjer so se na približno 20 m² veliki ravni površini oblikovali do 60 cm veliki sortirani krogi (Slika 2). V Ledenici pod Hrušico fin sediment izvira iz časov, ko se je skozi jame aktivno pretakala voda, medtem ko je grob material rezultat počasnega razpadanja jamskih sten. V Barki je verjetno tako fin kot tudi grob sediment posledica mehničnega preperevanja jamskih sten.



Slika 1: Lega proučevanih jam.

Za obe območji je značilno celinsko podnebje s povprečno letno temperaturo zraka med 6 in 8 ° C in okoli 1800 mm padavin letno (Obu et al., 2018). Posebna oblikovanost jam z velikim vhodom in prostorno dvorano omogoča učinkovito izmenjavo toplote med površjem in jamo. V hladni polovici leta se relativno težji hladen zrak s površja steka v nižja območja, v našem primeru v jame. Hladen zrak se na dnu jam akumulira in z nadaljnjim ohlajanjem povzroča zmrzal. V toplejši polovici leta kroženje zraka ni mogoče, saj je toplejši zrak relativno lažji od hladnega, kar pomeni, da ga ne more izpodrinit. Jame se tako obnašajo kot pasti hladnega zraka in ne omogočajo kroženja zraka (Covington & Perne, 2015).



Slika 2: Prečni prerez jam Barka in Ledenica pod Hrušico s položaji merilnikov temperature zraka (modri krogi) in sedimenta (zeleni trikotniki). Spodaj fotografije sortiranih tal v obeh jamah (Foto: M. Blatnik).

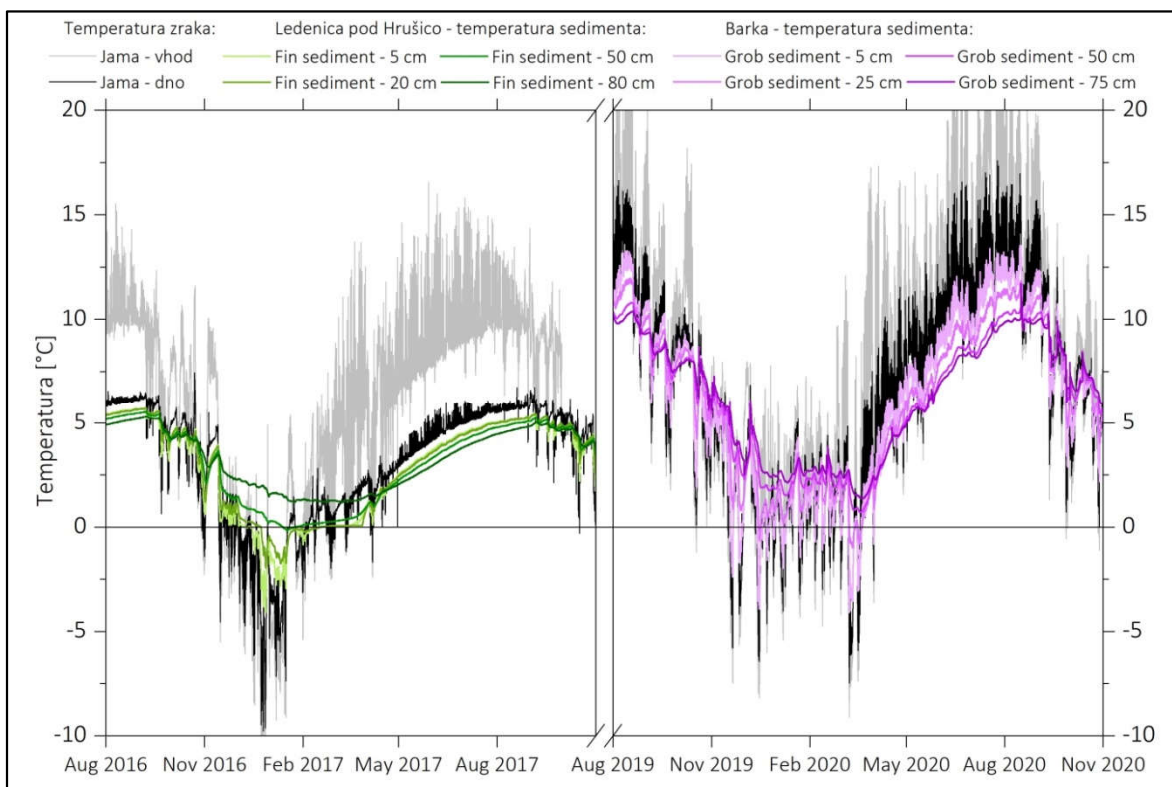
Metode

Za spremljanje temperaturne dinamike smo v obeh jamah vzpostavili samodejne meritve temperatur zraka in sedimenta na različnih globinah. V Ledenici pod Hrušico so bile vse meritve opravljene z merilniki HOBO U12, ki so povezani s tipali TMCx-HD (Onsetcomp, 2021a). Temperature zraka smo merili na 6 različnih globinah med vhodom v jamo in dnom. Meritve temperature sedimenta smo vzpostavili v dveh profilih z grobim in finim sedimentom, in sicer na 4 različna mesta med 5 in 80 cm globine. V jami Barka smo za merjenje temperature sedimenta uporabili isti tip merilnikov. Temperaturne značilnosti finega in grobega sedimenta smo spremljali na 4 mestih med 5 in 75 cm globine. Temperaturo zraka smo merili s samodejnimi merilniki TidbiT MX Temperature 400' (Onsetcomp, 2021b), in sicer na treh globinah med vhodom v jamo in njenim dnom. Vse meritve temperature zraka in sedimenta so bile v 1 urnem intervalu, meritve pa so potekale od 22. avgusta 2015 naprej v jami Ledenica pod Hrušico oziroma od 22. decembra 2017 naprej v jami Barka. 30. septembra 2018 smo v jami Barka namestili sistem s 3 fotoaparati SONY ILCE QX-1 (Sony.co, 2021) za samodejni zajem fotografij v intervalu 1 ure v zimskem obdobju oziroma intervalu 1 dneva v poletnem obdobju. Kamere smo namestili na jamske stene tako, da so usmerjene proti tlorišču s sortiranimi tlemi z različnih kotov. To omogoča fotogrametrično obdelavo fotografij, s čimer bi lahko podrobno analizirali spremembe v obliki in volumnu tal (Filhol et al., 2019), pa tudi gibanje posamičnih delcev na površini.

Rezultati in razprava

Meritve temperature zraka in sedimenta so pokazale določene razlike med preučevanima jamama. V hladni polovici leta se pri obeh jamah temperaturna nihanja zraka iz površja v notranjost prenašajo z nekoliko zmanjšano amplitudo. V topli polovici leta je ta dinamika nekoliko različna. V primeru Ledenice pod Hrušico toplejši in lažji zunanji zrak ne more vstopiti v jamo. Notranjost jame je glede na okolico podhlajena, temperatura pa skozi celotno poletje in jesen zelo počasi narašča. Jama se torej obnaša kot past hladnega zraka (Slika 3). V jami Barka je tudi v topli polovici leta prisotna izmenjava toplote med površjem in notranjostjo jame, tako da so spremembe na površju z nekoliko zmanjšano amplitudo zaznane tudi na dnu jame (Slika 3). Možen vzrok bi bil prevetrenost ali pa lokalno vzpostavljeno kroženje zraka, saj se sortirana tla nahajajo pod manjšim kaminom, ki je morda povezan s površjem.

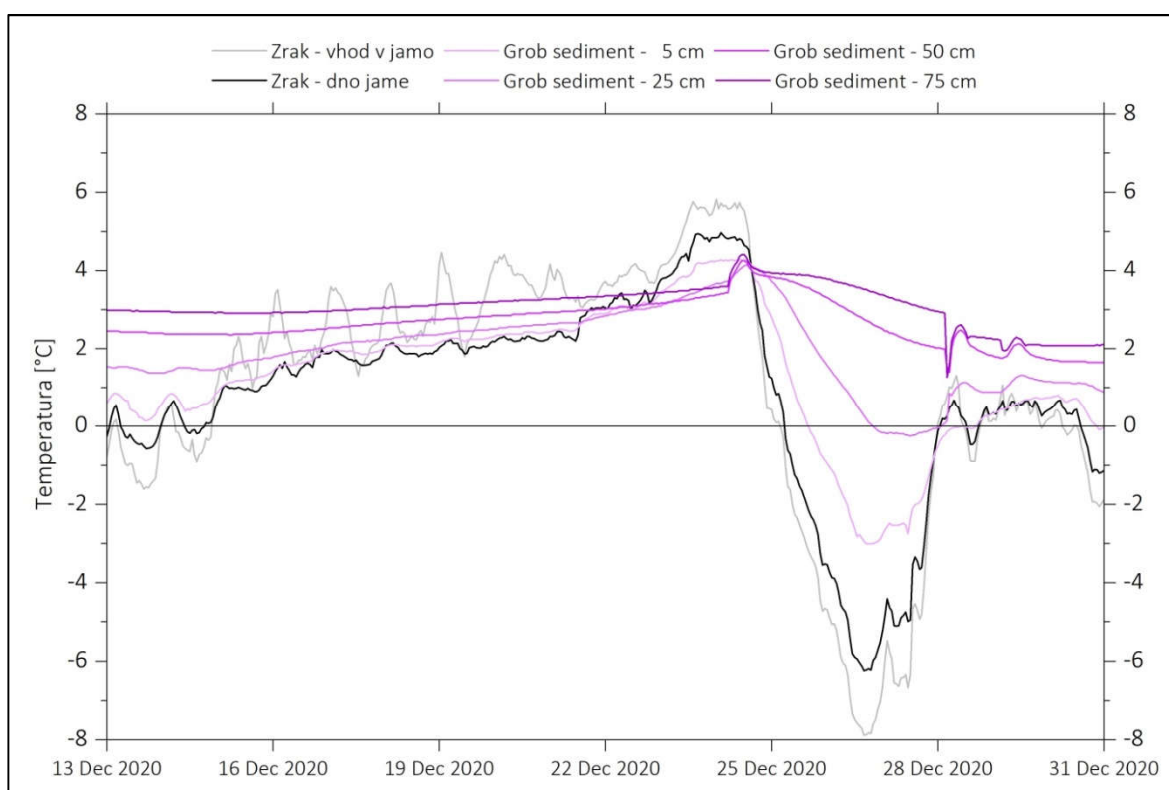
Temperatura sedimenta v obeh jamah sledi dinamiki temperature zraka v najnižjem predelu jame, vendar z zmanjšano amplitudo in z nekoliko časovnega zamika (Slika 4). S povečanjem globine v sedimentu se časovni zamik v temperaturnih spremembah še dodatno povečuje, amplituda nihanj pa zmanjšuje ali občasno izgine, kar pomeni, da so razlike med letnimi ali dnevnimi temperaturnimi viški in nižki manjše (Slika 4). V Ledenici pod Hrušico je letna amplituda temperature zraka na dnu jame približno 15 °C, medtem ko je na 80 cm globine sedimenta le 6 °C. Časovni zamik temperaturnih sprememb je na tej globini med 2 in 5 dni. Na dnu jame Barka je sezonsko nihanje temperature zraka približno 35 °C, pri 75 cm globine sedimenta pa 10 °C. Časovni zamik pri temperaturnih spremembah je 0–2 dni, kar potrjuje učinkovitejšo izmenjavo toplote med jamskim in zunanjim okoljem (Sliki 3 in 4).



Slika 3: Dinamika temperature zraka in sedimenta v Ledenici pod Hrušico (levo) in Barki (desno).

Pri proučevanju sortiranih tal so glavni cilji ugotoviti: 1) globino, pri kateri temperatura sedimenta pade pod ledišče, kar omogoča cikle zmrzovanja in tavanja, in 2) število ciklov zmrzovanja in tavanja v sezoni. V Ledenici pod Hrušico smo zaznali 1–2 cikla zmrzovanja in tavanja na sezono, zmrzovanje pa je prisotno do 40 cm globine. V jami Barka smo zaznali približno 5–10 ciklov zmrzovanja in tavanja na sezono, zmrzovanje pa se prav tako pojavlja do 40 cm globine (Slika 3). Meritve torej nakazujejo, da je v jami Barka precej bolj aktivna dinamika zmrzovanja in tavanja, s tem pa hitrejša premeščanje delcev in s tem nastanek sortiranih tal.

Prvi posnetki s fotoaparatom in fotogrametrična analiza so pokazali, da navpičen premik tal notranjosti krogov z vlažnim finim sedimentom znaša do 5 cm. Spremembe v grobem gradivu na obrobju krogov so manjše. Spremljali smo tudi bočne premike delcev, pri čemer so se že po prvega pol leta spremljanja trije označeni kamni premaknili za več centimetrov iz notranjosti proti obrobju krogov. Nadaljnje analize posnetkov bodo posvečene podrobni analizi sprememb v volumnu in podrobnejšem spremljanju posamičnih delcev za daljše obdobje meritev.



Slika 4: Blaženje in zamik temperaturnih signalov v zraku in sedimentu z naraščanjem globine – primer dogodka iz decembra 2020 v jami Barka.

Sklep

Začetna analiza temperatur zraka in sedimenta je izpostavila določene razlike v klimatskih značilnosti obeh proučevanih jam. Ledenica pod Hrušico se bolj izrazito obnaša kot past hladnega zraka, in omogoča kroženje zraka le pozimi. V sedimentu so odzivi na spremembe temperature zraka počasni, zato je število ciklov zmrzovanja in tavanja majhno, kar se odraža v počasnejšem razvoju sortiranih tal. V Barki je izmenjava toplote med površjem in jamo učinkovitejša. Zaznali smo večja temperaturna nihanja tako pri zraku kot

v sedimentu, prav tako je bilo zabeleženo večje število ciklov zmrzovanja in tajanja. Posledično je v jami Barka razvoj sortiranih tal verjetno hitrejši. Samodejno fotografiranje tal z različnih zornih kotov se je prav tako izkazalo kot uporabna metoda za natančnejše spremljanje ciklov zmrzovanja in tajanja, za spremljanje premikanja posameznih delcev v horizontalni in tudi vertikalni smeri ter za ugotavljanje sprememb v volumnu. Uporabljene metode in tudi ugotovitve bi bilo zanimivo primerjati s tistimi s polarnih območij, kjer permafrost za razliko od kraških območij predstavlja tudi oviro za pretakanje vode navzdol.

Literatura

- Badino, G. (1995). *Fisica del Clima Sotterraneo-Memorie IIS. Volume 7. Istituto Italiano di Speleologia, Bologna*, 136 pp.
- Covington, M. D., Perne, M. (2015). Consider a cylindrical cave: A physicist's view of cave and karst science, *Acta Carsologica*, 44, 3, 363–380.
- Filhol, S., Perret, A., Girod, L., Sutter, G., Schuler, T.V, Burkhart, J.V. (2019). Time-Lapse Photogrammetry of Distributed Snow Depth During Snowmelt, *Water Resources Research*, 55, 9, 7916–7926.
- Hallet, B. (2013). Stone circles: form and soil kinematics, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371, 2004.
- Kessler, M.A., Werner, B.T. (2003). Self-Organization of Sorted Patterned Ground, *Science*, 299, 5605, 380–383.
- Luetscher, M., Jeannin, P-Y. (2004). The role of winter air circulation for the presence of subsurface ice accumulations: an example from Monlési ice cave (Switzerland), *Theoretical and Applied Karstology*, 17, 19–25.
- Luetscher, M., Jeannin, P-Y., Haeberli, W. (2005). Ice caves as an indicator of winter climate evolution: a case study from the Jura Mountains, *Holocene*, 15, 7, 982–993.
- Matsuoka, N., Abe, M. Ijiri, M. (2003). Differential frost heave and sorted patterned ground: field measurements and a laboratory experiment, *Geomorphology*, 52, 1, 73–85.
- Mitter, P. (1983). Frost features in the karst regions of the West Carpathian Mountains. *Proceedings of Fourth International Conference »Permafrost«, Fairbanks, Alaska, Washington, D.C., National Academy Press*, 86–865.
- Obu, J., Košutnik, J., Overduin, P. P., Boike, J., Blatnik, M., Zwieback, S., Gostinčar, P., Mihevc, A. (2018). Sorted patterned ground in a karst cave, Ledenica pod Hrušico, Slovenia, *Permafrost and Periglacial Processes*, 29, 2, 121–130.
- Onsetcomp. (2021a). HOBO 4-Channel External Data Logger. URL: <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-008>
- Onsetcomp. (2021b). HOBO TidbiT MX Temperature 400' Data Logger. URL: <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx2203>
- Pulinowa, M.Z., Pulina, M. (1972). Phénomènes cryogènes dans les grottes et gouffres des Tatras, *Biuletyn Peryglacialny*, 21, 201–235.
- Sony.co. (2021). Sony ILCE-QX1 Lens-Style Camera with 20.1MP Sensor, Full Specifications & Features. URL: <https://www.sony.co.uk/electronics/interchangeable-lens-cameras/ilce-qx1-body-kit/specifications>
- Urbančič, T., Mihevc, A. (2019). Movements and polygonal ground formation monitoring with terrestrial laser scanning in the cave Skednena jama, *Proceedings of European Geosciences Union, General Assembly 2019, Vienna, Austria, Geophysical research abstracts, Vol. 21*.
- Zupan Hajna, N. (1997). Karst depressions with precipitous walls on the southern slope of Snežnik Mountain, Slovenia, *Acta Carsologica*, 26, 2, 397–407.
- Žák, K., Orvosova, M., Filippi, M., Vlček, L. (2013). Cryogenic cave pearls in the periglacial zones of ice caves, *Journal of Sediment Research*, 83, 2, 207–220.