

Uporaba metode fotogrametričnih časovnih vrst za spremljanje sortiranih strukturnih tal v jamskem okolju

Application of time-series photogrammetry for monitoring of the sorted patterned ground in cave environment

Marko Zore, Mihaela Triglav Čekada, Matej Blatnik, Jaroslav Obu

UDK: 528.74:551.44(497.4)
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.03
Prispelo: 22. 10. 2024
Sprejeto: 31. 7. 2025

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2025.03.352-365
SCIENTIFIC ARTICLE
Received: 22. 10. 2024
Accepted: 31. 7. 2025

IZVLEČEK

V prispevku je predstavljen postopek opazovanja delcev na sortiranih strukturnih tleh v kraški jami. Zaradi ponavljajočega zmrzovanja in tajanja lahko pride do sortiranja drobnozrnatega sedimenta ter grušča, ki se razporedita v krožne vzorce. Te reliefne oblike so značilne za hladna okolja brez vegetacije, najdemo pa jih tudi v kraških jamah v Sloveniji. Sortirana strukturna tla so večkrat povezana s procesom krioturbacije, ki je slabo raziskan. Opazovanje premikov delcev na sortiranih strukturnih tleh lahko vodi do pomembnih spoznanj v povezavi s krioturbacijo. Namen članka je analiza primernosti uporabe fotogrametrično izdelanih gostih oblakov točk, ki so bili izdelani na podlagi grajenja strukture iz gibanja, za spremljanje premikov delcev na strukturnih tleh v jami Barka na Snežniški planoti. Na podlagi štirih konvergentnih fotografij sortiranih tal, ki smo jih posneli enkrat dnevno, smo za vsak dan izdelali gost oblak točk in izvedli analizo časovne vrste v obdobju od sredine decembra 2022 do sredine junija 2023. Z uporabljenno metodo smo z natančnostjo 2,3 milimetra uspešno zaznali vertikalne premike sedimenta, ki med ciklom zmrzovanja in odtajanja lahko znašajo nekaj centimetrov.

ABSTRACT

The paper presents a method for observing particles on sorted patterned ground in a karst cave. Due to repeated freeze-thaw cycles, fine-grained sediment and gravel can be sorted and arranged in circular patterns. These landforms are characteristic of cold, vegetation-free environments, but they can also be found in karst caves in Slovenia. Sorted patterned ground is often associated with the process of cryoturbation, which is still poorly understood. Observing particle movements on sorted patterned ground can provide unique insights into the cryoturbation process. The purpose of this paper is to analyse the suitability of photogrammetrically derived dense point clouds, based on Structure from Motion method application, for monitoring particle movements on sorted patterned ground in the Barka cave on the Snežnik Plateau, Slovenia. We used this method to create 3D dense point clouds from four convergent photographs of the sorted circles for each day and performed a time series analysis for the period from mid-December 2022 to mid-June 2023. We successfully detected vertical sediment movements of several centimetres during freeze-thaw cycles within an accuracy of 2.3 mm.

KLJUČNE BESEDE

krioturbacija, fotogrametrija, reliefne spremembe, jama Barka, Slovenija

KEY WORDS

cryoturbation, photogrammetry, morphological changes, Barka cave, Slovenia

1 UVOD

Tajanje organske snovi, ki je bila shranjena v permafrostu, bo zaradi njenega razkrajanja povzročilo visoke izpuste ogljikovega dioksida in metana v ozračje (Schurr et al., 2015). Ključen proces, ki je tisočletja shranjeval organsko snov v permafrostu, je krioturbacija (Palmtag in Kuhry, 2018). Krioturbacija je proces notranjega kroženja snovi v prsti (tleh) kot posledica ponavljajočega zmrzovanja in tavanja tal. Ponavljajoče zmrzovanje in tavanje (ang. *freeze-thaw cycles*) povzroča selektivno dvigovanje površja (ang. *differential frost heave*), ki poleg krioturbacije povzroča sortiranje drobnozrnatega sedimenta ter gruča, ki se razporedita v različne vzorce. Takšne reliefne oblike se imenujejo sortirana strukturna tla, ki se najpogosteje pojavljajo v obliki kolobarjev ali prog in jih najpogosteje najdemo v hladnejših okoljih večjih geografskih širin ali višjih nadmorskih višin, kot so Arktika in visokogorje (Ballantyne, 2018).

Sortirana strukturna tla se pojavljajo tudi v nekaterih kraških jamah v Sloveniji, kjer so primerne razmere za njihov nastanek (Mihevc, 2009; Mihevc in Urbančič, 2019; Blatnik et al., 2023). Krajše jame, v katerih se lahko pozimi za daljši čas ujame hladen zrak, imajo lahko na vhodnih delih več ciklov zmrzovanja in tavanja sedimentov. Meljnata tekstura sedimenta, prisotnost gruča in zadostna količina vlage zaradi kapljanja ustvarijo ugodno okolje za nastanek sortiranih strukturnih tal (Obu et al., 2018).

Dosedanja opazovanja procesov, ki so ključni za nastanek strukturnih tal, so bila omejena na nekaj laboratorijskih poskusov (Matsuoka, 2003) in kombinacijo točkovnih meritev z ekstenziometri ter primerjavo časovnih vrst fotografij (Ballantyne 1996; Matsuoka, 2014, 2023). Kääb et al. (2014) so uporabili metodo grajenje strukture iz gibanja (ang. *structure from motion*, SfM) za izračun notranje in zunanje orientacije fotografij ter izdelavo redkih oblakov točk dveh blokov terestričnih fotografij, ki sta prikazovala sortirane kolobarje na Svalbardu v dveh časovnih presekih (2007 in 2010). Uporabili so programsko opremo *MicMac*, ki poleg SfM, v naslednjem koraku s postopkom gostega slikovnega ujemanja omogoča izdelavo gostega oblaka točk. V nadaljnjih korakih so v programu iz posameznega bloka fotografij in gostega oblaka točk izdelali še digitalni model površja (DMP) in popolni ortofoto. Analizo premikov v celotnem obdobju med testnima datumoma so izdelali na podlagi primerjave izdelanih DMP. Pri uporabi SfM pa so kot velik izziv izpostavili pomanjkanje stabilnih oslonilnih točk, saj je bilo celotno obravnavano območje podvrženo zmrzovanju in tajanju, torej tudi dvigovanju in spuščanju tal. Žal takrat zvezne meritve, ki bi za območje ponudile celovit prostorski ter časovni vpogled v procese dvigovanja površja in sortiranja delcev na dnevni ravni, niso obstajale.

Kraške jame so izvrstno okolje za spremljanje sortiranih strukturnih tal. Zaradi odsotnosti snežne odeje in rastja ter stabilnih jamskih sten, na katerih je mogoče lažje določiti stabilne oslonilne točke, omogočajo neprekinjeno spremljanje pojava v hladni polovici leta. Takšna lokacija ponuja idealno priložnost za boljši vpogled v procese dvigovanja tal zaradi zmrzali in sortiranja delcev, kar bo na koncu prispevalo k boljšemu poznavanju procesov, ki ustvarjajo krioturbacijo. V ta namen smo vzpostavili fotografski sestav za neprekinjeno spremljanje sortiranih kolobarjev v kraški jami Barka na Snežniški planoti. Namestili smo štiri fotoaparate, ki enkrat dnevno fotografirajo sortirane kolobarje.

Namen prispevka je predstaviti in ovrednotiti fotogrametrično metodo izdelave gostih oblakov točk, ki temeljijo na grajenju strukture iz gibanja, ki smo jo v jamskem okolju uporabili za izdelavo časovnih vrst oblakov točk strukturnih tal. V članku predstavljamo tudi podrobnejšo analizo vertikalnih premikov strukturnih tal v zimi 2022/2023.

2 METODOLOGIJA

2.1 Preučevano območje in priprava delovišča fotogrametrične izmere

Za preučitev in spremljanje sortiranih strukturnih tal je bila izbrana kraška jama Barka (katastrska številka 4271) v bližini Mašuna z vhomom na 1147 metrih nadmorske višine. Jama se odpira kot udornica s previsnimi stenami in krajšimi stranskimi rovi. Na ravnem dnu udornice, na globini 20 metrov, so pod previsno steno osnovnega brezna v enem izmed stranskih rogov sortirani kolobarji s premerom med 40 in 70 centimetri (Obu et al., 2023). Območje sortiranih strukturnih tal je zaradi previsnih sten neporazčeno in zaščiteno pred snežno odejo.



Slika 1: Stalne oslonilne točke C1, C2, C4 in C5 na stenah jame Barka. (foto: Jaroslav Obu)

Na stenah stranskega rova smo vzpostavili stalna sidrišča, na katera smo namestili štiri samodejno prožene fotoaparate, usmerjene v opazovano območje. Ta sidrišča v nadaljevanju obravnavamo kot stojišča fotoaparátov. Uporabili smo fotoaparate Canon EOS 2000D z objektiv EF-S18-55 F/3.5-5.6, z goriščno razdaljo, fiksirano na 20 mm, in zaslonko, fiksirano na 5,6. Tako smo dosegli primerljivo notranjo orientacijo vseh fotoaparátov. Fotoaparati imajo v zornem polju jamska tla v obsegu približno 3×4 metre, delno pa tudi stabilne navpične stene jame. V jami smo vzpostavili lokalni koordinatni sistem, v katerem so bile opredeljene koordinate oslonilnih točk na stenah jame (slika 1), ki smo jih uporabili za izračun zunanje orientacije fotografij. Oslonilne točke smo označili z vijaki, katerih glava je bila obarvana rdeče. Stabilizirali smo pet oslonilnih točk, ki pa niso bile vse vidne s štirih stojišč fotoaparátov. Oslonilne točke smo izmerili v lokalnem koordinatnem sistemu s teodolitom s podmilimetrsko točnostjo. Za celotno območje strukturiranih tal smo predpostavili, da se premika, zato nanj nismo postavili oslonilnih točk. Razporeditev oslonilnih točk posledično ni bila idealna za izvedbo fotogrametričnih meritev, saj smo bili omejeni s položajem stabilnih sten in njihovo vidnostjo s stojišč fotoaparátov. Fotoaparate in njihov prožilni sistem smo napajali preko akumulatorskih baterij. Nastavili smo jih na periodični zajem fotografij enkrat dnevno. Temperaturo sedimenta smo merili v drobnozrnatem sedimentu na globinah 5 in 25 centimetrov z merilniki

HOBO U12 in temperaturnimi senzorji HOBO ONS-TMC20-HD (merilni razpon od -40 do $+50^{\circ}\text{C}$, natančnost $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ in ločljivost $0,03^{\circ}\text{C}$). V analizi smo uporabili fotografije od sredine decembra 2022 do sredine junija 2023.

2.2 Izdelava oblakov točk

Dvigovanje tal in sortiranje delcev zaradi zmrzovanja sedimenta poteka hitro, običajno v enem dnevu. Zaradi relativno hitrih sprememb površja je za spremljanje teh procesov potrebna avtomatizacija zajema fotografij, zaradi velike količine pridobljenih podatkov pa tudi njihova avtomatizirana obdelava. Za izdelavo časovnih vrst gostih oblakov točk smo izbrali odprtokodno programsko orodje *MicMac v1.0.beta14* (Rupnik et al., 2017; Kääb et al., 2014), ki omogoča procesiranje preko zunanjih ukazov in s tem avtomatizacijo postopka izdelave oblakov točk (Filhol et al., 2019).

Posamezen gosti oblak točk smo izdelali iz štirih konvergentnih fotografij. Prvi blok štirih fotografij smo orientirali in georeferencirali v lokalnem koordinatnem sistemu z metodo SfM na podlagi štirih oslonilnih točk (C1, C2, C4 in C5), ki so bile hkrati vidne na vseh fotografijah (slika 1). V samokalibraciji, vključeni v SfM, smo predpostavili, da so vsi uporabljeni fotoaparati identični in imajo enake parametre notranje orientacije. Notranjo in zunanjo orientacijo vsakega naslednjega bloka fotografij smo ponovno izračunali z metodo SfM zaradi morebitnih majhnih sprememb naklonov zornih kotov fotoaparata, ki bi lahko napočile v vmesnem času, na primer kot posledica obtežitve ohišij zaradi ledenih sveč. V ta namen so bile samodejno izbrane vezne točke, ki so z algoritmom SIFT (Lowe, 2004) povezovali že orientiran blok fotografij z novim blokom fotografij. Potem so bile za skupno orientacijo vseh izbranih časovnih presekov samodejno izbrane vezne točke filtrirane, pri čemer so se za nadaljnjo obdelavo ohranile le tiste, ki so bile na stabilnih jamskih stenah. Preostale vezne točke v istem časovnem preseku so ostale iste. Vsi bloki fotografij so bili nato orientirani (izračun notranje in zunanje orientacije fotografij) in kombinirani z metodo iterativne blokovne izravnave, pri čemer je bila orientacija prvega sklopa fotografij obravnavana kot ničelno stanje, na katero smo priorientirali vse nadaljnje bloke fotografij. Pri tem se je izdelal redek oblak točk. V naslednjem koraku obdelave smo v programskem orodju *MicMac* z algoritmom za gosto slikovno ujemanje, v tem primeru je bil uporabljen večpogledni stereo (ang. *multi-view stereo image matching*, MVSM), izdelali gost oblak točk (Kozmus Trajkovski et al., 2025; Rupnik et al., 2017). Končni rezultat postopka je bila časovna vrsta gostih oblakov točk, pri čemer je bil posamezen oblak točk izdelan na podlagi štirih fotografij, ki so bile posnete istočasno, in obarvan na podlagi fotografij iz istega časovnega preseka.

2.3 Izračun vertikalnih premikov na sortiranih strukturnih tleh

Naslednji korak je metrična primerjava gostih oblakov točk in iskanje razlik v spremembi površja jame. V ta namen smo uporabili odprtokodno programsko orodje *Cloud Compare* (<https://www.danielgm.net/cc/>). Orodje omogoča tako okensko delo s posamičnimi oblaki točk kot konzolno obdelavo daljših nizov podatkov.

S programskim orodjem *Cloud Compare* smo izvedli naslednje ločene postopke, kjer smo večinoma uporabili privzete parametre:

- **Cross Section:** zožitev območja oblaka točk na interesno območje (odstranitev stropa in sten jame),

- **Rescale**: zmanjšanje merila osnovne enote z metra na milimetre zaradi majhnega območja obdelave,
- **Iterative Closest Point**: iterativni postopek za optimalno medsebojno ujemanje oblakov,
- **C2C Dist**: izračun medsebojnih razdalj med primerjanima oblakoma točk po metodi razdalje najbližjih sosedov,
- **Filter SF**: omejitev zaloge vrednosti medsebojnih razdalj med oblakoma točk in izločitev krajnih vrednosti.

Opisani postopki se izvedejo na posameznem gostem oblaku točk (*Cross Section*, *Rescale*) oziroma na dveh primerjanih gostih oblakih točk (*Iterative Closest Point*, *C2C Dist*, *Filter SF*). Za preučitev vertikalnih sprememb tal moramo postopke izvesti na večji množici gostih oblakov točk, za kar je ključen konzolni način uporabe programa *CloudCompare*, ki omogoča samodejno delo zunaj uporabniškega okna. Za lažji pregled ter nadzor nad podatki in ukazi smo uporabili programsko okolje *python* (<https://www.python.org/>), ki omogoča pregleden izbor gostih oblakov točk prek dialognih oken, pri čemer v ozadju kliče ustrezne postopke programa *CloudCompare*.

Za izračun višinskih razlik med gostimi oblaki točk v programu *CloudCompare* smo uporabili metodo razdalje najbližjih sosedov, pri čemer izračun temelji na različici »Hausdorffove razdalje« oziroma najdaljši razdalji izmed najkrajših razdalj v množici. Osnovni rezultat metode je običajno izračun razdalje med točkami dveh primerjanih gostih oblakov točk, program pa omogoča tudi izračun vektorjev razlik v smereh glavnih osi X, Y in Z, ki so podlaga za izračun razdalj med oblakoma. V nadaljevanju obravnavamo zgolj razlike v smeri osi Z, ki odražajo vertikalne razlike med primerjanima oblakoma, in sicer pozitivne vrednosti interpretiramo kot dvig tal, negativne vrednosti pa kot upad tal. Rezultat uporabljene metode je 2D-rastrska podoba območja z mrežo v ločljivosti piksla 1×1 mm s pripisanimi vrednostmi razlik v smeri osi Z.

2.4 Časovni in prostorski okvir analize

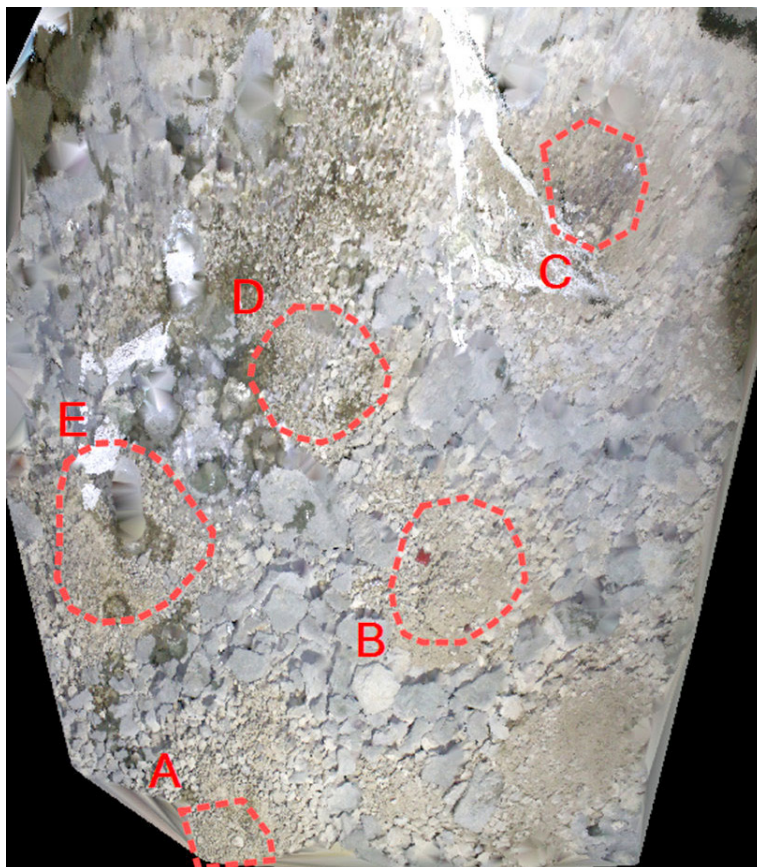
Za izvedbo analize smo uporabili podatke od druge polovice decembra 2022 do sredine junija 2023. V tem obdobju smo zabeležili več ciklov zmrzovanja in tajanja. Povečano dinamiko vertikalnih sprememb strukturnih tal smo zabeležili v obdobju od 20. januarja do 19. aprila 2023, kar v rezultatih podrobneje opisujemo. Za večmesečno obdobje je bil na voljo sklop fotografij, posnet v istem delu dneva – uporabili smo fotografije, posnete ob polnoči. V analizi smo skupno uporabili 90 gostih oblakov točk.

Najprej smo določali višinske spremembe med obdobji za celotno območje strukturnih tal. S tem smo poskušali sistematično zajeti obdobja največjih sprememb jamskih tal na posameznih koncentričnih območjih. Nato smo na analiziranem območju sortiranih strukturnih tal izbrali pet središč sortiranih kolobarjev, ki vsebujejo drobnozrnat material in so najbolj dovzetna za dviganje zaradi zmrzali. To so poligoni A, B, C, D in E, ki so podani v lokalnih koordinatah in so prikazani na sliki 2.

Izbrani poligoni okvirno obsegajo:

- območje A: 24×18 cm,
- območje B: 57×60 cm,
- območje C: 29×36 cm,
- območje D: 38×37 cm,
- območje E: 50×42 cm.

Izbrali smo goste oblake točk iz časovnega obdobja, ko so bile na območju poligonov spremembe največje. Prvi oblak točk v izbranem obdobju je bil izhodišče, na podlagi katerega smo izračunali višinske razlike v razmerju do vseh ostalih gostih oblakov točk v izbranem obdobju. Ugotovljene višinske spremembe podajamo kot povprečje vseh rastrskih vrednosti na podlagi preučenih območij v milimetrski ločljivosti.



Slika 2: Izbrani poligoni za preučevanje vertikalnih premikov na sortiranih strukturnih tleh na ortofotu.

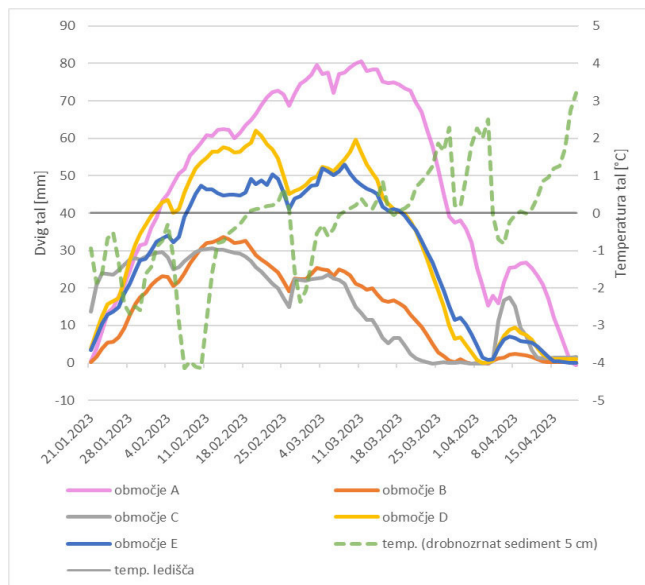
2.5 Natančnost oblakov točk in fotogrametrične metode

Natančnost gostih oblakov točk v časovni vrsti smo preverili tako, da smo izbrali tri ravne ploskve v velikosti vsaj 30×30 mm na stabilnih jamskih stenah. Točke na teh treh ploskvah smo iz celotne časovne vrste združili v en oblak točk za vsako ploskev. Za vsak tako izdelan oblak točk smo po metodi najmanjših kvadratov izračunali regresijsko ravnino in za posamezno ploskev izračunali oddaljenost vseh točk od regresijske ravnine. Iz oddaljenosti smo izračunali standardni odklon, ki nam služi kot merilo za natančnost oblakov točk.

Standardni odkloni točk od ravnine so bili 2,1 mm, 2,91 mm in 5,98 mm za posamezno ploskev. Koren vsote kvadratov standardnih odklonov znaša 2,3 mm. Vertikalnih premikov pod pragom enega standardnega odklona v nadaljnji analizi nismo upoštevali.

3 REZULTATI

V obravnavanem obdobju smo od sredine januarja do sredine aprila zaznali daljše obdobje dvigovanja in zniževanja podlage. To je obdobje, ko se je v jasnem in mirnem vremenu v jami nabiral zrak z negativnimi temperaturami, ki je povzročal zmrzovanje tal. Advektivni tip vremena je to jezero hladnega zraka občasno premešal, kar je povzročilo odtajanje tal. V tem obdobju zaznamo dviganje in zniževanje podlage na vseh opazovanih območjih (slika 3).



Slika 3: Povprečna sprememba višine jamskih tal po dnevih za izbrana območja ter temperatura drobnozrnatih sedimentov na globini 5 centimetrov.

Podatki o vertikalnem premikanju središč sortiranih kolobarjev kažejo precejšnjo odvisnost dvigovanja drobnozrnatega materiala od temperature tal. V obdobju od 21. 1. do 18. 2. (28 dni), ko so temperature tal negativne, opazimo dvig na vseh poligonih. Od 19. 2. do 26. 2. (7 dni) sledita obdobje temperatur nad lediščem in rahel spust na večini poligonov. Od 27. 2. do 7. 3. (9 dni) sledita drugi val negativnih temperatur in ponoven dvig. Od 8. 3. do 3. 4. (24 dni), ko so temperature nad lediščem, sledi močan spust. Od 4. 4. do 8. 4. (4 dni) sledi še tretje krajše obdobje negativnih temperatur, ko ponovno na vseh poligonih opazimo manj izrazit dvig tal.

Kljub relativni usklajenosti dvigovanja tal opazimo po območjih različne amplitude povprečnih vrednosti (slika 3). Ti premiki znotraj poligonov znašajo do 33,6 mm pri poligonu B, do 30,7 mm pri poligonu C in do 81,5 mm pri poligonu A, medtem ko je dvigovanje pri poligonu D 62,0 mm ter pri poligonu E okoli 52,5 mm (preglednica 1). Na prvo otoplitveno obdobje se poligoni B, C in D odzovejo z znižanjem za približno 15 mm, poligon E z znižanjem za približno 10 mm, medtem ko se območje A v primerjavi z drugimi poligoni na prvo otoplitveno obdobje ne odzove. Med ponovnim zmrzovanjem se povprečni višini poligonov D in E vrnete na vrednosti pred otoplitvijo, medtem ko se povprečni višini poligonov B in C dvigneta le za okoli 5 mm. Po dolgi otoplitvi 8. 2. se povprečne vrednosti za vsa območja z izjemo območja A vrnejo na izhodiščne vrednosti. Med ponovnim krajšim dvigom v začetku aprila pa se poligon C v povprečju dvigne za 16,7 mm, poligon D za 8,1 mm, poligon E za 7,1 mm, poligon B pa le za 2,4 mm.

Največji povprečni dvig smo na območjih B, C in D zaznali ob koncu februarja. To je ob koncu najdaljšega obdobja zmrzovanja, ko so negativne temperature tal vztrajale 28 dni. Na preostalih dveh območjih (A in E) smo najvišje povprečne vrednosti zaznali tudi v drugem obdobju zmrzovanja (9 dni), ki sledi vmesnemu obdobju tajanja (7 dni).

Maksimalni vertikalni premiki (slika 4) znotraj poligonov kažejo nekoliko drugačno dinamiko kot povprečni premiki. Najvišje maksimalne vrednosti izkazuje poligon D, poligon A pa nekoliko nižje, kar je obratno kot pri povprečnih vrednostih. Poligona B in C tudi pri maksimalnih vertikalnih premikih izkazujeta najmanjše vrednosti. Poligoni B, C in D imajo maksimalne vrednosti približno dvakrat višje kot povprečje, medtem ko je maksimalna vrednost pri poligonu A višja za četrtno. Maksimalni dvig pri poligonu E pa je devetkratnik povprečnega dviga. V poligonih B in C so bile zabeležene povprečne vrednosti dviga tal 33,6 mm za območje B in 30,7 mm za območje C. Najvišja maksimalna vrednost je bila 75,5 mm za območje B in 79,3 mm za območje C.



Slika 4: Maksimalna sprememba višine jamskih tal po dnevih za izbrane sortirane kolobarje. Območje E zaradi motenj (ledena sveča) ni prikazano.

Preglednica 1: Najvišji povprečni dvigi jamskih tal v obdobju od januarja do aprila 2023 (*vrednosti vključujejo motnje zaradi prisotnosti ledenih sveč).

	datum	dvig
Območje A	11. 3. 2023	80,5 mm
Območje B	14. 2. 2023	33,6 mm
Območje C	12. 2. 2023	30,7 mm
Območje D	20. 2. 2023	62,0 mm*
Območje E	8. 3. 2023	52,9 mm*

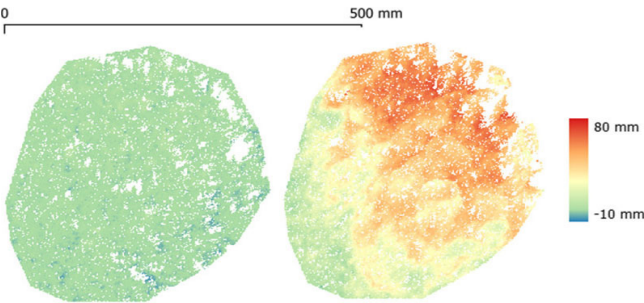
Preglednica 2: Najvišji maksimalni dvigi jamskih tal v obdobju od januarja do aprila 2023 (*vrednosti vključujejo motnje zaradi prisotnosti ledenih sveč).

	datum	dvig
Območje A	12. 3. 2023	102,3 mm
Območje B	20. 2. 2023	75,5 mm
Območje C	8. 2. 2023	79,3 mm
Območje D	20. 2. 2023	140,7 mm*
Območje E	19. 2. 2023	466,0 mm*

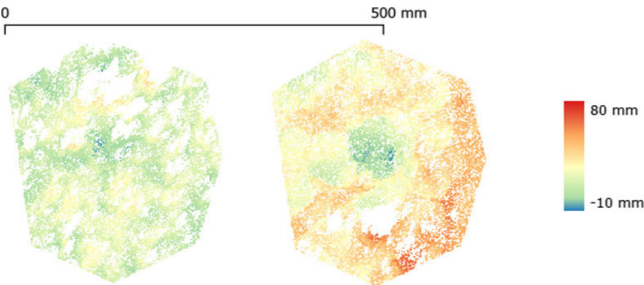
Na slikah od 5 do 9 je za pet izbranih testnih poligonov prikazana višinska razlika tal po enem dnevu in v obdobju do dneva z največjim povprečnim dvigom tal. Ugotovimo, da se največji povprečni dvig tal na vseh testnih območjih ni zgodil na isti dan. Beli lisi brez podatkov na desnih odsekih slik 8 in 9 sta nastali zaradi prisotnosti ledenih sveč in predstavljata bodisi območja brez podatkov, ki zaradi ledene sveče niso v vidnem polju objektiva fotoaparata, ali pa smo previsoke vrednosti, ki predstavljajo površino ledenih sveč, izločili, saj ne prikazujejo pravega dviga tal.



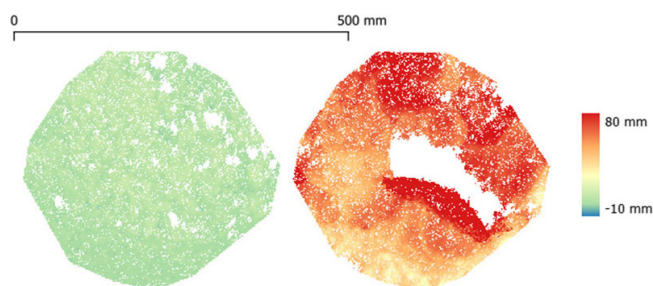
Slika 5: Levo višinska razlika od izhodišča (21. januar) po enem dnevu (22. januar) in desno višinska razlika med izhodiščem in dnev z največjo spremembo povprečnega dviga tal (11. marec) za območje A.



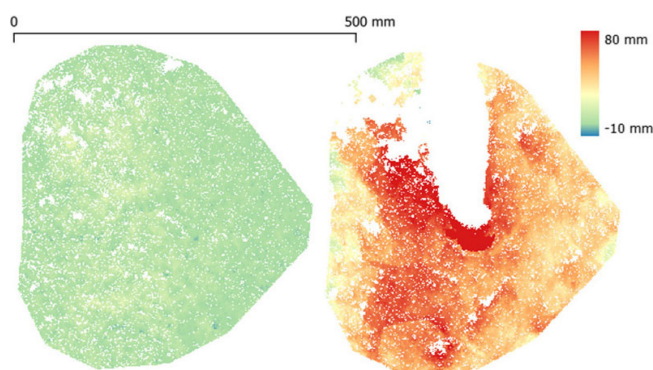
Slika 6: Levo višinska razlika od izhodišča (21. januar) po enem dnevu (22. januar) in desno višinska razlika med izhodiščem in dnev z največjo spremembo povprečnega dviga tal (14. februar) za območje B.



Slika 7: Levo višinska razlika od izhodišča (21. januar) po enem dnevu (22. januar) in desno višinska razlika med izhodiščem in dnev z največjo spremembo povprečnega dviga tal (12. februar) za območje C.



Slika 8: Levo višinska razlika od izhodišča (21. januar) po enem dnevu (22. januar) in desno višinska razlika med izhodiščem in dnem z največjo spremembo povprečnega dviga tal (20. februar) za območje D. Bela lisa brez izmerjene vrednosti je nastala zaradi prisotnosti ledene sveče.



Slika 9: Levo višinska razlika od izhodišča (21. januar) po enem dnevu (22. januar) in desno višinska razlika med izhodiščem in dnem z največjo spremembo povprečnega dviga tal (8. marec) za območje E. Bela lisa brez izmerjene vrednosti je nastala zaradi prisotnosti ledene sveče.

4 DISKUSIJA

4.1 Uporabnost metode fotogrametričnih časovnih vrst v jamskem okolju

Fotogrametrična izdelava gostih oblakov točk je v vedah o Zemlji zelo pogosto uporabljeno orodje, saj omogoča cenovno dostopen zajem prostorskih podatkov v visoki prostorski ločljivosti (Westoby et al., 2012). Kot večina ostalih metod zajema prostorskih podatkov (npr. tahimetrija, lasersko skeniranje ...) zahteva prisotnost na terenu, zato so podatki omejeni na vsakokratni obisk preučevanega območja. V ta namen so na težko dostopnih območjih preučevanja, kot so grenlandski ledeniki, uporabili pritrjene sestave fotoaparatorov, ki so v dnevnem intervalu fotografirali preučevane objekte z več strani (Mallalieu et al., 2017).

Izdelava gostih oblakov točk za dolge časovne vrste je lahko zelo delovno intenzivna in zamudna, zato je ključna avtomatizacija fotogrametričnega postopka. Za namen opazovanja sortiranih strukturnih tal v jami smo prilagodili algoritem, ki so ga Filhol et al. (2019) uporabili za spremljanje taljenja snega. Ključna za uspešnost izdelave je bila implementacija algoritma SIFT, ki je, kljub manjšim premikom zornih kotov fotoaparatorov, ki so bila posledica obtežitve ohišij zaradi ledenih sveč, omogočila koregistracijo fotografij.

Sinhronizirano fotografiranje z več fotoaparati se je v jamskem okolju izkazalo kot posebej zahtevno, in sicer najprej zaradi omejenih možnosti za postavitev fotoaparátov, ki bi omogočila optimalni pogled na preučevano območje, zaradi neoptimalne razporeditve oslonilnih točk, potem pa tudi zaradi stalne prisotnosti visoke vlage. Ta je po eni strani povzročala odpovedovanje elektronskih komponent, ki niso bile popolnoma odporne proti vlagi, po drugi strani pa rosenje stekel na ohišjih. Slednjo težavo smo rešili z namestitvijo grelcev, ki so ogrevali stekla deset minut pred fotografiranjem. Dodaten izziv je bila prisotnost glodavcev, ki so večkrat poškodovali napeljavo, zato je bilo treba kable dodatno zaščititi. Razmeroma stabilno notranjo orientacijo fotoaparátov smo dosegli z uporabo enakih objektivov, ki so imeli v celotnem obdobju opazovanja vsi na iste vrednosti fiksirane goriščne razdalje in zaslonke.

Prisotnost stabilnih jamskih sten se je v našem primeru izkazala kot ključna za opazovanje geomorfnihi procesov med zmrzovanjem in odtajanjem. Filhol et al. (2019) so v Skandinavskem gorovju v fazi odtajanja tal opazili premike velikih kamnitih blokov, na katerih so bili nameščeni fotoaparati in oslonilne točke, zaradi česar je bila metoda manj natančna. Po drugi strani so bile nekatere oslonilne točke nameščene na jeklene kline, ki so jih za opazovanje strukturnih tal na površju Svalbarda namestili Kääb et al. (2014), do naslednjega obiska izvržene iz tal.

Oslonilne točke so bile pri naši raziskavi zaradi omejenih možnosti namestitve ohišij postavljene nekoliko stran od strukturnih tal glede na položaj fotoaparátov (pomanjkanje prostora na vrhu rova neposredno nad strukturnimi tlemi ter posledično omejeno vidno polje fotoaparátov). Kljub temu je analiza gostih oblakov točk na stabilnih jamskih stenah pokazala natančnost podatkov 2,3 mm neposredno nad sortiranimi tlemi, kar je bolje, kot so z isto metodo izmerili Kääb et al. (2014), ki so za oslonilne točke uporabili bolj nestabilna tla. Najslabši standardni odklon 5,98 mm smo izmerili za kontrolno ploskev, ki je bila najbolj oddaljena od opazovanih poligonov. Glede na vertikalne premike središč kolobarjev v razponu do 100 mm lahko sklepamo, da sta takšna postavitev fotoaparátov, oslonilnih točk in izbrana metoda za fotogrametrično obdelavo časovnih vrst blokov fotografij primerni za spremljanje dvigovanja tal zaradi zmrzovanja in odtajanja ter podobnih geomorfnihi procesov v jamskem okolju.

4.2 Reprezentativnost meritev na posameznih poligonih

Vertikalni premiki na drobnozrnatih središčih sortiranih kolobarjev so posledica rasti ledenih jeder pod površino ali igličastega ledu na površini. V fazi zmrzovanja kapilarna voda migrira proti ledenemu jedru, ki se tvori v središču sortirane kolobarja, kar povzroča dvigovanje površja in kasnejše zniževanje med taljenjem ledu (Ballantyne, 2018).

Analiza časovnih vrst gostih oblakov točk je pokazala, da sta za meritve dvigovanja površja najbolj reprezentativna poligona B in C, kjer je tudi gibanje njunih povprečnih in maksimalnih vrednosti relativno dobro usklajeno. Območje C je sicer nekoliko bolj podvrženo podatkovnim luknjam (slika 7, bele lise brez izmerjene vrednosti), kar lahko pripišemo večji oddaljenosti od fotoaparátov. Poligon A je po drugi strani popolnoma na robu opazovanega območja ob steni jame in je zato bolj dovzeten za tvorbo ledenih sveč, poleg tega je najbolj oddaljen od oslonilnih točk. Dvig tal je v poligonu A v največjem obsegu skoraj na celotnem poligonu znašal okoli 80 mm, kar za druge poligone ni značilno.

Meritve s poligonov D in E (sliki 8 in 9) so najmanj reprezentativne, saj so tam med zmrzovanjem nastajale ledene sveče na samih tleh, po otoplitvi pa so na območja teh poligonov padale ledene sveče tudi s stropa

jame. Na območju E je v prvem obdobju negativnih temperatur zrasla pokončna ledena sveča, visoka več 10 centimetrov, in povzročila »senco« v vrednostih, ki niso vidne fotoaparatu (slika 9). Na območje D pa je po otoplitvi padel ostanek ledene sveče s stropa. Te motnje se odražajo predvsem pri izmeri maksimalnih vrednosti (slike 4, 7 in 8 ter preglednica 2), pri čemer je območje D doseglo največje vrednosti. Območje E na sliki 4 ni prikazano, saj so zaradi ledene sveče največje vrednosti dosegale več 10 centimetrov.

4.3 Vertikalni premiki znotraj poligonov

Opisani rezultati predstavljajo prvovrsten prostorski vpogled v dinamiko dvigovanja tal v drobnozrnatem delu sortiranih kolobarjev. Rezultati iz analiziranega časovnega obdobja kažejo dobro usklajenost med dolžino obdobja zmrzovanja in spremembo višine tal – za večjo intenzivnost so potrebna daljša obdobja zmrzovanja. Glede na to, da so bile nekatere najvišje vrednosti dosežene v drugem obdobju zmrzovanja, lahko nadalje sklepamo, da se tla odtajajo postopoma in za odtajanje potrebujejo večje število dni s pozitivno temperaturo. S tem se dvig tal iz predhodnega zmrzovanja delno prenese v naslednja obdobja zmrzovanja.

Iz primerjave med povprečnimi in maksimalnimi spremembami višine znotraj poligonov so za reprezentativna poligona razvidne razlike, večje od 30 centimetrov. Povprečne vrednosti vertikalnih premikov znotraj poligonov kažejo dinamiko tako na robu kot v središču drobnozrnatega dela sortiranega kolobarja. Maksimalne spremembe so največje v središčih kolobarjev, ki so najbolj dovzetni za dviganje zaradi rasti ledenega jedra.

Kääb et al. (2014) so prav tako s fotogrametrično metodo izdelave gostih oblakov točk spremljali sortirane kolobarje na Svalbardu. Za obdobje treh let so izmerili maksimalne vertikalne premike do 7 mm. Zaradi odsotnosti meritev v fazi zmrzovanja pa dinamike dviganja med samim zmrzovanjem in odtajanjem niso mogli spremljati. Zvezne meritve dvigovanja tal zaradi zmrzali na sortiranih progah so izvajali Matsuoka et al. (1997) v Švicarskih Alpah ter Matsuoka (2014, 2023) v Japonskih Alpah. Meritve so izvajali z ekstenziometri, ki so merili vertikalne premike le v določeni točki. V Švicarskih Alpah so izmerili vertikalne premike v razponu od 10 do 20 mm ob posamičnem ciklu zmrzovanja oziroma odtajanja. Podoben razpon vertikalnih premikov (5–20 mm) so v obdobju 20 let zabeležili v Japonskih Alpah, kjer pa so ekstremni premiki dosegli 50 mm. Maksimalni dvigi tal so bili na naših reprezentativnih poligonih B in C do 80 mm v le enem letu, kar so bistveno višje vrednosti, kot so bile izmerjene v prej navedenih študijah. Višje vertikalne premike lahko pripišemo daljšim ciklom zmrzovanja in odtajanja, ki so posledica ujetosti hladnega zraka v jami in odsotnosti snega. Prav tako je pomembna prisotnost zadostne količine vode za rast ledenih jeder, ki je v jami na voljo zaradi kapljanja, na gorskih pobočjih pa pod vplivom gravitacije prej odteče. Pri merjenju vertikalnih premikov z ekstenziometrom so naleteli tudi na težave z meritvami zaradi horizontalnega gibanja delcev in vpliva na samo zmrzovanje zaradi prisotnosti merilne naprave (Matsuoka et al., 1997; Matsuoka, 2014, 2023). Ob upoštevanju navedenega je merjenje premikov z neinvazivnimi fotogrametričnimi metodami primernejše.

Naše ugotovitve temeljijo na analizi krajše časovne vrste gostih oblakov točk, vendar smo z njo potrdili, da je uporabljena fotogrametrična metoda uporabna za analiziranje tako majhnih dvigov tal. V prihodnosti, ko bomo analizirali še daljše časovne vrste sprememb dvigov tal v jami Barka, bomo lahko podrobneje predstavili lokalno pogojen potek krioturbacije.

5 ZAKLJUČEK

Z uporabo časovnih vrst fotogrametrično izdelanih gostih oblakov točk smo na sortiranih strukturnih tleh v kraški jami Barka izmerili vertikalne premike tal do 80 mm v središčih reprezentativnih sortiranih kolobarjev. Natančnost meritev je 2,3 mm, kar kaže na uspešno uporabo metode v jamskem okolju ter primernost za spremljanje tovrstnih reliefnih sprememb. Na to kaže tudi njena primerjava z obstoječimi poskusi monitoringa podobnih tovrstnih premikov. Meritve maksimalnih vertikalnih premikov na središčih kolobarjev so znatno višje od sorodnih študij, kar lahko pripišemo daljšim ciklom zmrzovanja in odtajanja, odsotnosti snega in večji prisotnosti vode v tleh v jamskem okolju. Podatki, izmerjeni z opisano metodo, ponujajo edinstven vpogled v prostorsko in časovno dimenzijo procesa dvigovanja tal zaradi zmrzali, kar lahko prispeva k boljšemu razumevanju krioturbacije.

6 ZAHVALA

Delo je nastalo v okviru temeljnega raziskovalnega projekta *Razumeti krioturbacijo – do boljših napovedi usode ogljika iz talečega permafrosta s pomočjo kraških jam (CryoKarst)* (J6-4634) in raziskovalnega programa *Raziskovanje krasa* (P6-0119), ki ju financira ARIS. Za pomoč pri terenskem delu se želimo zahvaliti predvsem Alojziju Blatniku, nadalje pa tudi Žanu Kafolu, Franju Droletu, Filipu Šarcu, Franciju Gabrovšku, Urošu Novaku, Andreju Drevenšku, Antonu Marinčiču in Antonu Smrekarju.

7 LITERATURA IN VIRI

- Ballantyne, C. K. (1996). Formation of miniature sorted patterns by shallow ground freezing: a field experiment. *Permafrost and Periglacial Processes*, 7 (4), 409–424. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1530\(199610\)7:4<409::AID-PPP230>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1530(199610)7:4<409::AID-PPP230>3.0.CO;2-3)
- Ballantyne, C. K. (2018). *Periglacial geomorphology*. Oxford: John Wiley & Sons. DOI: <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.12409>
- Blatnik, M., Obu, J., Košutnik, J., Blatnik, A., Filhol, S., Girod, L., Zwieback, S., Overduin, P. P., Boike, J. (2022). Sortirana tla v jamah – pokazatelj podobnosti med jamami in periglacialnim okoljem. V: Miran KUCHAR (ur.) et al. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2021 : zbornik del : 27. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 27. januar 2022. Ljubljana: Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko, str. 93–99. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2022/SZGG_2022_Blatnik_et_al.pdf.
- Blatnik, M., Gabrovšek, F., Košutnik, J., Overduin, P. P., Boike, J., Obu, J. (2023). Characteristics of freeze-thaw cycles at patterned ground sites in two karst caves in Slovenia. V: FERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ, José M. (ur.). *Book of abstracts: EUCOP6: Puigcerdà, 18-22 June 2023* (str. 451). DOI: <http://doi.org/10.52381/EUCOP6.abstracts.1>
- Filhol, S., Perret, A., Girod, L., Sutter, G., Schuler, T. V., Burkhart, J. F. (2019). Time-Lapse Photogrammetry of Distributed Snow Depth During Snowmelt. *Water Resources Research*, 55 (9), 7916–7926. DOI: <http://doi.org/10.1029/2018WR024530>
- Kääb, A., Girod, L., Berthling, I. (2014). Surface kinematics of periglacial sorted circles using structure-from-motion technology. *The Cryosphere*, 8 (3), 1041–1056. DOI: <http://doi.org/10.5194/tc-8-1041-2014>
- Kozmus Trajkovski, K., Urbančič, T., Stopar, B., Grigillo, D. (2025). Fotogrametrični poligon za zajem podatkov v zaprtih prostorih. *Geodetski vestnik*, 69 (2), 148–179. DOI: [10.15292/geodetski-vestnik.2025.02.148-179](https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2025.02.148-179)
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60 (2), 91–110. DOI: <http://doi.org/10.1023/B%3AAVISI.0000029664.99615.94>
- Mallalieu, J., Carrivick, J. L., Quincey, D. J., Smith, M. W., in James, W. H. (2017). An integrated Structure-from-Motion and time-lapse technique for quantifying ice-margin dynamics. *Journal of Glaciology*, 63 (242), 937–949. DOI: <https://doi.org/10.1017/jog.2017.48>
- Matsuoka, N. (2014). Combining time-lapse photography and multisensor monitoring to understand frost creep dynamics in the Japanese Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 25 (2), 94–106. DOI: <http://doi.org/10.1002/ppp.1806>
- Matsuoka, N. (2023). How can needle ice transport large stones? Twenty-one years of field observations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48 (15), 3115–3127. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.5685>
- Matsuoka, N., Abe, M., in Ijiri, M. (2003). Differential frost heave and sorted patterned ground: field measurements and a laboratory experiment. *Geomorphology*, 52 (1-2), 73–85. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00249-0](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00249-0)
- Matsuoka, N., Hirakawa, K., Watanabe, T., in Moriaki, K. (1997). Monitoring of periglacial slope processes in the Swiss Alps: the first two years of frost shattering, heave and creep. *Permafrost and Periglacial Processes*, 8 (2), 155–177. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1530\(199732\)8:2%3C155::AID-PPP248%3E3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1530(199732)8:2%3C155::AID-PPP248%3E3.0.CO;2-N)

- Mihevč, A. (2009). Cryoturbation of the sediments at the cave entrances: case studies from Skednena jama, Potočka zijalka and Bestažovca Cave. V: L. Steguweit (ur.). Hugo Obermaier Gesellschaft für Erforschung des Eiszeitalters und der Steinzeit, 51st Annual Meeting in Ljubljana, 14th–18th of April (str. 26). Erlangen: Hugo Obermaier-Gesellschaft für Erforschung des Eiszeitalters und der Steinzeit.
- Mihevč, A., Urbančič, T. (2019). Spremljanje premikov in oblikovanja poligonalnih tal v Skedneni jami s terestričnim laserskim skeniranjem. V: Miran KUJAR (ur.) et al. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2018 : zbornik del. 24. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko (str. 121–130). Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2019/SZGG_2019-Mihevč_Urbancic.pdf
- Obu, J. (2021). How much of the Earth's surface is underlain by permafrost? Journal of geophysical research, Earth surface, 126 (5), 1–5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2021JF006123>
- Obu, J., Košutnik, J., Overduin, P. P., Boike, J., Blatnik, M., Zwieback, S., Gostinčar, P., in Mihevč, A. (2018). Sorted patterned ground in a karst cave, Ledenica pod Hrušico, Slovenia, Permafrost and Periglacial Processes, 29 (2), 121–130, DOI: <http://doi.org/10.1002/ppp.1970>
- Obu, J., Blatnik, M., Triglav Čekada, M., Overduin, P. P., Boike, J., Kääb, A., Girod, L., Košutnik, J. (2023). Quantification of hourly particle movements on sorted circles in a karst cave in Slovenia. V: José M. FERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ (ur.). Book of abstracts: EUCOP6 : Puigcerdà, 18–22 June 2023 (str. 450). DOI: <http://doi.org/10.52381/EUCOP6.abstracts.1>
- Obu, J., Westermann, S., Viera, G., Abramov, A., Balks, M. R., Bartsch, A., Hrbaček, F., Kääb, A., Ramos, M. (2020). Pan-Antarctic map of near-surface permafrost temperatures at 1 km² scale. The cryosphere, 14 (2), 497–519. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/tc-14-497-2020>
- Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Bernikov, N., Christiansen, H. H., Dashtseren, A., Delaloye, R., Elberling, B., Etzelm Üller, B., Kholodov, A., et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-science reviews, 193, 299–316. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>
- Obu, J., Blatnik, M., Boike, J., Overduin, P. P., Girod, L., Triglav Čekada, M., Bric, V., Thurner, M., Beer, C., Marsuoka, N., Palmtag, J., Gabrovšek, F. (2023). Understanding cryoturbation processes: using karst caves to improve projections of soil carbon fate upon thawing permafrost. V: José M. FERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ (ur.). Book of abstracts : EUCOP6 : Puigcerdà, 18–22 June 2023 (str. 382). DOI: <http://doi.org/10.52381/EUCOP6.abstracts.1>
- Palmtag, J., in Kuhry, P. (2018). Grain size controls on cryoturbation and soil organic carbon density in permafrost-affected soils. Permafrost and Periglacial Processes, 29 (2), 112–120. DOI: <http://doi.org/10.1002/ppp.1975>
- Palmtag, J., Obu, J., Kuhry, P., Richter, A., Siewert, M. B., Weiss, N., Westermann, S., Hugelius, G. (2022). A high spatial resolution soil carbon and nitrogen dataset for the northern permafrost region based on circumpolar land cover upscaling. Earth system science data, 14 (9), 4095–4110. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-14-4095-2022>
- Rupnik, E., Daakir, M., in Pierrot Deseilligny, M. (2017). MicMac—a free, open-source solution for photogrammetry. Open geospatial data, software and standards, 2, 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40965-017-0027-2>
- Schuur, E. A., McGuire, A. D., Schadel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., ... in Vonk, J. E. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. Nature, 520 (7546), 171–179.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., in Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, 179, 300–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>



Zore M., Triglav Čekada M., Blatnik M., Obu J. (2025). Uporaba metode fotogrametričnih časovnih vrst za spremljanje sortiranih strukturnih tal v jamskem okolju. Geodetski vestnik, 69 (3), 352–365.
DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2025.03.352-365>

Marko Zore, univ. dipl. inž. geod

Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana
e-naslov: marko.zore@gis.si

doc. dr. Mihaela Triglav Čekada, univ. dipl. inž. geod.

Geodetski inštitut Slovenije in Univerza v Ljubljani in Fakulteta
za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana
e-naslov: mihaela.triglav@gis.si

dr. Matej Blatnik

Inštitut za raziskovanje krasa, ZRC SAZU
Titov trg 2, 6230 Postojna
e-naslov: matej.blatnik@zrc-sazu.si

dr. Jaroslav Obu

Inštitut za raziskovanje krasa, ZRC SAZU
Titov trg 2, 6230 Postojna
e-naslov: jaroslav.obu@zrc-sazu.si