

Spremljanje premikov in oblikovanja poligonalnih tal v Skedneni jami s terestričnim laserskim skeniranjem

Andrej Mihevc^{*}, Tilen Urbančič^{**}

Povzetek

Večletno spremljanje oblikovanja poligonalnih tal in pred več leti opravljena izmera vertikalnih pomikov nas je vodila do celovitejše obravnave omenjenih pojavov v Skedneni jami. Za potrebe večletnega spremljanja premikov smo si vzpostavili geodetsko mrežo oslonilnih točk, ki so stabilizirane v stene jame. Iz izmer v obdobju devetih mesecev smo zaznali premike kamnov, med izmerama pred in v času zmrzovanja jamskih tal, pa tudi vertikalne premike pretežno ilovnatih tal. Določili smo jih kot razdaljo med oblakoma točk dveh terminskih izmer. Največji zaznani premiki so tudi do 15 cm. Tehnologija terestričnega laserskega skeniranja se izkaže kot primerna za spremljanje tovrstnih sprememb oblike jamskih tal.

Ključne besede: jama, temperatura, poligonalna tla, terestrično lasersko skeniranje

Key words: cave, temperature, polygonal ground, terrestrial laser scanning

Uvod

Periglacialni pojavi, ki so značilni za večje geografske širine in večje nadmorske višine, nastanejo tam, kjer zaradi nizkih zimskih temperatur in pomanjkanja snežne odeje seže sezonsko zmrzovanje globoko v tla. Posledica so premikanje tal po vertikali in horizontali ter nastajanje značilnih oblik. Z njimi se pri nas srečujejo arheologi, ki pri izkopavanjih v jamah pogosto naletijo na deformirane plasti sedimentov (Brodar, 1983). Povečini jih pripisujejo hladnim obdobjem pleistocena.

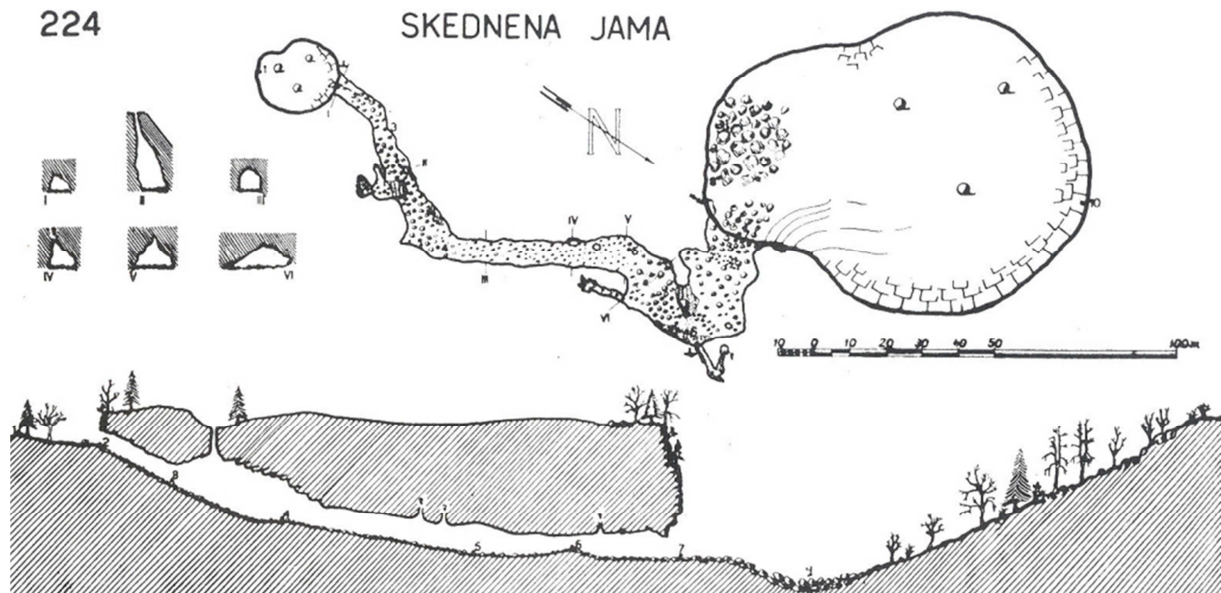
Pri proučevanju jam ob severnem robu Planinskega polja je Gams (1963) raziskal in opisal tudi Skedneno jamo (Slika 1). V jami je med drugim opazil lepo razvita poligonalna tla. Ugotovil je, da so recentna, da so v jami nastala v sedanjih klimatskih pogojih in ne v pleistocenu. O podobnih oblikah v drugih jamah so poročali tudi Mihevc (2009), Zupan Hajna (2009), Obu et al. (2018). V nekaj jamah pa smo sezonske premike tal tudi merili. Na več načinov smo označili kamne na tleh in nato merili razdaljo med njimi in fiksnimi točkami na stenah. Tako so določili letne vertikalne premike med 10 in 20 cm v Skedneni jami, Ulici pečini in v Potolčki zijalki (Mihevc, 2001; 2016), nismo pa mogli izmeriti bočnih premikov.

Terestrično lasersko skeniranje (TLS) je metoda množičnega zajema prostorskih podatkov. V primerjavi s klasično geodetso izmero, s TLS v zelo kratkem času določimo koordinate velikemu številu naključnih točk, kjer pa je njihova natančnost manjša. Uporaba metod množičnega zajema prostorskih podatkov v jamah omogoča podrobne podatke o geometriji jame. Natančno lahko določimo obliko in velikost jame, izdelamo različne vzdolžne in prečne profile, virtualne 3D modele ter vizualizacije (Gallay et al., 2015; Yakar et al., 2016).

^{*} Inštitut za raziskovanje Krasa ZRC SAZU, Titov trg 2, 6230 Postojna

^{**} Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

Za meritve smo izbrali Skedneno jamo, ki je zaradi lahke dostopnosti in izrazitih periglacialnih pojavov za ta namen zelo primerna. Oblake točk TLS bomo uporabili za spremljanje sprememb oblike površja jamskih tal. Tovrstni podatki nam omogočajo celovit vpogled, identificiranje in določitev velikosti deformacij oz. sprememb oblike tal.



Slika 1 - Tloris in iztegnjeni profil Skednene jame (Gams, 1963)

Skednena jama

Skednena jama je 206 m dolga in 30 m globoka jama. Leži pod uravnanim vrtačastim površjem, ki je na višini okrog 485 m. Jama ima tri vhode. Najnižji je v dnu velike udorne doline, na višini okrog 451 m. Za vhodom se rov razširi v okrog 15 m široko dvorano (Slika 2).



Slika 2 - Vhodna dvorana z značilno uravnanimi ravnimi tlemi – skednjem

Tla dvorane so ravna, kot na skednju, od tod tudi ime jame. Iz dvorane vodi glavni rov proti jugu. Jamska tla se spuste za kak meter, nato pa se rov blago, nato pa strmo vzpne do drugega, nekoliko manjšega vhoda. V tem delu jame je tudi tretji vhod, navpično brezno, ki sega v jamo s površja. Sprva je rov širok okrog 10 m in je povečini do 5 m visok. Poleg tega glavnega rova ima jama še dva majhna stranska rova. Pomemben je rov, ki se pod stropom vhodne dvorane odcepi proti SV. Rov je do 1,5 m širok in do 1,8 m visok ter dolg le 10 m (Slika 1).

Stene glavnega rova so živoskalne, le ponekod so nastali majhni beli in razpokani kapniki, ki kažejo na zimsko zmrzovanje in poletno odlaganje sige. Stene jame so v toplem delu leta vlažne, saj se na njih kondenzira vlaga, v hladni polovici leta pa večinoma suhe. V jami na štirih mestih kaplja prenikajoča voda, pozimi na teh mestih nastanejo veliki ledeni kapniki (Slika 2).

Večji del jamskih tal tvorijo manjše skale in droban grušč pomešan s peskom in jamsko ilovico. V večjem delu jame, v dolžini več kot 100 m, so jamska tla gladka in izravnana v blago nagnjeno površino z naklonom 7-10°. V prečnem prerezu pa so jamska tla vodoravna (Slika 3). V teh uravnanih tleh so oblikovana poligonalna tla .



Slika 3 - Enakomerno in v vzdolžnem smislu blago nagnjena klančina v glavnem rovu

Uravnana jamska tla kažejo recentne drobne krioturbatne strukture, poligonalna tla, kamnite pasove, po velikosti sortirane kamne, kupčke gline in šopi ledenih kristalov. Te oblike so bolj izrazite v bližini dotoka kapljajoče vode (Sliki 4 in 5).

Povprečna letna temperatura v bližnji Planini je $9,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Najhladnejši mesec je januar ($-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) in najtoplejši julij ($+18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Podobne temperature smemo pričakovati tudi na površju nad jamo. Zaradi več vhodov je potek temperatur v jami pod močnim vplivom zunanjega dogajanja. Pozimi v jamo z lahkoto prodira zunaji zrak, jama se močno ohladi, tla zamrznejo, ledeni kapniki pa se v jami obdržijo pogosto do maja. V toplem delu leta topli zunanji zrak teže vdira v jamo. Temperaturo zraka v jami tedaj določa temperatura obdajajoče kamnine, ki je približno enaka povprečni zunaji temperaturi, to je okrog $8\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 4 - Poligonalna tla v bolj vodoravnih tleh v vhodni dvorani

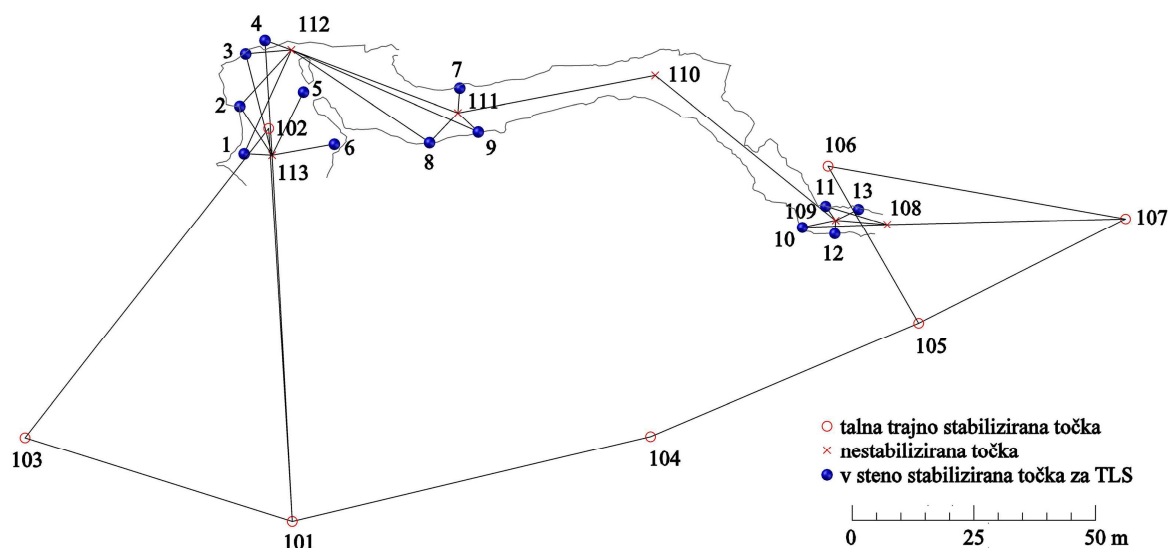


Slika 5 - Na nagnjenih tleh rova so poligoni zaradi polzenja tal razpotegnjeni

Trestrično lasersko skeniranje Skednene jame

Geodetska mreža

Koordinatno izhodišče vseh izmer TLS v Skedneni jami predstavlja lokalna geodetska mreža devetnajstih točk. Mreža je zasnovana kot razširjena oblika zaključenega poligona (Slika 6). Na površju je s klini trajno stabiliziranih 7 točk. V jami so točke geodetske mreže stabilizirane v steni s sidrnimi vijaki, skupaj 13 točk (Slika 7). Razporejene so tako, da v geometrijskem smislu zagotavljajo kakovostno georeferenciranje oblakov točk v vsej jami in glede na predvidena mesta postavitve terestričnega laserskega skenerja ter lego območij poligonalnih tal, ki jih imamo namen podrobneje obravnavati. Stabilizacija (v steno) in signalizacija (reflektivne nalepke) točk v jami sta prilagojeni uporabi TLS.



Slika 6 - Geodetska mreža Skednene jame



Slika 7 - Točka geodetske mreže oz. oslonilna točka za TLS: levo sidrni vijak, desno okrogla reflektivna tarča s premerom 5 cm

Geodetsko mrežo smo izmerili 11. 4. 2018. Uporabili smo tahimeter Leica Nova MS50 in precizne prizme Leica GPH1P. Proti vsem vidnim točkam smo na vsakem stojišču horizontalne smeri izmerili v petih girusih. Istočano smo v obeh krožnih legah v petih ponovitvah izmerili tudi zenitne razdalje in poševne dolžine. Za upoštevanje dejanskih pogojev v atmosferi, smo v času izmere na vseh stojiščih izmerili meteorološke parametre. Ker je bila mreža merjena prvič, smo za izračun koordinat točk in njenih natančnosti mrežo izravnali kot prosto.

Terestrično lasersko skeniranje

Za izvedbo skeniranja smo uporabili skener Riegl VZ-400 (Slika 8). Med 11. 4. 2018 in 5. 1. 2019 smo izvedli 8 izmer (11. 4. 2018, 10. 5. 2018, 11. 6. 2018, 10. 7. 2018, 9. 8. 2018, 10. 9. 2018, 9. 11. 2018 in 5. 1. 2019). Pri skeniranju smo na vseh stojiščih v vseh terminskih izmerah ločljivost skeniranja nastavili na 1 cm/20 m v vertikalni in horizontalni smeri. Za registracijo oblakov točk smo kot vezne točke, poleg točk geodetske mreže, uporabili tudi reflektivne valje s premerom in višino 10 cm, okrogle reflektivne nalepke premera 5 cm in okrogle Leicine tarče za skeniranje velikosti 6". Registriran oblak točk posamezne terminske izmere smo georeferencirali v lokalni koordinatni sistem jame preko točk geodetske mreže.



Slika 8 - Skener Riegl VZ-400 ter oslonilne in vezne točke (reflektivne nalepke, valjčki, tarča Leica 6")

Obdelave oblakov točk smo opravili v programih RiSCAN PRO (filtriranje), Surfer 15 (izdelava digitalnih modelov višin in izračun razlik) in CloudCompare (izračun razdalj med oblaki točk).

Rezultati

Geodetska mreža

V mreži, ki je bila izmerjena 11. 4. 2018, smo iz opazovanj izračunali 54 sredin merjenih horizontalnih smeri in prav toliko sredin poševnih dolžin in zenitnih razdalj. Opazovanja proti vsem ostalih vidnim točkam smo opravili na vseh sedmih stalno stabiliziranih točkah na površju ter šestih nestabiliziranih in na stativih prisilno centriranih točkah v jami. Mrežo smo izravnali ločeno za ravninske koordinate in višine. Mrežo smo v obeh primerih izravnali kot prosto (Kuang, 1996). Povprečne natančnosti koordinat točk po izravnavi predstavljamo v Preglednici 1.

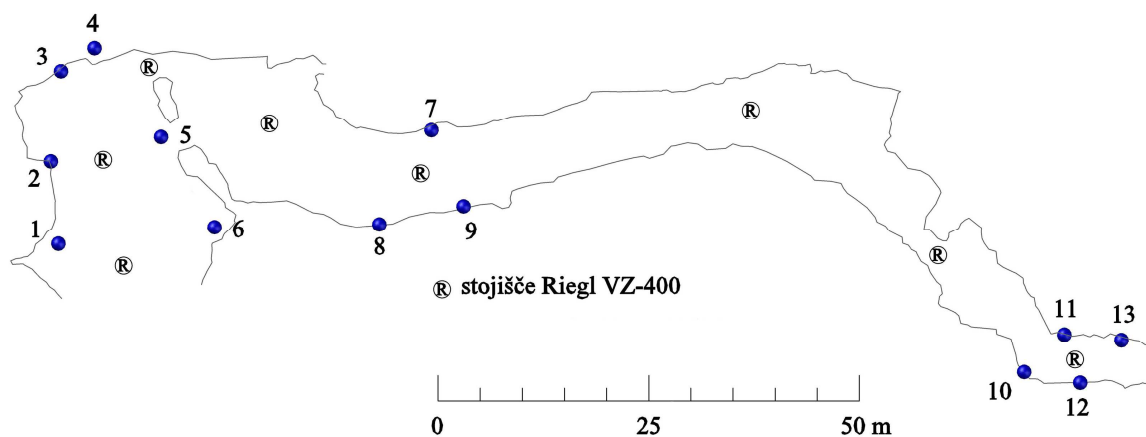
Preglednica 1 - Natančnosti koordinat točk geodetske mreže

	$\bar{\sigma}_y$ [mm]	$\bar{\sigma}_x$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
Vse točke v mreži	1,1	1,0	1,2
13 točk v jami	1,4	1,5	2,0

Natančnosti koordinat točk celotne mreže so odvisne tudi od opazovanj na nalepke, ki smo jih uporabili za signaliziranje točk v stenah jame. Iz Preglednice 1 vidimo, da na povprečne natančnosti posameznih koordinat točk cele mreže koordinate stenskih točk oz. opazovanja na te točke vplivajo med 0,3 in 0,8 mm.

Obdelava oblakov točk

Za pridobitev kakovostnejših podatkov pri skeniranju in enostavnejši obdelavi oblakov točk v vsaki izmeri smo izberali približno ista mesta postavitve skenerja. Položaje postavitve skenerja prikazujemo na Sliki 9.



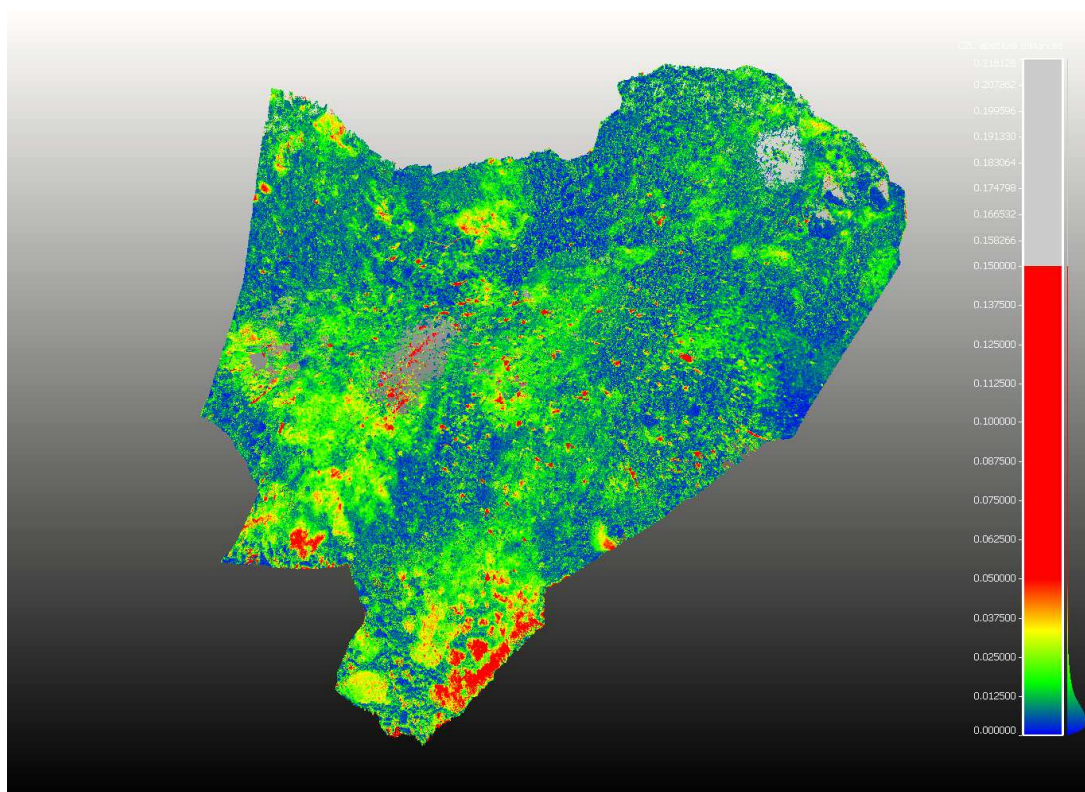
Slika 9 - Stojišča skenerja pri skeniranju dne 10. 5. 2018.

Prve korake obdelav oblakov točk skeniranja z Rieglovim skenerjem smo naredili v programu RiSCAN PRO. Oblak točk skeniranja iz posameznega stojišča je v koordinatnem sistemu takrtne orientacije skenerja. Za registracijo oblakov točk smo uporabili vezne točke. V povprečju smo imeli med dvema zaporednima stojiščema več kot 8 veznih točk. Za georeferenciranje združenega oblaka točk smo uporabili oslonilne točke geodetske mreže (Sliki 6 in 9). Nefiltriran oblak točk je pri skeniranju cele jame vseboval skoraj 350 000 000 točk. Ker je skenirana površina v jami takšne oblike, da oblakov točk z

običajnimi algoritmi ne moremo samodejno klasificirati, smo morali ročno izbrisati vse neželene točke ter točke klasificirati v talne in netalne. Oblake točk smo za nadaljno obdelavo in izračune razlik v obliki površja zaradi neenakomerne gostote filtrirali z Octree filtrom.

Primerjavo oblakov točk smo naredili na dva načina. Najprej s kreiranjem digitalnih modelov višin s programom Surfer. Na podoben način, vendar brez modeliranja ploskev, pa tudi s programom CloudCompare, smo premike določili z izračunom razdalj med oblakoma točk.

Opravljenе izmere so v letu 2018 potekale v času, ko je bila temperatura v jami stalno nad 0 °C. Glede na dejstvo, da na dviganje tal vplivajo ravno temperature pod lediščem, sprememb oblike površja v času med aprilom in novembrom 2018 ni bilo, niti jih nismo pričakovali. Zaznali smo le številne premaknjene večje kamne, za kar razloge najdemo v obiskovalcih jame. Prve spremembe oblike površine smo zaradi zmrzovanja v tleh zaznali šele po obdelavi oblaka točk skeniranja 5. 1. 2019. Ker glede na poznavanje tovrstnih procesov v tako kratkem obdobju ni pričakovati znatnega premika kamnov in drobnega materiala v horizontalnem smislu, smo spremembo oblike poligonalnih tal izračunali le v višinskem smislu. Izračunane razlike med oblakoma jamskih tal v dvorani pri večjem vhodu v jamo (Slika 9, kjer so točke 1-6) za izmeri 9. 11. 2018 in 5. 1. 2019 prikazujemo na Sliki 10. Z rdečo barvo so prikazana vsa območja, kjer je razdalja med oblakoma večja od 5 cm.



Slika 10 - Prikaz razdalj med oblakoma točk skeniranja z Riegl VZ-400 za dneva 9. 11. 2018 in 5. 1. 2019

Ugotovili smo, da so se na območju, ki je na Sliki 10 spodaj in kjer smo pričakovali največje spremembe, območja drobnega ilovnatnega materiala dvignila tudi do 12 cm. V povprečju so se različna manjša območja dvignila za dobrih 5 cm. Večji kamni, ki mejijo na območja ilovnatnega materiala so ostali stabilni, manjši kamni pa so se premaknili za do 2 cm. Manjša območja rdeče barve prikazujejo premaknjene kamne. Dve večji lisi brez

točk sta na območjih, kjer je večji dotok vode s stropa in pri skeniranju 5. 1. 2019 zaradi mokrih tal in ledenih sveč nismo dobili odbojev laserskega žarka.

Zaključek

Vzpostavljena geodetska mreža v Skedneni jami omogoča kakovostno in dolgotrajno spremljanje spreminjanja oblike poligonalnih tal. Stabilnost točk geodetske mreže imamo namen preveriti po enem letu od vzpostavitve. Način stabilizacije točk v jami zagotavlja zanesljivo georeferenciranje oblakov točk skeniranja z najrazličnejšimi instrumenti.

Tehnologija terestričnega laserskega skeniranja je za proučevanje jam ter identificiranje in določitev velikosti sprememb oblike jamskih tal zelo uporabna. Naš namen je bil predvsem zaznavanje premikov jamskih tal zaradi zmrzovanja. Zaporedne meritve tal so pokazale največje premike po vertikali do 15 cm. Bili so tam, kjer je v jamskih tleh več vode, to je v okolici kapljanj oziroma dotoka prenikle vode. Tu so se premiki tudi najprej začeli. Dvigovanje tal je sčasoma zajelo celo jamo. Poleg tega so meritve pokazale tudi naključne premike nekaterih kamnov na tleh. To pa lahko pripišemo obiskovalcem, ki jih premikajo pri hoji po jami.

Največjo težavo pri obdelavi oblakov točk predstavljajo točke v senci kamnov ter točke na stičišču jamskih tal in sten, ki jih je potrebno ročno pregledati in neželene točke odstraniti. Na osnovi pridobljenih izkušenj bomo skrbno načrtovali prihodnje izmere in poskusili določiti maksimalne vrednosti sprememb. Oblika tal v Skedneni jami, splošne lastnosti poligonalnih tal in dolgoletno vizualno in metrično spremljanje sprememb oblike tal nas vodijo k večletnemu spremljanju dogajanja v jami in morebitno določitev premikanja materiala jamskih tal tudi v horizontalnem smislu.

Literatura in viri

- Brodar, S., Brodar, M. (1983). Potočka zijalka: visokoalpska postaja aurignacijskih lovcev = Potočka zijalka : eine hochalpine Aurignacjägerstation, *Dela*, 24, 213.
- Gallay, M., Kanuk, J., Hochmuth, Z., Meneely, J.D., Hofierka, J., Sedlák, V. (2015). Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave. Slovakia, *International Journal of Speleology*, 44, 3: 277–291.
- Gams I. (1963). Logarček. *Acta carsologica*, 3: 7–84.
- Kuang, S., 1996. *Geodetic Network Analysis and Optimal design*, Ann Arbor Press, Inc., Chelsea, Michigan
- Mihevc, A. (2009). Cryoturbation of the sediments at the cave entrances : case studies from Skednena jama, Potočka zijalka and Bestažovca Cave. V: Steguweit, L., (ur.). Hugo Obermaier-Gesellschaft für Erforschung des Eiszeitalters und der Steinzeit, 51st Annual Meeting in Ljubljana, 14th-18th of April. [Erlangen]: Hugo Obermaier-Gesellschaft für Erforschung des Eiszeitalters und der Steinzeit, 26.
- Mihevc, A. (2001). Jamski fluvialni sedimenti v Snežni jami na Raduhi in v Potočki zijalki. *Geološki zbornik 16 (Povzetki referatov)*. Ljubljana: Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 60–63.
- Obu, J., Košutnik, J., Overduin, 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*, Apr.-June 2018, 29, 2: 121–130.
- Zupan Hajna, N. (2007). Barka depression, a denuded shaft in the area of Snežnik Mountain, Southwest Slovenia. *Journal of caves and karst studies: a publication of the National Speleological Society*, 69, 2: 266–274.
- Yakar, M., Ulvi, A., Toprak, A.S. (2016). The Use of Laser Scanner in Caves, Encountered Problems and Solution Suggestion. *Universal Journal of Geoscience* 4, 4: 81–88.