

# DOLOČANJE GEOMORFOLOŠKIH IN HIDROGEOLOŠKIH POVEZAV MED VRTAČAMI IN JAMO POLINA PEČ S 3D LASERSKIM SKENIRANJEM

*dr. Mateja Breg Valjavec, dr. Rok Ciglič, dr. Jure Tičar*

ZRC SAZU, Geografski inštitut Antona Melika

*mateja.breg@zrc-sazu.si*, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7581-758X>

*rok.ciglič@zrc-sazu-si*, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3517-3780>

*jure.ticar@zrc-sazu.si*, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3567-8084>

*dr. Stanka Šebela*

ZRC SAZU, Inštitut za raziskovanje krasa

*stanka.sebela@zrc-sazu.si*, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0023-6019>

DOI: [https://doi.org/10.3986/9789610506683\\_03](https://doi.org/10.3986/9789610506683_03)

UDK: 528.8:551.435.8(497.4)

## IZVLEČEK

### **Določanje geomorfoloških in hidrogeoloških povezav med vrtačami in jamo Polina peč s 3D laserskim skeniranjem**

Namen prispevka je določiti, katere vrtače so najbolj neposredno povezane s plitvimi vodoravnimi jamami in za kakšne povezave gre. V raziskavi sledimo trem ciljem: (1) določiti lego jame v vadozni coni vodonosnika, (2) ugotoviti lego vrtač v razmerju do jame, (3) določiti geološke strukture. Raziskava temelji na podatkih letalskega laserskega skeniranja površja in trirazsežnostnega (3D) terestričnega laserskega skeniranja jame. V okviru slednjega smo z mobilnim laserskim skenerjem posneli jamo Polina peč (Matarsko podolje). S programi Leica Cyclone Register 360, Leica Cyclone 3DR, Global Mapper in ArcGISPro smo podatke obdelali in kartirali strukturno-geološke elemente, pomembne za transport vode. V jami smo določili dve območji s povezavami z vsaj tremi vrtačami na površju. Povzeli smo bistvene geomorfološke in geološke značilnosti povezav.

## KLJUČNE BESEDE

lasersko skeniranje, oblak točk, kras, vrtača, jama

## ABSTRACT

### **Determining the geomorphological and hydrogeological connections between dolines and the cave Polina peč using 3D laser scanning**

The aim of the paper is to determine which dolines are most directly connected to shallow horizontal caves and what the connections are. The research has three objectives: (1) to determine the exact position of the cave in vadoze zone of aquifer, (2) to determine the position of the dolines in relation to cave, and (3) to determine the geological structures. The research is based on airborne laser scanning data for the surface and terrestrial 3D laser scans of the cave. As part of the latter, we scanned Polina peč Cave (Matarsko podolje) using a mobile 3D laser scanner. In the Leica Cyclone Register 360, Leica Cyclone 3DR, Global Mapper and ArcGISPro programs, the data were processed and the geological structures were mapped that are important for the transport of water. We determined two underground areas with connections with at least three dolines on the surface. We summarized main geomorphological and geological characteristics of the connections.

## KEY WORDS

laser scanning, cloud points, karst, doline, cave

## 1 Uvod

Kras je edinstven tip pokrajine, ki zavzema 47 % površja Slovenije (Gostinčar 2016), poleg površja pa tudi podzemne geomorfološke oblike. Povezanost med površjem in podzemljem (na primer med jamo in vrtačami) se lahko določa neposredno s terenskim raziskovanjem človeku prehodnih rovov oziroma s posrednimi metodami, ki »dosežejo« tudi manj dostopne in nedostopne rove. Človek s svojimi dejavnostmi na površju vpliva na površinske oblike, kot so vrtače (Breg Valjavec, Zorn in Čarni 2018) in v podzemlju na kraške vodonosnike (Ravbar s sodelavci 2021). Predpogoj za ugotavljanje in vrednotenje antropogenih vplivov je dobro poznavanje delovanja kraškega hidrogeološkega sistema, ki pa je v večini primerov zelo kompleksen. Njegovo delovanje najlažje raziskujemo s preučevanjem potovanja snovnih tokov (voda, sedimenti) s površja v podzemlje. Poti vode in sedimentov se med kraškimi območji zelo razlikujejo, zato je vsaka povezava med vrtačo in pod njo ležečimi jamskimi rovi edinstvena, odvisna od številnih dejavnikov (tip kamnine, pretrstost kamnine, smer in vpad plasti).

Kadar gre za jamske rove plitvo pod površjem (približno do 50 m), so za preučevanje povezanosti smiselne tudi posredne geoinformacijske metode. Najsodobnejše raziskovanje površja (relief, gozdna vegetacija, stavbe) temelji na tehnologiji visokoločljivostnega laserskega skeniranja (lidar). V krasoslovju so bile raziskave omejene na površje, predvsem na zaznavanje vrtač, pri čemer so se razvile metode za avtomatsko klasifikacijo (Kobal s sodelavci 2015; Telbisz s sodelavci 2016; Verbovšek in Gabor 2019; Grlj 2020; Mihevc in Mihevc 2021; Čonč s sodelavci 2022; Ciglič s sodelavci 2022). Uporabnost letalskega lidarja v jamarstvu sta predstavila Čekada in Gostinčar (2016). Ugotavljala sta uporabnost klasificiranega oblaka točk tal za natančno določanje vhodov kraških jam, predvsem navpičnih brezen. Uporaba lidarskih podatkov v zadnjem obdobju močno vpliva tudi na izboljšano natančnost lokacij jamskih vhodov v bazi Katastra jam, kar omogoča boljše varovanje najbolj zastopanih naravnih vrednot v Sloveniji (Tičar in Čekada 2018).

Za sledenje in kartiranje jamskih sistemov se je pokazala kot zelo uporabna tehnika terestričnega laserskega skeniranja (TLS) (Buchroithner in Gaisecker 2009), še posebej trirazsežnega (3R) oziroma tridimenzionalnega (v nadaljevanju 3D) terestričnega laserskega skeniranja. 3D TLS je tehnika zajema prostorskih podatkov s pomočjo 3D laserskega skenerja, kjer je rezultat oblak točk, ki predstavlja vse objekte v vidnem polju 3D skenerja. Gre za tehnologijo, ki se zelo hitro razvija in omogoča vedno nove in natančnejše prostorske analize. 3D laserski skenerji, kot mobilni sistemi na stativih ali podobnih stojalih, ki jih imenujemo terestrični 3D laserski skenerji, se uporabljajo v kulturni dediščini, arheologiji, pri meritvah arhitekturnih deformacij, topografskih meritvah in v strojništvi (Možetič 2004). Dosedanje raziskave v Sloveniji so predstavljale uporabo TLS pri antropogenih objektih (zgradbe, tuneli), medtem ko so bili 3D lasersko zajeti tudi že nekateri jamski objekti kot Železna jama (Petrovič s sodelavci 2008), sistem Škocjanskih jam (Novaković s sodelavci 2014; Walters in Zupan Hajna 2020), in Županova jama (Podržaj 2020). Prednost TLS so hitrost, količina in natančnost podatkov (gostota točk). Še vedno so za snemanje jam najbolj razširjeni stacionarni skenerji, s katerimi se skenira iz različnih pozicij v jami in pri katerih je nujna množica postaj po vsej jami, da bi se izognili sencam skeniranja zaradi okluzij v oblaku točk (Holenstein s sodelavci 2011). Prednost stacionarnih skenerjev v primerjavi z mobilnimi je v večjem dosegu laserskega žarka, zato so ti primerni za večje jamske sisteme (na primer Škocjanske jame). Čeprav TLS dajejo hitrejšje in zelo podrobne rezultate, je njihova uporaba v zahtevnih okoljih, kot so brezna in ožine, lahko omejena. Ročni ali mobilni 3D laserski skenerji omogočajo lasersko skeniranje tudi težje dostopnih rovov, ožjih rovov in globljih brezen, kjer ni možnosti namestitve stativa za stacionarni TLS. Mobilni 3D laserski skenerji vključujejo samodejno združevanje točk med premikanjem po prostoru. En sam laserski posnetek med premikanjem operaterja zabeleži na milijone meritev v vseh treh dimenzijah, ki jih sodobni mobilni skener sam združi v 3D oblak točk (Zlot in Bosse 2014; Gally s sodelavci 2015), izdelava trajektorije (pot snemanja) in ustvari notranji koordinatni sistem. S pridobitvijo oblaka točk se ustvari 3D model, ki ga lahko po naknadni obdelavi uporabimo za podrobno preslikavo v realnih, visoko natančnih koordinatah in za različne raziskave jame (Konsolaki s sodelavci 2020).

V prispevku bomo predstavili posreden geoinformacijski pristop, ki temelji na laserskem skeniranju kraškega površja (letalski lidar) in kraških jam (mobilno 3D lasersko skeniranje). Raziskava temelji na uporabi mobilnega ročnega 3D laserskega sistema za skeniranje Leica BLK2GO. Namen prispevka je raziskati značilnosti v povezavah med vrtačami in jamskimi rovi. Rezultati bodo v nadaljevanju raziskave osnova za nadaljnje hidrogeološke in geofizikalne analize ter za določanje vpliva preteklih antropogenih dejavnosti v vrtačah (pašništvo, poljedelstvo, apneničarstvo) na vodoravne jame v vadozni coni. Skladno s tem iščemo odgovore na sledeča vprašanja: Kako globoko je jama pod površjem na določenih odsekih? Ali lahko smeri in vpade plasti v jami povežemo z izdanki apnenca in razpoklinskimi conami na površju? Ali lahko spremembe v kamnini na površju povežemo s spremembami kamnine v jami (plastovit apnenec, masiven apnenec, breča)? Ali se razlike v geoloških značilnostih (tip in starost kamnine, prelomi, debelina, smer in vpad plasti) pri posameznih geomorfoloških oblikah (vrtače, skraplje) odražajo v hidrogeoloških procesih med površjem in podzemljem? Skladno s tem v prispevku sledimo naslednjim ciljem: (1) določiti lego jame v vodonosniku (v vadozni coni), (2) ugotoviti lego posamezne vrtače v razmerju z jama, (3) določiti geološke strukture (vpadni kot in smer plasti razpoke, prelomi) na površju in v jami in s tem smer tok padavinske vode ter potencialne povezave med posamezno vrtačo in jama.

## 2 Preučevano območje: jama Polina peč v Matarskem podolju

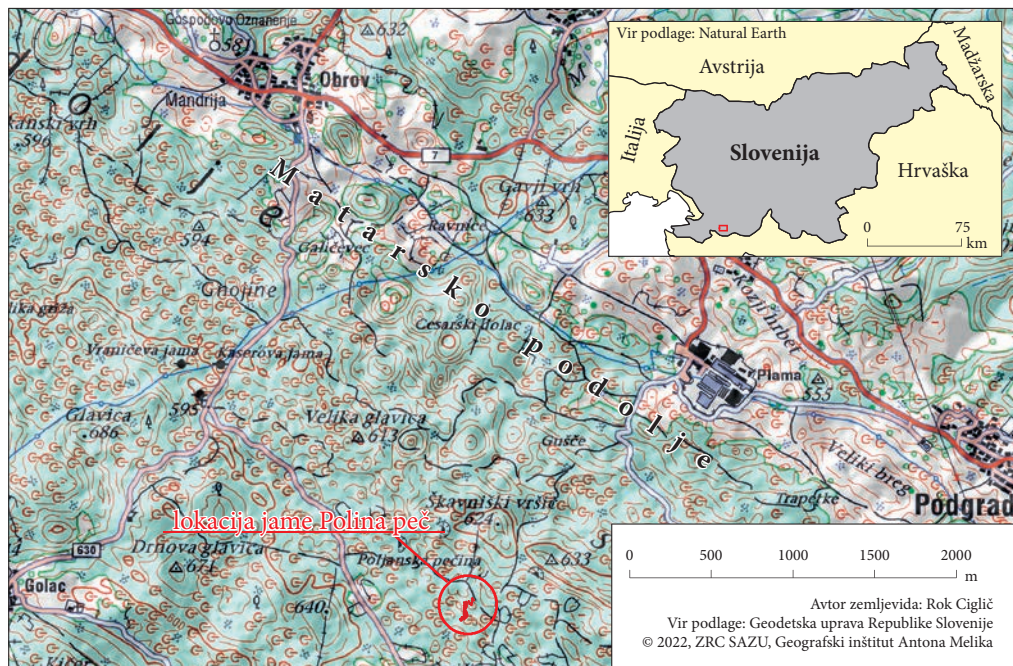
Matarsko podolje je kraška uravnava na nadmorski višini med 500 in 680 m. Oblikovala se je v krednih in paleogenskih apnencih (Verbovšek in Gabor 2019). Najpogostejša površinska geomorfološka oblika so vrtače, med katerimi prevladujejo manjše (do 100 m premera) in plitvejše (do 10 m) korozijske vrtače (slika 1). Njihova gostota je nekaj deset vrtač na km<sup>2</sup>. Vrtače pokrivajo 7 % celotnega podolja (Grlj 2020; Mihevc in Mihevc 2021). Tradicionalno je bilo območje stoletja namenjeno pašništvu, pašniki so bili v prvi polovici 20. stoletja opuščeni in preraščeni s sredozemsko-montanskim gozdom, v katerem prevladujeta bukev (*Fagus sylvatica*) in navadna leska (*Corylus avellana*) v vrtačah, na plitvih tleh izven vrtač pa črni bor (*Pinus Negra*) (Breg Valjavec, Zorn in Čarni 2018). Matarsko podolje meji na flišne Brkine, zato se je na njunem stiku oblikovalo znano območje kontaktnega krasa. V slednjem so razvite jame kontaktnega krasa, ki so jih izoblikovale ponikalnice iz Brkinov. V veliki meri se zato pojavljajo bolj ali manj vodoravne vodne jame (Grlj 2020; Mihevc in Mihevc 2021).

Jama Polina peč je razvita v apnencih spodnje krede K<sub>1</sub><sup>1-3</sup>, ki po geološki karti (Šikić in Pleničar 1975) pripadajo debeloplastnatim do masivnim apnencem. Karbonatne kamnine so del Brske formacije (barezijske do aptijske starosti). Ponekod na površju lahko poleg apnenca najdemo še karbonatno brečo ali dolomit. Brska formacija, poimenovana po vasi Brje na Tržaško-Komenski planoti, je debela več kot 500 m in jo gradita spodnjekredni bituminozen debelozrnat dolomit in apnenec (Jurkovšek s sodelavci 1996). Jama se nahaja med Materijskim prelomom (Placer 2015) na severu in Skadanskim prelomom na jugu (Placer 2007). Oba dinarska preloma (SZ–JV) sta tektonsko aktivna (Atanackov s sodelavci 2021, Karta aktivnih prelomov Slovenije 2022). Natančen načrt jame Polina peč (slika 2) smo pridobili iz baze Katastra jam (2020).

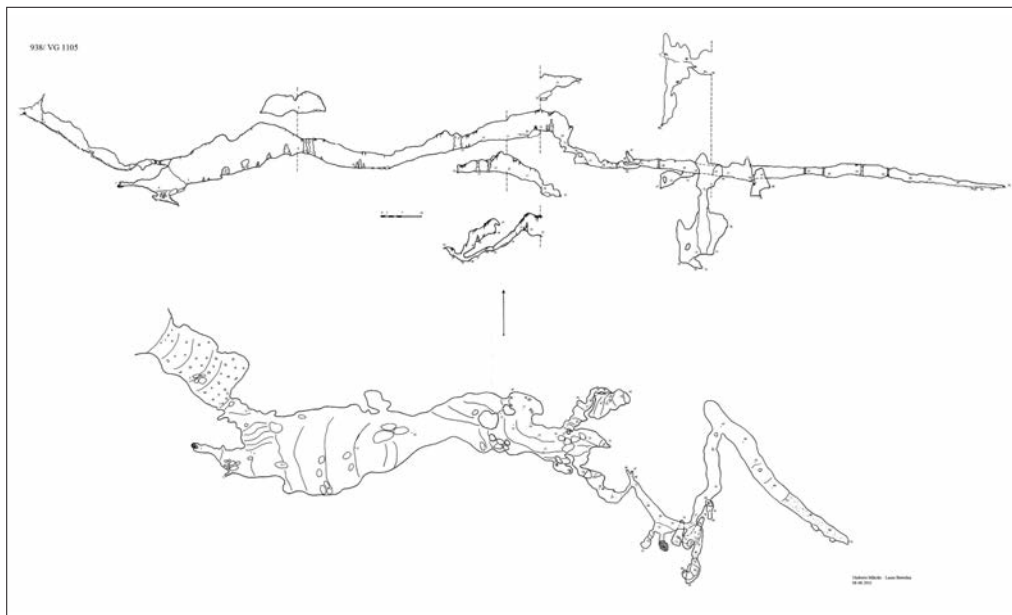
## 3 Metode in podatki

### 3.1 Zajem podatkov 3D laserskega skeniranja

Glavnina rovov jame Polina peč je bila lasersko skenirana z mobilnim skenerjem Leica BLK2GO. Gre za najmanjši dvoosni lidar (*dual axis lidar dome*), ki je na voljo z najboljšo natančnostjo v svojem razredu (20 mm), zaprt v popolnoma zaščiteni kupoli. Hitrost laserskega skeniranja znaša 420.000 točk



Slika 1: Pregledni zemljevid Matarskega podolja z lokacijo jame Polina peč (katastrska številka 938), ki se odpira jugovzhodno od Obrova na Matarskem podolju.



Slika 2: Načrt jame Polina peč (katastrska številka 938) iz Katastra jam. Spodnji prikaz je tloris jame, zgornji pa vzdolžni profil.



na sekundo. Doseg laserskega žarka znaša 0,5 do 25 m. Vidno polje sistema zajema za lasersko skeniranje je 360° krat 270° (vertikalni krat horizontalni kot vidnega polja). BLK2GO vključuje sistem vizualizacije z več kamerami (*multicamera vision system*), ki ga sestavljajo vgrajena podrobna kamera z 12 milijoni slikovnih pik za visoko kontrastne posnetke in tri dodatne panoramske kamere za vizualizacijo in navigacijo SLAM (*simultaneous localization and mapping*), za barvanje oblakov točk in zajem panoramskih posnetkov. Z uporabo treh kalibriranih panoramskih kamer algoritem za slikovno podporo samodejno in sproti ustvarja panoramsko fotografijo (300° krat 135°). Ta sistem kamer se uporablja tudi v sklopu VIS sistema (*visual inertial system*) in za obarvanje oblaka točk. GRAND-SLAM je kombinacija visokohitrostnega dvoosnega lidarja, večkamernega vidnega sistema in inercialne merilne enote, ki omogoča BLK2GO samodejno orientacijo brez zunanega sistema za pozicioniranje. Natančna kamera omogoča zajem detailne fotografije ločljivosti 12 Mpix (vidno polje: 90° krat 120°). Fotografija je zajeta medtem, ko GRAND-SLAM nemoteno deluje (BLK2GO nemoteno skenira okolico in uporablja VIS sistem).

Za prikaz preliminarne lege jame na zemljevidu smo načrt iz Katastra jam vektorsko digitalizirali. Geolociranje jame je pri tem postopku temeljilo na lokaciji koordinat jamskega vhoda v Katastru jam in podatkih o smeri jame. Izmerjena dolžina jame je 365 m, globina pa 38 m. Jamo smo razdelili v 6 sektorjev, ki se deloma prekrivajo za potrebe združevanja v enoten 3D model jame. Prvi sektor vključuje površje z vrtačo z razširjenim naravnim vhodom v obliki spodmola na severovzhodnem pobočju vrtače (slika 3A, svetlo moder sektor). V vrtači smo na območju, kjer smo izvedli lasersko skeniranje, enakomerno razmestili štiri plastične tarče. Tarčam smo s pomočjo sprejemnika GNSS (globalni navigacijski satelitski sistem) določili koordinate z natančnostjo nekaj centimetrov. Uporabili smo sprejemnik Leica Zeno 20. Koordinate smo pretvorili v državni koordinatni sistem D96/TM ter v tem sistemu določili nato tudi položaj celotnega oblaka točk vrtače in jame. Po štiri tarče smo namestili tudi znotraj jame v območjih prekrivanja posameznih sektorjev (prvi sektor je bil zunaj, pred vhodom v jamo), kar je pripomoglo k boljšemu povezovanju posameznih oblakov točk. Skeniranje je potekalo v deloma osvetljenem okolju, kjer je bila svetloba v jami zagotovljena le iz svetilk na varovalnih čeladah. Skeniranje in georeferenciranje jame smo izvedli 23. aprila 2021.

### 3.2 Podatki letalskega laserskega skeniranja

Za geomorfološko in geološko analizo reliefa nad jamo Polina peč smo uporabili javno dostopne podatke laserskega skeniranja površja, in sicer digitalni model reliefa z ločljivostjo 1 m. Celotna država je bila skenirana s tehnologijo letalskega laserskega skeniranja v letih 2011, 2014 in 2015 v okviru nacionalnega projekta (Agencija RS za okolje, Ministrstvo za okolje in prostor, 2015). Podatkovni sloji za površje (relief s stavbami in vegetacijo) in relief so bili za celo Slovenijo pripravljeni po enotni metodologiji (Triglav Čekada in Bric 2015) in so prosto dostopni na spletni strani Agencije Republike Slovenije za okolje.

### 3.3 Računalniška obdelava in izdelava 3D modela jame

Uvoz in obdelava surovih oblakov točk sta potekala v programu za obdelavo 3D oblakov točk Leica Cyclone Register 360, kjer smo ločene oblake točk združili v enoten 3D oblak točk. Pri tem smo uporabili polavtomatski postopek. Ker je podatkov veliko, se je izkazalo, da je bolje uskladiti oblake točk enega za drugim. Program povezuje in združuje oblake točk samodejno tako, da razpozna podobne vzorce prekrivajočih se območij (slika 3B). Na začetku je bilo potrebno oblake točk registrirati z ročnim določanjem referenčnih točk na prekrivajočem območju (v našem primeru smo uporabili tarče in geološke strukture v jami, na primer razpoke in plasti), ki jih nato algoritem vključi v samodejno poravnavo (*auto alignment*) (Walters in Zupan Hajna 2020). Vizualna poravnava (*visual alignment*) samodejno zavrti delne oblake točk, da se najbolje prilegajo na podlagi geometrije. Na koncu je možno še ročno popraviti odstopanja pred dokončno in optimalno poravnavo, ki jo zaključimo z modulom *optimise allignment*. Združeni 3D oblak točk za celotno jamo obsega 923.638.901 točk v dolžini trajektorija

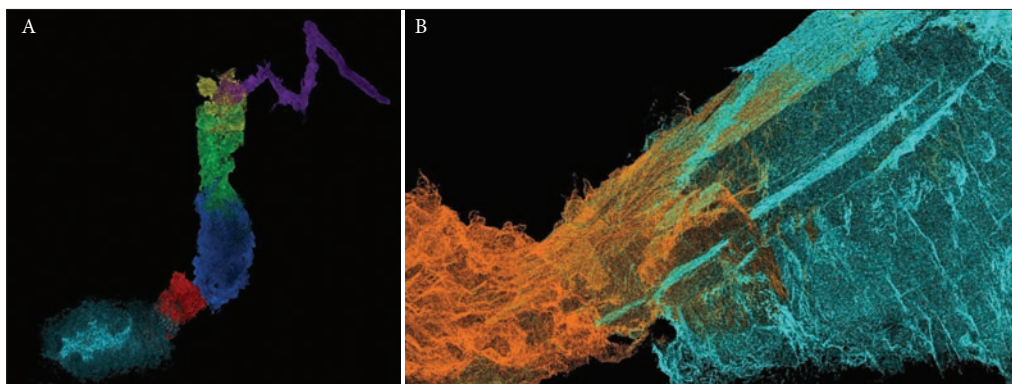
1.692,894 m. Sestavljen je iz 6 delnih oblakov točk (slika 3A), z različnim deležem medsebojnega prekrivanja (preglednica 1), ki v povprečju za celoten 3D oblak točk dosega 33 % prekrivanje s standardno napako 0,004 m.

### 3.4 Strukturno-geološko kartiranje jame in površja

Podrobno terensko strukturno-geološko kartiranje jame in površja (Čar 1982; Šebela 1998) smo opravili za dopolnitve in primerjave z rezultati 3D laserskega skeniranja (Konsolaki s sodelavci 2020). Kartiranje jame je potekalo na osnovi obstoječega jamskega načrta iz Katastra jam (Jamarska zveza Slovenija). Na načrtu smo označili tip in starost kamnine, debelino plasti, smer in kot vpada plasti ter

Preglednica 1: Značilnosti skeniranja po posameznih sektorjih (delnih oblakih točk).

	čas snemanja (s)	dolžina trajektorija (m)	število točk v 3D oblaku	delež prekrivanja med sosednjima sektorjema	napaka prekrivanja
sektor 1	441	146	63.991.805	50,19 %	0,004 m
sektor 2	438	126	91.722.013	5,30 %	0,005 m
sektor 3	1.382	491	302.821.119	33,48 %	0,004 m
sektor 4	667	238	152.559.901	49,43 %	0,004 m
sektor 5	623	224	107.785.060	27,04 %	0,004 m
sektor 6	1.997	610	302.916.799		
celotna jama	5.548	1.835	1.021.796.697	33 %	0,004 m



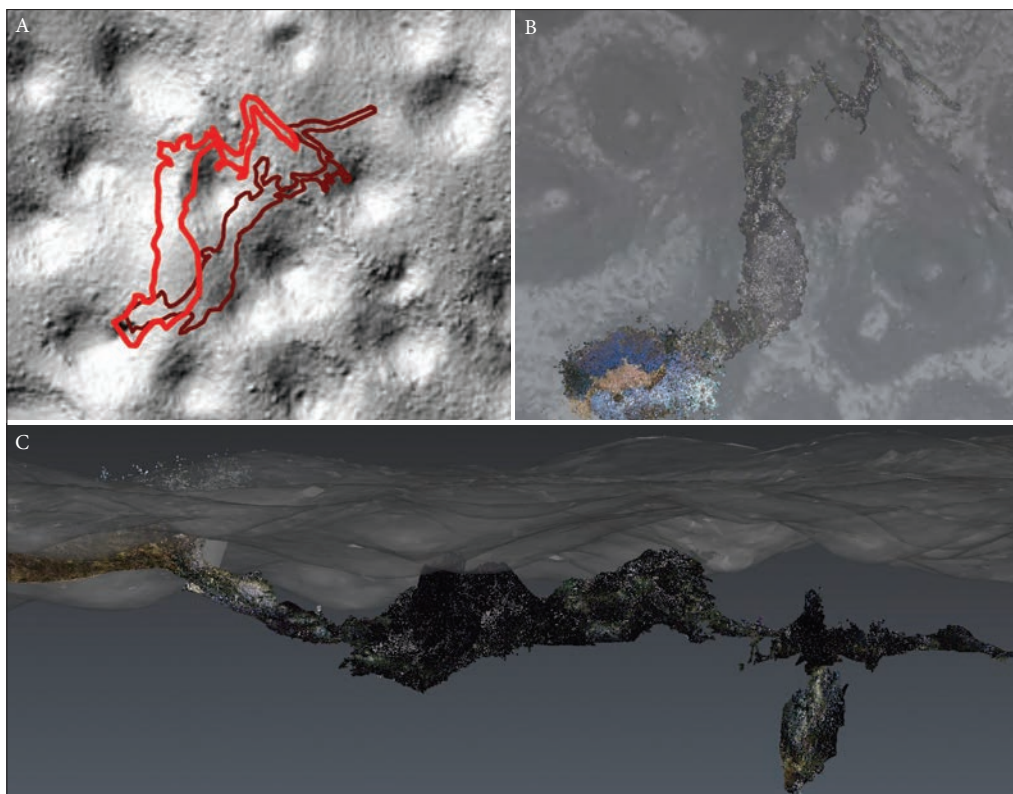
Slika 3: A – sestavljen 3D oblak točk jame iz 6 sektorjev, ki so vidni v različno obarvanih oblakih točk (sektor 1 – svetlo modra, sektor 2 – rdeča, sektor 3 – temno modra, sektor 4 – zelena, sektor 5 – rumena, sektor 6 – vijolična), B – poravnava in prekrivanje dveh zaporednih oblakov točk med postopkom združevanja s pomočjo modula visual alignment.

vidne geološke strukture (prelomi, razpoke, razpoklinske cone). Kartiranje površja je potekalo na natisnjeni kartografski podlagi, ki sta jo sestavljala vizualizacija reliefa z deležem vidnega neba (SVF) (Zakšek, Oštir in Kokalj 2011) v ločljivosti 1 krat 1 m ter čezenj položen prosojen sloj zemljevida TTN 1 : 5.000.

## 4 Rezultati in razprava

### 4.1 Projekcija jame na površje in lega pod površjem

Georeferenciran 3D oblak točk jame smo izvozili v standardnih formatih .E57 in .las za nadaljnje analize v GIS programih (Leica Cyclone 3DR 2021.1, ArcGIS Pro in Global Mapper 2.1). V programu Leica Cyclone 3DR smo georeferenciran 3D oblak točk postavili v trirazsežnostno okolje v razmerju z digitalnim modelom višin 1 krat 1 m. Georeferenciran 3D oblak točk smo projicirali na površje (slika 4A) in ga vektorizirali, da smo lahko določili vrtače, ki so v potencialni hidrogeološki povezavi z jamo. V trirazsežnostnem okolju je možen pogled iz različnih perspektiv (sliki 4B, 4C). Glede na preliminarno projekcijo obstoječega jamskega načrta (slika 4A, temno rdeč poligon) je končna projekcija jame, ki



Slika 4: A – projekcija digitaliziranega jamskega načrta (črn črtkan poligon) in projekcija na terenu zajete 3D oblaka točk jame (rdeč poligon) na površje, B – pogled na 3D model jame pod prosojnim površjem (senčen relief) iz juga proti severu, C – pogled na 3D model jame v osnovni legi smer zahod–vzhod od spodaj navzgor (izpod senčenega lidarskega reliefa), dobro sta vidna vpad plasti po celotni jami ter jamski vhod v vrtači (tudi vegetacija) ter navpično brezno, ki na sliki B ni vidno zaradi navpičnega pogleda od zgoraj.

temelji na 3D modelu jame (slika 4A, svetlo rdeč poligon), nekoliko zamaknjena proti zahodu in v generalnem usmerjena proti severu. Pri določanju vrtač, ki so potencialno povezane z jamo, smo tako upoštevali slednji (lastno izdelan) načrt.

#### 4.2 Strukturno-geološke značilnosti jame

Glede na ogled površja, kjer smo izmerili smer vpada plasti apnenca proti severovzhodu za  $30^{\circ}$ – $50^{\circ}$ , ter geološko karto (Šikić in sodelavci 1972) in 3D lasersko skeniranje jame smo tudi v Polini peči lahko potrdili, da plasti apnenca (spodnja kreda) debeline 1–2 m vpadajo proti severovzhodu (smer vpada  $45^{\circ}$ ) pod kotom  $40^{\circ}$  (slika 5). Vpad plasti v jami je dobro viden na 3D modelu jame in se ujema s podatki strukturno-geološkega kartiranja oziroma ga dopolnjuje.

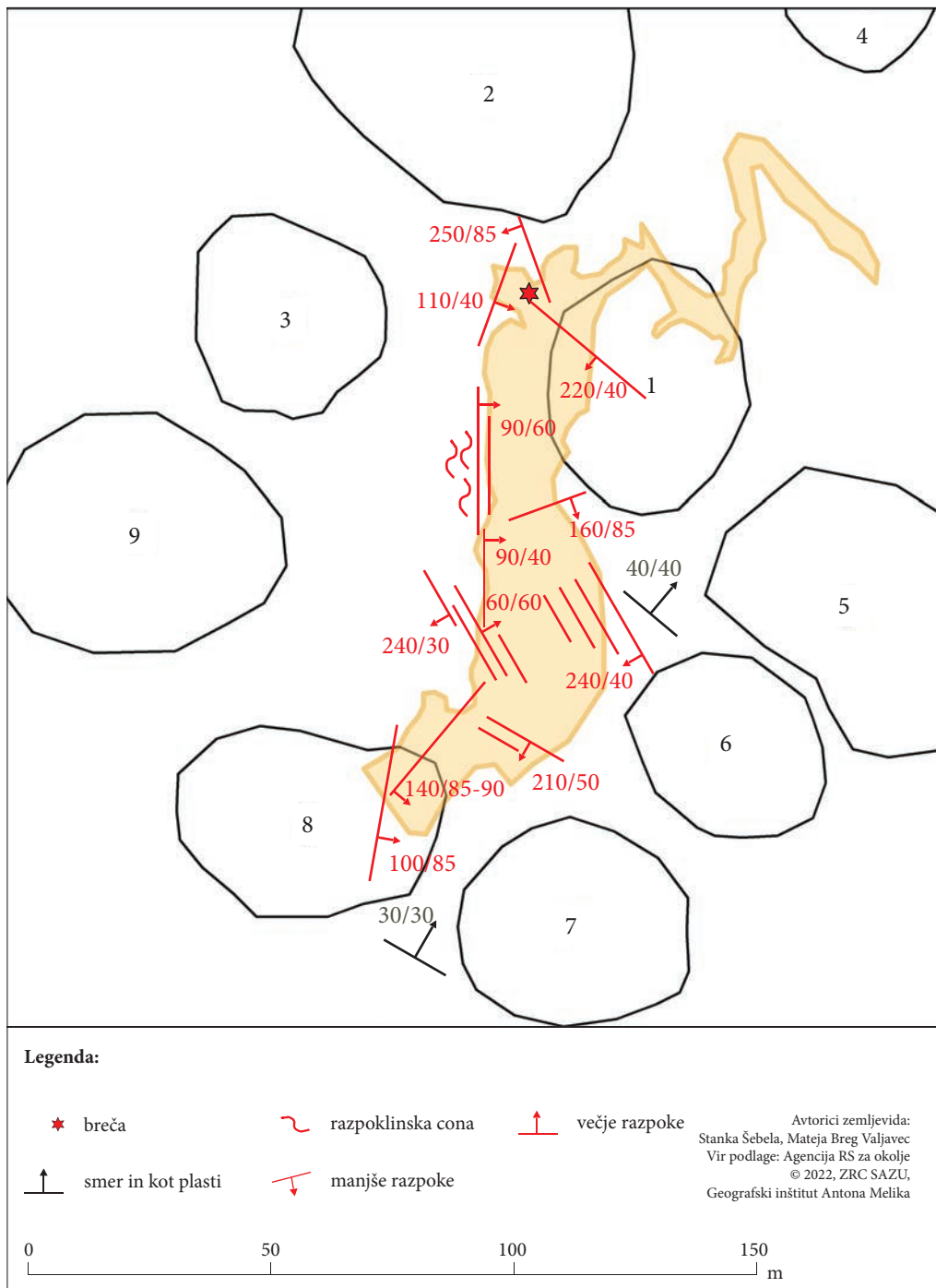
V Polini peči smo določili močnejše izražene sisteme razpok v dinarski smeri, kot tudi razpoklinsko cono in šibkejše izražene razpoke (slika 5). Sklepamo lahko na deformacije gubanja in narivanja (manjši dupleks na vhodu v jamo), kar se ujema s podatki terenskega geološkega kartiranja, ki je bilo opravljeno na površju nekoliko bolj proti severozahodu od Poline peči, kjer so določili narivne prelome po lezikah in duplexe različnih dimenzij (Celarc s sodelavci 2012).

#### 4.3 Jama in njene povezave s površjem

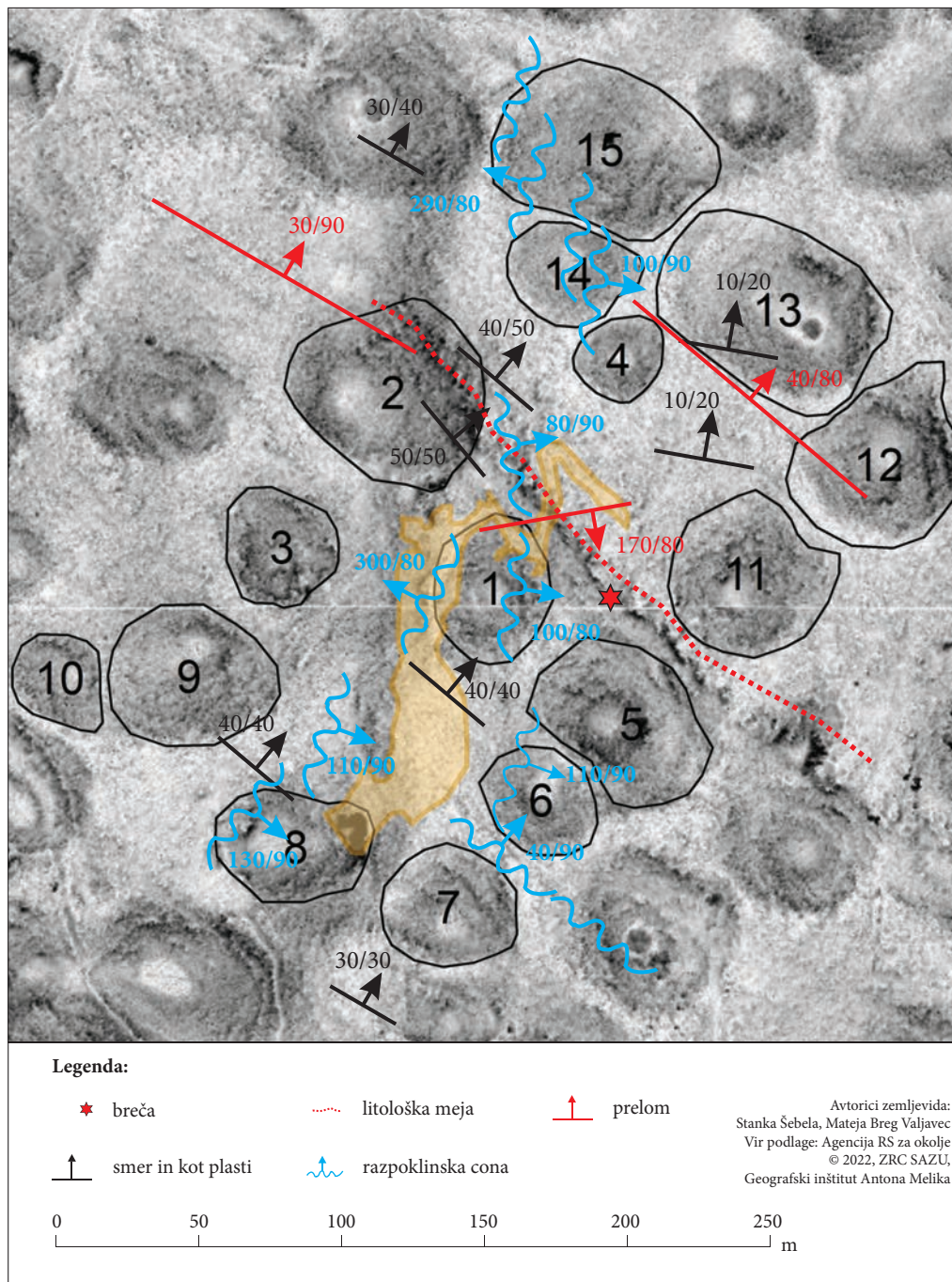
Rezultati strukturno-geološkega kartiranja površja so prikazani na sliki 6. Jasno sta definirani lito-loška in morfološka meja med debeloplastnatim in masivnim apnencem, med katerima se pojavi tudi plast breče. Med geološkimi strukturnimi oblikami smo tudi na površju zaznali razpoklinske cone ter določili prelome s smerjo vpada in vpadnim kotom. Določili smo smer vpada plasti apnenca proti severovzhodu za  $20$ – $50^{\circ}$ . Glede na načrt jame smo naredili izbor petnajstih vrtač v njeni neposredni bližini (slika 6). Kot dodaten kriterij za nadaljnje vrednotenje vrtač smo upoštevali tudi rezultate strukturno-geološkega kartiranja površja nad jamo (slika 6) in same jame (slika 5). Glede na smer in vpad plasti apnencev ter na bližino so za povezanost z jamo najbolj zanimive vrtače na zahodni strani jame (številčne oznake 2, 3, 9, 8, 10), iz katerih bi lahko padavinska voda pritekala v jamo med lezikami, če bi sledila smeri vpada plasti. Neposredno nad jamo oziroma tik ob njej je vrtača 1. Vrtače na vzhodni oziroma jugovzhodni strani so glede na vpad skladov predvidoma slabše hidrološko povezane z jamo, vendarle pa je ob njih veliko razpoklinskih con s precej vertikalno usmerjenostjo ( $80^{\circ}$ – $90^{\circ}$ ), ki bi zaradi bližine jame lahko usmerjale padavinsko vodo v jamske rove.

V programu Global Mapper smo izdelali vzdolžni navpični profil, ki preseka oblak točk jame in nadležeče površje (slika 7A). Ponazorili smo lego jame pod površjem v posameznih odsekih in vrtače na površju (slika 7B). Profil se začne na zahodnem robu vrtače in poteka v dolžini 50 m proti vzhodnem robu vrtače do spodmola z vhodom v jamo. Vhod v jamo je v obliki spodmola, ki je lociran v pobočju, pod strmo skalo na vzhodnem robu vrtače na nadmorski višini 565 m. Poleg oblike vrtače je v njej prikazana tudi višina grmovno-drevesne vegetacije. Od spodmola naprej se profil v dolžini 30 m lomi v smeri proti severovzhodu. Takoj za najožjim delom vhoda v jamo, kjer so nameščene tudi varovalne rešetke s ključavnico, se jama razširi v veliko in do 20 m visoko podorno dvorano in v nadaljnjih približno 120 m poteka v smeri proti severu. V začetku podorne dvorane je dosežena najnižja nadmorska višina dvorane na 547,2 m, hkrati pa se dve zajedi v stropu dvigata do nadmorske višine nad 570 m. Zaradi omejitve dosega laserskega žarka do 25 m sklepamo, da pri stropnih zajedah nismo dosegli končne višine in bo potrebno meritve v prihodnje dopolniti z dodatnim laserskim skeniranjem bližje stropu oziroma s primernim terestričnim laserskim skenerjem daljšega dosega. V nadaljevanju se podorna dvorana v isti smeri (proti severu) zoži in zniža na nekaj metrov, dno pa se začne dvigovati in na koncu doseže v našem primeru najvišjo izmerjeno nadmorsko višino jame 572 m (strop). V tem delu je jama najbližje površju (okrog 7 m), katero je na tej lokaciji na približno 579 m n. m. v. V zadnjem oziroma novem delu jame, ki je bil odkrit leta 1996 in se imenuje Brežanski rov, se rovi zožijo in ponovno spustijo do 40 m pod površje.





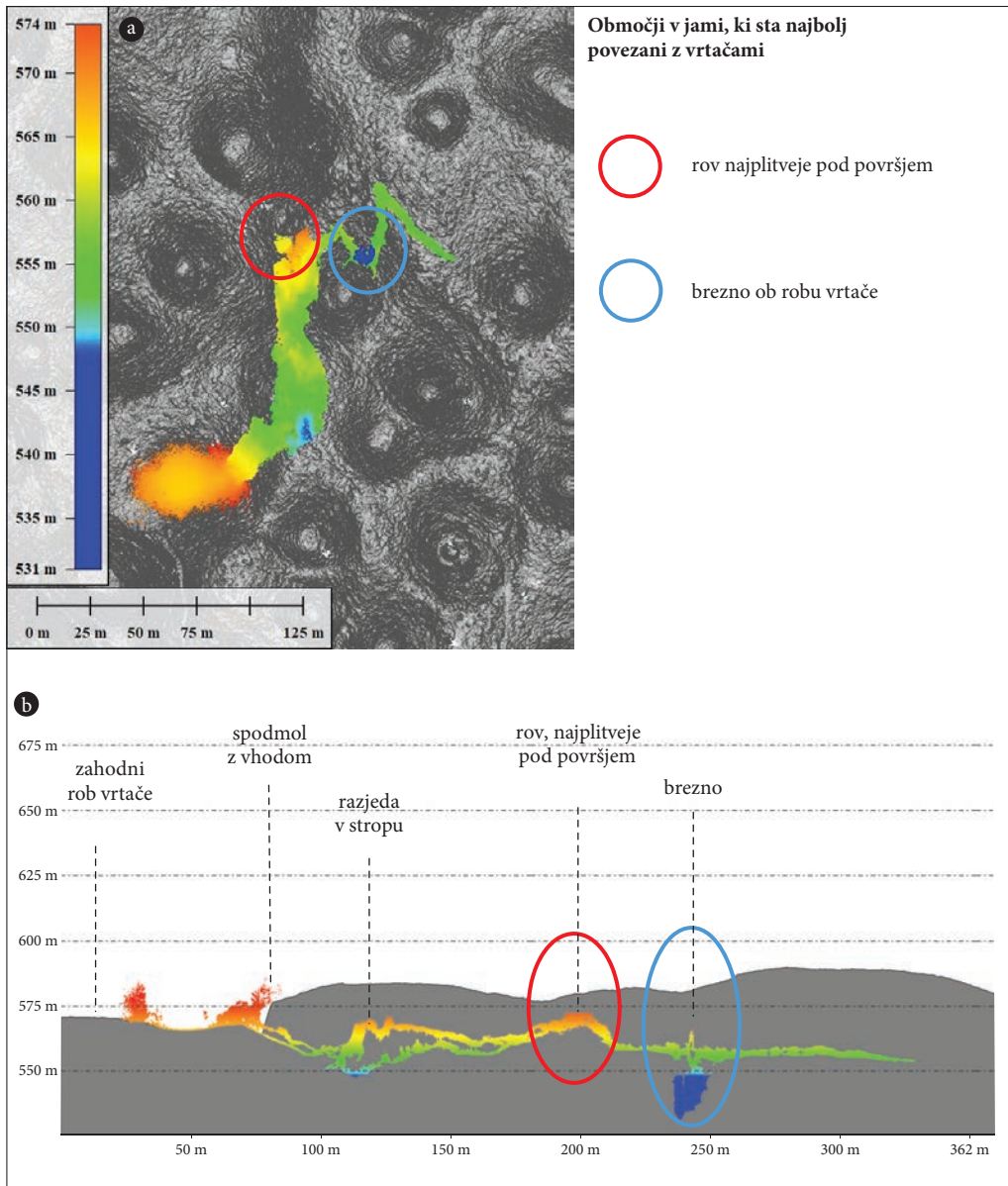
Slika 5: Strukturno-geološki zemljevid jame Polina peč.



Slika 6: Strukturno-geološki zemljevid površja nad jamo Polina peč. Poleg geoloških struktur je označena lega jame (oranžen poligon) in območja petnajstih vrtač (črni poligoni).

V tem delu ozek vodoravni rov prečno »preseka« navpično brezno, ki pada v globino še 25 m in doseže najgloblje izmerjeno točko jame na 531 m, hkrati pa se brezno dviga tudi proti površju.

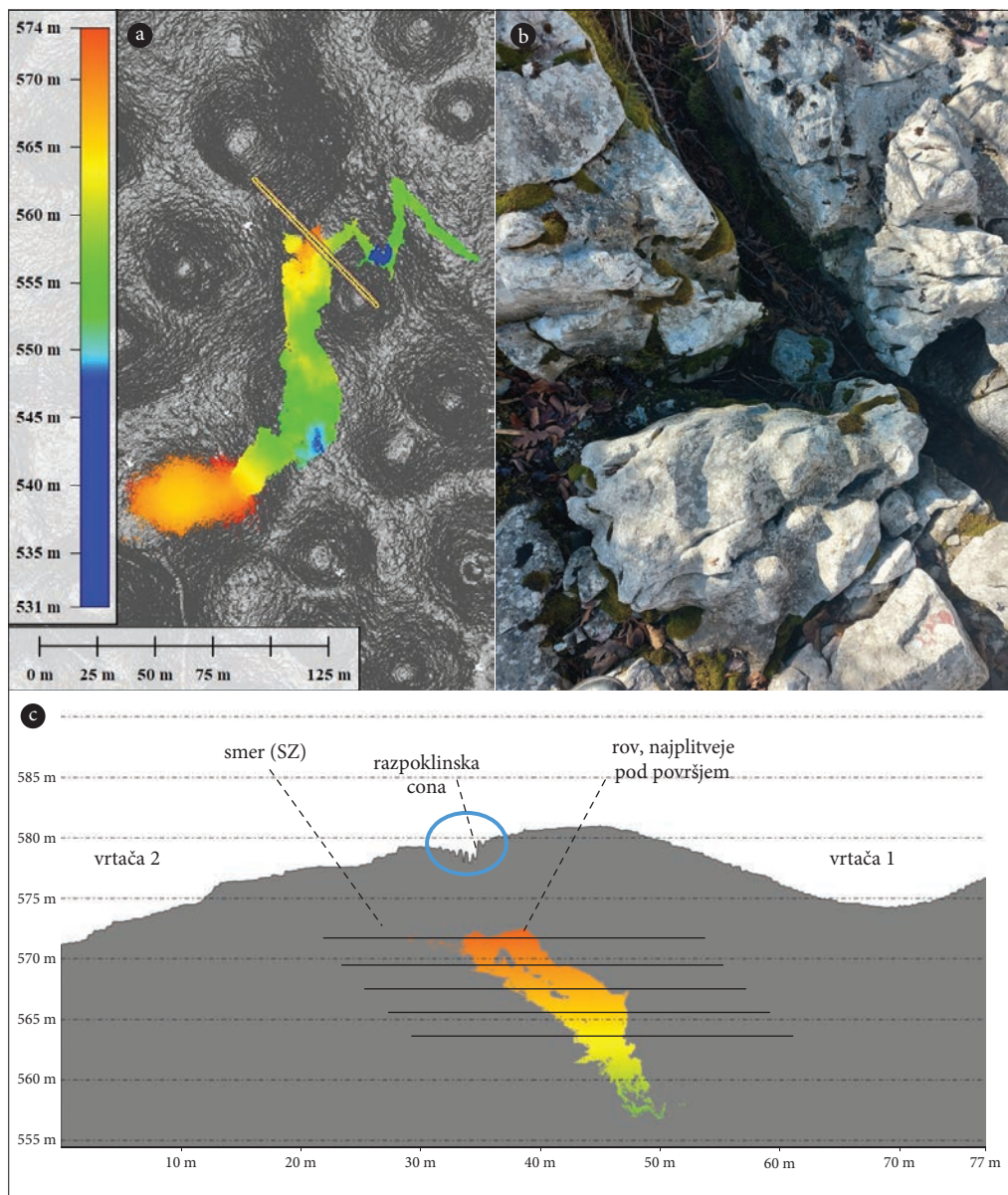
V nadaljevanju podrobneje predstavljamo značilnosti dveh povezav označenih na sliki 7, za kateri lahko na osnovi zgolj geoinformacijskih metod z največjo mero verjetnosti potrdimo geomorfološke povezave med vrtačami in jamo.



Slika 7: A – 3D oblak točk jame s prikazanimi nadmorskimi višinami projiciran na senčen relief, B – vzdolžni presek jame pod površjem v programu Global Mapper.



Kot je razvidno na sliki 8C, leži jama najplitveje pod površjem (7 m) med vrtačama 2 in 1, natančneje pod vzhodnim pobočjem vrtače 2. Med vrtačama je za vodo dobro prepustna razpoklinska cona (slika 8B) v prečno dinarski smeri, skozi katero se lahko padavinska voda prav tako usmerja v jamo. Geomorfološko povezavo jame s površjem pri vrtači 2 posredno nakazuje tudi večja količina sedimentov,

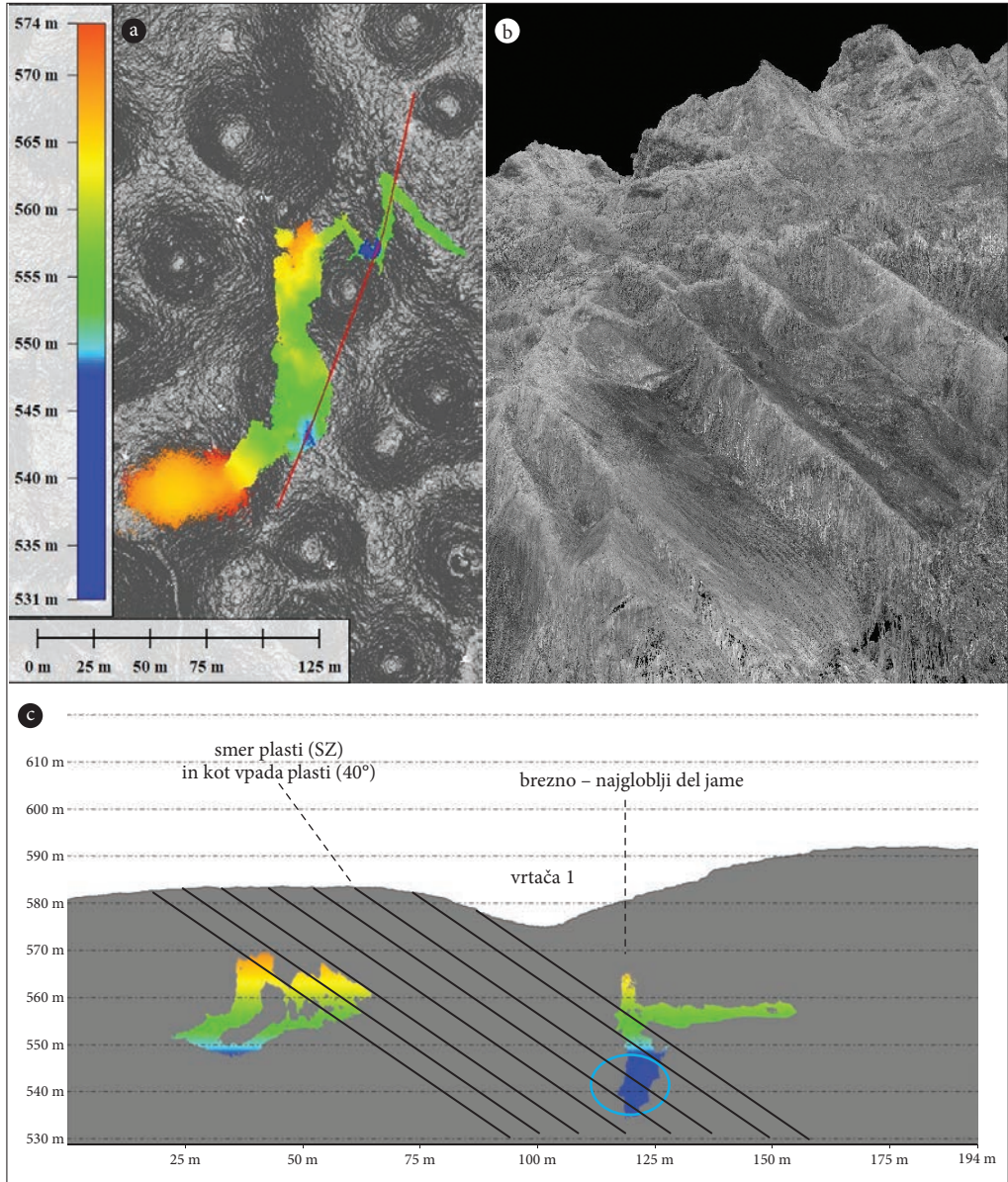


Slika 8: A – lega prečnega preseka skozi jamo, na območju, kjer je rov najplitveje pod površjem v smeri severozahod–jugovzhod, B – fotografija primera razpoklinske cone, C – prečni presek skozi jamo in ponazoritev vpada plasti med vrtačama 2 in 1.



ki so usmerjeni v dvorano, ter preprih v razpokah, ki ga je zaznati le v vzhodnem delu jame ter v dvorani pod vrtačo 2.

Vrtača 1 navidezno »objema« jamo vse od jugozahodnega do severozahodnega roba (slika 9A). Na sliki 9C vidimo, da sta jugozahodno pobočje vrtače in del dna vrtače okrog 15 m nad jamskim stropom.



Slika 9: A – lega prečnega preseka skozi jamo na dveh območjih v smeri jugozahod–severovzhod skozi vrtačo 1, B – prikaz vpada plasti na 3D oblaku točk, C – prečni presek skozi jamo in ponazoritev vpada plasti med vrtačo 1 in dvema območjema v jami.

Na osnovi geološkega kartiranja (slika 6) smo na zahodnem robu vrtače 1 določili skoraj subvertikalno razpoklinsko cono v prečno dinarski smeri severovzhod–jugozahod (300/80° in 100/80°). Vpad plasti je v smeri severozahoda pod kotom 40°, tako kot je vpad plasti v jami (sliki 5 in 9B), kar pomeni, da padavinska voda iz zahodne strani vrtače 1 odteka v smeri brezna na severozahodni strani vrtače, če sledi lezikam med plastmi. Vendar številne razpoklinske cone, kjer so razpoke skorajda navpične, omogočajo tudi neposreden hiter odtok padavinske vode v podzemlje, tudi v jamo neposredno pod površjem.

Med vrtačami se v raziskavi nismo posvetili vrtačam, ki ležijo severovzhodno od jame, predvidoma 40 m nad jamo. Ker predvidevamo, da se jamski rovi nadaljujejo v različne smeri, so omenjene vrtače zanimive predvsem zaradi možnih geomorfoloških in hidrogeoloških povezav s še neodkritim delom jame. V eni od teh vrtač se na robu dna odpira vhod v jamo, kar nakazuje prepih na vhodu. Zaradi neposredne bližine obeh jam obstaja verjetnost, da sta jami povezani.

Čprav je uporaba TLS omejena na manjša preučevana območja, omogoča bolj natančen 3D zajem objektov kot zračno lasersko skeniranje. 3D laserski skenerji so poenostavili celovito zajemanje podatkov o objektih, saj omogočajo preprosto in hitro zajemanje velike količine prostorskih koordinat točk skeniranih objektov ter njihovo predstavitev v obliki ravninskih ali prostorskih modelov (Mozetič 2004). Velika prednost 3D laserskega skeniranja je njegova zmožnost delovanja v popolni temi. Razmerje med porabljenim časom za skeniranje in pisarniško obdelavo je nekje med 1 : 3 do 1 : 5, odvisno od zahtevnosti skeniranja, velikosti in celovitosti objekta ter zelenega končnega rezultata (Mozetič 2004). V prostorskem oblaku točk lahko merimo razdalje, računamo površine in volumne, izdelamo poljubne prereze itd.

## 5 Sklep

3D lasersko skeniranje in izdelava oblaka točk omogoča natančno 3D modeliranje in kartiranje kraških jam. Z uporabo sprejemnika GNSS za določanje položaja in natančnim georeferenciranjem izmerjenih točk zunaj jame postavimo jamo v državni koordinatni sistem (v našem primeru D96/TM) in jo primerjamo s površjem nad njo, kar je bil glavni namen tega prispevka. Uporabljeni pristop omogoča določanje potencialnih geomorfoloških in hidrogeoloških povezav med vrtačami in jamskimi rovi, ugotavljanje natančne lege in globine jame pod vrtačo, smer in vpad plasti kamnine, kartiranje strukturnih razpok ter globino in površino geomorfoloških in geoloških oblik na površju, kot so vrtače, grezi, ponori, škraplje ter razpoklinske cone.

Potencialne hidrogeološke povezave, ki jih zaznamo z geoinformacijskimi metodami, so podlaga za nadaljnje raziskave z uporabo dodatnih hidroloških (na primer sledenje) in geofizikalnih metod (na primer meritev električne upornosti tal). Metoda je uporabna tudi na kraških območjih zunaj Slovenije, kjer so na voljo podatki letalskega laserskega skeniranja za območje celotne države.

*ZAHVALA: Raziskavo je financirala Agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v okviru temeljnega raziskovalnega projekta Koncept soodvisnosti v krasu: povezanost vrtač in jam z vidika antropogenih vplivov (J6-2592) in raziskovalnega programa Geografija Slovenije (P6-0101).*

## 6 Viri in literatura

Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Celarc, B., Novak, M., Milanič, B., Markelj, A., Bavec, M., Kastelic, V., 2021: Database of active faults in Slovenia: Compiling a new active fault database at the junction between the Alps, the Dinarides and the Pannonian Basin tectonic domains. *Frontiers in Earth Science* 9:604388. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.604388>.

- Breg Valjavec, M., Zorn, M., Čarni, A. 2018: Human-induced land degradation and biodiversity of Classical Karst landscape: On the example of enclosed karst depressions (dolines). *Land Degradation and Development* 29. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3116>.
- Buchroithner, M. F., Gaisecker, T. 2009: Terrestrial laser scanning for the visualization of a complex dome in an extreme Alpine cave system. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation* 4. DOI: <https://doi.org/10.1127/1432-8364/2009/0025>.
- Ciglič, R.; Čonč, Š.; Breg Valjavec, M. 2022: The impact of digital elevation model preprocessing and detection methods on karst depression mapping in densely forested Dinaric Mountains. *Remote Sensing*, 14, 2416. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14102416>
- Celarc, B., Jurkovšek, B., Placer, L., Milanič, B. 2012: Strukturna zgradba območja med Dinaridi in Istrskim polotokom: Vpliv tektonike plošč na gradnje velikih infrastrukturnih objektov (primer 2. tira Divača – Koper). *Razprave 6. posvetovanja slovenskih geotehnikov*, Lipica, 14. - 15. junij 2012, SloGeD, 49-66, <http://sloged.si/wp-content/uploads/Razprave%206.%20posvetovanja/0.1.pdf> (8.4.2022).
- Čar, J., 1982: Geologic setting of the Planina Polje ponor area. *Acta Carsologica*, 10, 75-105.
- Čekada, M., Gostinčar, P. 2016: Uporaba Lidarja v jamarstvu. *Digitalni podatki. GIS v Sloveniji* 13. Ljubljana.
- Čonč, Š., Oliveira, T., Portas, R., Černe, R., Breg Valjavec, M., Krofel, M. 2022: Dolines and cats: Remote detection of karst depressions and their application to study wild felid ecology. *Remote Sensing* 14. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14030656>
- Gallay, M., Kaňuk, 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 Domicia Cave, Slovakia. *International Journal of Speleology* 44-3. DOI: <https://doi.org/10.5038/1827-806X.44.3.6>
- Gostinčar, P. Geomorphological characteristics of karst on contact between limestone and dolomite in Slovenia. Dissertation, 623 Fakulteta za podiplomski študij univerze v Novi Gorici, 2016. )
- Grlj, A. 2020: Omejevanje kraških kotanj z analizo polrezov. *Dela* 53. DOI: <https://doi.org/10.4321/dela.53.5-22>.
- Holenstein, C., Zlot, R., Bosse, M. 2011: Watertight surface reconstruction of caves from 3D laser data. *Proceedings IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Francisco. DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6095145>
- Jurkovšek B., Toman, M., Ogorelec B., Šribar L., Droben K., Poljak M., Šribar L. 1996. Geological map of the southern part of the Trieste-Komen plateau, Cretaceous and Paleogene carbonate rocks 1:50 000. Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko, Ljubljana, 142 pp.
- Konsolaki, A., Vassilakis, E., Gouliotis L., Kontostavlos, G., Giannopoulos, V. 2020: Visokoločljivostno digitalno 3D modeliranje podzemeljskih morfoloških struktur v jami Koutouki, Grčija. *Acta Carsologica* 49-2/3. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v49i2-3.7708>
- Kobal, M., Bertonecelj, I., Pirotti, F., Dakskobler, I., Kutnar, L. 2015: Using lidar data to analyse sink-hole characteristics relevant for understory vegetation under forest cover – Case study of a high karst area in the Dinaric Mountains. *PLoS ONE* 10-3. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122070>
- Mihevc, A., Mihevc, R. 2021: Morphological characteristics and distribution of dolines in Slovenia, a study of a lidar-based doline map of Slovenia. *Acta Carsologica* 50-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v50i1.9462>
- Mozetič, B. 2004: Terestrično 3D (trirazsežno) lasersko skeniranje. *Geodetski vestnik* 48-3.
- Novaković, G., Mlekuž, D., Rozman, L., Lazar, A., Peric, B., Cerkenik, R., Peternelj, K., Erič, M. 2014: New approaches to understanding the world natural and cultural heritage by using 3D technology: UNESCO's Škocjan Caves, Slovenia. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 3-4. DOI: <https://doi.org/10.1260/2047-4970.3.4.629>
- Petrovič, D., Grigillo, D., Gnilšek, J., Vežočnik, R., Kosmatin Fras, M. 2008: Lasersko skeniranje Železne jame in možnost uporabe zajetih podatkov. *GIS v Sloveniji* 9, *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji* 2007-2008.

- Placer, L. 2007: Kraški rob, Geološki prerez vzdolž AC Kozina – Koper. *Geologija* 50-1. DOI: <https://doi.org/10.5474/geologija.2007.003>
- Placer, L. 2015: Simplified structural map of Kras, Kras (Slovene), Carso (Italian) = Geographical unit. *Geologija* 58-1. DOI: <https://doi.org/10.5474/geologija.2015.008>
- Podržaj, P. 2020: 3D lasersko skeniranje Županove jame. Magistrsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Ravbar, N., Petrič, M., Blatnik, M., Švara, A. 2021: A multi-method approach to create improved indicators for the adequate karst water source protection. *Ecological Indicators* 126-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107693>
- Šebela, S. 1998: Tectonic structure of Postojnska jama cave system. ZRC publishing 18, Ljubljana. DOI: <https://doi.org/10.3986/961618265X>
- Šikić, D., Pleničar, M., Šparica, M., Grad, K., Rijavec, J., Buser, S., Blašković, I., Prelogović, E., Dozet, S., Drobne, F., Mioč, P., Orehek, A., Pavlovec, R., Šribar, L., Turnšek, D., Magaš, N. 1972. Osnovna geološka karta SFRJ. / L 33-89, Ilirska Bistrica. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Šikić, D., Pleničar, M. 1975: Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, tolmač lista Ilirska Bistrica L 33-89. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Telbisz, T., Látos, T., Deák, M., Székely, B., Koma, Z., Standovár, T. 2016: The advantage of lidar digital terrain models in doline morphometry compared to topographic map based datasets – Aggtelek karst (Hungary) as an example. *Acta Carsologica* 45-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v45i1.4138>
- Tičar, J., Čekada, M. 2018: Natančnost določanja lege naravnih vrednot v Sloveniji na primeru kraških jam. *Pokrajina v visoki ločljivosti. GIS v Sloveniji* 14. Ljubljana.
- Triglav Čekada, M., Bric, V. 2015: Končan je projekt laserskega skeniranja Slovenije/The project of laser scanning of Slovenia is completed. *Geodetski vestnik* 59-3.
- Verbovšek, T., Gabor, L. 2019: Morphometric properties of dolines in Matarsko podolje, SW Slovenia. *Environmental Earth Sciences* 78. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8398-6>
- Walters, R., Zupan Hajna, N. 2020: 3D Laser scanning of the natural caves: example of Škocjanske jame. *Geodetski vestnik* 64-1. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2020.01.89-103>
- Zakon o varstvu podzemnih jam. Uradni list Republike Slovenije 2/2004. Ljubljana.
- Zakšek, K., Oštir, K., Kokalj, Ž. 2011: Sky-view factor as a relief visualization technique. *Remote Sensing* 3-2. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs3020398>
- Zlot, R., Bosse, M. 2014: Three-dimensional mobile mapping of caves. *Journal of Cave and Karst Studies* 76-3. DOI: <https://doi.org/10.4311/2012EX0287>