

Geodetske meritve za umestitev Županove jame v globalno koordinatno osnovo: izmera do Velike dvorane

Marjetič Aleš*, Polona Pavlovčič Prešeren*

Povzetek

Določitev podzemnih pojavov v globalnem koordinatnem sistemu je pomembna z več vidikov. Na ta način lahko prikažemo potek jam na izbrani kartografski podlagi in določimo njihovo umestitev glede na površje. Rezultate lahko uporabimo za izhodišče planiranja posegov v prostor, da v čim manjši meri vplivamo na vzpostavljeno naravno ravnovesje med površjem in podzemljem. Koordinatno osnovo lahko vzpostavimo na različne načine in z različno kakovostjo. V prispevku opisujemo geodetska dela pri vzpostavitvi globalne koordinatne osnove za izmero dela kraške Županove jame, ki se nahaja v bližini Turjaka. Z metodami izmere GNSS smo na površju vzpostavili izhodiščno mrežo točk. Te so služile za nadaljnjo terestrično določitev koordinat ostalih točk na površju in v jami, od Ledenice do Velike dvorane. Točke nam bodo v prihodnje služile za nadaljevanje izmere v ostale dvorane in za položajno umestitev kraških pojavov v posameznih dvorinah v globalnem koordinatnem sistemu.

Ključne besede: globalni koordinatni sistem, GNSS in terestrična izmera, kraška jama

Keywords: global coordinate system, GNSS and terrestrial measurements, Karst cave

Uvod

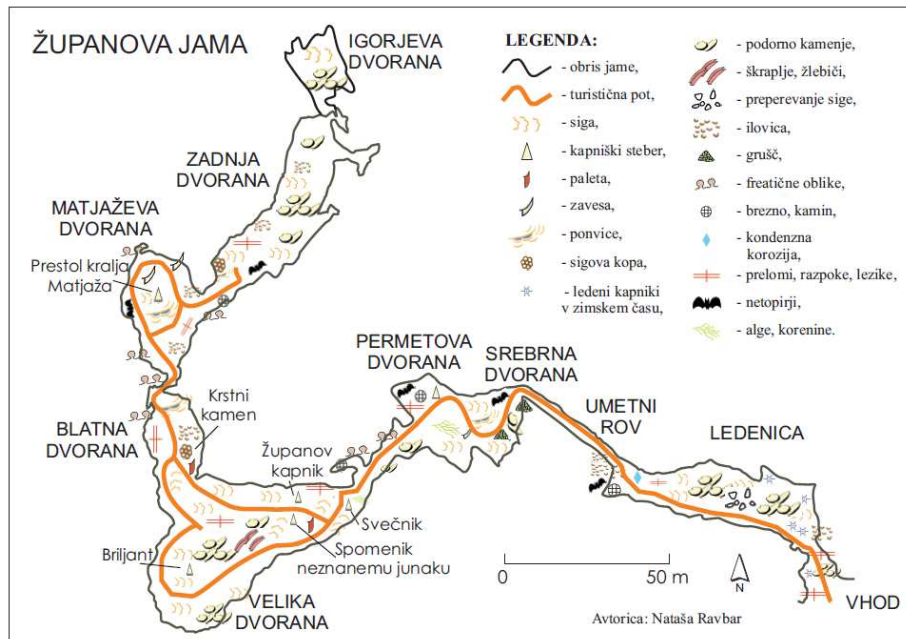
Kraško jamo v bližini Turjaka je leta 1926 odkril takratni župan občine Št. Jurij, Josip Perme. Tako so jamo poimenovali Županova jama, čeprav jo poznamo tudi pod imenom Taborska jama. Jamo je naredil tok potoka Podlomščice, ki se danes ne nahaja več na ožjem območju jame. V kataster jam so jo vpisali leta 1990 in od tod lahko razberemo, da je dolga okoli 700 m in gre v globino 70 m pod zemeljskim površjem (eKataster jam, 2018).

Najprej so v jamo vstopali preko brezna, ki je takoj vodilo v današnjo Permetovo dvorano. Tam se še danes 13 m navzgor vidi vhod v jamo. Danes v jamo vstopamo 100 m stran, kjer je vhod v jamo Ledenica. To so z umetnim rovom povezali s Srebrno in naprej Veliko dvorano (slika 1). Zanimivo je, da je Ledenico v *Slavi Vojvodine Kranjske* omenil že Janez Vajkard Valvazor.

Geodetske meritve Županove jame smo izvedli od Ledenice do Velike dvorane, čeprav se jama nadaljuje preko Blatne, Matjaževe in Zadnje dvorane do v letu 2008 odkrite Igorjeve dvorane. Cilj izmere je bil umestiti jamo v globalno koordinatno osnovo in vzpostaviti izhodišče za nadaljnje geodetske meritve v jami. To pomeni, da smo v globalnem koordinatnem sistemu določili koordinate točk v jami. Pri tem smo izven jame najprej vzpostavili mrežo točk, kjer smo izvedli meritve GNSS (angl. *Global Navigation Satellite System*) za določitev položajev točk v slovenski realizaciji koordinatnega sistema ETRS89, v koordinatnem sistemu D96/TM. Točke so služile za izhodišče terestričnih meritev poligona, ki je s površja potekal v Ledenico vse do Velike dvorane. Tako vzpostavljena koordinatna osnova nam bo v prihodnje služila za izmero ostalih delov jame in kraških pojavov v njej. Na osnovi vzpostavljene mreže točk bo mogoče določiti globino

* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova c. 2, Ljubljana

preostalih delov jame ter proučevati druge geofizikalne značilnosti območja, na primer anomalije težnosti, kot to opisujejo Breitenberg et al. (2016) ter Breitenberg et al. (2017).



Slika 1 – Dvorane v Županovi jami (Turistično in okoljsko društvo Grosuplje, 2018).

Podroben opis dokumentiranja jam v Sloveniji ter izvedbe meritev opisujejo Urankar et al. (2001) v slovenskem jamarskem priročniku. Opisanih je več možnih postopkov določitve koordinat, tudi z uporabo tehnologije GPS (angl. *Global Positioning System*). Podoben postopek določitve koordinatne osnove, kot smo ga uporabili v dani nalogi, je opisan pri izmeri ledene jame Dobšinská na Slovaškem (Gašinec et al., 2014) ter Grapčeve jame na hrvaškem otoku Hvaru. Tu so avtorji (Redovniković et al., 2016) naredili tudi primerjavo kakovosti različnih merskih tehnik.

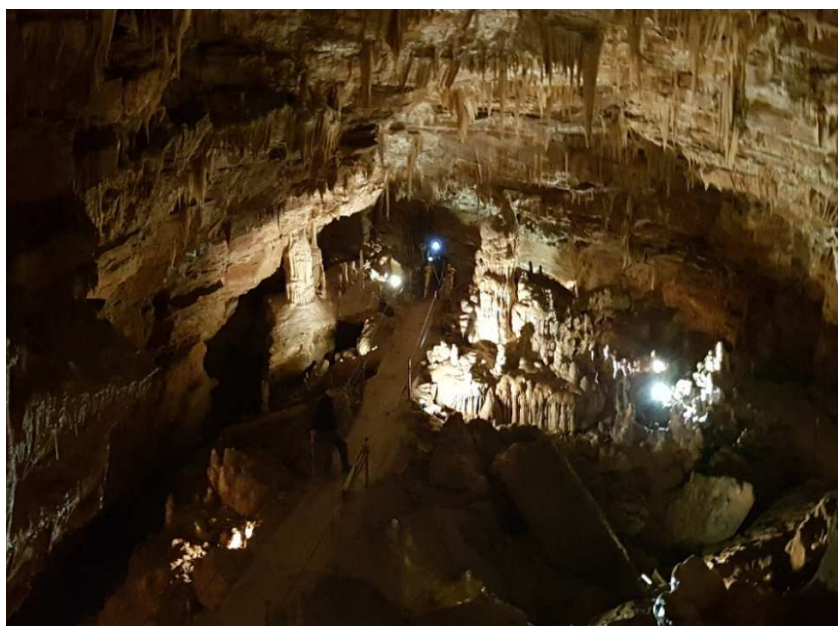
Terenska izmera



Slika 2 – Instrument GNSS (levo) in klasična terestrična izmera s tahimetrom (desno).

Za vzpostavitev delovišča v globalni koordinatni osnovi smo na štirih točkah izvedli statično izmero GNSS (slika 2 desno). Točke so bile od vhoda jame precej oddaljene, saj se ožje območje jame nahaja na zaraščenem terenu, ki ni primerno za kakovostno izvedbo izmere GNSS. Opazovanja na posameznih točkah so trajala 120 minut ali več.

Klasično terestrično izmero (slika 2 levo) smo naredili v obliki poligona, ki je najprej potekal po površini in se preko vhoda v Ledenico nadaljeval v notranjost jame (slika 3). Točke, določene z GNSS, so bile vključene v geodetsko mrežo in so služile za to, da smo tudi ostale točke določili v koordinatnem sistemu ETRS89 (oziroma D96/TM). Točkam, kjer smo naredili izmero GNSS, smo določili nadmorske višine z GNSS-višinomerstvom ob uporabi modela geoida AMG2000 in testnega izračuna modela geoida Slovenije iz leta 2010. Višinske razlike med ostalimi točkami v mreži smo določili s trigonometričnim višinomerstvom. To pomeni, da smo z meritvami mrežo točk umestili tako v horizontalno kot v višinsko osnovo.



Slika 3 –Terestrične meritve v Veliki dvorani.

Obdelava opazovanj statične izmere GNSS

Opazovanja GNSS smo obdelali z navezavo na državno omrežje postaj GNSS, SIGNAL, in sicer z navezavo na:

- najbližji stalni postaji omrežja (Trebnje, Ljubljana) in
- na virtualno referenčno točko VRS, vzpostavljeno v bližini geodetske mreže.

Vsako izmero smo obdelali na več načinov in sicer, ko:

- so se vsi vektorji navezovali na isto referenčno točko omrežja SIGNAL (t.i. radialna izmera),
- ko smo opazovanja celotne serije razdelili v dve oziroma tri serije enakega trajanja in v vsaki obdelali poligon z linearno neodvisnimi vektorji in
- ko smo v obdelavi uporabili različne modele troposferske refrakcije.

V obdelavo smo vključili precizne efemeride ter kalibracijske protokole anten službe NGS (angl. *National Geodetic Survey*). Z različnimi načini upoštevanja vpliva troposfere

na opazovanja smo po ugotavljanju kakovosti zapiranja figur v mreži GNSS ter na osnovi primerjava višinskih razlik, ki smo jih določili s terestrično izmero, določili končne rezultate (preglednica 1).

Preglednica 1 – Koordinate točk v ETRS89 ter D96/TM, ki smo jih določili z izmero GNSS.

Točka	φ	λ	h [m]	e [m]	n [m]
B	45° 54' 48,28798" N	14° 38' 16,05119" E	514,154	471.901,256	86.016,927
C	45° 54' 49,80948" N	14° 38' 19,50319" E	487,779	471.975,855	86.063,561
H	45° 54' 34,48029" N	14° 38' 19,67943" E	529,440	471.977,511	85.590,304
I	45° 54' 32,97113" N	14° 38' 17,98669" E	530,354	471.940,820	85.543,879

Razlike v geoidnih višinah, izračunanih iz modelov AMG2000 in testnega izračuna novejšega modela geoida, so na obravnavanem območju reda velikosti sedem centimetrov (preglednica 2).

Preglednica 2 – Geoidne višine iz modelov AMG2000 in testnega izračuna modela geoida.

Točka	N [m] AMG2000	N [m] Testni model	H [m] Testni model
B	46,412	46,483	467,671
C	46,411	46,482	441,297
H	46,419	46,488	482,952
I	46,419	46,489	483,865

Obdelava terestričnih meritev

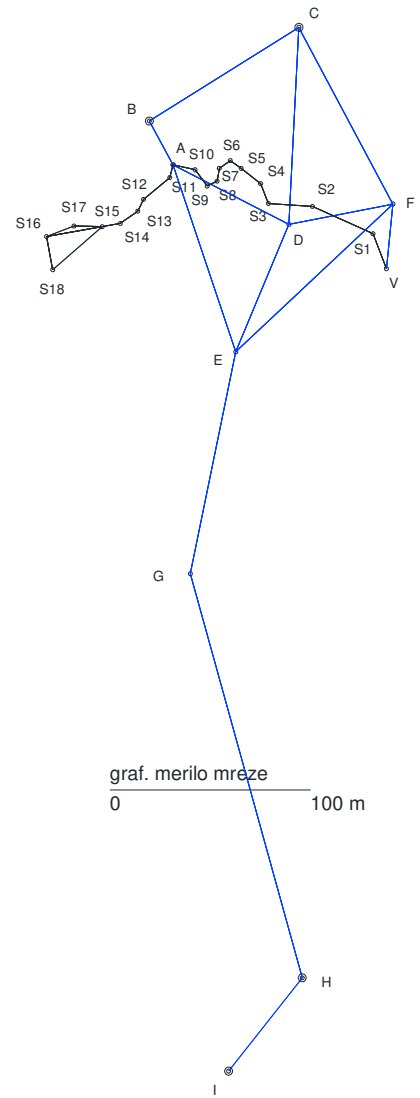
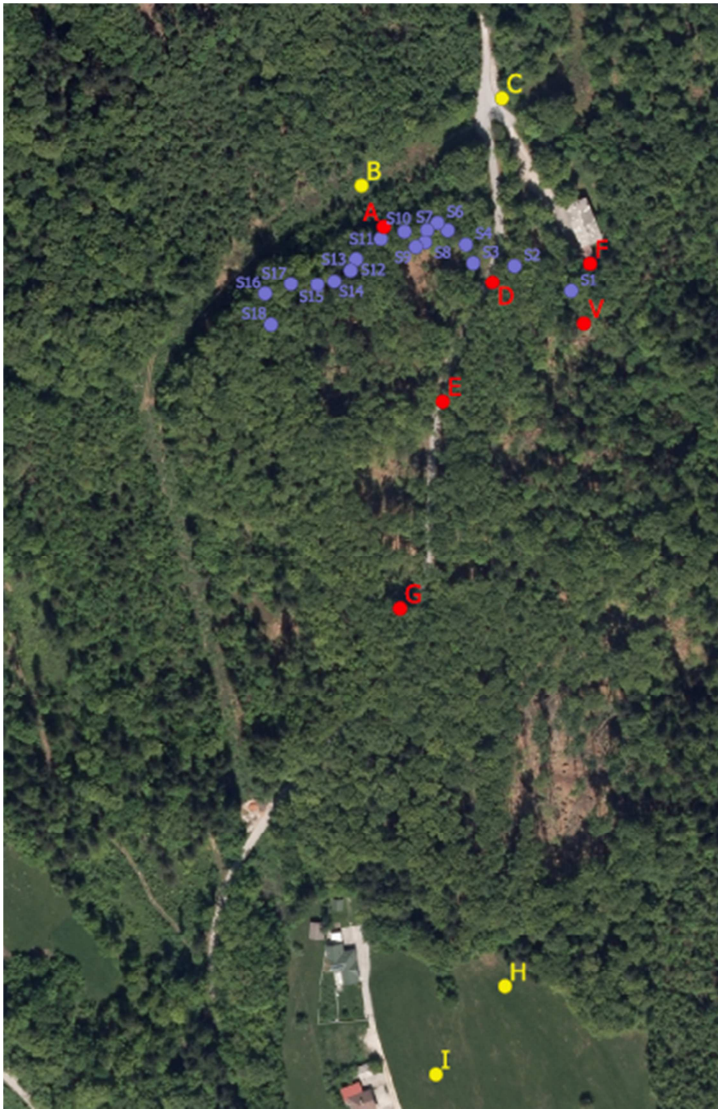
Mrežo štirih točk GNSS na površini (B, C H in I) smo z gostili z dodatnimi točkami, da smo lahko povezali točki B in C ter I in H ter mrežo pripeljali neposredno pred vhod v jamo. V tako razširjeni mreži smo izvedli klasične terestrične meritve, in sicer meritve kotov in poševnih dolžin med točkami mreže. Celotna geodetska mreža je bila tako v osnovi sestavljena iz dveh delov, in sicer iz (slika 4):

geodetske mreže na površini (točke A – I) in

- poligona od vhoda, preko dvorane Ledenica do Velike dvorane (točke S1 – S18).

Na sliki 4 so rumeno obarvane točke določene z GNSS (B, C, I, H), rdeče s terestričnimi meritvami (A, D, E, F, V) in modro točke v notranjosti jame (oznaka S in zaporedna številka). Točki S1, S2 (pred vhomom v jamo) ter točke v Veliki dvorani (S15 – S18) so tudi trajno stabilizirane.

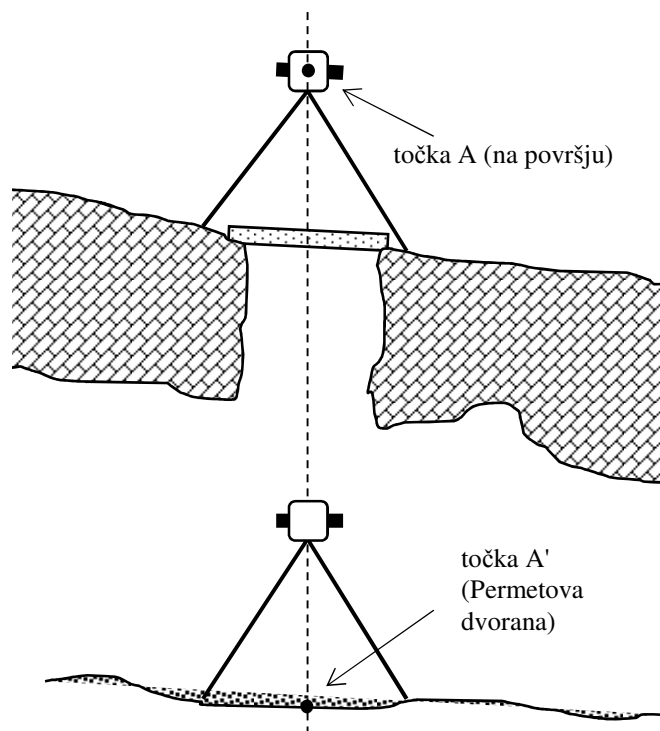
Geodetska mreža, skupaj z mrežo na površini in poligonom v notranjosti, je predstavljala velik geodetski strokovni izziv. S slike 4 je vidno, da mreža ni optimalne geometrijske oblike, da bi omogočala kakovostno določitev položajev točk. Prav tako ni bilo mogoče vnaprej oceniti kakovost določitev koordinat točk v jami.



Slika 4 – Razporeditev točk na območju (levo) ter oblika geodetske mreže (desno).

Poševno merjene dolžine smo popravili za meteorološke vplive in jih pred izravnavo reducirali v horizontalne dolžine na ničelnem nivoju. Naprej smo jih skupaj z merjenimi koti vključili v izravnavo po metodi najmanjših kvadratov. Izravnavo smo naredili ločeno za horizontalno in višinsko mrežo.

Geodetska mreža za umestitev Županove jame v globalno koordinatno osnovo je imela poleg zahtevne oblike še dodatno posebnost. Točko A na površini smo postavili nad vertikalnim jaškom nad Permetovo dvorano, skozi katero je potekal geodetski poligon z začetkom na površju pred vhomom v jamo. Zaradi oblike in vertikalne usmerjenosti jaška smo lahko izvedli vertikalno grezenje točke A s pomočjo laserskega grezila (slika 5). Na ta način smo naredili navezavo (vpetje) sredine slepega poligona na zunanji del geodetske mreže. Vpetje geodetskega poligona, ki je potekalo od vhoda do Velike dvorane, je posledično izboljšalo natančnost položajev točk poligona v horizontalni ravnini.



Slika 5 – Vertikalno grezenje točke A.

V izračunu smo mrežo razdelili na zunanjo mrežo in mrežo v jami. Vsako smo najprej izravnali kot prosto mrežo, brez danih točk. Z rezultati izravnave proste mreže smo dejansko samo ocenili kakovost meritev v mreži. Nam pa zaradi lastnosti izravnave proste mreže ti rezultati niso podali koordinat, vezanih na določitev koordinatnega sistema, kot bi ga želeli, da ga določajo dane točke. Zato je bilo celotno mrežo potrebno vpeti na "dane" točke, ki so bile za zunanjo mrežo predhodno določitev z izmero GNSS.

Izravnava vpete mreže splošno ne dopušča spreminjanja koordinat danih točk. Vemo pa, da se tahimetrične meritve kotov in dolžin navadno ne ujemajo z geometrijo mreže točk GNSS, predvsem zaradi slabše natančnosti določitve položajev točk z metodami izmere GNSS. Zato smo iskali odgovor na vprašanje, kako rešiti problem tako, da bi dopustili možnost, da se z izračunom na podlagi bolj kakovostnih tahimetričnih meritev na nek način izravnajo tudi "dane" količine. To smo naredili s pomočjo S-transformacije (Marjetič in Stopar, 2007), ki nam omogoča, da izravnamo tudi "dane" koordinate pod pogojem minimalne vsote kvadratov popravkov le-teh.

Rezultati S-transformacije zunanje mreže za točke A, F in V so predstavljale koordinatno osnovo za računanje poligona. Postopek izračuna zunanje mreže smo ponovili za izračun koordinat točk v jami. Rezultati izravnave se nahajajo v preglednicah 3 in 4. Točke B, C, H in I so določene z GNSS, A, F, in V so točke poligona na površju, ostale točke se nahajajo v jami.

Preglednica 3 – Rezultati izravnave in S-transformacije za zunanjo mrežo s parametri standardnih elips pogreškov.

Točka	Opis	Prosta mreža					S-transformacija				
		<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>a</i> [m]	<i>b</i> [m]	ϑ [°]	<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>a</i> [m]	<i>b</i> [m]	ϑ [°]
B	GNSS	471.901,2676	86.016,9289	0,0004	0,0002	1	471.901,2584	86.016,9316	0,0003	0,0002	140
C	GNSS	471.975,8611	86.063,5519	0,0004	0,0003	124	471.975,8518	86.063,5562	0,0002	0,0002	147
H	GNSS	471.977,5175	85.590,3091	0,0006	0,0003	8	471.977,5156	85.590,3097	0,0004	0,0002	33
I	GNSS	471.940,8161	85.543,8741	0,0009	0,0004	16	471.940,8146	85.543,8737	0,0004	0,0002	39
A	navezava v jamo	471.913,1102	85.995,1077	0,0004	0,0002	169	471.913,1014	85.995,1105	0,0004	0,0002	137
D		471.970,8662	85.965,4125	0,0003	0,0002	13	471.970,8584	85.965,4159	0,0004	0,0003	147
E		471.944,4010	85.901,9754	0,0003	0,0003	88	471.944,3939	85.901,9779	0,0006	0,0004	171
F	navezava v jamo	472022,7280	85.975,5816	0,0004	0,0002	10	472.022,7204	85.975,5859	0,0005	0,0003	32
G		471.921,7353	85.791,5420	0,0005	0,0004	89	471.921,7298	85.791,5433	0,0007	0,0005	172
V	navezava v jamo	472.019,4800	85.943,3511	0,0006	0,0003	16	472.019,4729	85.943,3551	0,0008	0,0004	26

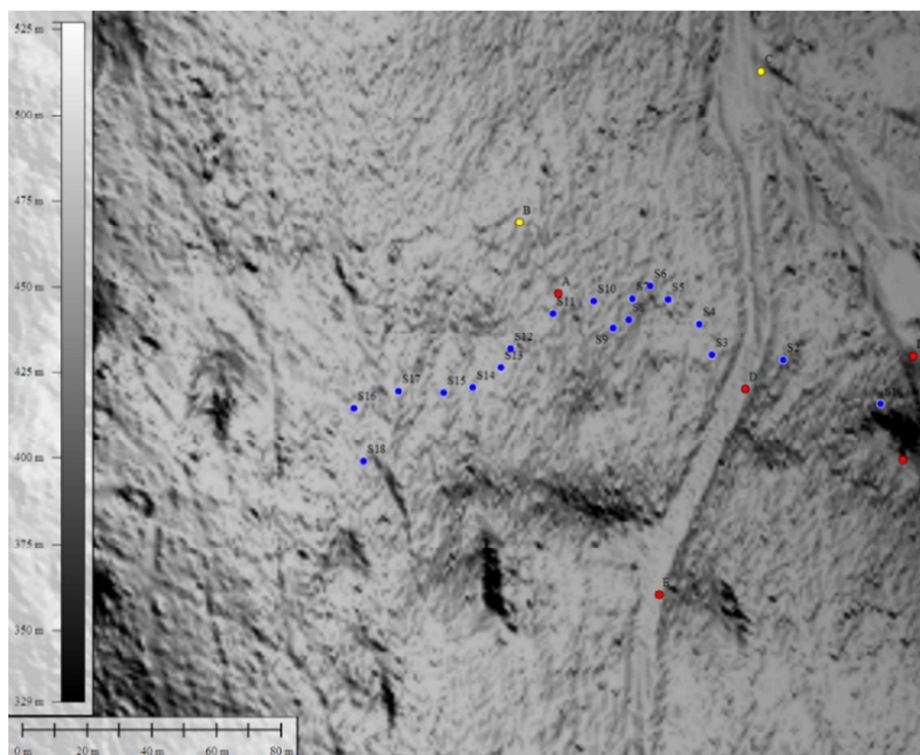
Preglednica 4 – Rezultati izravnave in S-transformacije za poligon v jami s parametri standardnih elips pogreškov. Odebeljeno so označene trajno stabilizirane točke.

Točka	Opis	Prosta mreža					S-transformacija				
		<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>a</i> [m]	<i>b</i> [m]	ϑ [°]	<i>e</i> [m]	<i>n</i> [m]	<i>a</i> [m]	<i>b</i> [m]	ϑ [°]
A	zunaj	471.913,1172	85.995,1295	0,0010	0,0008	85.	471.913,1015	85.995,1113	0,0002	0,0001	30
F	zunaj	472.022,7311	85.975,5807	0,0016	0,0011	104	472.022,7176	85.975,5854	0,0006	0,0003	10
V	zunaj	472.019,4823	85.943,3503	0,0018	0,0009	90	472.019,4755	85.943,3549	0,0005	0,0003	25
S1	v jami	472.012,7389	85.960,7996	0,0016	0,0007	93	472.012,7287	85.960,8025	0,0009	0,0003	164
S2	v jami	471.982,6223	85.974,3740	0,0013	0,0006	98	471.982,6098	85.974,3704	0,0011	0,0008	138
S3	v jami	471.960,6351	85.975,8817	0,0012	0,0008	109	471.960,6226	85.975,8736	0,0012	0,0010	43
S4	v jami	471.956,7421	85.985,7090	0,0011	0,0008	97	471.956,7276	85.985,6999	0,0013	0,0010	39
S5	v jami	471.947,0695	85.993,2731	0,0011	0,0008	76	471.947,0536	85.993,2619	0,0013	0,0011	26
S6	v jami	471.941,6368	85.997,2265	0,0011	0,0008	62	471.941,6202	85.997,2141	0,0012	0,0011	173
S7	v jami	471.936,1473	85.993,3516	0,0010	0,0008	45	471.936,1316	85.993,3381	0,0011	0,0010	33
S8	v jami	471.935,0271	85.986,9623	0,0009	0,0008	33	471.935,0127	85.986,9487	0,0011	0,0008	16
S9	v jami	471.930,1139	85.984,5010	0,0009	0,0008	19	471.930,1001	85.984,4864	0,0010	0,0006	32
S10	v jami	471.924,0951	85.992,6203	0,0009	0,0009	112	471.924,0798	85.992,6044	0,0008	0,0003	15
S11	v jami	471.911,4938	85.988,7644	0,0009	0,0008	85	471.911,4795	85.988,7459	0,0009	0,0002	13
S12	v jami	471.898,3500	85.977,9058	0,0010	0,0007	70	471.898,3381	85.977,8848	0,0012	0,0007	30
S13	v jami	471.895,4932	85.972,0085	0,0011	0,0006	66	471.895,4826	85.971,9870	0,0016	0,0008	28
S14	v jami	471.886,7810	85.965,9243	0,0013	0,0005	69	471.886,7718	85.965,9011	0,0018	0,0011	35
S15	v jami	471.877,7702	85.964,2934	0,0014	0,0005	74	471.877,7615	85.964,2684	0,0020	0,0014	43
S16	v jami	471.850,0056	85.959,4153	0,0015	0,0008	82	471.849,9983	85.959,3846	0,0024	0,0021	22
S17	v jami	471.863,7311	85.964,6269	0,0015	0,0006	78	471.863,7225	85.964,5990	0,0022	0,0017	39
S18	v jami	471.853,1036	85.942,8722	0,0016	0,0009	87	471.853,0997	85.942,8425	0,0024	0,0024	24

Mrežo smo izravnali tudi višinsko in pri tem obravnavali vse točke, na površju in v jami, hkrati. Tukaj poligona v notranjosti nismo uspeli navezati na dano točko, kot smo to naredili v primeru horizontalne situacije. Natančnost določitve višin točk so bile do 5 mm. Pri taki obliki mreže in dokaj strmih vizurah v jami lahko rečemo, da so rezultati dobri. V preglednici 5 predstavljamo rezultate izravnave višinske situacije, kjer je točka A določena na površju (stari vhod v Permetovo dvorano) in Ax z grezenjem določena točka v Permetovi dvorani.

Preglednica 5 – Rezultati izravnave in S-transformacije za višinsko mrežo. Odebeljeno so označene trajno stabilizirane točke.

Točka	H [m]	σ_H [m]	Točka	H [m]	σ_H [m]
A	467,0856	0,0012	S7	452,1543	0,0037
Ax	453,9746	0,0041	S8	453,4513	0,0038
D	453,7348	0,0015	S9	454,2249	0,0038
E	460,8078	0,0018	S10	455,4095	0,0039
F	440,8055	0,0018	S11	455,4513	0,0041
G	472,7770	0,0026	S12	444,2567	0,0043
V	434,7532	0,0024	S13	441,7929	0,0043
S1	425,6783	0,0026	S14	449,1999	0,0044
S2	423,8274	0,0031	S15	452,0113	0,0045
S3	432,2182	0,0033	S16	454,7929	0,0046
S4	435,1229	0,0035	S17	450,6147	0,0046
S5	441,7136	0,0036	S18	447,4938	0,0047
S6	446,7435	0,0037			



Slika 6 – Izris točk na lidarskem DMV (rdeče GNSS-točke, zeleno, točke izven jame (ARSO, 2018)).

Potek izmere zunaj in v notranjosti jame prikazujemo na lidarskem DMV (slika 6). Od tu naprej Županova jama poteka proti severu (slika 1). Za bolj natančno umestitev nadaljevanja jame v globalnem koordinatnem sistemu bo izmero potrebno nadaljevati s podobnim postopkom, kot smo ga uporabili do sedaj, in uporabo koordinat trajno stabiliziranih točk v jami.

Zaključek

Glavni namen prispevka je bil pokazati geodetski način vzpostavitve mreže v globalnem koordinatnem sistemu za izmero v jami. Koordinatna osnova Županove jame je trenutno kakovostno določena le do Velike dvorane, zato imamo v prihodnje namen z izmero nadaljevati. Točke, ki smo jih določili v jami, lahko služijo kot izhodišče 3D-modeliranja kraških pojavov v jami in pri njihovi umestitvi v globalni koordinatni sistem. Njihov horizontalni položaj bo služil za osnovo pri drugih geodetskih meritvah na površju za proučevanje geofizikalnih značilnosti danega območja.

Zahvale

Izmera je nastala tekom magistrske naloge *Aljaža Peklaja, dipl. inž. (UN)*. Pri izmeri je sodeloval tudi *Andrej Peklaj, univ. dipl. inž. geod.* Obema se zahvaljujema za pomoč pri izvedbi meritev.

Zahvala gre tudi *ga. Lučki Jere* in upravljavcu jame, *g. Damjanu Viršku*, ter *Turističnemu in okoljskemu društvu Grosuplje*, ki so nam omogočili izmero v jami.

Prispevek je nastal v okviru raziskovalnega programa *Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije (P2-0227)* Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije – ARRS.

Literatura

- Agencija RS za okolje (ARSO) (2018). LIDAR. http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso/ (18. 12. 2018).
- Breitenberg, C., Pivetta, T., Rossi, G., Ventura, P., Batic, A. (2018). Karst caves and hydrology between geodesy and archeology: Field trip notes. *Geodesy and geodynamics* 9, 262–269. DOI: 10.1016/j.geog.2017.06.004
- Breitenberg, C, Sampietro, D., Pivetta, T., Zuliani, D., Barbagallo, A., Fabris, P., Rossi, L., Fabbri, J., Mansi, A. H. (2016). Gravity for detecting caves: airborne and terrestrial simulations based on a comprehensive karstic cave benchmark. *Pure Applied Geophysics* 173, 1–22. DOI: 10.1007/s00024-015-1182-y
- Gašinec, J., Gašincová, S., Zelizňaková, V., Palková, J., Kuzevičová, Ž. (2014). Analysis of geodetic network established inside the Dobšinská ice cave space. *Geoscience Engineering* 1, 45–54. <http://gse.vsb.cz/2014/LX-2014-1-45-54.pdf/> (17. 12. 2018).
- eKataster jam. <https://www.katasterjam.si/> (17. 12. 2018).
- Marjetič, A., Stopar, B. (2007). Geodetski datum in S-transformacija. *Geodetski vestnik* 51 (3), 549–564.
- Redovniković, L., Stančić, B., Cetl, V. (2016). Comparison of different methods of underground survey. *International Symposium on Engineering Geodesy, "GNSS and Indoor Navigation"*, Varaždin, 465–473. http://www.geof.unizg.hr/pluginfile.php/7437/mod_book/chapter/173/TS5_4.pdf/ (18.12. 2018).
- Urankar, R., Šušteršič, F., Simić, M., Praprotnik, A. (2001). Ne hodi v jame brez glave. Društvo za raziskovanje jam Ljubljana, 131 p. http://www.dzrl.si/wp-content/uploads/2015/07/2001_Urankar_et_al_Ne_hodi_v_jame_brez_glave.pdf

(18.12. 2018).

Turistično in okoljsko društvo Grosuplje (2018).

<http://www.zupanovajama.si/wp/zupanova-jama/interaktivni-sprehod/> (18. 12. 2018).