

Analiza geometrijskih lastnosti nedokončanega železniškega predora v Godoviču

Tilen Urbančič*, Božo Koler**, Anže Kovačič***

Povzetek

Na območjih, kjer so potekali različni zgodovinski dogodki, pogosto najdemo številne zanimive objekte. Na področju železniške infrastrukture med zanimivejše objekte uvrščamo tudi nedokončani železniški predor v okolici Godoviča. Graditi so ga začeli med prvo svetovno vojno za potrebe oskrbe fronte. Omenjeni predor je eden izmed podzemnih objektov enotirne železniške proge, ki naj bi povezovala Logatec in Črni Vrh. Gradnja predora se je predčasno ustavila zaradi hitrega premika frontne linije proti zahodu. Danes je predor zapuščen in predstavlja odlično možnost za turistične dejavnosti. Predor smo skenirali s terestričnim laserskim skenerjem in iz dobljenih prostorskih podatkov določili številne geometrijske lastnosti predora. Rezultate smo primerjali z že znanimi geometrijskimi količinami, ki so jih določili jamarji, in s projektiranimi vrednostmi.

Ključne besede: železnica, predor, geometrija, terestrično lasersko skeniranje

Key words: railway, tunnel, geometry, terrestrial laser scanning

Uvod

Številne grajene in naravne objekte kulturne in tehnične dediščine najdemo širom Slovenije. Skrb za ohranjanje in obnove tovrstnih objektov v veliki meri ostaja financirana s strani države. Glede na število objektov kulturne dediščine je skoraj nemogoče, da bi prav vsi bili deležni primerne obravnave. V članku obravnavamo primer zapuščenega in nedokončanega železniškega predora v okolici Godoviča, ki predstavlja ostanek iz prve svetovne vojne. K zbiranju podatkov o samem objektu smo pripomogli na način, da smo s terestričnim laserskim skeniranjem predora zagotovili informacijsko zelo popoln niz prostorskih podatkov, ki predstavlja pomembno arhivsko vrednost ter omogoča podrobno analizo geometrije objekta.

Pedor pri Godoviču je predstavljal enega od podzemnih objektov enotirne železniške proge, s katero so v času prve svetovne vojne želeli izboljšati oskrbo fronte. Ta krak železniške proge je povezoval Logatec in Črni Vrh. Približno pol leta po začetku gradnje, se je oktobra 1917 frontna linija premaknila proti zahodu in železniška povezava za oskrbo fronte ni bila več potrebna. S popolno ustavitvijo del so številni objekti ostali nedokončani. Med njimi je tudi zapuščen predor v okolici Godoviča (Mihevc et al., 2013).

Konec prve svetovne vojne in razdelitev ozemlja sta botrovala, da železniška proga ni bila nikoli dokončana. Kasneje, po letu 1931, so severni del predora predelali in na tem območju zgradili bunker. Bil je del Alpskega zidu, ki je kot del sistema utrdb ščitil italijansko

* Geotočka d.o.o, Tehnološki park 24, 1000 Ljubljana in UL FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana

** UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

*** Apolonij 21 d.o.o., Medvedova ulica 25, 1241 Kamnik

mejo. Ker je bila lega bunkerja daleč stran od nove meje po koncu druge svetovne vojne, sta tako predor kot bunker ostala neuporabna in vse bolj zaraščena v gozdu (Mihevc et al., 2013).

Geometrija predora in bunkerja je bila v preteklosti že določena z jamarskim pristopom izmere (Mihevc et al., 2013). Kot del analiz diplomske naloge Kovačič (2021), ki jo povzemamo tudi v tem članku, je bila opravljena primerjava izmerjenih količin. Del primerjav je bil narejen tudi s projektiranimi merami, ki izhajajo iz projektne dokumentacije predora, ki jo hranijo v Mestni knjižnici Idrija.

Geometrijo predora smo določili iz oblaka točk terestričnega laserskega skeniranja (TLS). Uporaba TLS se je v zadnjih letih zelo povečala, saj so sodobni skenerji vse manjših dimenzij, omogočajo pa določitev podrobnih in zanesljivih rezultatov v kratkem času (Črček, 2021). K vse pogostejši uporabi TLS pri evidentiranju in drugih analizah v jamah botruje tudi tehnološki razvoj programske opreme, ki omogoča učinkovito obdelavo velike količine podatkov TLS.

Najbolj običajni rezultati obdelave oblakov točk TLS so prepoznane/modelirane ploskve in druge geometrijske oblike, ki so matematično opisljive. Druga možnost je tudi prikaz površin skeniranega objekta z mrežo nepravilnih trikotnikov. Oblaki točk ali izdelani modeli so lahko tudi osnova za izvedbo podrobnejših analiz. Pri grajenih objektih je npr. primer dobre prakse izračun in analiza ravnin iz katerih lahko izvedemo analizo geometričnih lastnosti prelivne stene hidroelektrarne (Kregar et al., 2017). Podoben primer je analiza geometrije objekta oz. vertikalnosti in ravnosti samostojnega zvonika ob cerkvi na Črnem Kalu (Gabršček, 2015) ali npr. zidov same cerkve v Kančevcih (Urbančič, Koler, 2021). Nekaj primerov uporabe tehnologije TLS na področju skeniranja podzemnih prostorov, kjer se je TLS s svojimi prednostmi izkazal kot zelo uporabna metoda, so kraške jame (Črček, 2021; Walters, Hajna, 2020; Blaznik, 2019; Mihevc, Urbančič, 2019; Oludare Idrees, Pradhan, 2016) in rudniki (Ahamad, Ojha, 2015). Kot glavni prednosti tehnologije TLS za uporabo pri skeniranju v predorih sta velika informacijska vrednost in nesporna geometrična korektnost 3D prostorskih podatkov (Wang et al., 2014; Kotsis et al., 2005).

Za nedokončani enotirni železniški predor v bližini Godoviča smo iz oblaka točk TLS določili njegovo geometrijo v 3D in lego v prostoru glede na površje. Poleg umestitve predora v prostor smo želeli z obdelavo podatkov določiti numerične vrednosti razsežnosti predora, kot npr. širine in višine na posameznih mestih predora ter naklon izkopanega predora. Iz podatkov smo izdelali dvodimenzionalne načrte in prikaze. Eden od ciljev raziskave je tudi primerjava in analiza dobljenih rezultatov s projektiranimi vrednostmi in z vrednostmi različnih dimenzij iz članka Mihevc et al. (2013).

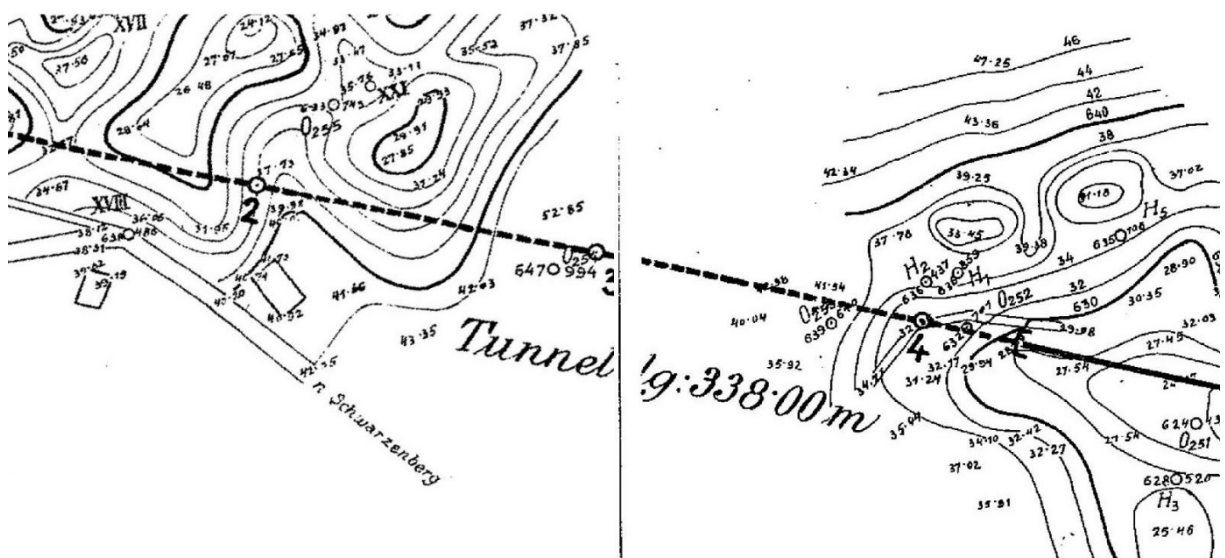
Opis delovišča

Obravnava predora se nahaja 2 km jugozahodno od naselja Godovič. Orientacija predora je skoraj popolnoma poravnana s koordinatno osjo v smeri sever-jug. Dostop do obeh vhodov je mogoč iz bližnje ceste. Južni vhod je za dostop popolnoma odprt, na severnem vhodu pa je vhod v bunker zaprt s prislonjenimi vrati (slika 1).



Slika 1: Prikaz lokacije predora glede na naselje Godovič: A – bunker in severni vhod, B – predor, C – južni vhod predora (Kovačič, 2021).

Iz projektne dokumentacije lahko dobimo podatke, da je projektirana dolžina predora 388 m, da je severni vhod na nadmorski višini 613 m in južni na višini 618 m. Vzdolžni padec je med obema vhodoma konstanten in znaša 13 ‰. Iz vertikalnega profila projektirane trase vidimo, da naj bi bila višina nadkritja med 10 m in 26 m (Kolmann, 1917).



Slika 2: Skica trase predora iz projekta Normalspurbahn Unter Loitsch Schwarzenberg (Kolmann, 1917).

Izkopavanje predora je potekalo iz obeh strani in sicer po stari avstrijski metodi. Izkopna dela in podpiranje so najprej izvedli v kaloti. Kaloto so z rovom na nivoju stopnice in talnega oboka povezali z vertikalnimi jaški, ki so služili odvozu materiala. V rovu za odvoz materiala lahko še vedno vidimo ostanke ozkotirne železnice za transport izkopanega materiala. Dela so potekala po odsekih oz. kampadah. Južni del predora je ostal v začetnih fazah gradnje. V srednjem delu predora lahko najdemo ostanke lesenih nosilcev in lesene nakladalne konstrukcije. Najbolj dokončan je bil krajši odsek severnega dela predora (slika 3). Predor je kljub nedokončanim delom ostal vse do danes ohranjen v skoraj enakem stanju kot ob prenehanju del, ker se nahaja na območju dobre geološke sestave tal.



Slika 3: Severni del predora, kjer je obok predora v celoti betoniran, s pogledom proti južnemu vhodu, kjer vidimo izkopano kaloto.

Severni portal je bil po letu 1931 s stani italijanske vojske predelan v bunker. Osrednji prostor bunkerja je v obliki kvadra, ki je s površjem povezav z vertikalnim jaškom s kupolo in dodatnim stopniščem. V predor je torej možno dostopati z obeh vhodov. Posledica enostavne dostopnosti je vidna v poškodovanosti posameznih delov bunkerja, kjer so izropani različni jekleni nosilci ipd.

Uporabljene metode

Geodetski datum izmere

Zaradi želje po povezljivosti prostorskih podatkov skeniranja predora z ostalimi prostorskimi podatki, smo predhodno na območju obeh vhodov vzpostavili geodetski mreži. Na južnem portalu geodetsko mrežo sestavlja 6 točk, na severni 5. Za določitev koordinat točk v državnem koordinatnem sistemu D96/TM in višinskem datumu SVS2010/Koper, smo na vseh točkah opravili hitro statično GNSS izmero. Koordinate GNSS izmere so bile uporabljene kot dane za izvedbo transformacije izravnanih koordinat geodetske mreže, ki je bila izmerjena klasično s tahimetrom. Izmera horizontalnih kotov, zenitnih razdalj in poševnih dolžin je bila opravljena v petih ponovitvah v obeh krožnih legah. Z izravnavo geodetke mreže smo zagotovili koordinate točk, ki v relativnem smislu zagotavljajo milimetrsko natančnost.

Geodetski mreži sta predstavljali koordinatno osnovo za določitev koordinat oslonilnih točk terestričnega laserskega skeniranja, s katerimi smo georeferencirali registriran oblak točk predora in bunkerja.

Terestrično lasersko skeniranje in predobdelava oblakov točk

Osnovni vir za izvedbo raziskovalnega dela je predstavljal oblak točk TLS. Glede na dobre lastne izkušnje in izkušnje drugih avtorjev smo se odločili za uporabo slikovnega terestričnega laserskega skenerja Leica BLK360 (slika 4), ki omogoča dovolj dobro prostorsko ločljivost in natančnost skeniranih točk. Tehnične lastnosti skenerja so zbrane v preglednici 1.



Slika 4: Slikovni terestrični laserski skener Leica BLK360 pri delu.

Preglednica 1: Tehnične lastnosti skenerja Leica BLK360.

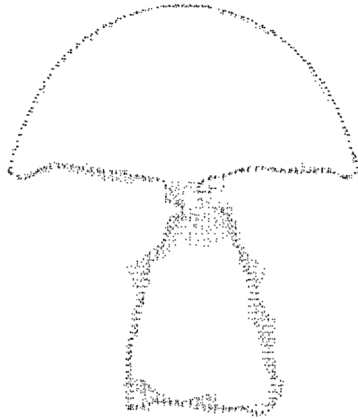
SKENIRANJE	
Varnost	Laser razred 1
Vidno polje	360°(horizontalno) × 300°(vertikalno)
Merilni doseg	0,6 m – 60 m
Hitrost	360000 točk/sekundo
Ločljivost	5 mm, 10 mm ali 20 mm na 10 m
Natančnost merjenja dolžine	4 mm na 10 m, 7 mm na 20 m
Natančnost 3D	6 mm na 10 m, 8 mm na 20 m
ZAJEM SLIKOVNEGA GRADIVA	
Fotografija	15,1 MP sistem 3 kamer, HDR, LED bliskavice Zajem kalibrirane sferične fotografije (150 MP) Vidno območje 360° × 300°
Termografija	Najsodobnejša tehnologija FLIR Zajem dolgovalovne IR (LWI) panoramske slike Vidno območje 360° × 70°

Za osnovno obdelavo oblakov točk smo uporabili program Leica Cyclone REGISTER 360. V tem primeru kot osnovno obdelavo obravnavamo koraka registracije in georeferenciranja. Pri registraciji oblakov točk zunaj predora smo zaradi posebnosti registracije z metodo ICP (angl. Iterative Closest Points), ki registracijo izvede z minimiziranjem 3D razdalje med dvema oblakoma točk, oblake z vegetacijo primerno obrezali. Na ta način smo v postopku registracije upoštevali le površine, kjer je odbojna površina dobra, posledično je boljša tudi natančnost skeniranih točk. Registracija za večino parov oblakov običajno poteka samodejno, za sete z manj preklopi pa moramo predhodno približno registracijo izvesti ročno.

Oslonilne točke smo na terenu označili s črno belimi tarčami, oblike znaka BMW. Za georeferenciranje registriranega oblaka točk uvozimo seznam oslonilnih točk, ki morajo imeti enako poimenovanje kot točke, ki smo jih določili v oblakih točk posameznih stojišč v programu. V kolikor algoritem sam ne zazna oslonilnih točk, jih lahko določimo tudi ročno. Predobdelavo oblakov točk smo v programu Leica Cyclone REGISTER 360 končali z izvozom georeferenciranih podatkov v formatu *.pts.

Določitev geometrijskih lastnosti iz oblaka točk

Osnovni rezultat obdelave oblakov točk so bili izrisani prečni profili. Nekaj rezultatov smo pridobili tudi z neposrednim merjenjem med različnimi točkami v oblaku točk. Obdelavo podatkov smo poskusili čim bolj avtomatizirati, zato smo za obdelavo uporabili različne programe. Najprej smo uporabili programe LAStools. Odločili smo se, da za izreze prečnih profilov, oblak točk glede na os predora najprej zarotiramo v smeri ene od koordinatnih osi (program *las2las* in uporaba funkcije *rotate_xy*). Iz rotiranega oblaka točk smo za izbrane položaje vzdolž osi predora izrezali rezine izbrane 1 m (program *las2las* in uporaba funkcije *keep_y*). Ker smo izrezane profile uporabili za izrise prečnih profilov v programu Civil 3D, smo izrezan oblak točk rotirali v 2D ravnino tako, da smo zamenjali koordinati y in z (program *las2las* in uporaba funkcije *switch_y_z*). Z izvozom podatkov v *.txt formatu smo imeli pripravljeno datoteko za uporabo v CAD programih. Primer rotiranega izreza enega od prečnih profilov prikazujemo na sliki 5.



Slika 5: Primer izreza prečnega profila iz oblaka točk.

Rezino oblaka točk smo uporabili za vektorizacijo oz. izris profila v programu Civil 3D. Uporabili smo funkcijo spline. Izrisane profile smo kotirali za zelene količine in jih uporabili kot glavni grafični rezultat. Glede na terenski ogled in stanje predora ter bunkerja smo se odločili, da izdelamo 19 prečnih profilov. Na zelo podoben način smo s spremembo nekaterih parametrov in ukazov v programih LAStools izdelali vzdolžni profil predora ter različne prereze obeh stopnic bunkerja ter tloris predora in bunkerja. Tako izdelane grafične prikaze smo uporabili za primerjavo dimenzij s projektiranimi vrednostmi in vrednostmi, ki so bile z jamomerskimi metodami izmere določene v Mihevc et al., (2013).

Terenska izmera

Vso terensko delo smo opravili 12. junija 2020. Najprej smo signalizirali oslonilne točke. Položaje petih oslonilnih točk smo določili z izmero iz geodetskih mrež na območjih obeh vhodov. Uporabili smo tahimeter Leica Flexline TS06, ki ima deklarirano natančnost merjenja kotov 2" in natančnost merjenja dolžin $2\text{ mm} + 2\text{ ppm}$. Koordinate smo določili neposredno na terenu na osnovi vnaprej znanih koordinat. Izmero smo nadaljevali s skeniranjem predora in bunkerja (slika 6).



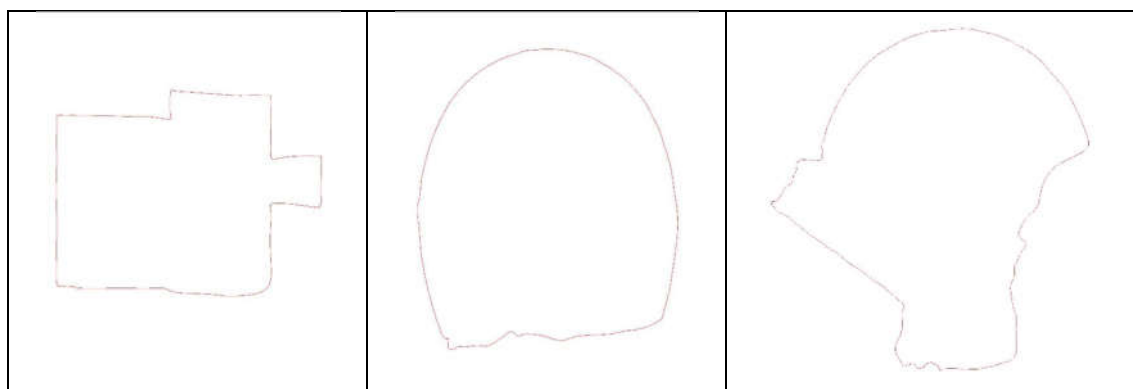
Slika 6: Jašek, ki se na vrhu zaključí s pokrito kupolo.

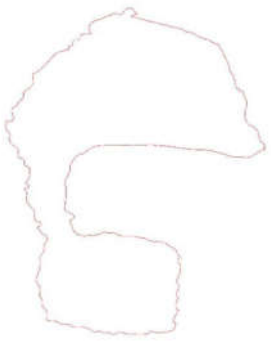

Pot skeniranja nas je vodila od južnega vhoda po rovu na spodnjem nivoju predora do bunkerja. Nadaljevali smo s skeniranjem bunkerja z obema stopniščema ter vertikalnega jaška s kupolo. Zadnji del skeniranja je vključeval vse predele na nivoju kalote v smeri proti južnemu izhodu. Registriran oblak točk sestavlja 81 oblakov točk. Povprečna razdalja med stojišči je v predelu predora znašala okoli 10 m.

Rezultati iz obdelav oblakov točk laserskega skeniranja

Po registraciji smo ugotovili, da znaša srednje prekrivanje med oblaki točk 41 % in da srednje odstopanje registracije znaša 7 mm. Kakovost georeferenciranja smo ocenili s srednjim odstopanjem na oslonilnih točkah in znaša 3,2 mm. Dobljena točnost in natančnost oblaka točk več kot zadostuje za analize, ki smo jih opravili.

Ker je izvorni oblak točk vključeval kar 230 milijonov točk, smo ga v programu RiSCAN PRO razredčili z Octree filtrom na 10 cm. Oblak točk, ki smo ga uporabili za analize, je vključeval 2,5 milijona točk. Sledila je obdelava oblakov točk, ki smo jo predstavili med uporabljenimi metodami. Rotacijo in izrezovanje profilov smo naredili s programi LAStools, izrise pa s programom Civil 3D. Nekaj karakterističnih prerezov prikazujemo na sliki 7.



Del hodnika v bunkerju.	Severni del predora, kjer je obok predora v celoti betoniran.	Zgornji del (kalota) je betoniran. Spodnji del izkopa dokončan na levi strani.
		
Prerez na območju vertikalnega jaška med nivojem kalote in stopnice.	Stopnišče do južni stopnic pri severnem vhodu.	

Slika 7: Predstavitev nekaterih karakterističnih prereзов.

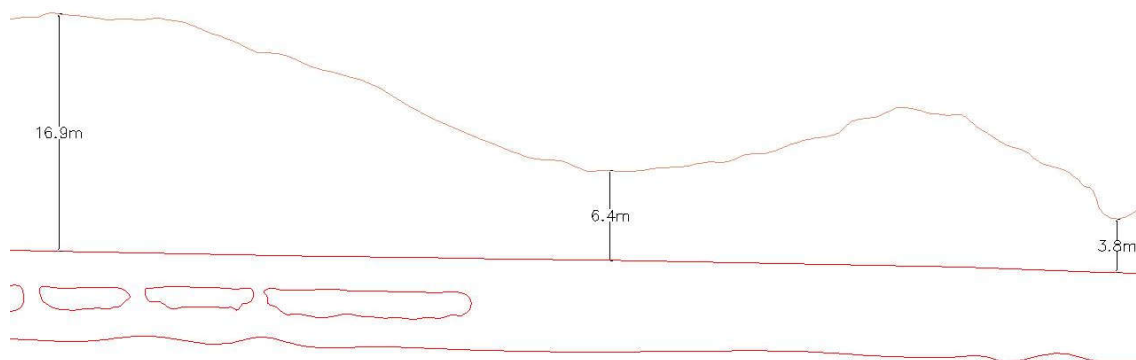
Popolnost in visoka informativna vrednost oblaka točk TLS predstavljata odlično izhodišče za popolno geometrijsko analizo predora in bunkerja. Teoretično lahko določimo katerokoli dimenzijo skeniranega objekta, ki je vključen v oblak točk.

Projektirana dolžina predora znaša 388 m. Ohranjen del predora brez bunkerja je dolg nekaj manj kot 356 m. Skupaj z bunkerjem dolžina predora znaša 391 m. Sklepamo lahko, da je bunker skoraj v celoti zgrajen na območju severnega portala predora in njegovi notranjosti.

V članku Mihevc et al. (2013) so določili približno višino južnega vhoda predora na nadmorski višini 618 m. Iz naše izmere sledi, da je vhod na višini 620,1 m. Nekoliko manjšo razliko smo ugotovili na severnem vhodu, kjer naj bi imel vhod višino 613 m, mi pa smo izmerili 614,5 m.

Iz projektne dokumentacije lahko razberemo, da naj bi bil naklon železnice 13 %. Na osnovi izračunov iz oblaka točk za območja na nivoju tal smo izračunali, da je naklon izkopanih tal pod naklonom 14 %.

Dimenzije prečnih profilov (višine in širine) se skladajo s številkami, ki so jih določili Mihevc et al. (2013), saj so odstopanja reda velikosti nekaj centimetrov. Rov za odvoz materiala ima povprečno višino in širino okoli 2 m. Za del predora, ki je dokončan znaša višina predora 6,5 m in širina 4,6 m. Največjo razliko med vsemi dimenzijami smo ugotovili pri navajanju višine nadkritja. Pri analizi smo dodatno uporabili oblak točk reliefa aerolaserskega skeniranja, ki je dostopen na portalu eVode na spletni strani Agencije RS za okolje. Mihevc et al. (2013) navajajo, da naj bi bila minimalna debelina nadkritja le 10 m. Ob uporabi modela reliefa in skeniranega predora smo ugotovili, da je nadkritja na enem delu veliko manj, in sicer le 3,8 m (slika 8). Največje nadkritje znaša 26,7 m in se povsem sklada s predhodnimi izmerami in podatki.



Slika 8: Izris vzdolžnega profila predora in terena nad predorom.

Zaključek

Iz oblaka točk pridobljenega s TLS smo analizirali geometrijo nedokončanega železniškega predora v okolici Godoviča, ki so ga začeli graditi v času prve svetovne vojne. Zaradi hitrih premikov fronte ni bilo potrebe, da bi ga dokončali. V času druge svetovne vojne so severni del predora predelali v bunker.

Izhajali smo iz georeferenciranega oblaka točk TLS. Umestili smo ga v državni koordinatni sistem. Na ta način lahko poleg relativnih količin analiziramo tudi njegovo lego v prostoru in npr. oddaljenosti od drugih objektov. Večino dimenzij predora in bunkerja smo določili z izmero iz 3D oblaka točk oz. izrisanih 2D prerezov. Vse količine smo uporabili za primerjavo s projektiranimi vrednostmi oz. z vrednostmi jamomerskih meritev (Mihevc et al., 2013). Pri izdelavi številnih prečnih, vzdolžnih in tlorisnih prerezov smo se osredotočili na posamezne karakteristične oblike v predoru, ki so povezane z različnimi fazami izkopnih in podpornih del. Del analiz smo opravili tudi na bunkerju ter stopniščih.

S primerjavo naših in predhodnih meritev smo ugotovili, da se podatki v veliki meri ujemajo. Očitno razliko smo opazili le pri nadmorskih višinah vhodov v predor: razlika je znašala na južnem vhodu 2,1 m in na severnem vhodu 1,5 m. Največjo razliko smo opazili pri določitvi minimalnega nadkritja, kjer se podatki razlikujejo za 6,2 m.

Dobljeni rezultati in opravljene analize so nas vodile do pridobitve iskanih informacij. Bolj pomembno kot same izvrednotene količine je sam oblak točk, ki predstavlja popoln arhivski prostorski podatek predora ter osnovo za morebitne nadaljnje prostorske razvojne aktivnosti na tem območju. Gre namreč za zanimiv in pomemben objekt slovenske tehnične dediščine, ki še čaka na obravnavo v smislu ohranjanja, saj je trenutno obsojen na propadanje.

Literatura in viri

- Ahamad, N., Ojha, S. K. (2015). The practical application of laser scanning in a mining environment. V: Conference: 2nd National Conference on Mining Equipment: New Technologies, Challenges and Applications (MENTCA 2015). Dhanbad: Indian School of Mines, pp. 9-10.
- Blaznik, A. (2019). Geodetski monitoring v kraški jami Ulica pečina. Magistrsko delo, UL FGG.
- Črček, J. (2021). Primerjava BLK360 in Riegl VZ-400 za skeniranje jam. Magistrsko delo, UL FGG.
- Gabršček, T. (2015). Analiza geometrije objekta kulturne dediščine iz podatkov terestričnega laserskega skeniranja. Diplomsko naloga, UL FGG.
- Kolmann, J. (1917). Normalspurbahn Unter Loitsch Schwarzenberg. Langenprofil Trassenführung uber Godovič won Km.+200 bis Bhf. Podjesenom.
- Kotsis, I., Spyros, K., Gikas, V. (2005). 3D Terrestrial Scanner for Tunnel Surveying: Hints and Tips and Comparison with Conventional Methods. V: International Symposium on Modern

- Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields. Sofia, Bulgaria. pp. 3-5.
- Kovačič, A. (2021). Določitev geometričnih lastnosti nedokončanega železniškega predora v Godoviču. Diplomaska naloga, UL FGG.
- Kregar, K., Štebe, G., Marjetič, A. (2017). Preverjanje stabilnosti ploskovnega objekta s terestričnim laserskim skeniranjem. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2018: zbornik del, Ljubljana, 26. januar 2017, 81-92.
- Mihevc, A., Lajovic, A., Ferk, M., Tičar, J. (2013). Unfinished railway tunnel and bunker at Godovič. V: Filippi, M. (ur.), Bosák, P. (ur.). Conference: 16th International Congress of Speleology. Brno: Czech Speleological Society: pp. 221–223.
- Mihevc, A., Urbančič, T. (2019). Spreminjanje premikov in oblikovanja poligonalnih tal v Skedneni jami s terestričnim laserskim skeniranjem. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2018: zbornik del, Ljubljana, 31. januar 2019, 121-130.
- Oludare Idrees, M., Pradhan, B. (2016). A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: a review of sensors, method and application development. *International Journal of peleology* 45, 1: 71–88.
- Urbančič, T., Koler, B. (2021). Geodetski monitoring cerkve sv. Benedikta v Kančevcih. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2020: zbornik del, Ljubljana, 30. januar 2021, 34-49.
- Walters, R., Zupan Hajna N. (2020). 3D laser scanning of the natural caves: example of Škocjanske jame. *Geodetski vestnik*, 64, 1: 89-103.