14
15–17 NOVEMBER, 2023
AUSTRIA TREND HOTEL
LJUBLJANA, SLOVENIA
International Tunneling and Underground Structures Conference
Mednarodna konferenca o predorih in podzemnih objektih
SLOVENIJA

PRIMER SANACIJE KRAŠKIH POJAVOV NA OBMOČJU JAME 2TDK-009 PREDORA T1-DIVAČA-SERVISNA CEV

EXAMPLE OF KARST PHENOMENA REMEDIATION IN THE AREA OF CAVE 2TDK-009 IN TUNNEL T1-DIVAČA-SERVICE TUBE

Mag. Gregor Vesel, univ. dipl. inž. geotehnol. | Mag. Boštjan Volk, univ. dipl. inž. grad. | Dr. Vojkan Jovičić, univ. dipl. inž. grad. | Saša Galuf, univ. dipl. inž. grad.

IRGO

ABSTRACT

Tunnel T1 (Lokev Tunnel) is part of the single-track railway connection Divača - Koper, on the construction section Divača - Črni Kal. The approximately 6.7 km long tunnel includes a main and a service tunnel tube, the majority of which runs through karstic, water-permeable carbonate rocks. The karstic feature of the ground is reflected in numerous karst phenomena, such as hollow or cave sediment filled caves and caverns which we had to pass through during the construction of the tunnel. Building the tunnel through underground caves required various measures, depending mainly on the size of the cave and its position in relation to the course of the tunnel.

The article presents an example of remediation measures in the service tube of tunnel T1 around the area of surface sinkhole and underground cave 2TDK-009. It is an area near the northern tunnel portal between chainages km 3+060 and km 3+105, where the influence of the surface sinkhole was extending deep below the bottom of the tunnel's invert and in such a way greatly influenced the stability of the ground. The area of the sinkhole then continues in depth through sediments and opens into the cave 2TDK-009, which is special mainly because of the low over-burden. In the article, we are describing various remedial measures that had to be carried out both during the excavation phase and for the purpose of ensuring the permanent stability of the tunnel, which is provided by a monolithic reinforced concrete structure of approx. 48 m in length.

POVZETEK

Predor T1 (Predor Lokev) je del enotirne železniške povezave Divača - Koper, na odseku Divača - Črni Kal. Predor dolžine približno 6,7 km obsega glavno in servisno predorsko cev, katerih pretežni del poteka v zakraselih vodoprepustnih karbonatnih kamninah. Zakraselost hribine se odraža v številnih kraških pojavih, kot so votle ali z jamskim sedimentom zapolnjene kraške jame in kaverne, katere smo morali premostiti tekom izgradnje predora. Premostitev predora skozi kraške jame je zahtevala različne ukrepe, odvisno predvsem od velikosti kraške jame in njene pozicije glede na potek predora.

V članku je predstavljen primer sanacijskih ukrepov v servisni cevi predora T1, na območju vrtače in jame 2TDK-009. Gre za območje blizu severnega portala med km 3+060 in km 3+105, kjer je vpliv vrtače na površini segal globoko pod dno talnega oboka predora in na ta način močno oslabil stabilnost hribine. Območje vrtače se nato v globino nadaljuje skozi jamski sediment in se odpre v jamo 2TDK-009, ki je posebna predvsem zaradi nizkega nadkritja. V članku opisujemo različne sanacijske ukrepe, ki jih je bilo potrebno izvesti tako v fazi izkopnih del, kot za potrebe zagotavljanja trajne stabilnosti predora, ki jo zagotavlja monolitna armiranobetonska premostitvena konstrukcija dolžine ca 48 m.

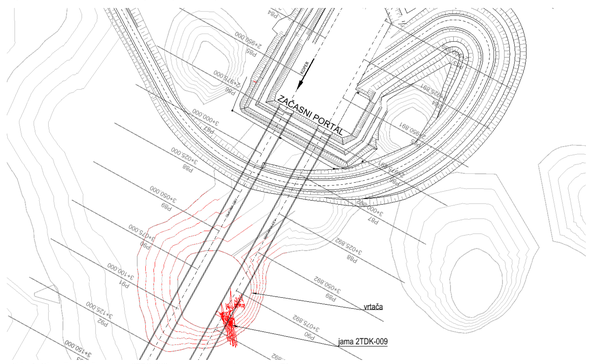
1. KRAŠKI POJAVI V PREDORU T1

Gradnja predora T1 poteka iz obeh smeri, to je iz smeri Divače proti Kopru in obratno. Do sedaj (september 2023) je na divaški strani izkopanih približno 3.000 m, na koprski strani pa približno 1.300 m predora. Na divaški strani je bilo do sedaj odkritih in s strani krasoslovnega nadzora dokumentiranih že 23 kraških jam, na koprski strani pa 5 kraških jam. Omenimo lahko, da na koprski strani prvih ca 800 m predora hribino gradi fliš, v katerem ni bilo predvidenih in tudi ne zaznanih kraških jam.

Velikost odkritih kraških jam v apnencu varira od nekaj 10 m^3 pa do več 100 m^3. To so torej jame, ki niso zapolnjene in je bilo moč v njih vstopiti, jih izmeriti, pregledati in dokumentirati. Poleg nezapolnjenih jam smo tekom gradnje predora srečali tudi več kavern in jam, zapolnjenih z jamskim sedimentom (pretežno glino in kamnitimi bloki). Inštitut za raziskovanje krasa evidence zapolnjenih jam ne vodi, ravno tako tudi ne raziskujejo praznih kavern dolžine manj kot 10 m, čeprav so za stabilnost in trajnost predora pomembne.

Med kraške pojave, katere smo pogosto srečali tekom gradnje predora T1, štejemo tudi močno razpokana in zaglinjena območja hribinske mase, kjer debelina glinenega polnila v razpokah pogosto znaša tudi več centimetrov. Taka območja so v dolžino merila tudi po več 10 m. Ne glede na velikost kraškega pojava so z vidika trajnosti predora pomembni tudi manjši kraški pojavi, ki sekajo izkopni profil predora.

Posebno zahteven primer kraškega pojava v predoru T1 je bila vrtača v območju nizkega nadkritja severnega (divaškega) portala in jama 2TDK-009, ki se nadaljuje pod dno vrtače. Oba pojava sta locirana v območju servisne cevi med km ca 3+060 in km 3+105. Sanacija omenjenega območja je bila poseben izziv.



Slika 1: Območje vrtače in jame 2TDK-009 na severnem portalu predora T1

1.1 VRTAČA

Vpliv vrtače na stabilnost glavne cevi je bil zanemarljiv, kar pa ne velja za servisno cev. Pri izkopu servisne cevi, kjer smo za podpiranje praviloma uporabljali predhodno uporabljene podporne tipe glavne cevi, se je kmalu izkazalo, da le ti niso ustrezni. Prve težave so se pojavile na km ca 3+078, kjer je prišlo do večjega zruška jamskega sedimenta v območje izkopa predora. Podpiranje izkopa kalote na danem območju, je poleg osnovnih podpornih elementov vključevalo tudi podporno jedro, sidranje čela z IBO sidri ter sidrni ščit v temenu predora. Zrušek, ki je nastal v temenu predora, je izvajalec kmalu po dogodku zapolnil s črpnim betonom (poraba ca 50 m^3). Naknadno so bila izdana navodila, da se območje zruška dodatno zapolni z vodocementno injektirno maso (poraba ca 2,5 tone cementa).



Slika 2: Zrušek jamskega sedimenta v območju vrtače na km 3+078

V nadaljevanju izkopa servisne cevi je prišlo do naslednjega večjega zruška jamskega sedimenta na km ca 3+083. Na tem mestu smo za podpiranje predora začeli uporabljati cevni ščit iz jeklenih cevi premera 114 mm in na ta način uspešno prešli mimo območja jamskega sedimenta, ki je segal vse do km ca 3+092. Sanacija zruška je potekala na enak način kot pri zrušku na km 3+078. V območje zruška se je vgradilo ca 10 m^3 črpnega betona. Za zapolnjevanje z injektirno maso se je porabilo ca 2,5 tone cementa.

Kljub omenjenim ukrepom, je vpliv zruška v predoru segal do površine, kjer je nastala ugreznina globoka ca 2m.



Slika 3: Zrušek jamskega sedimenta v območju vrtače na km 3+083

1.2 JAMA 2TDK-009

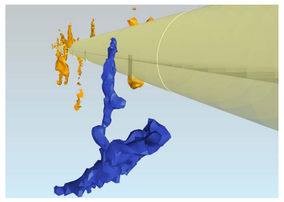
Pri nadaljevanju izkopa v kaloti servisne cevi, se je na km ca 3+094 v levem boku odprl vhod v jamo 2TDK-009. Odprtina s premerom do 1 m se je manj kot meter od roba izkopnega profila prevesila v vertikalno brezno, po katerem je bil možen dostop v glavni del jame. Krasoslovni pregled jame je pokazal, da gre za serijo brezen širine do 15 m, ki nato preidejo v poševen jamski rov. Dno jame, ki se nahaja več kot 30 m pod vhodom, je zapolnjeno z gruščnatim materialom, odloženim v strmem nasipnem kotu. Jama se razteza do sredine predora, po dolžini pa strmo vpada v smeri proti Kopru.

Jama je bila izmerjena z elektronskim merilnikom razdalje in smernega kota, na osnovi česar je bil nato izrisan 3D model jame. Ugotovili smo, da je skrajna točka stropa jame locirana ca 5,0 m pod dnom talnega oboka predora. Nadalje je bilo med ogledom jame opaziti sledove cementne injektirne mase, verjetno iz faze sidranja kalote ali prvih sanacijskih ukrepov (zapolnjevanje zruška), kar kaže na to, da je okoli predora razpršen jamski sistem, kateri nam ni detajlno poznan.

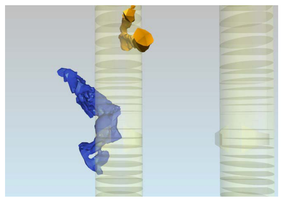
Ob zavedanju, da se jama 2TDK-009 nahaja plitvo pod predorom, je postalo jasno, da bo velik izziv kako zagotoviti trajno stabilnost predora v območju jame.

Ključna tveganja pri prehodu predora skozi območje jame so izhajala iz dveh dejavnikov:

- **Nepoznavanje polnega obsega jame**. Z laserskim merilnikom razdalje se je dalo posneti le odprta območja jame, do katerih je bil možen fizičen dostop človeka. Manjših rovov in lokalnih kavern, do katerih ni bil možen dostop ali niso bili vidni, ni bilo mogoče godetsko posneti.
- **Heterogenost in stopnja razpokanosti kamnine v stropu jame**. Ker se dobršen del jame nahaja neposredno pod predorom, obstaja nevarnost, da zaradi slabonosilnih tal in vibracij v času obratovanja predora pride do porušitve stropa jame in posledično do porušitve predora.



Slika 4: Tridimenzionalni pogled na jamo 2TDK-009



Slika 5: Tloris jame 2TDK-009

2.1 DODATNE GEOFIZIKALNE PREISKAVE

Delno uspešen postopek utrjevanja temeljnih tal z injektiranjem oz. znatne izgube injektirne mase so privedle do sklepa, da tla niso kompaktna. Georadarske preiskave tal, katere se izvajajo vzdolž celotnega predora, so prav tako odražala območja visoke stopnje zakraselosti. V ta namen smo na obravnavanem območju izvedli podrobnejše geofizikalne preiskave, katere v osnovi niso bile predvidene.

Dodatne geofizikalne preiskave smo izvedli z dvema metodama, to so seizmične in georadarske preiskave. V ta namen se je med km 3+070 in 3+090 na območju izven jame 2TDK-009 v tla zvrtalo 9 vertikalnih vrtin globine 6 in 9 m. Vrtine so se nato opremile s plastičnimi cevmi, medprostor pa zasul s kremenčevim peskom.

Najprej so se izvedle seizmične preiskave z dvema globokima (9 m) vrtinama in oddajniki ter sprejemniki, nameščenimi v šestih profilih nad talnim obokom. Sledila je izvedba georadarskih preiskav (»cross hole« in refleksijska metoda) med vrtinami.

Na osnovi analize vseh zbranih podatkov se je nato določilo območja kompaktne kamnine ter območja praznin ter tako natančneje definiral obseg in stanje stropa jame 2TDK-009. Hkrati so geofizikalne preiskave podale tudi vrednosti nekaterih geomehanskih parametrov (dinamični deformacijski modul, Poissonov količnik, prostorninska teža materiala), ki so nam služili v pomoč pri načrtovanju končne sanacije jame



Slika 6: Izvedba seizmičnih preiskav

2 UKREPI ZA UTRDITEV HRIBINE

Da bi lahko obvladovali omenjena tveganja, smo v prvi fazi na obravnavanem odseku izvedli konsolidacijsko injektiranje oboda predora, zamenjavo slabonosilnih temeljnih tal s kamen betonom ter konsolidacijsko injektiranje talnega oboka.

- **Utrjevanje oboda predora z injektiranjem**

Zaradi prisotnosti jamskega sedimenta z večjimi kamnitimi bloki, predvsem v desnem boku predora, smo se odločili za utrjevanje oboda predora s konsolidacijskim injektiranjem. Injektiranje se je izvedlo preko injektirnih vrtin globine 1,3 m, razporejenih v rastru 1x1m (skupaj 431 vrtin). Ocenjena poraba injektirne mase za posamezno vrtino je znašala do 200 l. Skupaj je bilo porabljenih ca 60 ton cementa. Postopek je bil delno uspešen, saj se je približno na polovici injektirnih vrtin postopek injektiranja predhodno zaključil, saj je poraba injektirne mase presegla ocenjeno količino za več kot 25% pri že začetnem tlaku injektiranja, ki je znašal 1 bar. To je nakazovalo na izgubljanje mase.

- **Zamenjava temeljnih tal s kamen betonom**

Pri izkopu talnega oboka je bilo v desni polovici predora med km ca 3+070 do 3+090 zaznati jamski sediment, ki je segal pod dno talnega oboka. Območje se je saniralo na način, da se je slabo nosilen stisljiv material (jamski sediment) odstranil in nadomestil s togim kamnom v betonu. Izkop je segal do globine 1,5 m pod dno talnega oboka in je sledil območju jamskega sedimenta. V izkop se je nato po plasteh vgradil kamen (premer 50-500 mm) in beton C20/25. Ocenjena poraba kamen betona je v danem primeru znašala ca 160 m^3.

- **Utrjevanje talnega oboka z injektiranjem**

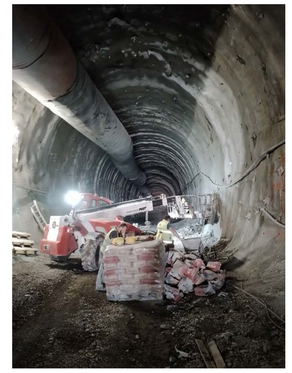
Ker hribina med jamo 2TDK-009 in dnom predora ni homogena (razpokanost, prisotnost jamskega sedimenta, kavernoznost itd), smo se odločili, da se talni obok v ožjem območju jame 2TDK-009 konsolidacijsko poinjektira. Injektiranje se je izvedlo preko injektirnih vrtin globine 2,3 do 3 m, razporejenih v rastru 1,5x1,5 m ter linijsko na stiku kamen betona in kompaktne hribine. Za injektiranje se je uporabila vodocementna injektirna masa iz običajnega cementa CEM II 42,5 in vodocementnega faktorja 0,5. Ocenjena poraba injektirne mase na posamezno vrtino je znašala do 300 l. Skupaj je bilo v tla zavrtanih 40 injektirnih vrtin, od katerih jih je bilo uspešno zainjektiranih le polovica. Na približno polovici injektirnih vrtin se je postopek injektiranja predhodno zaključil, saj je poraba injektirne mase presegla ocenjeno količino za več kot 25%, v veliki večini primerov že pri začetnem tlaku injektiranja, ki je znašal 1 bar. Željenega učinka nismo dosegli, izgube injektirne mase so bile prevelike, zato se je z injektiranjem zaključilo.



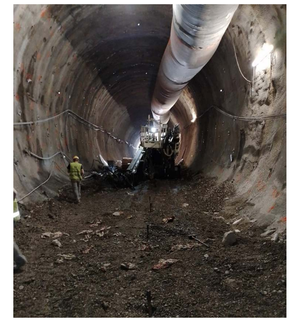
Slika 7: Izkop in odstranitev slabonosilnih temeljnih tal



Slika 8: Zamenjava temeljnih tal s kamen betonom



Slika 9: Injektiranje oboda predora



Slika 10: Injektiranje talnega oboka predora

2.2 DODATNO ZAPOLNJEVANJE KAVERN V TLEH

Po končanih geofizikalnih preiskavah se je na območju med km 3+060 in 3+105 v tla izvrtalo dodatnih 32 vrtin globine 6 m. V vrtine se je nato včrpal beton C25/30 maksimalne zrnavosti 16 mm, ki je bila edina razpoložljiva tehnologija za konsolidacijo in večjo kapaciteto vgradnje materiala. Poleg omenjenih 32 vrtin se je z betonom zapolnil tudi večji del vrtin, ki so predhodno služile za izvedbo geofizikalnih preiskav.

Skupna poraba betona za zapolnitev 39 vrtin je znašala ca 310 m^3. S tem ukrepom smo utrdili temeljna tla izven območja jame 2TDK-009 in tako naredili nosilno oporo armiranobetonski plošči, ki predstavlja trajno rešitev premostitve jame 2TDK-009.



Slika 11: Pregled vrtin s kamero



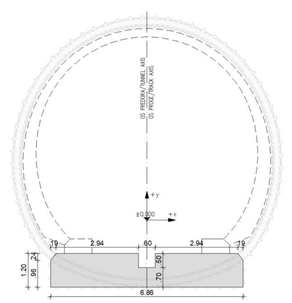
Slika 12: Zapolnjevanje kavern v temeljnih tleh s črpnim betonom

2.3 PREMOSTITVENA KONSTRUKCIJA PREKO JAME 2TDK-009

Za zagotavljanje trajnosti talnega oboka predora je bila izvedena premostitvena konstrukcija v obliki monolitne armiranobetonske plošče. Dolžina konstrukcije znaša 47,84 m (4 kampade notranje obloge), tako da ima AB plošča na obeh straneh zagotovljeno minimalno 5 m dolga ležišča. Dimenzije plošče so bile določene na osnovi statičnih analiz, kjer je bil ključni robni pogoj modul reakcije tal. Vrednosti za modul reakcije tal so bile ocenjene iz geomehanskih parametrov, dobljenih iz geofizikalnih preiskav. Pri tem so bili obdelani različni scenariji podpiranja, ki so zajemali različno razporeditev ter togost podpor, med drugim tudi ekstremni primer porušitve stropa jame v dolžini 6 m (območje brez podpiranja). Debelina plošče je bila na osnovi statičnih analiz optimizirana na 1,20 m, dodatno je bilo pod ploščo predvidenih 5 prečnih gred oziroma ojačitvenih reber, namenjenih zmanjšanju razponov plošče ter hkrati zagotovitvi večje togosti celotne konstrukcije v prečni smeri.



Slika 13: Armiranje prve kampade AB plošče



Slika 14: Prečni prerez AB plošče preko jame 2TDK-009