

Tunel Pećine

Rajko Kuželički, Dalibor Ružić

Ključne riječi

tunel Pećine,
državna cesta D404,
središte Rijeke,
čvor Draga,
željeznička pruga
Rijeka – Zagreb,
stijenska masa

Key words

Pećine tunnel,
national road D404,
Rijeka centre,
Draga Interchange,
Rijeka – Zagreb
railway line,
rock mass

Mots clés

tunnel de Pećine,
route nationale D404,
centre de Rijeka,
échangeur de Draga,
ligne ferroviaire
Rijeka – Zagreb,
masse rocheuse

Ключевые слова

тоннель Печине,
государственная
дорога D404,
центр Риеке,
узел Драга, железная
дорога Риека-Загреб,
горная порода

Schlüsselworte

Tunnel Pećine,
Staatsstrasse D404,
Zentrum von Rijeka,
Knotenpunkt Draga,
Eisenbahnstrecke
Rijeka - Zagreb,
Gesteinmassiv

R. Kuželički, D. Ružić

Stručni rad

Tunel Pećine

Tunel Pećine izvodi se na državnoj cesti D404 koja spaja središte Rijeke sa riječkom obilaznicom u čvoru Draga. Duljine je 1258,50 m sa tri trotračne i dvije četvertračne dionice te dva priključka za podzemne garaže. Tunel prolazi ispod gradskog područja usporedno s kolosijekom željezničke pruge Rijeka – Zagreb, najvećim dijelom kroz ekstremno okršenu stijensku masu. U radu su prikazani osnovni podaci o tunelu te projektiranju i izvedbi, a istaknute su i njegovi osobitosti.

R. Kuželički, D. Ružić

Professional paper

Pećine Tunnel

The Pećine Tunnel is now under construction on the national road D404 which connects the centre of Rijeka with the Rijeka Bypass at the Draga Interchange. The tunnel is 1258.50 m long and has three three-lane and two four-lane sections, as well as two connections to underground car parks. The tunnel route, parallel to the Rijeka – Zagreb railway line, runs under the urban area, and traverses highly fragmented rock formations. Principal data about the design and construction of the tunnel are given, and its special features are emphasized.

R. Kuželički, D. Ružić

Ouvrage professionnel

Tunnel de Pećine

Le tunnel de Pećine est actuellement en construction sur la route nationale D404 qui relie le centre de la ville de Rijeka avec la rocade de Rijeka à l'échangeur de Draga. Le tunnel est de 1258,50 m de longueur et il a trois tronçons à trois voies et deux tronçons à quatre voies, ainsi que deux raccords aux parkings souterrains. Le tracé du tunnel, parallèle à la ligne ferroviaire Rijeka – Zagreb, passe sous la zone urbaine, et franchit les formations rocheuses très fragmentées. Les données principales sur l'étude et la construction de ce tunnel sont présentées, et ses caractéristiques typiques sont mises en relief.

Р. Кужелички, Д. Ружич

Отраслевая работа

Тоннель Печине

Тоннель Печине возводится на государственной дороге D404, соединяющей центр Риеке с риечкой объездной дорогой в узле Драга. Его длина составляет 1258,50 м с тремя трёхполосными и двумя четырёхполосными участками, а также существуют два приключения для подземных гаражей. Тоннель проходит из-под городской территории параллельно с колеёй железной дороги Риека-Загреб, большей частью через экстремально закарстованную горную породу. В работе описаны, основные данные о тоннеле, а также о проектировании и возведении, а подчеркнуты и его особенности.

R. Kuželički, D. Ružić

Fachbericht

Tunnel Pećine

Der Tunnel Pećine wird an der Staatsstrasse D404 ausgeführt, die das Zentrum von Rijeka mit der Umgehungsstrasse von Rijeka im Knotenpunkt Draga verbindet. Desssen Länge beträgt 1258,50 m mit drei dreispurigen und zwei vierspurigen Teilstrecken und zwei Anschlüsse für unterirdische Garagen. Der Tunnel verläuft unterhalb des Stadtgebiets paralell mit dem Geleise der Eisenbahnstrecke Rijeka - Zagreb durch extrem karstifiziertes Gesteinmassiv. Im Artikel sind die Grundangaben über den Tunnel, Entwurf und Ausführung dargestellt, und seine Besonderheiten hervorgehoben.

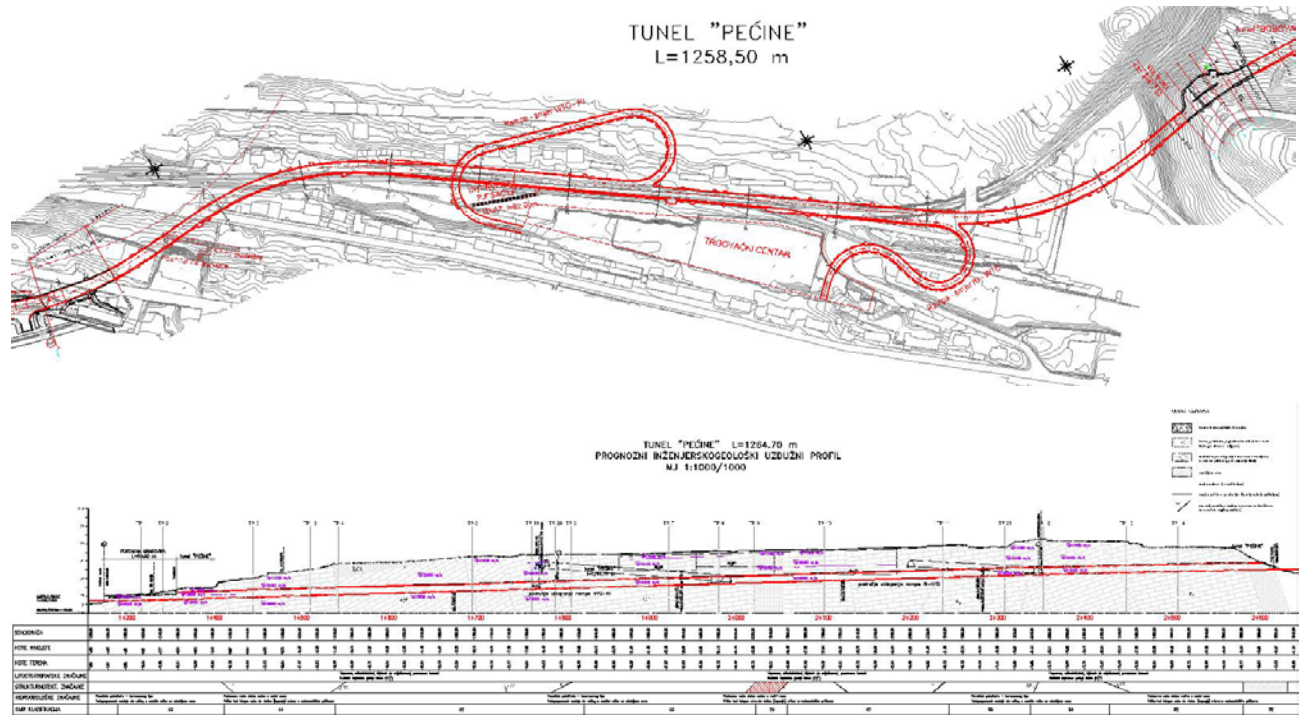
Autori: Mr. sc. **Rajko Kuželički**, dipl. ing. građ., **Dalibor Ružić**, dipl. ing. građ., Rijekaprojekt d.o.o., Rijeka

1 Uvod

Tunel Pećine prolazi ispod istoimene gradske četvrti i u sklopu je gradske magistralne ceste D404 u Rijeci. Magistralna cesta D404, dionica A – E1, duljine 3497 m, povezuje: središte Rijeke, luku Sušak, kontejnerski terminal Brajdica, stambena naselja Sušaka (u čvoru Vežica), i trgovačko - poslovni centar TCR (*Tower Center Rijeka*) sa obilaznicom Rijeke (u čvoru Draga).

Pećine predviđeno je tunelskim priključcima, dvotračnim tunelima za smjer TCR – Rijeka duljine 380 m te Rijeka – TCR duljine 262 m.

Radi prometnih trakova za usporavanje odnosno ubrzanje vozila, pri ulazu ili izlazu iz tunelskih priključaka za TCR, profil u tunelu Pećine povećava se s trotračnog na četverotračni u dvije dionice ukupne duljine 507 m (40 % duljine tunela).



Slika 1. Situacija i uzdužni profil tunela Pećine

Tunel Pećine duljine je 1258,50 m. U tunelu je u osnovi predviđen trotračni cestovni profil s obzirom da je trasa u stalnom usponu. Za uspon, u smjeru izlaza iz grada (smjerovi za Zagreb i Split), predviđena su dva vozna traka jer je na znatan udio teretnih vozila koja će se uključivati iz riječke luke i s kontejnerskog terminala Brajdica. Duljina je trotračnih dionica tunela-751,50 m (60 % duljine tunela). Prometno povezivanje TCR-a s tunelom

Najveći je uzdužni nagib u tunelu 2,88 %, visine nadsloja iznad tunelske cijevi 3,5 - 30 m, poprečni nagibi kolnika 2,5 – 3,7 %.

U nastavku tunela Pećine slijedi tunel Bobova, također trotračni, duljine 189,50 m, s nadslojem 2 – 18 m te prolaskom ispod stambenih zgrada s visinom nadsloja od 6,30 m.

Tablica 1. Podaci o elementima profila tunela

Elementi profila tunela	Dvotračni tunel	Trotračni tunel	Četverotračni tunel
Broj i širina voznih trakova	2 x 3,50 = 7,00 m	3 x 3,50 = 10,05 m	4 x 3,50 = 14,00 m
Širina kolnika	= 7,60 m	= 11,10 m	= 14,60 m
Visina rubnjaka	= 0,20 m	= 0,20 m	= 0,20 m
Maks. širina tunela	= 9,82 m	= 13,40 m	= 16,90 m
Svijetla visina u osi kolnika	= 6,85 m	= 8,00 m	= 8,47 m
Ploština svijetlog otvora	= 56,05 m ²	= 87,40 m ²	= 117,64 m ²
Ploština iskopa	= 81,29 m ²	= 117,02 m ²	= 158,85 m ²
Raspon/visina iskopa	= 11,45/8,30 m	= 14,80 / 9,50 m	= 18,7 / 10,20 m

Kao posebnosti tunela Pećine mogu se navesti: izmjena trotračnih i četvertračnih profila pojedinih dionica tunela, dva tunnelska priključka za podzemne garaže TCR-a s "račvama" na kojima krajnji profil doseže i šestetračnu širinu s rasponom otvora do 28,35 m, visinom 13,60 m i ploštinom iskopa do 310 m², prolazi ispod gradskog područja, paralelno ispod kolosijeka željezničkih pruga s nadslojem od dvadesetak metara, pokraj građevne jame TCR-a, najvećim dijelom kroz ekstremno okršenu stijensku masu, što čine ovaj tunel u projektnom i izvođačkom smislu naročito zahtjevnim.

Tuneli na dionici A – E1, magistralne ceste D404 s udjelom u duljini trase:

Portalna građevina tunela Pećine	L = 84,0 m (2,40 %)
Tunel Pećine	L = 1258,5 m (35,98 %)
Tunel Bobova	L = 189,5 m (5,42 %)
Portalna građevina tunela Bobova	L = 54,0 m (1,54 %)

Tuneli Pećine i Bobova s portalnim građevinama imaju ukupnu duljinu od 1586 m odnosno 45,3 % duljine trase dionice A-E1.

2 Tunelski profili

Obloga tunela izvodi se od armiranog betona MB-30 debljine $d = 0,50$ m kod trotračnog i $d = 0,65$ m kod četvertračnog tunela. Prostor ispod pješačkih staza koriste se kao instalacijski kanali, kontinuirano pokriveni betonskim poklopcima.

Odvodnja kolničke površine predviđena je sustavom šupljih rubnjaka te sifonskog preljeva s potopljenom preg-

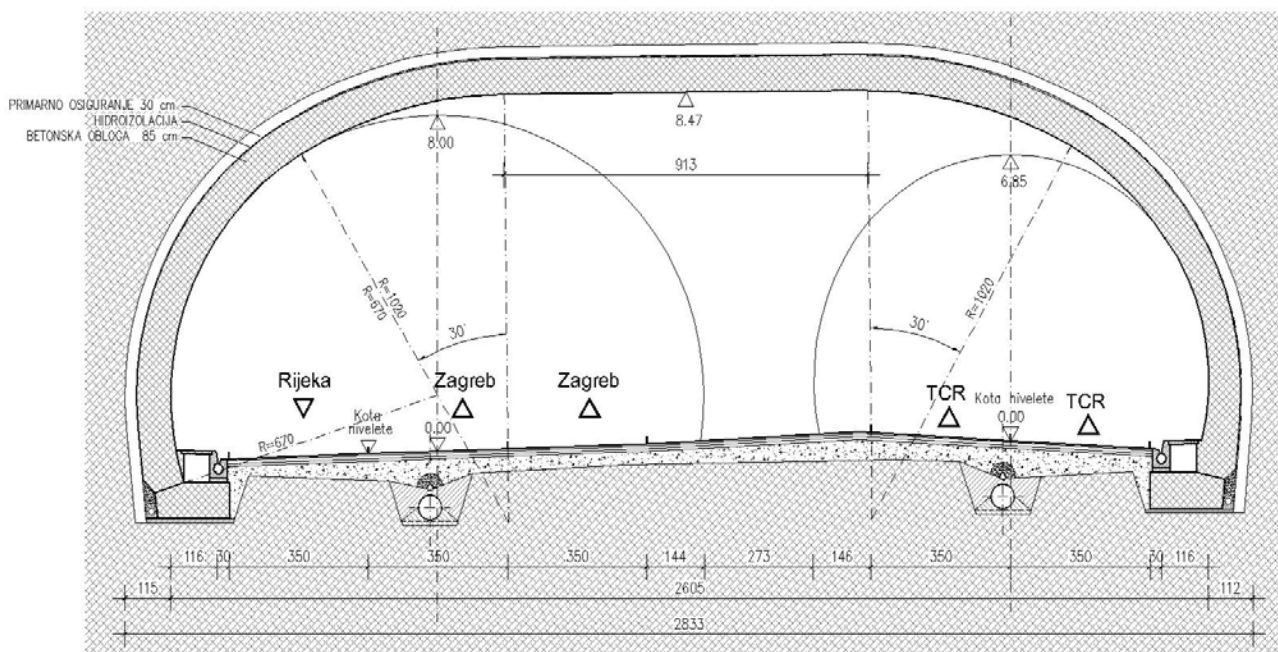
radom te spojem na glavni uzdužni kolektor odvodnje tunela.

Procjedna voda sa strane brda, iza tunnelske obloge, prihvaća se perforiranim drenažnim cijevima profila 200 mm. Na bokovima tunela predviđena su revizijska okna za bočne uzdužne drenaže na razmaku od približno 50 m. Između obloge tunela i primarne podgrade predviđen je sloj hidroizolacije od PVC folije zaštićene geotekstilom (tablica 1.).

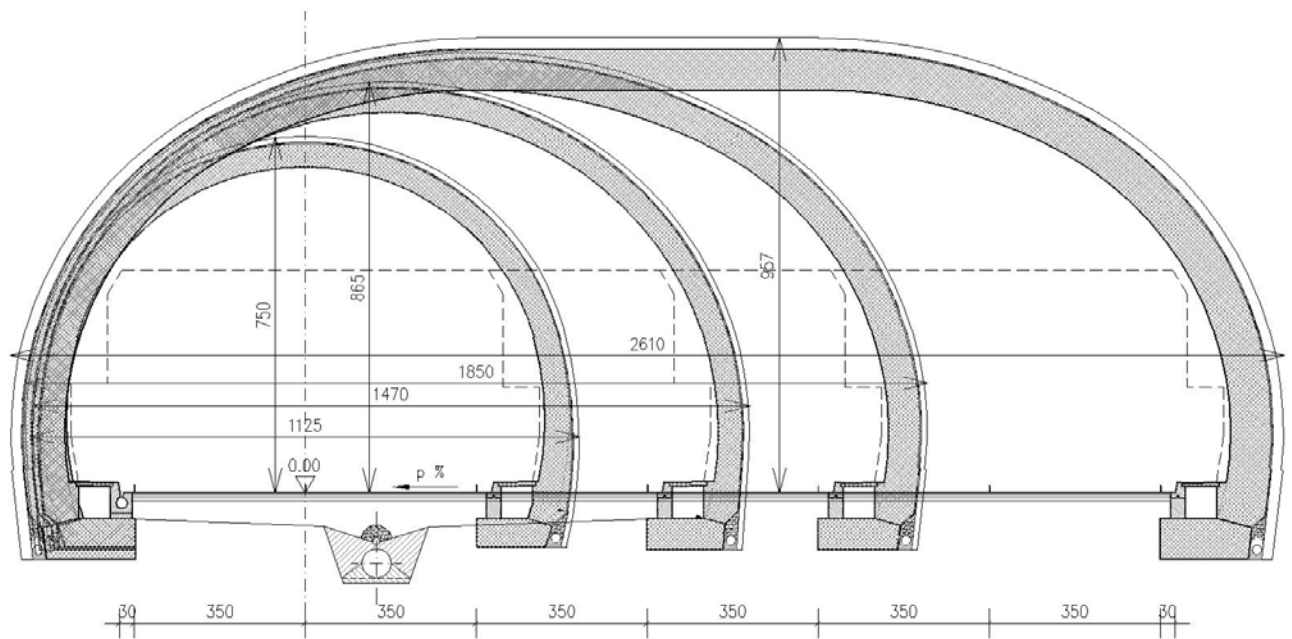
U tunelu je predviđen uzdužni tip ventilacije s reverzibilnim ventilatorima ovješena o svod tunela. U tunelu su predviđeni i posebni sustavi za elektroenergetsko napajanje, rasvjetu, dojavu požara i zaštitu od požara, hidrantska mreža, sustav daljinskog vođenja i upravljanja, kao i telekomunikacijski sustavi.



Slika 3. Postavljanje hidroizolacije u račvi - istok



Slika 3. Presjek tunela u račvi - istok



Slika 4. Usporedba presjeka dvotračnoga, trotračnoga, četverotračnoga i profila u račvi

3 Inženjerskogeološke osobine stijenske mase

Dio područja kojim prolazi cesta D404 odnosno Tunel Pećine pripada malom sušačkom dijelu Kastavske zaravni, koja je sa sjeverozapada ograničena dolinom Rječine, s jugozapada morskom obalom, sa sjeveroistoka sušačkom dragom, a s jugoistoka uvalom Martinščica. Tunel Pećine pripada jednom, a tunel Bobova drugom tektonskom bloku koji su odvojeni značajnom rasjednom zonom Rijeka-Voz (otok Krk).

Osnovnu stijensku masu kroz koju prolazi trasa tunela čine kredne naslage (prijelazne karbonatne breče, dolomiti i vapnenci u izmijeni i rudistni vapnenci) te naslage paleogena (foraminiferski vapnenci i vapnenačke breče).

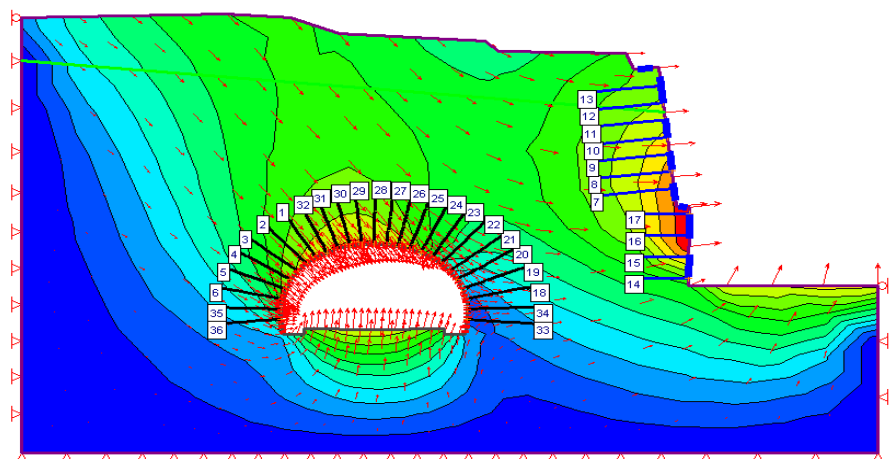
U hidrogeološkom su smislu navedene karbonatne naslage stije-
ne srednje do dobre vodopropusnosti. Također, s obzirom na flišnu barijeru u Sušačkoj dragi, područje Sušaka čini mali zatvoreni sljev pa su dotoci vode u tunelu uglavnom zbog procjeđivanja oborinskih voda.

Prema RMR klasifikaciji u tunelu se najvećim dijelom očekivala, što je i potvrđeno tijekom gradnje, stijenska masa IV. kategorije, ali s obzirom na male visine nadsloja na cijelom potezu tunela, baze okršenosti na dubini od 10 - 30 m, tj. u zoni kalote ili dna tunela,

kao i zbog mjestimičnoga padinskog utjecaja na bokovima tunela na dijelovima ispod teniskoga i rukometnog igrališta te na potezu građevne jame TCR-a, primjenjivali su se podgradni sustavi i za V. stijensku kategoriju u trotračnom i četverotračnom profilu tunela.

4 Iskop i podgrada

Kod tunela Pećine predviđen je radni postupak probijanja i podgrade tunela primjenom nove austrijske metode s elementima podgradnog sustava koji čine: mlazni (mikroarmirani) beton, čelične armaturne mreže, čelična adhezijska (samobušuća) štapna sidra, tunelski rešetkasti čelični lukovi, zaštitni svod od injektiranih čeličnih cijevi (*pipe-roof*).



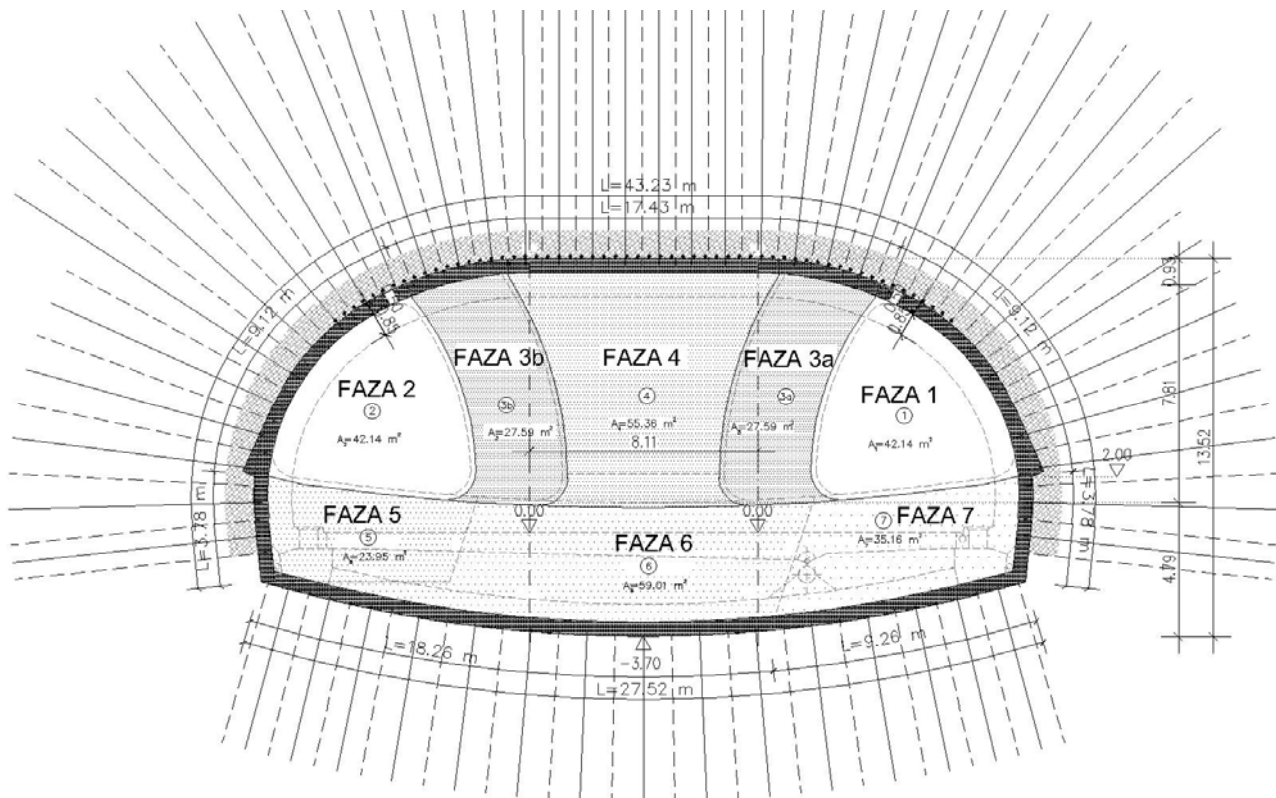
Slika 5. Proračunski profil četverotračnog tunela uz građevnu jamu TCR-a

Sastav i dimenzije podgradnog sustava prethodno su, u fazi projekta, određeni numeričkim i empirijskim pristupom. Za potvrdu ili korekciju podgradnog sustava, u drugoj je fazi projektiranja primijenjena kombinacija numeričkih, empirijskih i promatračkih metoda da bi se usvojio najpovoljniji sustav, to jest:

- numerički pristup s geotehničkim proračunima baziranim na prosječnim fizikalno – mehaničkim podacima stijenske mase za određenu geotehničku dionicu
- empirijski pristup, RMR i Q - klasifikacije te na njihovoj osnovi određivanje podgradnog sustava
- promatrački pristup osnovan na mjerenju deformacija (konvergencije) na izvedenom podgradnom sustavu i u stijenskoj masi u okolišu iskopa
- analiza strukturnih geoloških osobina stijenske mase (diskontinuiteti, klinovi) te odgovarajuće dimenzioniranje podgradnog sustava – lokalno za svaki pojedinačni slučaj.

tunela, s povoljnijom stijenom (III. i IV. stijenska kategorija), provodio se mehaničkim načinom (prolaz kroz odlagalište ljevaoničkog otpada, V. kat.), miniranjem ili kombinacijom miniranja i mehaničkog iskopa u tri faze. Tijekom građenja, na dijelu koji se kopao miniranjem, provodilo se kontinuirano mjerenje seizmičkog djelovanja na građevine na površini te se u tom smislu prilagođavala tehnologija miniranja. Prema posebnom programu, za potrebe II. faze projektiranja provodila su se opsežna geotehnička opažanja i mjerenja koja su se sastojala od: određivanja stvarnoga inženjerskogeološkog profila (inženjerskogeološko kartiranje, klasificiranje, određivanje parametara stijenske mase), geotehničkih opažanja (ponašanje stijenske mase na čelu tunela, snimanja procesa građenja, dnevnih pregleda ugrađenih podgradnih sklopova), te geotehničkih mjerenja (kontrolna mjerenja, podgradna mjerenja, stabilizacijska mjerenja i praćenja građevina na površini terena – klinometri).

Svi rezultati geološkog i geotehničkog motrenja stijens-



Slika 6. Faze iskopa – razrada profila u račvi za V. kategoriju

Iskop tunela izvodio se sa dva radna čela. Zapadni dio trase tunela u duljini od približno 50 %, radi ekstremno okršene stijenske mase sa znatnim udjelom gline (IV. i V. stijenska kategorija), kopao se isključivo mehaničkim načinom (otkopnim čekićem) pod zaštitom "cijevnog kišobrana" (*pipe-roof*), korak napredovanja 1,0 m, sa razradom profila u 4 do 7 faza. Iskop istočnog dijela

ke mase, tehnologije i dinamike iskopa i ugradnje podgradnih sustava kontinuirano su praćeni i dokumentirani tijekom gradnje.

Tehnologija i dinamika iskopa i podgradnog sustava prilagođavali su se tijekom izvedbe kvaliteti i strukturnim osobinama stijenske mase, odnosno rezultatima geotehničkih mjerenja i opažanja.

Uspješno praćenje i prilagođavanje tehnologije iskopa i podgradnih sustava podrazumijevali su stalni i kvalitetan geotehnički nadzor tijekom građenja.

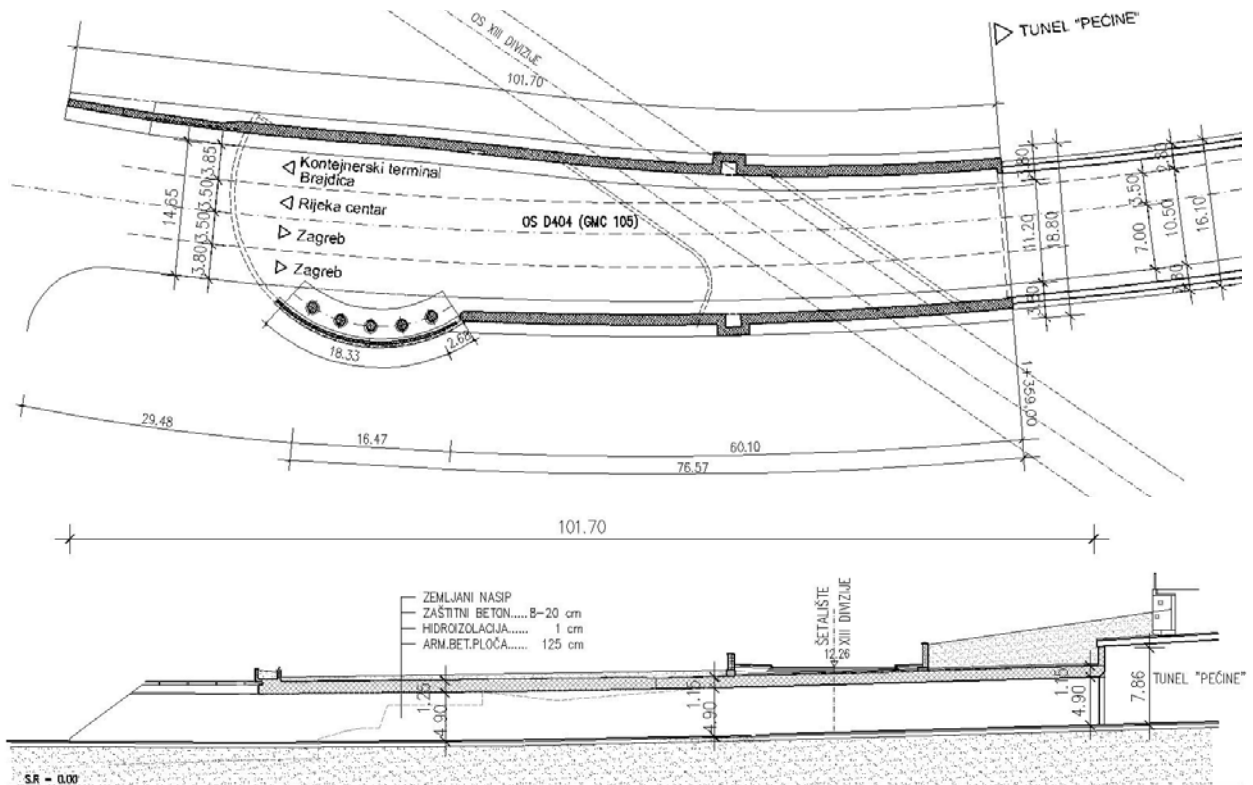
Mjereni pomaci u stijeni zabilježeni tijekom različitih faza iskopa bili su ekstremno mali, što je potvrda uspješno primijenjenih mjera stabilizacije tunelskog iskopa.

5 Neke osobitosti tunela Pećine

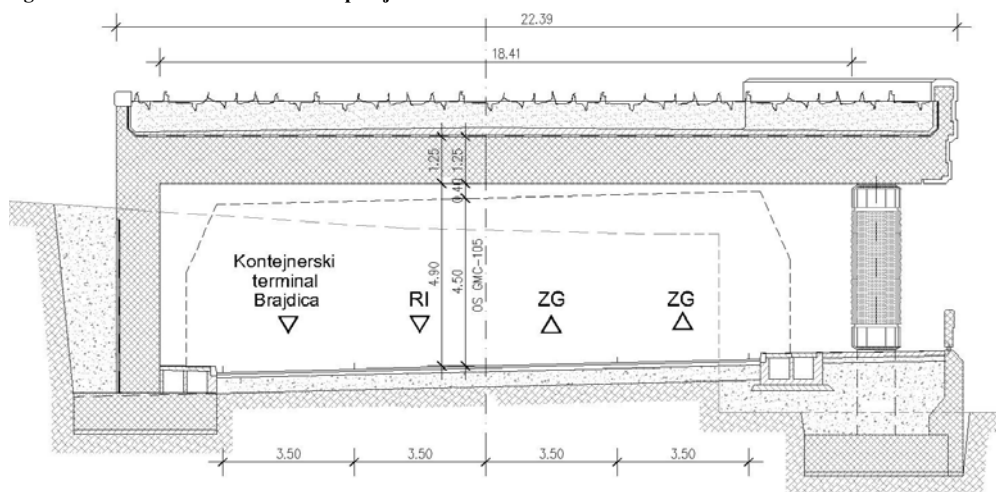
Duž trase tunela Pećine može se izdvojiti nekoliko karakterističnih mjesta koja su zahtijevala poseban pristup tijekom projektiranja i gradnje te koja Tunel Pećine čine

osobitim u odnosu na uobičajene cestovne tunele. U nastavku opisujemo neka osobita mjesta vezana za konstrukciju i prolaz trase tunela ispod izgrađenog dijela grada:

1. Portalna građevina Pećine
2. Tunelski profili (3, 4, 5 – tračni)
3. Prolaz tunela ispod teniskog i pokraj rukometnog igrališta
4. Prolaz tunela kroz civilno sklonište i pokraj postojećeg željezničkog tunela Brajdica
5. Prolaz tunela ispod stambenih zgrada



Slika 7. Portalna građevina Pećine – tlocrt i uzdužni presjek



Slika 8. Portalna građevina Pećine – karakteristični presjek



Slika 9. Portalna građevina Pećine tijekom gradnje

6. Objekti u tunelu (interventni pješački izlaz, transformatorska stanica)
7. Tunelski priključci za TCR
8. Križanje dvotračnog i četverotračnog tunela
9. Prolaz tunela pokraj građevne jame i tornja TCR-a
10. Prolaz tunela ispod pruge RI - ZG
11. Prolaz istočnoga portalnog dijela kroz odlagalište talioničkog otpada

5.1 Portalna građevina Pećine

Na ulaznom portalu tunela, uz kontejnerski terminal Brajdica, radi prijelaza gradske prometnice te zaštite od buke (blizina stambenih zgrada i škole), predviđena je portalna građevina (duljina građevine 101,70 m, najveći svijetli raspon 14 – 19,0 m, tlocrtna ploština 1550 m²).

5.2 Tunelski profili – profili iskopa

U osnovi trotračni tunelski profil dobiva dodatne prometne trakove za ubrzavanje/usporavanje vozila pri



Slike 10. Prolaz tunela ispod teniskog igrališta – ulazni portal



izlazu/ulazu u tunelske priključke za podzemne garaže TCR-a. Time nastaje četverotračni profil na dvije dionice duljine 300 m i 215 m.

U zoni raskrižja u tunelu, četverotračni profil se dalje proširuje na više od pet trakova s obzirom na dvotračni priključni tunel. Time se u tunelu dobivaju sljedeće dimenzije otvora iskopanog profila: raspon/visina/površina iskopa

Trotračni profil:	14,80 m/9,50 m/117,00 m ²
Četverotračni profil:	18,70 m/10,20 m/158,90 m ²
Peterotračni profil (u računama):	28,35 m/13,60 m/309,10 m ²

5.3 Prolaz tunela ispod teniskog igrališta i pokraj rukometnog

Nakon portalne građevine Pećine te ulaska u tunelski iskop, početni dio tunela u duljini od 55 m prolazi ispod teniskog igrališta s nadslojem nasipa i degradirane stijene iznad tunela visine 3 – 7 m.

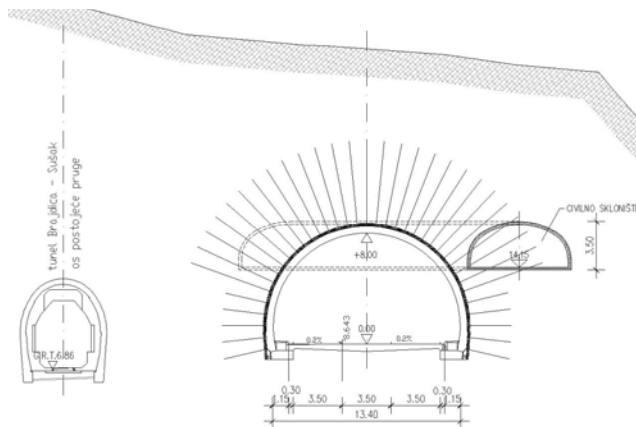


Na slici 10. prikazan je početak tunelskog iskopa ispod ruba teniskoga igrališta. Na slikama je vidljiva zaštita predusjeka mlaznim betonom te prva serija "cijevnog kišobrana", kao i zaštitni svod od armiranoga mlaznog betona i čeličnih rešetkastih lukova.

Od 50 – 70 m trotračni profil tunela, s rasponom iskopa od 14,80 m i nadslojem od oko 7,50 m, prolazi pokraj zasjeka rukometnog igrališta na udaljenosti od oko 5,60 m.

5.4 Prolaz tunela kroz civilno sklonište i pokraj postojećeg željezničkog tunela Brajdica

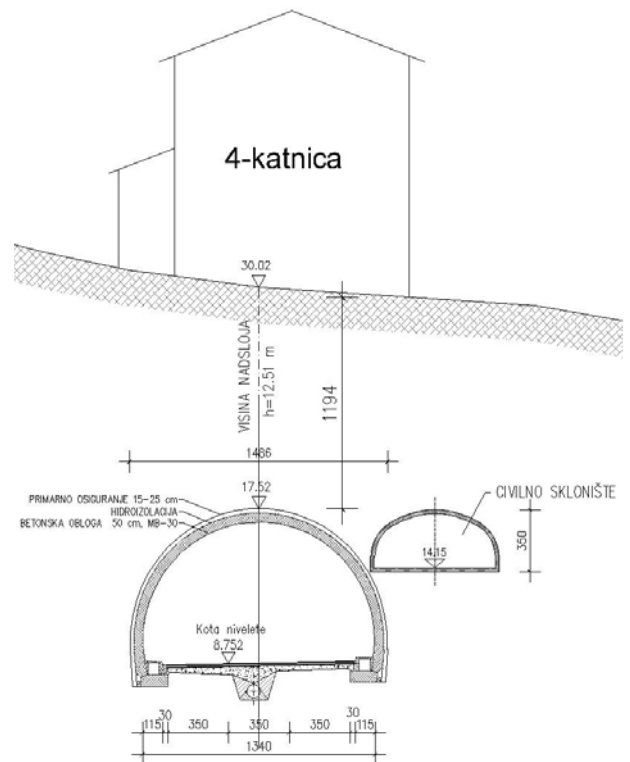
Nakon prvih 65 m kalota tunela presijeca civilno sklonište iz II. svjetskog rata. Kako bi se nadomjestio dio izgubljenog skloništa ono je produljeno na suprotnoj strani te je izveden dodatni izlaz na površinu. U tom se području trotračni profil tunela približava na 10-ak m postojećem željezničkom tunelu koji povezuje sušačku luku i željezničku postaju Pećine (slika 11.).



Slika 11. Prolaz tunela kroz civilno sklonište i pokraj željezničkog tunela Brajdica

5.5 Prolaz tunela ispod stambenih zgrada

Tunel Pećine prolazi ispod izgrađenoga gradskog područja, pokraj ili ispod stambenih zgrada od kojih se mogu izdvojiti prolaz trotračnog profila neposredno ispod stambene četverokatnice, s nadslojem od oko 12 m, te prolaz pokraj četrnaesterokatnice sa nadslojem od oko 15 m na horizontalnoj udaljenosti od približno 6 m (slika 13.).



Slika 13. Tunel ispod četverokatnice, nadsloj 12 m



Slika 12. Portal željezničkog tunela Brajdica i portalna građevina tunela Pećine neposredno pred početak iskopa tunela



Slika 14. Prolaz tunela ispod četrnaesterokatnice

5.6 Objekti u tunelu

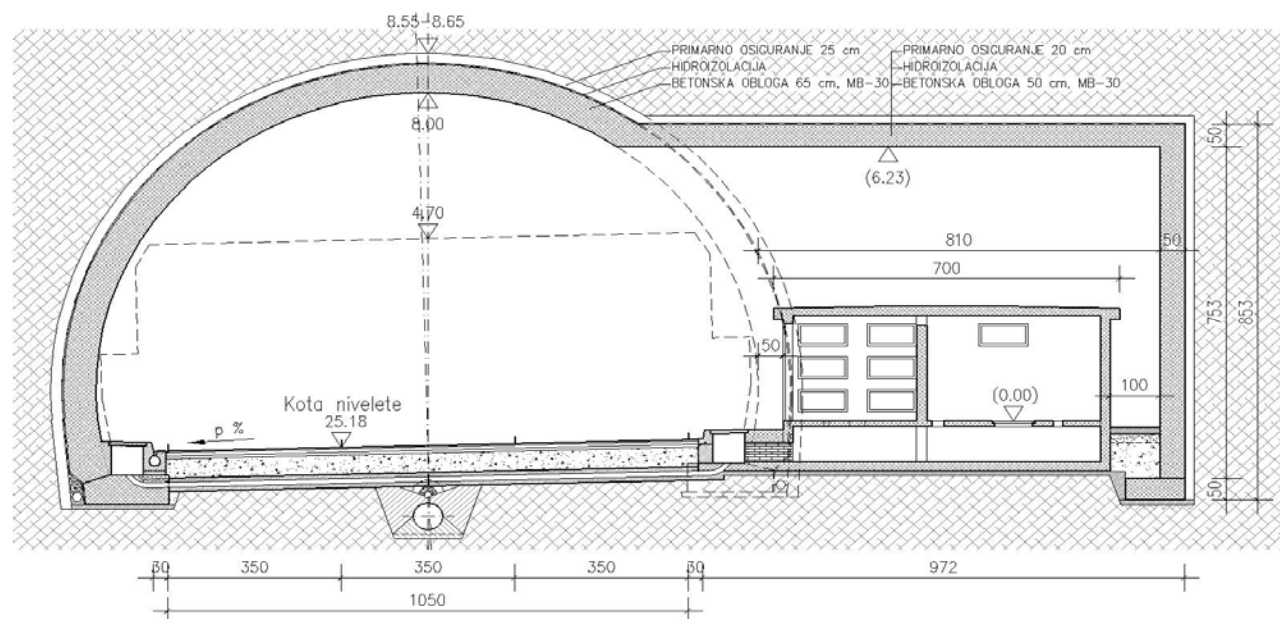
Transformatorska stanica

Osim standardnih elektroinstalacijskih, SOS i drenažnih niša, u trotračnom profilu tunela izvedena je niša za transformatorsku stanicu s parkirališnim mjestom za servisno vozilo u niši. Dimenzije otvora niše jednake su tunelskom profilu kao za dvotračni cestovni tunel (slika 15.).

se automatski uključuju kada se otvore vrata. Tunel je duljine 82,60 m, dimenzija svijetlog otvora $3,0 \times 3,5$ m, s kutom uspona od 18° . Denivelacija iznosi 24 m i riješena je nizom stubišnih krakova s podestima.

SUDIONI CI U IZGRADNJI

Investitor dionice:	HRVATSKE CESTE d.o.o. Zagreb (dir. pravca S. Kalčić, dipl. ing. građ.)
Projektant dionice:	"RIJEKAPROJEKT" d.o.o. Rijeka
Projektant tunela:	"RIJEKAPROJEKT" d.o.o. Rijeka (mr. sc. R. Kuželički, dipl. ing. građ.)
Revident:	Građevinski fakultet Zagreb (prof. dr. sc. M. S. Kovačević, dipl. ing. građ.)
Nadzor:	"IGH" – Zagreb (P. Lušo, dipl. ing. građ., MPV)
Izvođač radova:	"Hidroelektra Niskogradnja" d.d. Zagreb



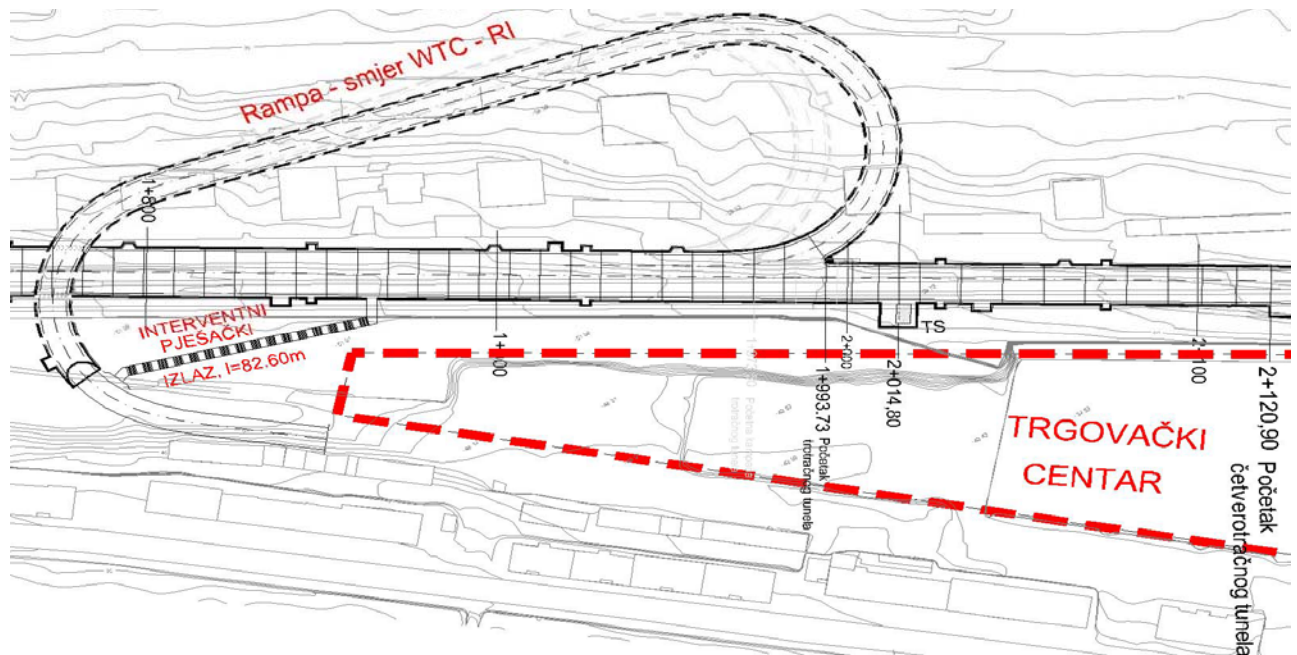
Slika 15. Presjek kroz nišu transformatorske stanice u trotračnom profilu tunela

Interventni pješački izlaz

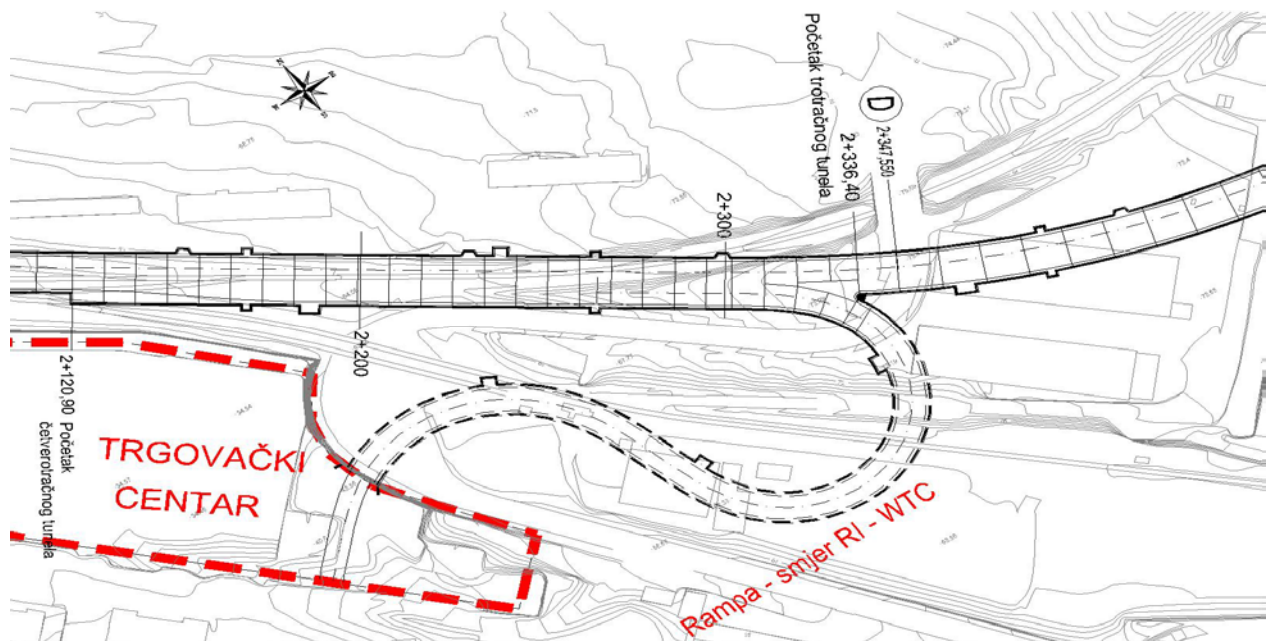
Interventni pješački izlaz povezuje tunel Pećine sa površinom u zoni TCR-a i služi kao evakuacijski put u slučaju požara. Prolaz je opremljen protupožarnim vratima na obje strane koja se slobodno otvaraju u oba smjera. U prolazu su predviđeni rasvjeta i ventilacija što

5.7 Tunelski priključci TCR - Rijeka i Rijeka - TCR

Tunelskim priključcima (slike 16. i 17.) prometno se povezuje trgovačko-poslovni centar TCR s tunelom Pećine odnosno državnom cestom D404. Dva tunelska priključka (RI – TCR duljine 234 m i TCR – RI duljine



Slika 16. Priključak TCR – Rijeka (zapad), križanje dvotračnog i četvertračnog tunela

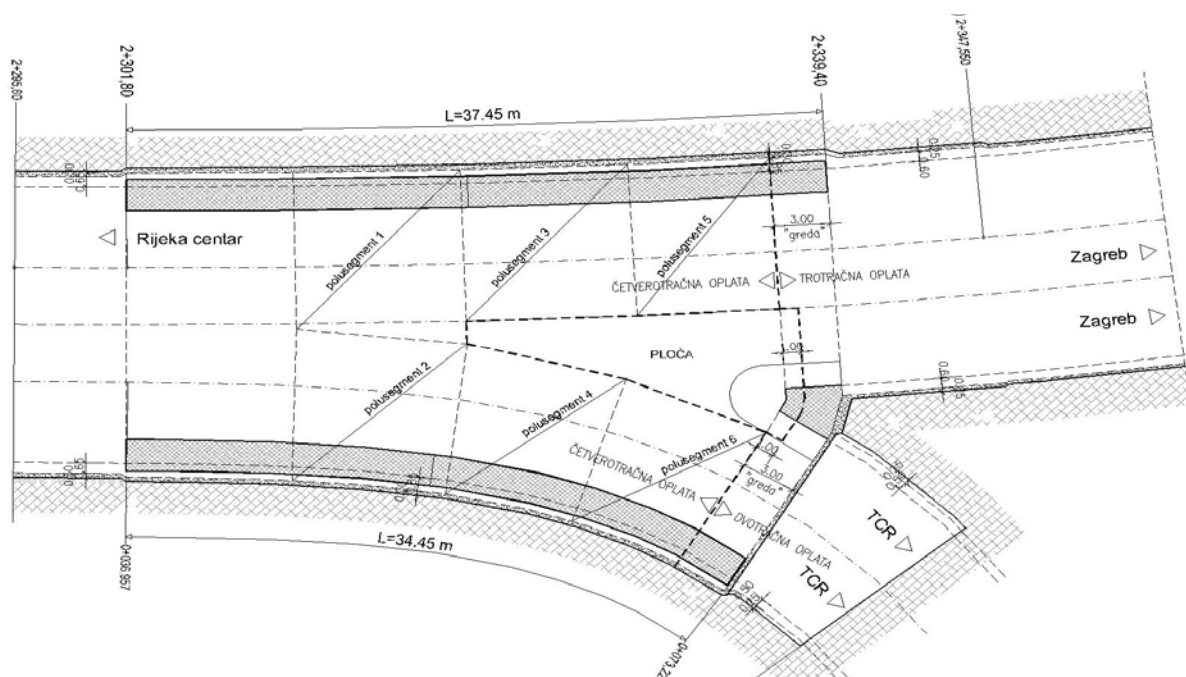


Slika 17. Priključak Rijeka – TCR (istok)

341 m) omogućuju prometnu vezu za smjerove iz Rijeke i prema Rijeci. Za smjerove iz čvora i prema čvoru Draga (smjerovi Zagreb i Split), koristit će se povratna petlja na kontejnerskom terminalu Brajdica. Tunelski su priključci jednosmjerni sa dva prometna traka (voznim i zaustavnim).

Dijelovi tunela u "račvama" predstavljaju mjesta odvojnica dvotračnih profila tunelskih priključaka TCR-a na mjestu četvertračnog profila (slike 18. i 19.). Osim veličine tunelskog otvora na tome mjestu (raspon iskopa do 28,35 m, visina 13,60 m, ploština iskopa do 310 m²),

osobitost je i način izvedbe sekundarne betonske obloge s obzirom na postupno proširenje profila po pravilu prijelaznice priključnog tunela, tj. svijetli se otvor tunela proširuje od četvertračne širine od 16,90 m na 24,80 m. Kako bi se izbjegla izrada unikatnih i vrlo skupih oplata posebno za svaki segment sekundarne obloge u račvama (ukupno šest različitih 3D oblika), razrađena je tehnologija betoniranja "polusegmenata" s pomoću postojeće oplata za četvertračni tunelski profil. U svakoj je račvi izvedeno 6 polusegmenata (polusvodova) sekundarne obloge tako da se obloga betonira od pasice do tjemena



Slika 18. Tlocrt priključka Rijeka – TCR (istok)



Slika 19. Iskop i podgrada u rači Rijeka – TCR (istok), lijevo – trotračni profil, desno – priprema za tunelski priključak Rijeka - TCR

oplate samo s jedne strane. Nakon betoniranja 3 lijeva i 3 desna segmenta, u tjemenu ostaje trapezna horizontalna ploča (dimenzija 17,70 m × 8,10 m) koja se zasebno betonira. Takav način rada zahtijevao je dodatno horizontalno učvršćenje jedne polovice oplata radi nesimetričnog opterećenja svježeg betona (konstrukcija tunelskih oplata predviđa simetrično ispunjavanje betonom s obje strane), te "ovješanje" polovice segmenta sekundarne obloge pošto se oplata ukloni, odnosno do vremena izvedbe druge polovice segmenta i horizontalne ploče u tjemenu. U tu svrhu ugrađene su dvije grupe posebnih stijenskih sidara koja prolaze kroz hidroizolacijsku foliju s posebnim rješenjem brtvljenja sidro - folija. Posebna grupa sidara služila je za učvršćenje oplata tijekom betoniranja, dok je druga grupa sidara "pridržavala"



Slika 20. Pogled na budući izlazni portal priključka Rijeka - TCR

betonski polusegment do konačnog zatvaranja "prstena" sekundarne obloge. Oplata se otpuštala te premještala nakon dostizanja marke betona MB-15, tj. otprilike 40 sati nakon završetka betoniranja.

5.8 Križanje trotračnog i četverotračnog tunela

Tunelski priključak TCR – Rijeka povezuje obodnu cestu TCR-a s tunelom Pećine. Radi nasuprotnih strana TCR-a i prometnog smjera prema Rijeci, te radi visinske razlike točaka koje povezuje, nastaje denivelirano križanje tunelskog priključka (dvotračni tunel) s tunelom Pećine (četverotračni tunel). Visina denivelacije (visinska razlika između tjemena tunela Pećine i priključka TCR – Rijeka) na mjestu križanja je 13,40 m.

5.9 Prolaz tunela pokraj građevne jame i tornja TCR-a

Na duljini od oko 330 m, te bočne udaljenosti od približno 15 m, trasa tunela Pećine sa svojim trotračnim i četverotračnim profilom prolazi pokraj građevne jame



Slika 21. Građevna jama TCR-a, pogled na pokos iza kojeg prolazi trasa tunela

(slika 22.), odnosno sada već završene građevine TCR. Visine pokosa iskopa građevne jame TCR-a uz rub kojim prolazi tunel Pećine iznose do 28 m na najvišem dijelu, nagib pokosa je vertikalno do 10:1. Na tom je dijelu nadsloj iznad tunela otprilike 23 m.

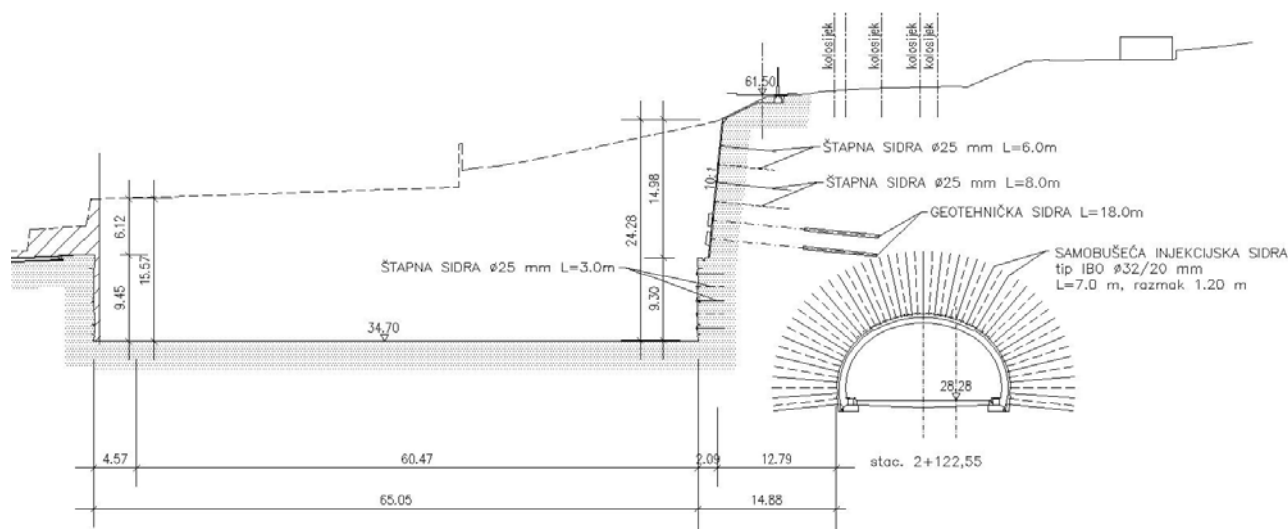


Slika 23. Tunel uz građevnu jamu TCR-a – sekundarna obloga

5.10 Prolaz tunela ispod željezničke pruge Rijeka - Zagreb

Trasa tunela Pećine sa svojim trotračnim i četverotračnim profilom, na duljini poteza od oko 710 m, prolazi paralelno i vertikalno ispod kolosijeka magistralne željezničke pruge Rijeka – Zagreb (slike 22. i 24.).

Visine nadsloja između tjemena tunela i kolosijeka kreću se od 25 – 32 m. Na tom dijelu grada nalazi se željeznička postaja Sušak s ranžirnim kolosijecima koji također prolaze neposredno iznad tunela.



Slika 22. Prolaz tunela pokraj građevne jame TCR i ispod kolosijeka željezničke pruge Rijeka - Zagreb



Slika 24. Označena trasa tunela ispod kolosijeka

5.11 Prolaz istočnoga portalnog dijela tunela kroz odlagalište ljevaoničkog otpada

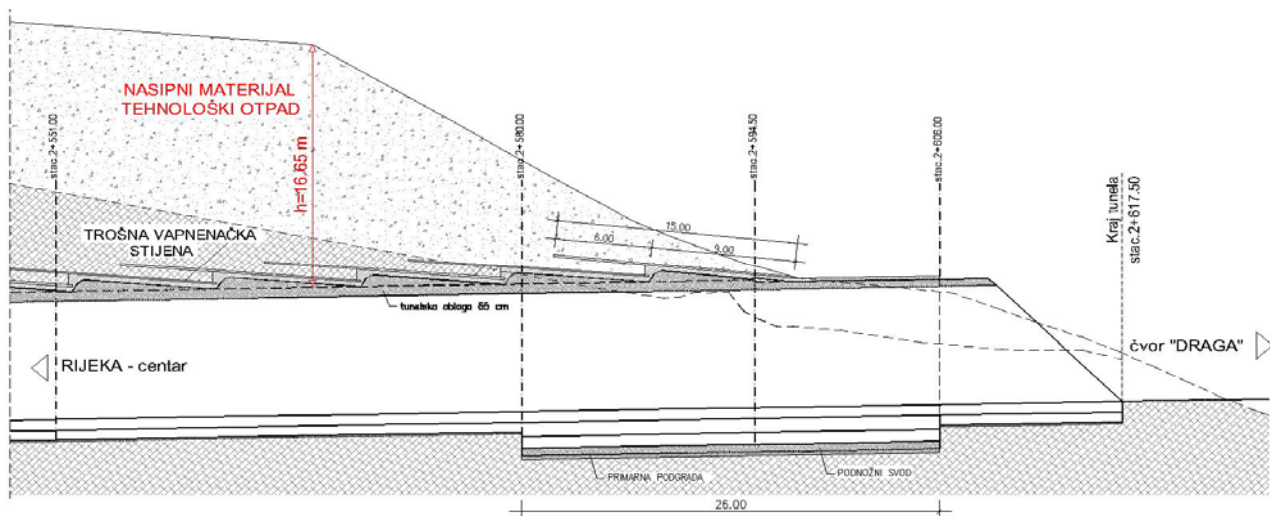
Na području izlaznog (istočnog) portala tunela nalazi se tvornica dizalica "Vulkan" te odlagalište ljevaoničkog otpada. Otpadni materijal koji se ovdje odlaže više od

ljevaoničkog otpada kretala se 2 – 18 m, dok je duljina tunela u području utjecaja odlagališta iznosila 60 m.



Slika 25. Istočni (izlazni) portal tunela

U okviru troškovnika građevinskih radova predviđeno je: tunelski iskop 176 000 m³, mlazni beton 12 000 m³, čelični elementi tunelske podgrade 1800 t, beton 37 000 m³, armatura za beton 2800 t.



Slika 26. Prolaz izlaznog portalnog dijela tunela kroz odlagalište ljevaoničkog otpada

50 godina sastoji se uglavnom od sitnog pijeska i blokova pješčanih kalupa za željezne odljevke te željeznog ljevaoničkog otpada raznih veličina do nekoliko stotina kilograma težine. U tehnološkom smislu izvođenja tunelske podgrade takav je materijal predstavljao značajan problem s obzirom da se zahvati na stabilizaciji tunelskog iskopa temelje na bušenju, ugradnji i injektiranju čeličnih elemenata (sidra, cijevni kišobran, konsolidacijsko injektiranje), što je ovdje bilo uvelike otežano i nezvjesno poradi nailaska bušaće šipke na komade željeznog otpada. Na potezu prolaska tunela visina nadsloja

6 Zaključak

Tunel Pećine zbog odnosa raspona tunelskih otvora i visine nadsloja iznad tunela pripada grupi "plitkih" tunela kod kojih nepredvidive strukturne osobine stijenske mase (za razliku od prosječnih parametara čvrstoće) mogu imati odlučujuću ulogu u redistribuciji primarnih geostatičkih naprezanja te time i u postizanju stabilnosti iskopanog otvora. Rezultati numeričkih proračuna, kao i empirijski pristup (RMR i Q-klasifikacija) osnovan na skupu kvantitativnih karakteristika stijenske mase, u tak-

vim okolnostima ne daje dovoljno sigurne rezultate u smislu određivanja i dimenzioniranja podgradnog sklopa. Problem naglašava prolaz ispod gradskog područja, veliki rasponi otvora i stijenska masa slabe kvalitete (zbog visokog stupnja okršenosti, u tunelu je bilo prisutno znatno procjeđivanje vode nakon kiše).

Nakon 23 mjeseca rada na iskopu i podgradi, tunel je uspješno probijen bez ijednoga nekontroliranog događaja. Međutim, tek nakon proboja slijedila je "najkritičnija" faza u izgradnji, a to su proširenja (iskop, podgrada) tunelskih profila na mjestima najvećih raspona – u računama tunelskih odvojaka s rasponima otvora više od 28 m. U sljedećih nekoliko mjeseci završeni su iskopi i

podgrada "račva", te je do dana pisanja ovog članka (veljača 2008.) izveden i veći dio (više od 70 %) sekundarne betonske obloge.

Na osnovi rezultata geotehničkih opažanja i mjerenja koja su se provodila tijekom izgradnje tunela Pećine, može se zaključiti da su pomaci izmjereni na podgradi, u stijenskoj masi (na rubu tunelskog otvora, u dubini stijene te na objektima na površini), bili u okvirima ili ispod predviđenih vrijednosti u geotehničkim proračunima i analizama, pa se time potvrdila uspješnost primijenjenih projektnih rješenja, tehnologije gradnje i mjera na stabilizaciji tunelskog otvora.

LITERATURA

- [1] Bieniawski, Z. T.: *Engineering rock mass classifications*. Wiley, New York, 1989
- [2] Barton, N. R.; Lien R.; Lunde J.: *Engineering classification of rock masses for design of tunnel support*. 1974.
- [3] Jašarević, I.; Kovačević, M. S.: *Rationalisation in the Design and Construction of Underground Structures*, 3th International Symposium on Tunnel Construction and Underground Structures, 26-28. September 1996, Ljubljana, Slovenia. 1997.
- [4] Kovačević, M. S.: *The Observational Method and the use of geotechnical measurements*. XIIIth ECSMGE, Prague, 25-28 August 2003, Prague, 575-582, 2003.
- [5] Kuželički, R.: *Primjena polinoma na ulazne parametre geomehničke klasifikacije*. Znanstveno-stručno savjetovanje MESTU 99, Zbornik radova, 1999.
- [6] Kuželički, R.; Lušo, P.; Lugomer, D.; Ružić, D.: *Sanacija uruška u tunelu "Sv. Kuzam". 4. Savjetovanje hrvatskog geotehničkog društva, Ojačanje tla i stijena, Zbornik radova, 2006.*
- [7] Stojković, B.: *Osiguranje stabilnosti primarne podgrade cestovnih tunela u sedimentnim stijenama*, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2005.