

Projektiranje cestovnih i željezničkih tunela

DANI PROMETNICA 2011

mr.sc. Ivan Mustapić, dipl.ing.građ.¹, Tanja Mikulić¹, Darko Šarić¹

¹ Institut IGH d.d., Zavod za projektiranje prometnica, Odjel za tunele
Janka Rakuše 1, 10000 Zagreb

1 Uvod



Slika 1. Željeznički tunel



Slika 2. Cestovni tunel

U ovom članku bit će izloženi neki od aspekata izrade građevinskih projekata tunela, i to prije svega cestovnih i željezničkih, a na primjerima iz prakse.

Postoji više definicija tunela, a jedna od najadekvatnijih je slijedeća: „Tunel je podzemna građevina ispod površine terena koja osigurava prostor za različite namjene i s jednim ili oba kraja izlazi na površinu.“ [1]

Važno je napomenuti da je izrada projektne dokumentacije bilo za cestovni, bilo za željeznički tunel multidisciplinarni zadatak i da pokriva veliki broj različitih tehničkih struka.

Danas su tuneli namijenjeni prometovanju vozila i vlakova izrazito složene građevine, prije svega u tehničkom i tehnološkom smislu. Povećanjem prometa, te civilizacijskih dosega, sigurnost prometovanja se diže na primjerenu i socijalno prihvatljivu razinu, tako da su sistemi i sustavi koji su u svrsi sigurnog odvijanja prometa sve prisutniji i sve obimniji u prometnim tunelima.

Nadalje, postoji i aspekt sigurnosti korisnika prometnih tunela u slučaju incidentne situacije, a koji je posebno naglašen nakon katastrofalnih požara što u cestovnim tunelima (Mont Blanc, Tauren, St.Gotthard) a što u željezničkim (La Mans).

Obzirom na sam izgled tunela kao specifičnog linijskog objekta, problematika zaštite od požara dolazi do značajnog izražaja.

I dalje postoji problematika same izvedbe tunela, koja napretkom tehnologije iskopa i izgradnje tunela postaje sve manje primarni faktor koji utječe na sam projekt tunela, no ipak je pri izradi građevinskog projekta tunela potrebno uvažavati i samu tehnologiju izvedbe tunela.

Građevinski projekt tunela ima zadatak osigurati prostor za sigurno odvijanje cestovnog/željezničkog prometa kao i za sve potrebne sisteme i sustave vezane uz pojedini vid prometa, te osigurati primjerenu sigurnost korisnika tunela kako u slučaju normalnog odvijanja prometa, tako i u slučaju incidentne situacije.

2 Zakonska regulativa

Postoji problematika domaće regulative koja pokriva područja projektiranja prometnih tunela. Tu se prije svega misli na aspekt sigurnosti korisnika tunela u slučaju incidente situacije. Nadalje, samo određeni segmenti pri izradi projekta tunela su definirani kroz opću regulativu (Zakon o gradnji i prostornom uređenju, Zakon o zaštiti od požara, Tehnički propis za betonske konstrukcije, itd.).

Obzirom da se domaća regulativa u većem dijelu može smatrati zastarjelom, pri izradi projekata tunela kako željezničkih, tako i cestovnih oslanjamo se na stranu regulativu, prije svega na Europske direktive i tehničke specifikacije za interoperabilnost koje daju samo osnovne smjernice i minimalne uvjete, te na austrijske smjernice za projektiranje tunela gdje su pojedini zahtjevi preciznije definirani.

2.1 Razvoj regulative za projektiranje cestovnih tunela

Dugo je vremena kao mjerodavni hrvatski propis za projektiranje i gradnju tunela važio „Pravilnik o tehničkim normativima i uvjetima za projektiranje i gradnju tunela na cestama“ iz 1973.[2] uz koji su korišteni i neki dijelovi opće tehničke regulative (Zakoni o gradnji, normizaciji, zaštiti od požara, zaštiti na radu...).

Kada je sredinom 90-ih godina započela izrada projektne dokumentacije za tunele, prije svega za Tunel Sveti Rok, ustanovljeno je da je gore navedena zakonska regulativa o projektiranju cestovnih tunela u Republici Hrvatskoj nepotpuna te s projektantskog gledišta nedovoljna, jer navedenim Pravilnikom nisu pokriveni svi aspekti pri projektiranju tunela.

Iz tog razloga, u Republici Hrvatskoj su kao zakonsko uporište, kako bi se omogućio normalan rad i usklađena međusobna suradnja projektanata i nadležnih institucija pri projektiranju i izvedbi cestovnih tunela, odabrane najsuvremenije austrijske smjernice za projektiranje tunela RVS [3] koje su važile kao mjerodavne u slučaju nepostojanja odgovarajućih hrvatskih propisa.

Radi se o rješenju koje je zadovoljavajuće za sve uključene u izradu i ovjeru projekata te za investitora (ujedno i upravitelja) tunela. S obzirom da se ipak radi o smjernicama a ne o zakonu, važno je napomenuti da je potreban legitimitet spomenutim smjernicama dat na način da je prilikom izdavanja lokacijskih dozvola u tzv. Posebnim uvjetima građenja iz područja zaštite od požara definirano da tuneli moraju biti projektirani sukladno austrijskim smjernicama RVS.

Nakon velikih nesreća uslijed požara u europskim tunelima regulativa unutar zemalja EU se mijenja u smjeru veće zaštite korisnika tunela, te je donesena je Direktiva 2004/54/EC Europskoga Parlamenta i

Vijeća od 29. travnja 2004. o najnižim sigurnosnim zahtjevima za tunele u Transeuropskoj cestovnoj mreži [4] s obaveznom primjenom iste na svim tunelima dužim od 500 metara u Transeuropskoj cestovnoj mreži za sve zemlje članice, čime su definirani sigurnosni standardi.

Glavni cilj Direktive je sprečavanje opasnih događaja u tunelu, te stvaranje preduvjeta da u slučaju nezgode ona rezultira što je moguće manjim posljedicama.

Iako Republika Hrvatska nije članica Europske Unije, od 2004. godine pri izradi projekta se vodi računa Direktivi 2004/54/EC te se projektna rješenja, pored RVS smjernica, nastoje uskladiti i sa njenim odredbama.

Naposljetku, važno je napomenuti da je u sklopu prilagodbe našeg zakonodavstva europskom donesen i hrvatski Pravilnik o minimalnim sigurnosnim zahtjevima za tunele [5] koji je usklađen sa Direktivom 2004/54/EC i koji stupa na snagu ulaskom Republike Hrvatske u Europsku Uniju.

Obzirom da je cestovni tunel sastavni dio određene ceste, nužno je pri projektiranju voditi računa o odredbama Pravilnika o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa [6].

2.2 Razvoj regulative za projektiranje željezničkih tunela

Projektiranje željezničkih tunela je u hrvatskom zakonodavstvu obuhvaćeno Pravilnikom o tehničkim normativima i uvjetima za projektiranje i gradnju željezničkih tunela, iz 1973 godine [7], te isti kao takav ne sagledava današnje aspekte odvijanja željezničkog prometa te ga se može smatrati zastarijelim i neadekvatnim. Nadalje, u aktualnoj regulativi tuneli se spominju u Pravilniku o tehničkim uvjetima za sigurnost željezničkog prometa kojima moraju udovoljavati željezničke pruge [8] i to kroz svega 7 članaka (Članak 70. do članak 76., dok se članak 77. odnosi na pružne zaštitne galerije). Navedenim Pravilnikom su definirani temeljni tehnički i sigurnosni zahtjevi za željezničke tunele, a u skladu sa važećom europskom regulativom. Stoga se pri izradi projektne dokumentacije za željezničke tunele koristimo „ODLUKOM EU KOMISIJE od 20. Prosinca 2007 god. Vezane za tehničke specifikacije za interoperabilnost (TSI) koje se odnose na sigurnost u željezničkim tunelima Transeuropskih konvencionalnih i vrlo brzih željezničkih sustava“ [9] kao temeljnim dokumentom koji definira minimalne sigurnosne zahtjeve za željezničke tunele u većem obimu nego gore navedeni Pravilnik. Tu je važno napomenuti da je citirani domaći Pravilnik usklađen sa tehničkim specifikacijama za interoperabilnost. Međutim, tu se pojavljuje istovjetni problem regulative kao i kod cestovnih tunela, a to je da tehničkim specifikacijama za interoperabilnost daju samo osnovne smjernice i minimalni uvjeti. Shodno tome, adekvatno primjeni regulative za cestovne tunele, za detaljniju razradu projektnih rješenja koriste se austrijske smjernice za projektiranje. Kao osnovna smjernica pri izradi projekta željezničkog tunela koriste se „Tehničke smjernice za projektiranje visoko frekventnih pruga“ austrijskih saveznih željeznica [10], a koje su izrađene na temelju Smjernica za projektiranje visoko frekventnih pruga (HL-RiL-2002i) uzimajući u obzir nove spoznaje.

Također, pri izradi projekta koriste se u određenim segmentima i preporuke UIC-e (The International Union of Railway) u dijelovima koji nisu u suprotnosti s prije navedenim dokumentima.

Nadalje, pojedina projektna rješenja se temelje i na Smjernicama Austrijskog vatrogasnog saveza za izgradnju i pogon novih željezničkih tunela na glavnim i sporednim kolosijecima, Zahtjevi u vezi zaštite od požara i katastrofa (izdanje 2000.).

Ovdje je potrebno napomenuti da je sam upravni postupak vezan za željezničke tunele u samom začetku, tako da nije još došlo do faze kao što je kod cestovnih tunela, da su sve mjerodavne

institucije u upravnom postupku prihvatile gore navedenu regulativu kao mjerodavnu. Oslanjajući se na iskustva iz cestovnih tunela, projektant i investitor su se dogovorno oslonili na važeću europsku regulativu te na najnoviju regulativu i smjernice koje se primjenjuju u Austriji pri izradi projekata željezničkih tunela a koje sa svojim vokacijom daju optimalna rješenja glede sigurnosti korisnika i ekonomskih efekta.

3 Polazni ulazni parametri za projektiranje prometnih tunela

Polazna osnova za projektiranje tunela je dobiveni **projektni zadatak** od strane investitora, a u kojemu su sadržani osnovni parametri prometnice na kojoj se tunel nalazi, te tip i namjena tunela. Isto tako, potrebno se pridržavati **rješenja i uvjeta iz projektne dokumentacije nižeg ranga** izrađene za predmetni tunel, koju je potrebno detaljnije razraditi. Obzirom da je tunel sastavni dio neke prometnice, potrebno je **uskладiti projekt tunela s projektom prometnice**.

Projektnim zadatkom definiran je tip i rang prometnice (autocesta, brza cesta, državna cesta, gradska prometnica, željezničke pruge od značaja za međunarodni promet, regionalni promet ili lokalni promet, te u tehnološkom pogledu željezničke pruge za velike brzine ili konvencionalne željezničke pruge ...) na kojoj se predmetni tunel nalazi, broj i širina kolnika/kolosjeka i njihovih prometnih traka (što utječe i na potreban broj tunelskih cijevi), te normalni poprečni profil prometnice i projektna brzina za tunel.

Osim navedenih osnovnih parametara, projektni zadatak može sadržavati i puno više elemenata i zahtjeva, ovisno o razini projekta (glavni, idejni, izvedbeni, studija...).

Predmetni projekt tunela mora biti u okvirima projektne dokumentacije niže razine za isti tunel (dakle, pri izradi npr. glavnog projekta za dobivanje građevinske dozvole mora se voditi računa o projektnom rješenju i posebnim uvjetima mjerodavnih institucija iz idejnog projekta za dobivanje lokacijske dozvole), odnosno s kojom mora biti usklađen.

Tunel mora biti projektiran na način da se uklapa u projekt prometnice, ali i obratno, zbog određenih specifičnosti vođenja trase u tunelu opravdano je mijenjati i projektne elemente prometnice u zoni tunela, što je posebno izraženo kod dugačkih tunela.

Kod kraćih tunela, gdje se tunel izvodi u svrhu savladavanja lokalne prepreke na trasi, tunel se prilagođava prometnici, dok se kod dugačkih tunela, tu se prije svega misli na bazne tunele, traži optimalni položaj tunela u planinskom masivu te se shodno njemu prilagođava trasa same prometnice. Kao primjer se može navesti tunel „Vinodol“ na željezničkoj pruzi visoke učinkovitosti Botovo – Zagreb – Rijeka. Prema prostornom planu nakon izlaska iz tunela Kapela 2 slijedi spuštanje prema Vinodolskoj dolini. Trasa prolazi sjeverno od naselja Ledenice i spušta se prema dolini nizom vijadukata i tunela. Samu dolinu i rijeku Dubračinu, te južne obronke Vinodolske doline prelazi se jako visokim (visina stupova do 250 m) i jako dugačkim vijaduktom duljine 8,2 km. Da bi se ostvario minimalan utjecaj pruge na štice i vrijedna područja Vinodolske doline te da bi se dobio optimalni prelazak trase Vinodolskom dolinom razmatrana je varijanta sa kraćim tunelom. Nakon sagledavanja geoloških uvjeta izgradnje tunela na sjevernom rubu Vinodolske doline koji su izuzetno nepovoljni, pokazalo se da je varijanta sa trasa gdje se nakon tehničke stanice „Ledenice“ ulazi u novi tunel dužine 9,3 km „Vinodol“ optimalna.

4 Odabir metode izgradnje prometnih tunela

Najvažnije obilježje za odabir tehnologije građenja, odnosno iskopa tunela, je geologija stijenske mase [11]. Karakteristika tunela je da, obzirom na svoj položaj i dužinu, prolaze uglavnom kroz planinske

masive promjenljivih makro i mikro strukturnih odnosno fizičko-mehaničkih svojstava, te je u takvim promjenljivim geološkim uvjetima općenito najpovoljnija uvijek moguća “klasična” tehnologija iskopa tunela bušenjem i miniranjem stijene (tzv. „drill and blast technique“), jer se u primjeni razmjerno lakše može prilagoditi neplaniranim promjenama predviđenih geoloških uvjeta podzemnog prostora kroz koji tunel prolazi [11]. Navedenom tehnologijom iskopa, baziranom na NATM-u (Nova austrijska tunelska metoda), iskopani su gotovo svi tuneli na cestama i autocestama u Republici Hrvatskoj.

Primjena metode iskopa tunela TBM (Tunnel Boring Machine – Tunelski bušači strojevi) do sada nije korištena na tunelima na autocesti, iz razloga relativno malih duljina tunela (do 6 km gdje je upitna isplativost takvog načina iskopa), fazne izgradnje dva najduža cestovna tunela (Sveti Rok i Mala Kapela), kao i same geološke strukture stjenske mase.

Nadalje, i novo projektirani željeznički tuneli koji bi svojom duljinom bili pogodni za takvu metodu iskopa, projektirani su na način da se iskop izvodi po načelima NATM-a, a prije svega zbog karakteristika stjenske mase kojima tunel prolazi. Uglavnom se radi o karbonatnim stijenama koje karakteriziraju veliki broj kastrifikacijskih objekata (špilja, dimnjaka) te učestala pojava da se između zona sa stjenskim materijalom nalaze zone ispunjene razlomljenim materijalom ili glinom. Kao ilustracija može poslužiti iskustvo sa iskopa Tunela Mala Kapela, gdje je prilikom iskopa bilo preko 80 sanacija razno raznih dimnjaka, špilja, i sličnih objekata, te gdje se prilikom iskopa dolazilo do učestalih lokalnih promjena stjenskog materijala kroz koji se tunel prolazio.

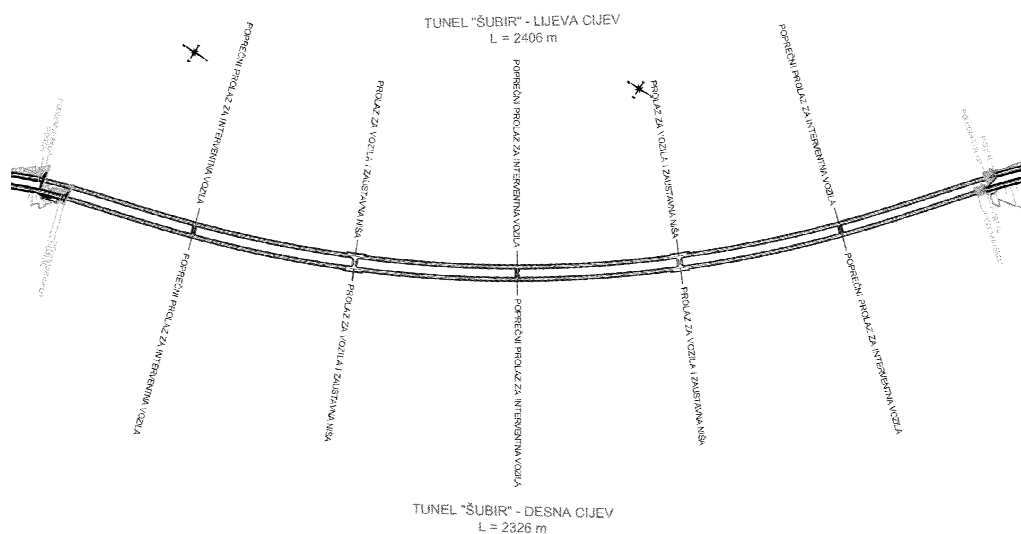
Kod malih visina nadsloja, koristi se tzv. “cut and cover” metoda izgradnje tunela, gdje se armiranobetonska tunelska cijev radi u otvorenom iskopu te ju se potom zatrpava.

Uspješno projektiranje tunela u velikoj mjeri ovisi o kvaliteti izvedenih geoloških i geotehničkih istražnih radova, čemu treba posvetiti naročitu pažnju. Kvalitetno provedenim istražnim radovima može se u zadovoljavajućoj mjeri prognozirati struktura stjenske mase, te eventualne pojave podzemnih voda i speleoloških objekata.

5 Projektiranje cestovnih tunela

Projektiranje cestovnih tunela ukratko će biti prikazano na praktičnom primjeru glavnog projekta tunela Šubir [12], koji se nalazi na autocesti A1, na dionici Ravča-Ploče.

Navedeni tunel je u prvobitnoj varijanti trebao prolaziti južnom padinom brda Šubir, duljina tunelskih cijevi 2326 m i 2406 m sa 5 poprečnih prolaza između tunelskih cijevi.



Slika 3. Situacija tunela Šubir [12]

Već ranije u ovom radu je navedeno da su projekti prometnih tunela **multidisciplinarni**, te se glavni projekt tunela Šubir sastojao od slijedećih projekata i elaborata:

- elaborat geotehničkih istražnih radova za tunel,
- glavni građevinski projekt tunela,
- glavni geotehnički projekt tunela,
- projekt hidrantske mreže tunela,
- razni elektrotehnički projekti tunela (napajanje, rezervno napajanje, cestovna rasvjeta prilaza tunelu, rasvjeta tunela, projekt razdjelnika tunela, projekt elektroventilacije tunela, projekt sustava radiodifuzije tunela, projekt sustava ozvučenja tunela, projekt vatrodajave i vatrozaštite tunela,
- strojarski projekt ventilacije tunela,
- prikaz mjera zaštite od požara sa analizama rizika,
- projekt prometne signalizacije i opreme tunela.

Geotehničkim projektom je definiran tip tunela u odnosu na ponašanje podzemnog otvora pri iskopu i stabilizaciji iskopa, izvršeno je zoniranje stijenske mase duž trase tunela na geotehničke jedinice za koje se projektne karakteristike stijenske mase mogu smatrati uniformnim, određivani su relevantni parametri svake geotehničke jedinice za potrebe rješavanja problema stabilizacije podzemnog iskopa, definirane su moguće tehnologije izvođenja, određeni su prognozni tipovi primarnih podgradnih sklopova, odnosno sve mjere na stabilizaciji iskopa tunela, definiran je program geotehničkog praćenja tunela tijekom izvedbe te je definiran program kontrole i osiguranja kvalitete.

S obzirom da se radi o opsežnom projektu koji zahtjeva specijalistička znanja o geotehnici podzemnih prostorija, geotehnički projekt je bio zasebna cijelina.

Glavnim građevinskim projektom je definiran je položaj tunela u odnosu na predmetnu prometnicu, mehanička stabilnost i otpornost konačne tunelske obloge, način izvedbe hidroizolacije tunela, odvodnja kako brdskih voda, tako i tekućina s kolnika uvažavajući protupožarnu zaštitu. Također, u Glavnom građevinskom projektu su prikazani svi elementi iskolčenja tunela (os, rubovi kolnika). Konačna obloga tunela je proračunata za predviđene slučajeve opterećenja u fazi eksploatacije, kao za slučajeve opterećenja u fazi izgradnje. Glavnim projektom je definirani smještaj svih potrebnih poprečnih prolaza između tunelskih cijevi, kao i njihov poprečni presjek i uklapanje u glavnu tunelsku cijev. Također, prikazane su i detaljno definirane i sve potrebne niše za zaustavljanje, SOS niše, hidrantske niše, niše za smještaj uređaja elektroinstalacija, mjesta ovješnja ventilatora, niše za trafostanice i smještaj UPS uređaja, niše za smještaj revizionih okna bočnih drenaža kao i ostali građevinski elementi unutar tunelske obloge vezani uz ugradnju opreme ili vezani uz sistem odvodnje tunela.

Iz gore navedenog razvidno je da su u glavnom građevinskom projektu tunela Šubir, kao i u svim ostalim projektima cestovnih tunela kao složenih građevina, obuhvaćeni elementi više usmjerenja građevinarstva, i to:

- prometnog usmjerenja – koje daje osnove tlocrtnog i visinskog trasiranja tunela, normalni poprečni profil tunelske cijevi, projektnu brzinu, bočnu preglednost i očekivano prometno opterećenje,
- konstruktorskog usmjerenja – koje daje proračun i projekt sekundarne betonske obloge i armature u tunelu te portalnih građevina,
- hidrotehničkog usmjerenja – koje daje hidraulički proračun i projekt odvodnje u tunelu kao i projekt hidrantske mreže te projekte drenaže tunela i vanjskih obodnih jaraka iznad čela predusjeka,

U ovom radu će poseban naglasak biti dan na prometno projektiranje tunela Šubir dok će ostali gore navedeni elementi biti opisani samo u osnovnim crtama.

5.1 Projektni parametri tunela Šubir

5.1.1 Projektna brzina

Projektni elementi autoceste u području tunela Šubir određeni su za računsku brzinu od 100 km/h, što je u skladu s austrijskim smjernicama RVS [3] i novim hrvatskim Pravilnikom iz 2009. [5] gdje je propisano da je najveća dopuštena brzina vožnje u tunelu (koja je ujedno i projektna brzina za tunele):

- 100 km/h, u tunelu s jednosmjernim prometom,
- 80 km/h, u tunelu s dvosmjernim prometom.

Kao što se vidi, u tunelu su propisane manje brzine vožnje nego na otvorenom dijelu autoceste, a to ograničenje je zadano zbog veće sigurnosti prometa u tunelu.

Navedene projektne brzine su polazište za definiranje normalnog poprečnog profila tunelske cijevi i određenih tlocrtnih elemenata trase u tunelu.

5.1.2 Broj tunelskih cijevi

Budući da se tunel Šubir nalazi na autocesti A1, za koju je prognozirano odgovarajuće prometno opterećenje (sa izraženijim sezonskim prometnim opterećenjem – PLDP), predviđen je kao dvocijevni tunel, gdje bi se obje tunelske cijevi izvodile istovremeno, što je u skladu s EU Direktivom 2004/54/EC [4] i hrvatskim Pravilnikom [5] gdje je propisano da broj tunelskih cijevi ovisi o:

- očekivanom prometnom opterećenju, pri čemu je potrebno uzeti u obzir i udio teških teretnih vozila,
- stupnju sigurnosti prometa,
- uzdužnom nagibu,
- duljini tunelskih cijevi.

Za tunele, kod kojih će očekivano prometno opterećenje biti veće od 10.000 vozila po prometnoj traci na dan u prognostičkom razdoblju od 15 godina, mora se planirati izgradnja dvije tunelske cijevi s jednosmjernim prometom.

Za prometna opterećenja manja od gore navedenog prihvatljiva je i izgradnja jedne tunelske cijevi za dvosmjerni promet (i na autocestama), ali pri tome moraju biti primjenjena određena rješenja u pogledu sigurnosti u tunelu (evakuacijski izlazi, smanjena brzina vožnje, odgovarajući tip ventilacije...).

U pravilu, broj prometnih traka, osim zaustavne trake kod autocesta, mora u tunelu i izvan tunela biti isti. Svaka izmjena broja traka mora se provesti na dovoljno sigurnoj udaljenosti ispred portala tunela. Kod kraćih tunela na autocestama (do 200 m duljine) preporučljivo je, prema RVS-u [3], izvoditi zaustavni trak i u tunelu, no kod tunela Šubir to nije bio slučaj, obzirom na njegovu duljinu.

5.1.3 Elementi horizontalnog vođenja trase u tunelu

Tuneli Šubir, koji se nalazi na autocesti, je projektiran kao dvocijevni tunel gdje se u svakoj tunelskoj cijevi odvija jednosmjerni promet po dva prometna traka.

Tunelske cijevi tunela Šubir međusobno su odmaknute sa minimalnim osnim razmakom na početku i na kraju tunela od 26 m, a kako bi se izbjegao utjecaj pojedinog podzemnog otvora cijevi na drugi. Uobičajeni razmak ovisno od geoloških prilika se kreće između 1,5 do 3,5 širina otvora.

Tunelske cijevi se tlocrtno nalaze u prijelaznicama i kružnim krivinama, jer je preporučljivo ulazne i izlazne dijelove duljih tunela izvesti u krivini (zbog efekta tzv. „svijetle točke“).

S druge strane, kraće tunele (duljine do 200 m) je preporučljivo izvoditi isključivo u pravcu.

U tunelu Šubir je osigurana odgovarajuća duljina preglednosti, koja ovisi o projektnoj brzini, uzdužnom nagibu kolnika u tunelu i normalnom poprečnom profilu tunelske cijevi, sukladno Pravilniku za projektiranje cesta [6]. Kako na otvorenoj trasi autoceste taj problem i nije izražen (zaustavni trak uglavnom osigurava zaustavnu bočnu preglednost) taj element pri vođenju trase u području tunela se ne smije zanemariti s obzirom da se u pravilu ne izvodi zaustavna traka u tunelima.

5.1.4 Elementi vertikalnog vođenja trase u tunelu

Nivelete kolnika tunela "Šubir" zbog horizontalnog odmaka trase vode se neovisno jedna o drugoj. Obje tunelske cijevi nalaze se u vertikalnoj krivini, odn. niveleta obaju tunelskih cijevi ima dvostrešan uzdužni nagib, i to 2,5% s ulazne te 1,0% s izlazne strane.

Navedeno rješenje u potpunosti je u skladu s svim odredbama i preporukama, jer je prema EU Direktivi 2004/54/EC i hrvatskom Pravilniku najveći dozvoljeni uzdužni nagib nivelete kolnika u tunelu je 5%, osim ako zbog zemljopisnih uvjeta nije moguće drugo rješenje.

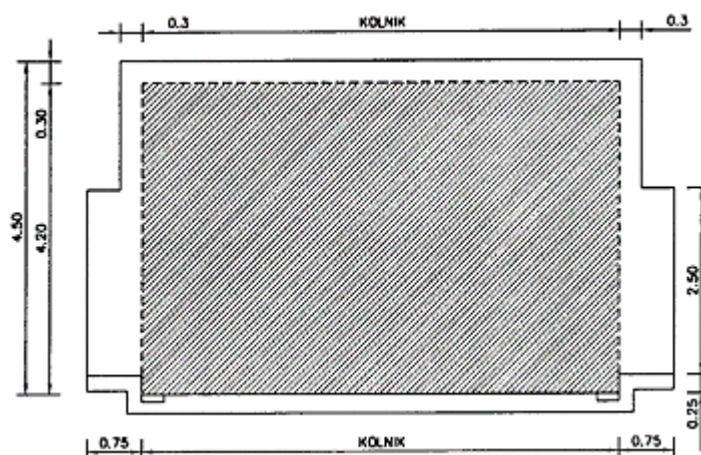
Za dulje tunele, kakav je Šubir, preporučljivo je da uzdužni nagib nivelete kolnika u tunelu ne prelazi iznad 3%, jer se inače moraju se poduzeti dodatne i/ili pojačane mjere da bi se povećala sigurnost, temeljene na analizi rizika, sukladno gore navedenim pravilnicima, a isto tako je kod duljih tunela preporučljivo (iz razloga lakše izgradnje i odvodnje podzemnih voda iz tunela) projektirati niveletu tunela u dvostranom, konveksnom, uzdužnom nagibu, što je ovdje slučaj.

Ako je moguće, uzdužni nagib kod duljih tunela ne bi trebao prelaziti više od 1,5% zbog povećanja pogonskih troškova tunelske opreme.

Najmanji dozvoljeni uzdužni nagib nivelete kolnika u tunelu je 0,5%, iz razloga odvodnje tunela.

5.1.5 Normalni poprečni profil tunelske cijevi

Poprečni presjek tunela Šubir svijetlog je otvora 56,17 m² te zadovoljava zahtjeve za slobodni profil definiran Pravilnikom za projektiranje cesta [6], te zahtjeve za slobodni profil definiran prema austrijskim smjernicama RVS [3]. Također, navedeni poprečni presjek omogućava smještaj svih potrebnih uređaja i opreme, te odgovarajući sistem provjetravanja. Poprečni presjek je odabran za brzinu od 100 km/h.



Slika 4. Prometni i slobodni profil u tunelu [6]

Širina prometnih traka u tunelu Šubir je 3,50 m, a širina rubnih traka 0,35 m. Budući da su širine prometnih traka u tunelu projektirane za brzinu od 100 km/h, kolnik u tunelu je uži nego na otvorenom dijelu trase autoceste (koji se odabran za projektnu brzinu od 120 km/h).

Isto tako, i širine rubnih traka u tunelu su manje nego na otvorenom dijelu autoceste, što je u skladu s hrvatskim Pravilnikom [5] koji propisuje najmanju dozvoljenu širinu rubnog traka u tunelu od 0,25 m.

Poprečni nagib kolnika u tunelu Šubir je jednostrešan, sa konstantnim nagibom od 2,5% (osim u zoni vitoperenja kolnika), što je rješenje propisano još starim Pravilnikom [2] koji navodi da poprečni nagibi kolnika u tunelima trebaju biti jednostrešni, u rasponu od 1,5% do 5%.

U tunelu Šubir su predviđene revizione staze s obje strane kolnika, minimalne širine 85 cm koje moraju biti uzdignute od prometne površine tunela za najmanje 15 cm, sukladno hrvatskom Pravilniku [5]. Ispod revizionih staza su smješteni instalacijski kanali za potrebnu opremu tunela.

Ovisno o karakteristikama stijenske mase kroz koju tunel prolazi tunelska cijev se izvodi sa ili bez podnožnog svoda.

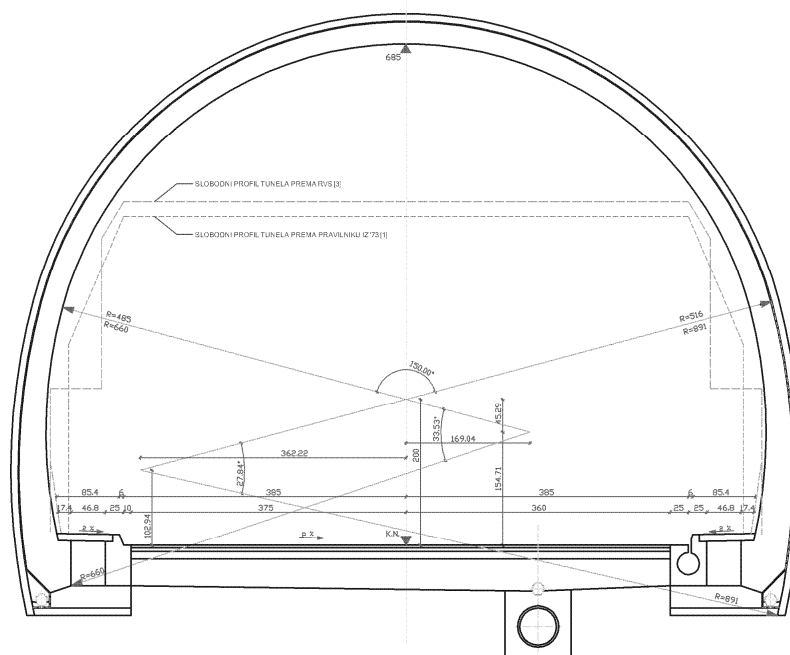
Prilikom projektiranja tunela Šubir, kao i pri projektiranju tunela uopće, primijenjeni su zaobljeni poprečni presjeci tunelske cijevi iz razloga stabilnosti iskopa, jer su najpovoljniji u smislu preuzimanja brdskih pritisaka.

Geometrijski su i unutarnja (intrados) i vanjska (ekstrados) ljuska tunela sastavljena od kružnih lukova, gdje je omjer radijusa uzastopnih kružnih lukova ≤ 5 , sukladno smjernicama RVS [3].

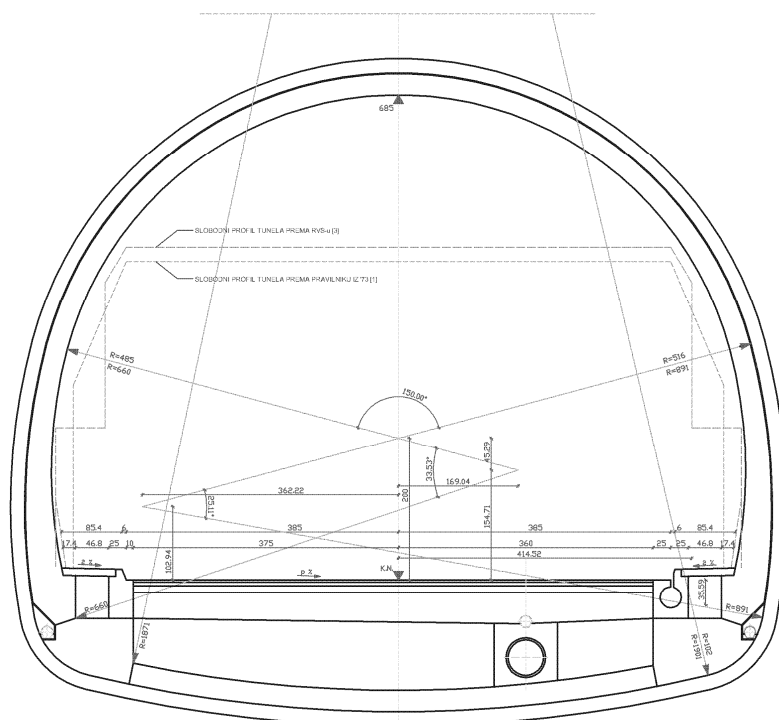
Geometrija intradosa poprečnog presjeka prilagođena je gabaritu slobodnog profila za maksimalni dopušteni poprečni nagib kolnika u tunelu.

Dakle, projektirani poprečni presjek tunelske cijevi mora zadovoljiti gore navedene 2 grupe zahtjeva:

- prometno-instalacijske – u smislu zadovoljenja slobodnog profila,
- geološko-statičke – u smislu ispunjenja uvjeta stabilnosti podzemnog iskopa.



Slika 5. Normalni poprečni presjek tunelske cijevi bez podnožnog svoda, za brzinu 100 km/h [12]



Slika 6. Normalni poprečni presjek tunelske cijevi s podnožnim svodom, za brzinu 100 km/h [12]

Obloga tunela Šubir se izvodi od betona klase C 25/30 debljine 30 cm i u pravilu je nearmirana, osim na mjestima niša, dok se u zonama V kategorije stijenske mase, na mjestima zaustavnih površina, u području spojeva sa poprečnim prolazima i u zonama portala obloga izvodi od betona klase C 30/37 te je armirana.

5.1.6 Odvodnja u tunelu

Odvodnja kolnika tunela Šubir vrši se sistemom šupljeg rubnjaka koji skuplja vodu s površine kolnika i preko sifonskih ispusta pomoću poprečnih PVC cijevi odvodi ju dalje do revizijskih okana kanalizacije od PVC cijevi položenih u betonskoj oblozi. Na bokovima tunela postavljaju se drenažne cijevi za prikupljanje brdskih voda i njihovo odvođenje u centralnu kanalizaciju. Prema austrijskim smjernicama RVS [3] u cestovnim tunelima se zahtijeva sustav odvodnje kolnika koji osigurava odvodnju dotoka incidente tekućine od 200 l/s na dužini kolnika od 200 m. Sifonski ispusti se rade sa potopljenom pregradom kako bi se spriječilo širenje vatre kanalizacijom.

Ovakvo rješenje, gdje se brdske i kolničke vode zajedno prikupljaju u centralnu kanalizaciju, je prihvatljivo kod očekivanih manjih dotoka brdskih i kolničkih voda.

U slučajevima očekivanih većih dotoka brdskih voda i vođenja tranzitnog kolektora kroz tunel potrebno je odvojeno voditi brdske vode, koje se ispuštaju u teren na nižem portalu, i kolničke vode koje se odvođe putem centralne kanalizacije.

5.1.7 Sigurnost u tunelu

Ključni čimbenici sigurnosti u tunelu su tunelska ventilacija i mogućnosti evakuacije i intervencije u slučaju nesreća.

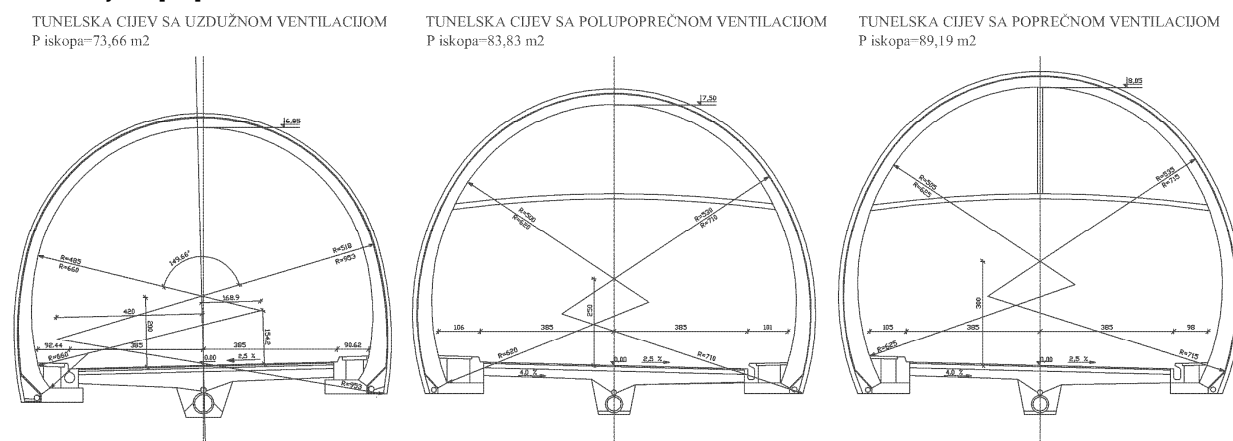
Budući da tunel Šubir spada u dugačke tunele (obje tunelske cijevi su dulje od 2000 m), nije dozvoljeno koristiti prirodno provjetranje, nego je prema Eu Direktivi 2004/54/EC [4] i hrvatskom Pravilniku [5] nužna primjena mehaničke ventilacije. Odabrana je uzdužna ventilacija kao

najekonomičnije rješenje ventiliranja tunela [13]. Ista ne zahtijeva dodatne građevinske radove, posebne strojarnice, te je u redovitoj eksploataciji tunela najekonomičnija, a u slučaju požara može se izvršiti potrebno odimljavanje.

Osim uzdužne ventilacije, postoje još 2 tipa mehaničke ventilacije tunela:

Polupoprečna ventilacija, koja se bazira na kanalu kojim se dovodi svježi zrak u tunel, dok se kroz sami tunel istiskuje zagađeni. Ovaj tip ventilacije zahtijeva dodatne radove na iskopu te određene građevinske radove unutar samog tunela. Povećanje troškova izgradnje tunela sa polupoprečnom ventilacijom može biti do 25 % u odnosu na troškove izgradnje tunela s uzdužnom ventilacijom [13].

Poprečna ventilacija, koja se bazira na kanalima za dovod nezagađenog zraka i za odvod zagađenog. Izgradnja navedenih kanala zahtijeva velike građevinske radove u smislu većeg iskopa, te izrade kanala istih uvjeta kao za sistem polupoprečne ventilacije. Povećanje troškova izgradnje tunela sa poprečnom ventilacijom može biti do 35-40 % u odnosu na troškove izgradnje tunela s uzdužnom ventilacijom [13].



Slika 7. Normalni poprečni presjeci tunelskih cijevi ovisno o tipu ventilacije [13]

Odabir tipa mehaničke tunelske ventilacije ovisi o prometnom opterećenju, odvijanju prometa u tunelskoj cijevi (jednosmjerni ili dvosmjerni), ekonomičnosti i sigurnosnim čimbenicima [14].

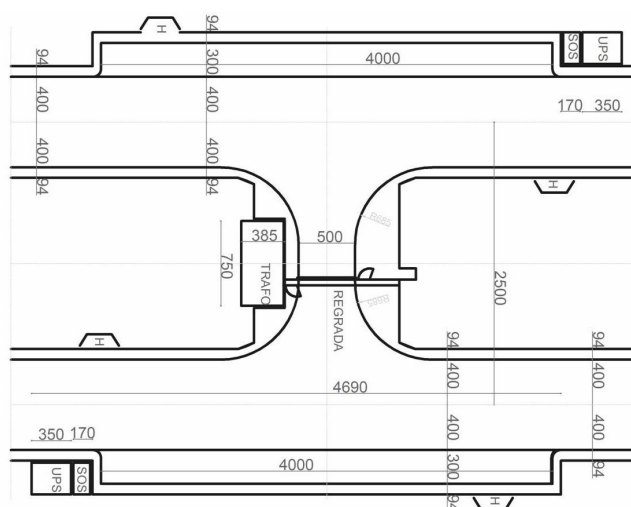
Značajni čimbenici zaštite korisnika tunela u slučaju požara osim ventilacije su i mogućnost evakuacije ugroženih osoba sa incidentnog mjesta te mogućnost pristupa spasilačkim službama lokaciji incidenta. U tu svrhu u tunelu Šubir je predviđeno 5 poprečnih prolaza između tunelskih cijevi, od kojih su 2 prolazi za vozila s zaustavnim nišama, a 3 su prolazi za interventna vozila. Navedeno rješenje je u skladu sa svom suvremenom tunelskom regulativom.

Prema hrvatskom Pravilniku [5] postoji 5 tipova tih evakuacijsko-intervencijskih puteva:

- direktni izlazi iz tunela u vanjski prostor,
- poprečni spojevi između tunelskih cijevi,
- izlazi na galeriju za slučaj nužde,
- poprečni izlazi u servisnu cijev (servisna tunelska cijev je pomoćna tunelska cijev koja može poslužiti i za evakuaciju korisnika glavne tunelske cijevi u slučaju požara ili nezgode, te isto tako omogućava pristup interventnim vozilima do glavne cijevi),
- skloništa s izlaznim putem na siguran prostor koji je odvojen od tunelske cijevi.

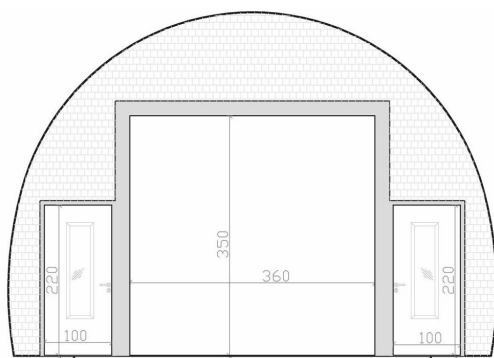
Poprečni prolazi između tunelskih cijevi tunela Šubir isprojektirani su po dimenzijama i na razmacima definiranim austrijskim smjernicama RVS [3]:

- poprečni prolazi s mogućnošću prolaska vozila, smještaju se pri svakoj zaustavnoj niši (koje su na razmaku svakih 1000 m),
- poprečni prolazi s mogućnošću prolaska interventnih vozila, raspoređuju se na međusobnoj udaljenosti svake druge niše za poziv u slučaju nužde (koje su na razmaku 250 m, dakle navedeni poprečni prolaz treba rasporediti na svakih 500 m),
- poprečni prolazi s mogućnošću prolaska pješaka, raspoređuju se na razmacima od 250 m (razmak niša za poziv u slučaju nužde) kod tunela bez prozračivanja dima od požara ili kod tunela s uzdužnim nagibom $> 3\%$. Ovaj tip prolaza nije korišten u tunelu Šubir zbog toga što je u tunelu predviđena mehanička ventilacija i najveći uzdužni nagib kolnika je $2,5\%$.

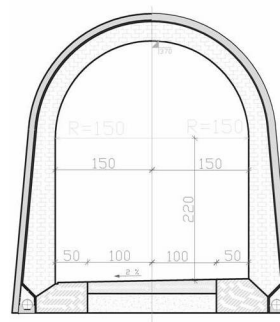


Slika 8. Tlocrt zaustavnih niša i poprečnog prolaza za vozila s trafostanicom [15]

U tunelu su predviđene 4 zaustavne niše površine dužine 40 m i širine 3 m, koje su postavljene na maksimalnom razmaku od 850 m. Služe za zaustavljanje vozila koje je u kvaru, te su, u tu svrhu, opremljene SOS uređajima. Osim toga, u svakoj zaustavnoj niši predviđen je prostor za smještaj elektro-opreme i hidranta.



Slika 9. Poprečni prolaz za interventna vozila [15]



Slika 10. Poprečni prolaz za pješake [15]

5.1.8 Portalne građevine i uklapanje u okoliš

Portali tunela Šubir se izvode u otvorenom iskopu, kao izvučene armiranobetonske građevine iz tunelske cijevi.

Svojim rješenjem moraju udovoljavati terenskim uvjetima, estetskim zahtjevima, sigurnosti prometa kao i zahtjevu minimalne devastacije terena uz što bolje uklapanje u okoliš. Takvo kompleksno sagledavanje problema daje raznolikost u pristupu rješavanja i mogućnostima oblikovanja portala i portalnih zona.

Pristupna zona tunelu (tunelski predusjek) treba minimalno zadirati u krajobraz, te su moguća dva suprotna pristupa projektiranju istog [16]:

- pristupna zona tunelu integrirana u postojeći krajobraz,
- pristupna zona tunelu koja sadrži pozitivni vizualni kontrast u odnosu na krajobraz.

U našoj projektantskoj praksi uglavnom se koristi prvi princip, integriranje s postojećim okolišom. U svrhu što manje devastacije okoliša nastoji se izvoditi čim manje tunelske predusjeke, što se postiže ulaskom u podzemni iskop sa najmanjom mogućim visinom nadsloja. Preporučljivo je, iz razloga stabilnosti stijenskih blokova u nadsloju, kao donju granicu visine nadsloja uzeti minimalno 4,0 m.

Ovisno o terenu, koriste se dva osnovna načina uređenja čela tunelskih predusjeka:

- zasipavanje portalnih građevina materijalom iz iskopa i zatravljanjem (uglavnom u travnatim terenima), slika 11.
- obloga čela predusjeka lomljenim kamenom (uglavnom u krševitim, kamenitim terenima), što je predviđeno kod tunela Šubir, slika 12.



Slika 11. Zasuta i zatravljena portalna građevina



Slika 12. Čelo predusjeka obloženo kamenom oblogom

5.1.9 Interakcija s projektantima tunelske opreme

Budući da se u cestovne tunele, posebice u one duže od 500 m, ugrađuje velika količina razne tunelske opreme (elektro, strojarska, prometna, komunikacijska, rasvjetna, protupožarna, hidrantska...) nužno je predvidjeti kvalitetan i siguran raspored iste, uvažavajući mjerodavnu regulativu i pravila različitih struka instalatera tunelske opreme, a istovremeno osiguravajući adekvatnu funkcionalnost, sigurnost i ekonomičnost cestovnog tunela kao cjeline.

Iz tog razloga nužno je prilikom projektiranja tunela interaktivno raditi s svim ostalim projektantima uključenim u izradu projekta cestovnog tunela.

5.1.10 Promjene projekta prije i tokom izgradnje tunela

Investitorovom odlukom, iz razloga smanjenja troškova, glavni projekt tunela Šubir je promijenjen na način da tunel sada prolazi sjevernom padinom istog brda, ali sa znatno kraćim tunelskim cijevima, duljina 962 m i 825 m sa 1 poprečnim prolazom između tunelskih cijevi [17].

Obzirom na sasvim ispravnu konstataciju da „u nijednoj grani graditeljstva ne postoje veće i izrazitije nesigurnosti kao u tunelogradnji i to po svim čimbenicima koji čine temeljna obilježja i nastojanja građenja općenito, a posebice se to odnosi na gradnju dugačkih tunela ispod razmjerno visokih planinskih masiva“ [18], na ovom primjeru iz prakse vidi se s čime se sve moguće susresti pri projektiranju i izvođenju tunela.

Problem sa novom, sjevernom, trasom tunela pojavio se u vidu puno lošije „stijenske“ mase na ulaznom dijelu tunela, koji se nalazi u zoni flišnih naslaga s pojavom podzemnih voda. Obzirom na vrlo loš materijal kroz koji tunel prolazi u toj zoni, potrebno je koristiti specifičnu tehnologiju iskopa pod tzv. „cijevnim kišobranom“ (eng. „pipe-roof“) koja znatno poskupljuje radove. Za staru, južnu, trasu tunela nije bio prognoziran tako loš materijal i ne bi bila nužna ta tehnologija iskopa tunela.

U dijelu tunela s boljom stijenskom masom pojavio se jedan speleološki objekt (špilja) većih dimenzija koju je trebalo na adekvatan način sanirati.

Isto tako, promjenom trase tunela i zahtjevom investitora da tunel ne bude dulji od 1000 m, znatno je povećan ulazni predusjek tunela, koji sada ima 5 pokosa (koje je sve potrebno osigurati) i 4 berme na lijevoj (sjevernoj) strani i gdje je potrebno iskopati cca. 100.000 m³ sraslog materijala [17].

Povrh svega, po zahtjevu investitora, a nakon već izvršenog iskopa i podgrađivanja desne tunelske cijevi, izveden je vatrogasni prijelaz iznad desne tunelske cijevi (u usjeku) i sa „lažnim tunelom“ iznad lijevog kolnika autoceste, a ispred lijevog portala.

Navedene nepredvidivosti, što geološke a što od strane investitora, česta su pojava u fazi projektiranja i izgradnje jednog tunela te su „nažalost“ sastavni dio tog procesa.

6 Projektiranje željezničkih tunela

6.1 Koncept tunela

Kod projektiranja željezničkih tunela prvi korak je odabir koncepcije tunela. U odnosu na cestovne tunele gdje je odabir koncepta poprilično definiran zakonskom regulativom odabir koncepta željezničkih tunela ovisi o zahtjevima investitora i odluci projektanta. Odabir koncepta tunela zasniva se na kriterijima poput operabilnosti, sigurnosti i cijene investicije. Također bitan kriterij kod odabira je i duljina tunela te način evakuacije u slučaju incidenta.

Željeznički tuneli se obzirom na svoju duljinu dijele na:

- Kratke, duljine do 500 m
- Srednje duge, duljine do 1000 m
- Duge, duljine do 20 000 m
- Vrlo duge, duljine preko 20 000 m [9]

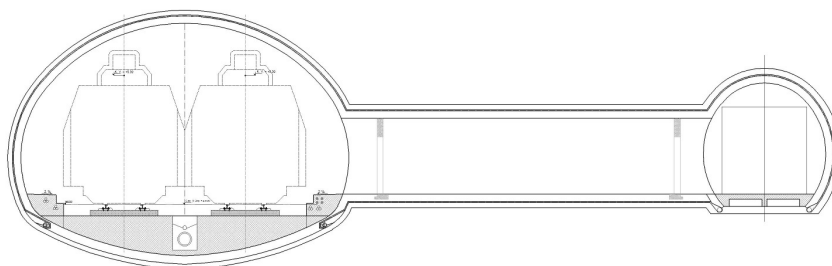
6.1.1 Dvokolosiječne pruge

Odabir koncepta dvokolosiječne pruge bit će prikazan na primjeru željezničke pruge od značaja za međunarodni promet „Državna granica – Zagreb – Rijeka“, poddionica Skradnik – Ledenice na kojoj se nalazi 5 tunela.

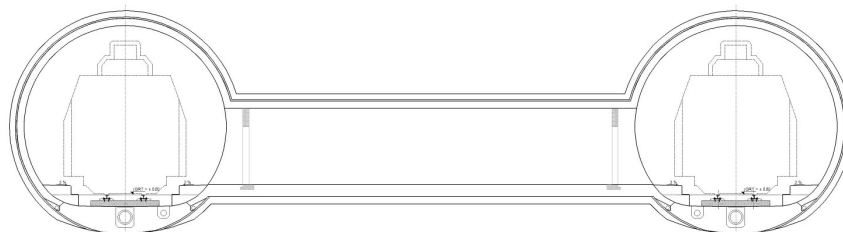
Mogući koncepti tunela za dvokolosiječne pruge su:

- Dvokolosiječna tunelska cijev sa servisnim tunelom
- Dva jednokolsiječna tunela sa servisnim tunelom
- Dva jednokolsiječna tunela bez servisnog tunela

Prilikom izrade idejnog projekta tunela na toj željezničkoj pruzi visoke učinkovitosti razmatrana su dva koncepta prikazana na slikama.



Slika 13. Dvokolosiječna tunelska cijev sa servisnim tunelom, [21]



Slika 14. Dva jednokolsiječna tunela bez servisnog tunela povezani poprečnim prolazom, [21]

Koncepcija sa dvije jednokolosiječne tunelske cijevi za duže tunele (Kapela 1 duljine 9 290 m i Kapela 2 duljine 14 428 m), iako ima svojih prednosti i nedostataka, je odabrana prije svega iz sigurnosnih razloga, kao i nakon tehničko ekonomske analize. Kod tunela Burnjak, duljine 1 530 m i Veljun, duljine 2 965 m koji ne spadaju u duge tunele primijenit će se isti koncept jer zahtjevani geometrijski elementi unutar tunela (minimalni radijus uvjetovan je nepostojanjem nadvišenja kolosiječne konstrukcije) i neposredna blizina drugih objekata onemogućavaju približavanje osi kolosijeka na osni razmak potreban za izvedbu dvokolosiječnog tunela. Tunel Treskavac koji je najkraći, duljine 395 m, i nalazi se na početku dionice projektiran je kao dvokolosiječan tunel.

Izrada jednocijevnog dvokolosiječnog tunela te dužine zahtijevala bi izradu i servisnog tunela. Kako je servisni tunel manjih dimenzija pri samom izvođenja radova na tunelu bio bi tehnološki zahtjevan, te je sa strane tehnologije izvođenja prihvatljivije izvoditi dva paralelna tunela većeg poprečnog presjeka gdje se iskopom poprečnih prolaza ostvaruje komunikacija između pojedinih napadnih mjesta prilikom iskopa glavnih cijevi, a što bitno pojednostavljuje i pojeftinjuje izvođenje radova.

Što se samih sigurnosnih razloga tiče u slučaju incidenta u jednoj tunelskoj cijevi druga uvijek služi kao sigurnosni prostor za spašavanje. Glavne tunelske cijevi su povezane poprečnim prolazima na svakih maksimalno 500 metara, te omogućuju evakuaciju korisnika iz ugrožene tunelske cijevi kao i pristup interventnih službi samom mjestu incidenta.

Nadalje, kako zbog sigurnosnih razloga nije preporučljivo da se u tunelu istovremeno nalaze putnički i teretni vlakovi došlo bi do ograničavanja kapaciteta pruge za slučaj izvedbe jedne cijevi sa dva kolosijeka.

Prednost koncepta sa dvije jednokolosiječne tunelske cijevi je i mogućnost održavanja jedne tunelske cijevi dok je druga u funkciji i na taj način se ne smanjuje kapacitet pruge.

6.1.2 Jednokolosiječne pruge

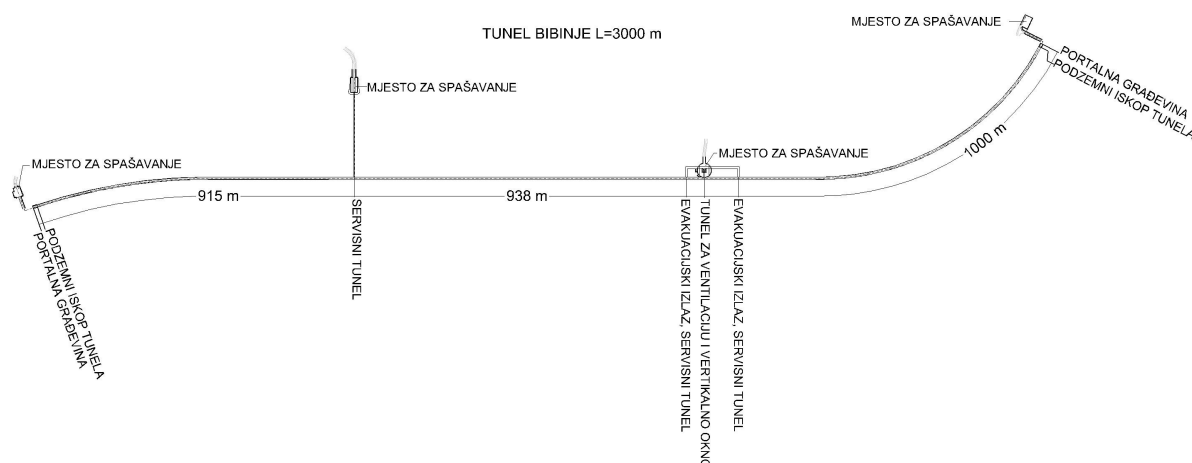
Odabir koncepta jednokolosiječne pruge bit će prikazan na primjeru tunela Bibinje koji se nalazi na željezničkoj zaobilaznici naselja Bibinje.

Ukoliko se radi o jednokolosiječnoj pruzi postoje dva osnovna konceptijska rješenja:

- Jednokolosiječni tunel sa paralelnim servisnim tunelom,
- Jednokolosiječni tunel sa evakuacijskim oknima.

Zadnji od ova dva koncepta primijenjen je na tunelu Bibinje duljine 3000 m.

Budući se radi o jednokolosiječnoj pruzi predviđenoj za mješoviti promet, s naglaskom na promet teretnih vlakova, tunel će se izvesti kao jednocijevni s jednim kolosijekom i dodatnim evakuacijskim izlazima kako bi se osigurala primjerena sigurnost korisnika tunela u slučaju incidenta (požara ili neke druge havarije) u tunelu.



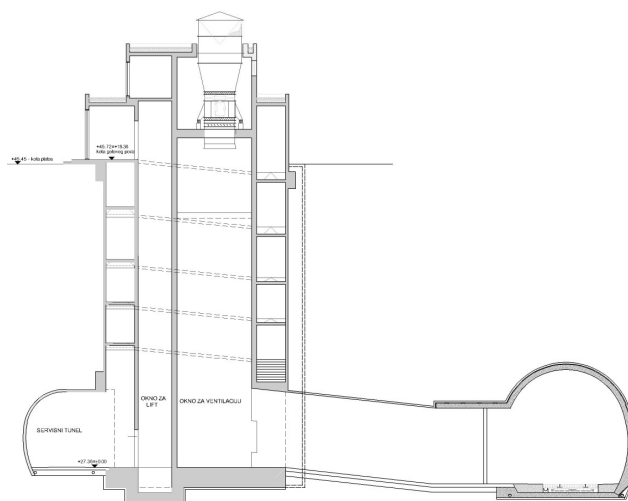
Slika 15. Shema tunela Bibinje [23]

Dodatni evakuacijski izlazi predviđeni su u vidu servisnog tunela i vertikalnog okna.

Servisni tunel je predviđen na udaljenosti od 915 metara od ulaznog portala, odnosno na udaljenosti na 938 metara od sljedećeg evakuacijskog izlaza (vertikalnog okna).

Kako bi se zadovoljio uvjet maksimalne dozvoljene udaljenosti između evakuacijskih izlaza (1000 metara) vertikalnom oknu pristupa se preko drugog servisnog tunela koji se proteže paralelno sa glavnom tunelskom cijevi u duljini od 147 metara, a koji je sa dva evakuacijska izlaza povezan sa glavnom tunelskom cijevi.

Lokacija vertikalnog okna odabrana je na mjestu gdje je najmanji nadsloj iznad tunelske cijevi kako bi se optimalizirala izgradnja samog okna, a ujedno i skratio put evakuacije. Budući je vertikalno okno predviđeno i za ventilaciju tunela, kraće vertikalno okno smanjuje energetske gubitke koji nastaju prilikom ventiliranja tunela.



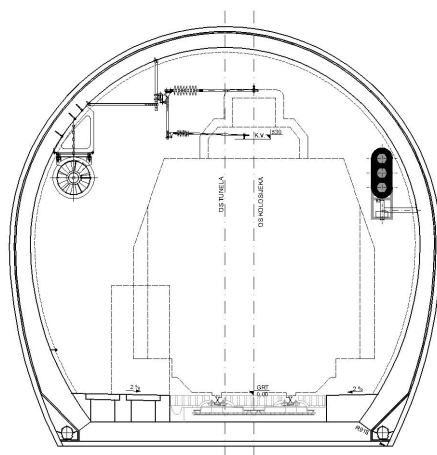
Slika 16. Vertikalno okno [23]

6.2 Poprečni presjek tunela

Poprečni presjek tunela napravljen je u skladu sa slobodnim profilom definiranim Pravilnikom o tehničkim uvjetima za sigurnost željezničkog prometa kojima moraju udovoljavati željezničke pruge, te isti zadovoljava slobodni profil definiran Austrijskim smjernicama za projektiranje tunela na prugama RVE 02.00.01.

Projektirani poprečni presjek omogućava smještaj potrebne opreme unutar profila, zadovoljava kriterije tlačnog komfora, te osigurava zahtijevanu mogućnost evakuacije.

Poprečni presjek tunela željezničkoj pruži visoke učinkovitosti „Državna granica – Zagreb - Rijeka“, poddionica Skradnik – Ledenice projektiran je za računsku brzinu $V_{RAČ} = 200 \text{ km/h} \pm 25\%$. Kod tunela Bibinje poprečni presjek tunela odabran je za projektiranu brzinu od $V_{max} = 100 \text{ km/h}$.



Slika 17. Poprečni presjek jednokolosiječnog tunela s opremom[22]

Za razliku od cestovnih tunela kod željezničkih tunela je potrebno provjeriti da li poprečni presjek zadovoljava aerodinamičke uvjete.

Za tunele na poddionici Skradnik – Ledenice provedena je aerodinamička studija u kojoj su provedene numeričke simulacije sa ciljem evaluacije slijedećih parametara:

- Tlačno opterećenje na tunelsku oblogu i postavljenu mehaničku opremu
- Komfort putnika zbog promjene tlaka
- Potrebna vučna snaga

Komfort putnika se očituje kroz dva parametra: medicinski kriterij pritiska i tlačni komfor. Medicinskim kriterijem sprječavaju se ozljede uha uslijed promjene tlaka, te TSI ograničava maksimalnu dozvoljenu promjenu tlaka tijekom prolaska vlaka kroz tunela na 10 kPa. Kriteriji za tlačni komfor se definiraju s maksimalnom promjenom tlaka u određenom vremenu. UIC je objedinio različite nacionalne kriterije i trenutno preporučuje kriterije kroz 2 seta UIC-Code 660 i UIC-Code 779-11 koji je nešto stroži.

U studiji je ispitano da li poprečni presjek zadovoljava aerodinamičke uvjete u 20 različitih slučajeva ovisno o tipu vlaka, duljini tunela, površini poprečnog presjeka, nagibu nivelete, te postojanju poprečnih prolaza ili okana. Simulacija je provedena za 3 tipa vlakova, vlakovi velikih brzina ICE-3 s maksimalnom brzinom 200 km/h, regionalni vlakovi s maksimalnom brzinom 160 km/h i teretni vlakovi s maksimalnom brzinom 140 km/h [20].

Za tunel Bibinje, čija površina svijetlog otvora iznosi 44 m² te je manja od površine svijetlog otvora tunela na poddionici Skradnik – Ledenice, nije bilo potrebno raditi novu aerodinamičku studiju jer poprečni presjek uz manje brzine sigurno zadovoljava aerodinamičke uvjete.

6.3 Elementi vođenja trase

Geometrijski elementi trase u područjima tunela (tlocrtni elementi, visinski elementi-niveleta) položeni su tako da daju optimalan smještaj tunelskih cijevi i zadovoljavaju uvjete u tunelu za računsku brzinu.

Na poddionici Skradnik – Ledenice minimalni polumjer iznosi 6500 m jer prema zahtjevu investitora nema nadvišenja kolosijeka. Kod tunela Bibinje elementi vođenja trase bili su definirani projektnim zadatkom. Nagib nivelete tunela Bibinje je 12‰. Kod tunela na poddionici Skradnik – Ledenice najveći nagib nivelete u slučaju kraćeg dvokolosiječnog tunela Treskavac je 12,31‰, dok je kod duljih tunela 8‰.

6.4 Oprema tunela

Za sigurno odvijanje prometa u tunelu potrebno je ugraditi različitu opremu. Građevinskim projektom osigurava se prostor za smještanje te opreme dok je oprema detaljno obrađena u posebnim projektima. Osnovni princip za smještanje opreme, za razliku od cestovnih tunela, je smještanje opreme izvan glavne tunelske cijevi izuzev opreme koja je nužna za odvijanje prometa i sigurnost korisnika (poput telefonskih uređaja i radio komunikacije u slučaju nužde, hidrantska mreža, signalizacijski sustav, sustav za kontrolu brzine). Oprema poput raznih razdjelnika, transformatora i trafostanica smješta se u poprečne prolaze.

Projektom rasvjete pokrivena je oprema poput oznake evakuacijskih puteva, orijentaciona rasvjeta.

Odvodnjom tunela rješava se prihvata i evakuacija površinskih i procjednih voda, te odvodnja tekućina sa trupa pruge. Odvodnja kolosijeka predviđena je putem predgotovljenih kanala na nižoj strani kolosiječne konstrukcije. Željeznički promet u tunelu odvija se u strogo kontroliranim uvjetima i stoga odvodnja kolosijeka je proračunata za manje kapacitete nego kod cestovnih tunela. Za prikupljanje brdskih voda na bokovima tunela predviđena je drenažna cijev tipa RAUDRIL Rail DN 250 mm.

Zbog problema s održavanjem i operabilnošću pruge preporučljivo je opremu smještati izvan tunelskih cijevi. To se odnosi i na kanalizaciju koja ne prolazi tunelom, što je slučaj u cestovnim tunelima.

Kolosiječna konstrukcija u tunelu je odabrana kao kolosijek na čvrstoj podlozi, te je u poprečnom presjeku ostavljen prostor visine 55 cm koji omogućava smještanje različitih tipova kolosijeka.

Na zahtjev investitora u slučaju incidenta predviđena je intervencija cestovnim vozilima te je zbog toga tunel cijelom svojom duljinom popločen. Ploče se ugrađuju na kolosijek do ravnine gornjeg ruba tračnica. Ploče prema patentiranom rješenju proizvođača kolosijeka moraju zadovoljiti uvjete nosivosti za kriterij vatrogasnog vozila, moraju omogućiti odvodnju gornje površine u predviđeni kanal sa strane, te biti učvršćene na način da se ne dolazi do uzdizanja uslijed podtlaka.



Slika 18. Predgotovljene ploče



Slika 19. Cestovna vatrogasna vozila

Za tunele dulje od 1000 m potrebno je osigurati mjesta spašavanja koja su opskrbljena električnom energijom i vodom te priključena na postojeću cestovnu infrastrukturu. Prema Pravilniku o tehničkim uvjetima za sigurnost željezničkog prometa kojima moraju udovoljavati željezničke pruge minimalna veličina tog prostora je 500 m².

Mjesta za spašavanje nalaze se u blizini portalnih građevina a kod tunela Bibinje osim na portalima mjesta za spašavanje nalaze se i na ulazu u servisni tunel te na mjestu vertikalnog okna.



Slika 20. Kolosijek na čvrstoj podlozi u tunelu



Slika 21. Prijelazna zona kolosiječne konstrukcije

Literatura

- [1] Grupa autora: *Opći tehnički uvjeti za radove na cestama-OTU, knjiga V-Cestovni tuneli*, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 2001.
- [2] Pravilnik o tehničkim normativima i uvjetima za projektiranje i gradnju tunela na cestama, *Službeni list SFRJ, broj 59/73*, Beograd, 1973.
- [3] Projektierungsrichtlinien RVS 9., "Strasse und Verkehr" (FSV), Wien, 1994.-2002.
- [4] Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network, *Official Journal of the European Union*, Strasbourg, 2004.
- [5] Pravilnik o minimalnim sigurnosnim zahtjevima za tunele, *NN 119/09*, Zagreb, 2009.
- [6] Pravilnik o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa, *NN 110/01*, str. 4066-4086, Zagreb, 2001.
- [7] Pravilnik o tehničkim normativima i uvjetima za projektiranje i gradnju željezničkih tunela, *Službeni list SFRJ, broj 55/73*, Beograd, 1973.
- [8] Pravilnik o tehničkim uvjetima za sigurnost željezničkog prometa kojima moraju udovoljavati željezničke pruge *NN 128/08*, Zagreb, 2008.
- [9] COMMISSION DECISION of 20 December 2007 concerning the technical specification of interoperability relating to 'safety in railway tunnels' in the trans-European conventional and high-speed rail system, *Official Journal of the European Union*, L 64/1, 2008/163/EC, Strasbourg, 2008.
- [10] Tehničke smjernice za projektiranje visoko frekventnih pruga tj. smjernice za HL" austrijskih saveznih željeznica (RVE 02.00.01, nacrt od 28.11.2006)
- [11] Linarić Z., *Izbor i planiranje tehnike i tehnologije građenja baznih tunela*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1992.
- [12] Glavni građevinski projekt tunela Šubir, Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Zavod za studije i projekte, Zagreb, 2008.
- [13] Grupa autora: *Tunel Mala Kapela – analiza mogućih faza izgradnje*, Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Zagreb, 2001.
- [14] Mustapić I.: *Analiza različitih modela etapne gradnje dvocijevnih tunela na autocestama*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.
- [15] Mustapić I. & Šarić D. & Stanković M.: *Tuneli na autoputu koridora Vc, dionica Mostar sjever-južna granica (LOT 4), 1. BH kongres o cestama*, Sarajevo, 2007.
- [16] Vrkljan I., *Podzemne građevine i tuneli*, udžbenik, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka
- [17] Glavni građevinski projekt tunela Šubir, Institut IGH d.d., Zavod za projektiranje prometnica, Zagreb, 2010.
- [18] Linarić Z., *Rizici u tehnologiji građenja dugačkih tunela u kršu*, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2000.
- [19] Nyfeler S., Reinke P.: *Aerodynamic studies of the high performance railway line between Zagreb and Rijeka*, HBI Haerter Consulting Engineers, 2009.
- [20] Institut IGH: *Idejno rješenje tunela željezničke pruge visoke učinkovitosti Državna granica (Botova) – Zagreb – Rijeka*, Zagreb, 2008
- [21] Institut IGH: *Idejni projekt tunela željezničke pruge visoke učinkovitosti Državna granica (Botova) – Zagreb – Rijeka, poddionica Skradnik – Ledenica*, Zagreb, 2008.
- [22] Institut IGH: *Idejni građevinski projekt tunela Bibinje*, Zagreb, 2010.