

doi: 10.67563/ASESCONF2026088V

Ivana Vujović¹

ASSESSMENT OF THE EXISTING CONDITION OF A TBM TUNNEL LINING AS A BASIS FOR ENGINEERING DESIGN DECISION-MAKING – A CASE STUDY OF THE VRAČAR TUNNEL

Summary: Rehabilitation design for existing TBM tunnels requires verification of the actual structural condition rather than reliance on original design assumptions. This paper presents an integrated procedure combining documentation review, visual inspection, geological, geotechnical and hydrogeological investigations, concrete-core testing and numerical ULS/SLS verification. The procedure was applied to the more than 40-year-old Vračar railway tunnel. The results distinguish problems associated with groundwater, joints, the contact zone and drainage; local concrete degradation and reduced concrete strength; and separate zones of segment dislocation. On that basis, an integrated rehabilitation concept was defined, comprising sealing of active groundwater ingress points, joint sealing, contact-consolidation grouting, concrete repair and local strengthening with carbon-fibre-reinforced polymer (CFRP) strips, passive anchoring of dislocated segments, drainage rehabilitation and monitoring, without changing the global structural system.

Keywords: TBM tunnel, tunnel lining, condition assessment, rehabilitation, numerical verification, engineering design

PROCENA POSTOJEĆEG STANJA TBM TUNELSKJE OBLOGE KAO OSNOVA ZA DONOŠENJE PROJEKTANTSKE ODLUKE – STUDIJA SLUČAJA TUNELA VRAČAR

Rezime: Projektovanje sanacije postojećih TBM tunela zahteva proveru stvarnog stanja konstrukcije, a ne oslanjanje isključivo na pretpostavke prvobitnog projekta. U radu je prikazan objedinjeni postupak koji obuhvata pregled dokumentacije, vizuelni pregled, geološka, geotehnička i hidrogeološka istraživanja, ispitivanje betonskih kernova i numeričke ULS/SLS provere. Postupak je primenjen na železničkom tunelu Vračar, starijem od četrdeset godina. Rezultati razdvajaju pojave povezane sa podzemnom vodom, spojnica, kontaktnom zonom i drenažom, lokalnu degradaciju i smanjenu čvrstoću betona i posebne zone dislokacije tjubinga. Na toj osnovi definisan je integrisani koncept sanacije koji obuhvata zaptivanje aktivnih prodora podzemne vode, britvljenje spojnica, kontaktno-konsolidaciono injektiranje, sanaciju betona i lokalno ojačanje trakama od polimera ojačanog karbonskim vlaknima (CFRP), pasivno sidrenje dislociranih tjubinga, sanaciju drenaže i monitoring, bez promene globalnog statičkog sistema.

Ključne reči: TBM tunel, tunnelska obloga, procena stanja, sanacija, numerička verifikacija, projektantski postupak

¹ Saobraćajni institut CIP d.o.o., Beograd, Srbija, ivana.vujovic@sicip.co.rs

1. UVOD

Postojeći tuneli predstavljaju kritičan deo saobraćajne infrastrukture, a odluke o nastavku eksploatacije, sanaciji ili rekonstrukciji moraju se zasnivati na njihovom stvarnom stanju. Za razliku od projektovanja novih konstrukcija, procena postojeće obloge objedinjuje prvobitni konstruktivni koncept, podatke o izvođenju i eksploataciji, aktuelna svojstva materijala, registrovana oštećenja i stvarne geološke, geotehničke i hidrogeološke uslove. Provera graničnog stanja nosivosti (ULS) i graničnog stanja upotrebljivosti (SLS) zato zavisi od pouzdanih dijagnostičkih podataka, a ne samo od nominalnih pretpostavki [4].

U radu je prikazana objedinjena procena stanja železničkog tunela Vračar u Beogradu, zasnovana na rezultatima terenskih istraživanja, laboratorijskih ispitivanja i numeričkih analiza. Na osnovu utvrđenih uzroka i karaktera oštećenja definisane su odgovarajuće mere sanacije. Razmatrane pojave razvrstane su u tri glavne grupe: (1) pojave povezane sa delovanjem podzemne vode i stanjem spojnica, kontaktne zone i drenaže; (2) lokalna degradacija i smanjena čvrstoća betona; i (3) lokalne dislokacije tjubinga. Prvoj grupi odgovaraju zaptivanje aktivnih prodora, britvljenje spojnica, kontaktno-konsolidaciono injektiranje i sanacija drenaže; drugoj sanacija betona, pasivizacija armature i, u proračunski izdvojenim zonama, spoljašnje ojačanje trakama od polimera ojačanog karbonskim vlaknima (CFRP); a trećoj pasivna stabilizacija samobušecim sidrima. Probno polje i monitoring predstavljaju mere kontrole izvođenja i potvrde projektovanih parametara [1].

2. POSTUPAK INŽENJERSKE PROCENE

Procena stanja postojeće tunnelske obloge predstavlja složen projektantski postupak kojim se utvrđuju stvarno stanje i pouzdanost konstrukcije i obezbeđuje stručna osnova za odluku o daljoj eksploataciji, sanaciji ili konstruktivnom ojačanju. Za razliku od projektovanja novih objekata, polaznu osnovu čine stvarno utvrđene karakteristike konstrukcije, tla, podzemne vode i kontaktne zone, kao i promene nastale tokom izgradnje i eksploatacije.

Postupak obuhvata pet međusobno povezanih faza: pregled dokumentacije, dijagnostička istraživanja, definisanje proverenih ulaznih parametara, ULS/SLS numeričku verifikaciju i donošenje projektantske odluke. Svaka faza obezbeđuje podatke za narednu, tako da se izabrana mera može neposredno povezati sa zatečenim stanjem, rezultatom istraživanja i proračunskom proverom (Tabela 1).

Tabela 1: Faze postupka inženjerske procene

Faza	Osnova	Ishod
Pregled dokumentacije	Projektna i eksploataciona dokumentacija	Program istraživanja
Dijagnostička istraživanja	Terenska i laboratorijska ispitivanja	Stvarni parametri konstrukcije
Definisanje ulaznih parametara i formiranje numeričkog modela	Geometrija, materijali, tlo i podzemna voda	Verifikovan numerički model postojećeg stanja
ULS/SLS provera	Dejstva, nosivost i deformacije	Sigurnost i upotrebljivost
Projektantska odluka	Objedinjena procena	Sanacija i monitoring

2.1. PREGLED DOKUMENTACIJE I DIJAGNOSTIČKA ISTRAŽIVANJA

Postupak počinje analizom prvobitnog projekta, podataka o izvođenju i eksploataciji i rezultata prethodnih istraživanja. Time se utvrđuju prvobitni konstruktivni sistem i uslovi izvođenja, izdvajaju karakteristične zone i mogući mehanizmi nastanka oštećenja i definiše program dijagnostičkih istraživanja.

Dijagnostička istraživanja obuhvataju detaljan vizuelni pregled i kartiranje oštećenja, geološka, geotehnička i hidrogeološka istraživanja tla iza obloge, uzimanje i laboratorijsko ispitivanje kernova betona i injekcione mase, hemijske analize podzemne vode i geodetska merenja geometrije obloge. Rezultati se vrednuju objedinjeno radi utvrđivanja rasprostranjenosti, intenziteta i uzroka registrovanih pojava.

2.2. DEFINISANJE PROVERENIH ULAZNIH PARAMETARA

Na osnovu rezultata istraživanja definišu se stvarna geometrija obloge, čvrstoća betona, model tla i kvazihomogene zone, stanje injekcione mase i kontaktne zone iza obloge, dejstvo podzemne vode i izmerena pomeranja tjubinga. Tako formiran numerički model predstavlja izvedeno stanje konstrukcije, umesto nominalnih pretpostavki prvobitnog projekta.

2.3. NUMERIČKA VERIFIKACIJA I PROJEKTANTSKA ODLUKA

Analitičkim proračunom prstena i dvodimenzionalnim i trodimenzionalnim modelima proveravaju se ULS i SLS postojeće obloge i faze izvođenja predložene sanacije, uključujući kontrolisano injektiranje, lokalno CFRP ojačanje i pasivno sidrenje.

Projektantska odluka donosi se tek zajedničkim vrednovanjem dijagnostičkih rezultata, verifikovanih ulaznih parametara i numeričkih provera. Utvrđeni mehanizmi povezuju se sa odgovarajućim intervencijama, dok se preostala neizvesnost tokom izvođenja kontroliše probnim poljem i monitoringom, kojima se potvrđuju proračunske vrednosti i tehnološki parametri.

3. STUDIJA SLUČAJA – TUNEL VRAČAR

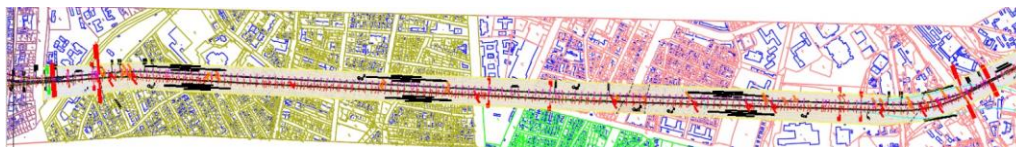
Tunel Vračar je dvocevna železnička konstrukcija izvedena pretežno TBM štitom. Predmetne deonice segmentne obloge pružaju se od km 1+235,00 do km 4+460,00 u levoj cevi i od km 1+334,05 do km 4+565,56 u desnoj cevi. Svaki prsten je širok 1,00 m i sastoji se od osam prefabrikovanih armiranobetonskih tjubinga. Trasa prolazi ispod gusto izgrađenog gradskog područja, sa promenljivom visinom nadsloja, složenim geotehničkim uslovima i prisustvom podzemne vode (Slike 1 i 2) [1, 5, 6].

Tabela 2: Osnovne karakteristike tunela Vračar

Parametar	Vrednost
Konstrukcija / način gradnje	Dvocevni železnički tunel / TBM
Segmentna obloga	Armiranobetonski tjubinci, 8 segmenata po prstenu
Unutrašnji / spoljašnji prečnik; Debljina obloge / širina prstena	6,70 m / 7,20 m; 0,25 m / 1,00 m
Obuhvaćena dužina	Leva cev 3225,00 m; Desna cev 3231,51 m



Slika 1: Položaj područja istraživanja u zoni tunela Vračar



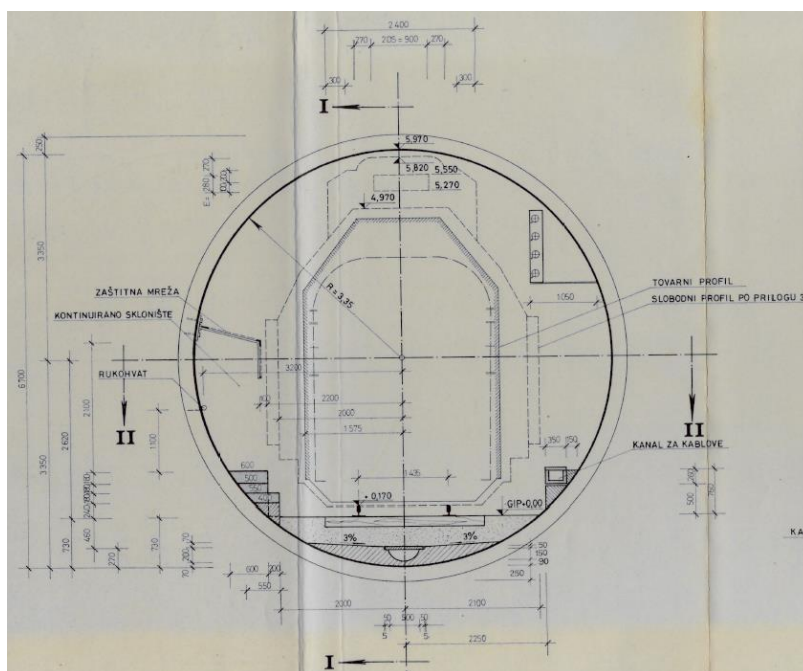
Slika 2: Situacioni prikaz tunela Vračar

4. DIJAGNOSTIČKA ISTRAŽIVANJA I PROVERENI ULAZNI PARAMETRI

Program dijagnostičkih istraživanja obuhvatio je analizu raspoložive projektne dokumentacije, detaljan vizuelni pregled i kartiranje oštećenja u obe tunelske cevi, geološka, geotehnička i hidrogeološka istraživanja tla i kontaktne zone iza TBM obloge, uzimanje i laboratorijsko ispitivanje kernova betona i injekcione mase, hemijske analize podzemne vode i geodetska merenja geometrije obloge. Objedinjenom analizom rezultata utvrđeni su rasprostranjenost, intenzitet i mogući uzroci registrovanih pojava, ocenjen je njihov uticaj na nosivost, upotrebljivost i trajnost obloge i formirana je osnova za izbor odgovarajućih mera sanacije [1–3].

Tabela 3: Dijagnostička istraživanja i njihova svrha

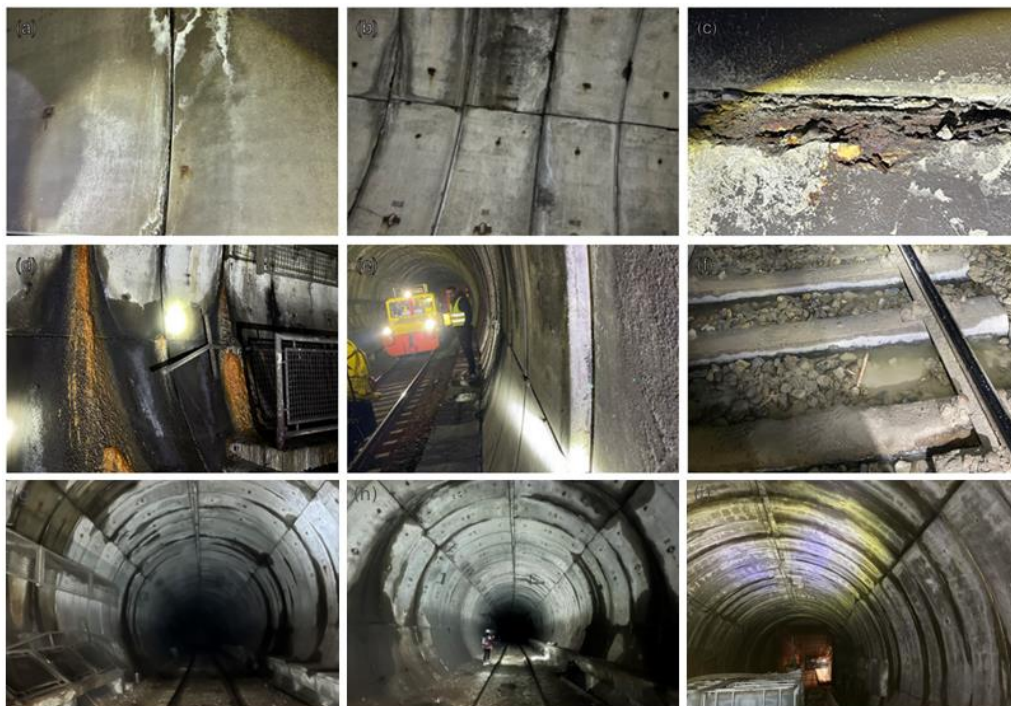
Istraživanje	Svrha
Pregled dokumentacije i istorije eksploatacije	Prvobitni sistem, uslovi izvođenja i istorija eksploatacije
Vizuelni pregled i kartiranje	Oštećenja, procurivanja, spojnice i dislokacije tjubinga
Geološka/geotehnička istraživanja i kernovanje iza obloge	Model tla, kvazihomogene zone i stanje kontaktne zone
Ispitivanje betona i injekcione mase	Čvrstoća i trajnost betona; svojstva injekcione mase
Ispitivanje podzemne vode	Intenzitet dotoka i hemijski uticaj na trajnost



Slika 3: Karakteristični poprečni presek tunela Vračar – arhivska dokumentacija

4.1. VIZUELNI PREGLED I KARTIRANJE OŠTEĆENJA

Pregledom su registrovani lokalni dotoci podzemne vode, tragovi ispiranja, oštećenja spojnica i sistema zaptivanja, segregacija i lokalni gubitak zaštitnog sloja betona, oštećeni otvori za injektiranje, nanosi mulja, nefunkcionalna drenaža i radijalna pomeranja tjubinga. Pojave nisu bile ravnomerno raspoređene, već su bile koncentrisane u zonama sa nepovoljnijim kontaktim, geološkim i hidrogeološkim uslovima. Karakteristični poprečni presek prikazan je na Slici 3, dok je devet fotografija karakterističnih oštećenja i pojava objedinjeno na Slici 4. Fotografije dokumentuju različite vidove zatečenog stanja, dok su njihovi uzroci i značaj utvrđeni zajedničkim vrednovanjem vizuelnog pregleda, geoloških, geotehničkih i hidrogeoloških istraživanja, laboratorijskih ispitivanja kernova betona i injekcione mase, hemijskih analiza podzemne vode i geodetskih merenja.



Slika 4: Fotografije karakterističnih oštećenja i pojava registrovanih tokom vizuelnog pregleda tunela Vračar

4.2. PROVERENI ULAZNI PARAMETRI

Rezultati ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće na pritisak betonskih kernova utvrdili su stvarnu čvrstoću i njenu lokalnu promenljivost. U desnoj cevi na km 4+412 izmereno je 23,4 MPa na jednoj strani prstena i 64,5 MPa na suprotnoj strani. Oko km 2+295 u levoj cevi dobijene su vrednosti 39,5 MPa i 38,3 MPa. Ovi rezultati korišćeni su zajedno sa ostalim podacima o kernovima, a nijedna pojedinačna vrednost nije usvojena kao globalno reprezentativna. Rezultati istraživanja i njihova primena u projektu sažeti su u Tabeli 4 [3].

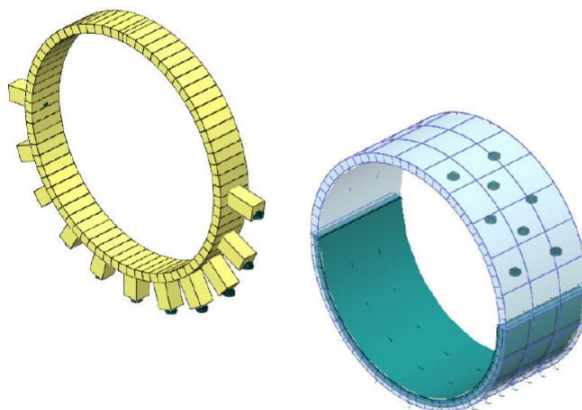
Ispitivanje kernova injekcione mase uzetih iza segmentne obloge, zajedno sa geološkim i geotehničkim istraživanjima, ukazalo je na neujednačeno stanje kontaktne zone i lokalno neodgovarajući kontakt obloge sa okolnim tlom. Zbog toga je predviđeno kontaktno-konsolidaciono injektiranje radi uspostavljanja kontinuiranog kontakta između obloge i okolnog tla i poboljšanja svojstava kontaktne zone. Dozvoljeni pritisci injektiranja verifikovani su ULS/SLS proračunima i potvrđuju se na probnom polju uz monitoring odziva obloge.

Tabela 4: Provera ulaznih podataka za numeričku analizu

Stavka	Osnova	Primena u proračunu
Geometrija obloge	Pregled, skeniranje i merenja	Geometrijski model i zone dislokacije
Uslovi tla	Bušotine i laboratorijska ispitivanja	Model tla i geostatička dejstva
Podzemna voda	Kartiranje i hemijske analize	Trajnost i mere zaptivanja
Betonska obloga	Čvrstoća, masa i karbonatizacija	Svojstva materijala i ULS/SLS provere
Kontaktne injekciona masa	Kernovanje; ispitivanje zapreminske mase, sastava i stanja	Provera stanja kontaktne zone i osnova za kontaktno-konsolidaciono injektiranje

5. NUMERIČKA VERIFIKACIJA

Analitički proračun prstena i 2D/3D numerički modeli primenjeni su za proveru postojećeg geostatičkog stanja, faznih pritisaka injektiranja i predloženih lokalnih mera. U modelima su korišćeni proverena geometrija obloge, lokalno reprezentativne čvrstoće betona utvrđene laboratorijskim ispitivanjem kernova, parametri tla i postojeći sistem armiranja tjubinga identifikovan na osnovu arhivske projektne dokumentacije. Segmentna obloga, izvedena krajem sedamdesetih godina XX veka, proverena je prema važećim projektantskim standardima i savremenim zahtevima graničnih stanja nosivosti i upotrebljivosti. Karakteristične kombinacije obuhvatile su dodatne pritiske injektiranja od $\Delta p = 50$ do 300 kPa [1, 4].



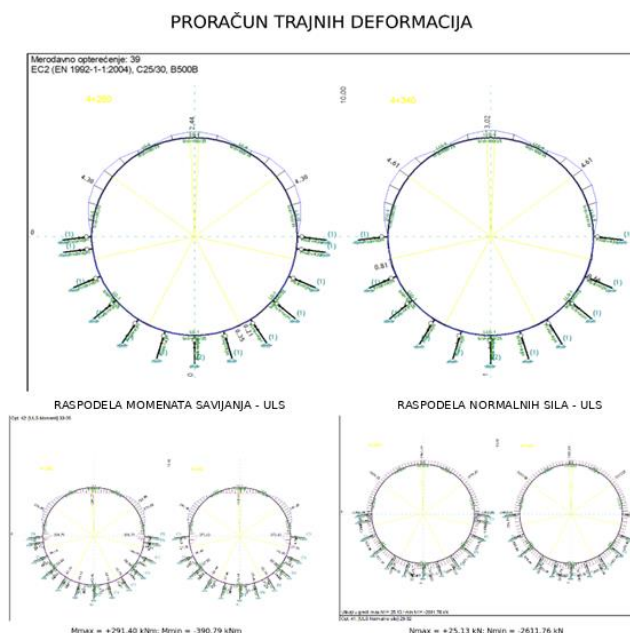
Slika 5: Trodimenzionalni numerički model segmentne TBM obloge

Obuhvat i inženjerska svrha sprovedenih provera dati su u Tabeli 5.

N–M proverom postojeće neojačane obloge u desnoj cevi dobijeno je iskorišćenje od 99,16% pri $\Delta p = 200$ kPa i 107,56% pri $\Delta p = 300$ kPa na km 4+280, odnosno 127,74% i 138,22% na km 4+340, dok su u levoj cevi na km 2+300 dobijene vrednosti od 124,23% i 130,44%. Rezultati su korišćeni za izdvajanje kritičnih preseka, ocenu ponašanja obloge tokom kontrolisanog injektiranja i definisanje dozvoljenog režima izvođenja. Zbog lokalizovanog prekoračenja nosivosti i potrebe za njenim povećanjem bez promene globalnog statičkog sistema usvojeno je spoljašnje CFRP ojačanje, kojim je ispunjen uslov $\eta \leq 100\%$. Dodatnom 2D numeričkom verifikacijom preseka desne cevi na km 4+280 i km 4+340 dobijene su maksimalna trajna deformacija od 4,61 mm i proračunska širina prsline od 0,07 mm. U ULS anvelopama momenti savijanja iznosili su od –390,79 do +291,40 kNm, a normalne sile od –2611,76 do +25,13 kN. Karakteristični rezultati prikazani su na Slici 6.

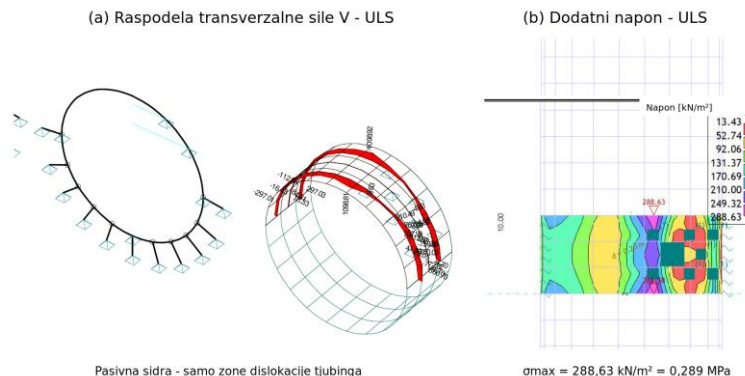
Tabela 5: Numeričke provjere sprovedene u projektu sanacije TBM tunelske obloge

Oblast provjere	Obuhvat	Inženjerski cilj
Geostatičko stanje	N, M, naponi i deformacije	Provera postojećeg ULS/SLS stanja
Kontrolisano injektiranje	Fazni pritisci 50–300 kPa i granice monitoringa	Dozvoljeni radni pritisak 200 kPa; do 300 kPa
Merodavni presecci	Analitički proračun prstena i 2D/3D numeričke provjere	Utvrđivanje merodavnih proračunskih vrednosti
Lokalne CFRP zone	Čvrstoća prema kernovima, N–M provera i proračun ojačanja	Obezbeđenje potrebne lokalne nosivosti
Lokalne zone dislokacije	Smičuća sila V, sile u sidrima, naponi naleganja i lokalni naponi	Pasivna stabilizacija



Slika 6: Rezultati 2D verifikacije obloge desne cevi na km 4+280 i km 4+340: trajna deformacija u SLS i ULS anvelope momenata savijanja i normalnih sila

Za proveru sistema pasivnih samobušćih sidara u složenim geotehničkim uslovima analizirane su zone dislokacije tjubinga na reprezentativnim presecima km 1+355 u levoj i km 1+440 u desnoj cevi. Rezultati prikazani na Slici 7 obuhvataju raspodelu smičuće sile V i dodatni lokalni napon u gornjem delu tjubinga. Maksimalne rezultatne sile u sistemu sidara iznosile su 1,38 MN u levoj i 0,90 MN u desnoj cevi, a proračunske sile po sidru iznosile su 459,10 kN i 298,93 kN. Naponi naleganja ispod sidrenih ploča iznosili su 5,10 MPa u levoj i 4,78 MPa u desnoj cevi, dok je dodatni lokalni napon u tjubingu iznosio 0,289 MPa. Provera postojeće armature pokazala je da je potrebna površina armature od približno 45 mm²/m znatno manja od postojeće površine od 251 mm²/m, čime je potvrđena dovoljna rezerva nosivosti tjubinga za lokalna dejstva izazvana sidrenjem.



Slika 7: Odvojena lokalna ULS provera pasivnih sidara u zonama dislokacije tjubinga: (a) raspodela smičuće sile V; (b) dodatni napon u gornjem delu tjubinga

6. IZBOR MERA SANACIJE

CFRP ojačanje i pasivno sidrenje predviđeni su za različite lokalne pojave i primenjuju se na odvojenim lokacijama. CFRP trake primenjuju se isključivo tamo gde su rezultati ispitivanja jednoosijalne čvrstoće betonskih kernova i ULS provere pokazali nedovoljnu lokalnu nosivost: oko km 2+300 u levoj cevi i u zoni km 4+280–4+415 u desnoj cevi [1, 8]. Pasivna samobušeća sidra primenjuju se samo u zonama dislokacije tjubinga od km 1+235 do km 1+555 ($L = 320 \text{ m}$) u levoj cevi i od km 1+334,05 do km 1+494,05 ($L = 160 \text{ m}$) u desnoj cevi. Njihova funkcija je da ograniče dalje radijalno pomeranje dislociranih tjubinga, a ne da ih vrate u prvobitni položaj ili promene statički sistem prstena.

Pored lokalnog CFRP ojačanja i pasivnog sidrenja, koncept sanacije obuhvata zaptivanje aktivnih prodora podzemne vode, britvljenje spojnica, kontaktno-konsolidaciono injektiranje, sanaciju i pasivizaciju lokalno oštećenog armiranog betona, sanaciju drenaže i monitoring. Injektiranje iza segmentne obloge u obe tunnelske cevi prethodi ne samo ugradnji CFRP traka i sidara, nego i svim drugim radovima sanacije, kako bi se najpre uspostavio odgovarajući kontakt iza obloge. Aktivni prodori podzemne vode potom se zaptivaju, a na oštećenim spojnicama izvode se radovi britvljenja [1, 7]. Veza između utvrđenog stanja i usvojene mere sanacije prikazana je u Tabeli 6.

Tabela 6: Utvrđeno stanje i usvojena mera sanacije

Utvrđeno stanje	Usvojena mera
Neodgovarajući kontakt obloge i tla	Kontaktno-konsolidaciono injektiranje iza obloge
Aktivni prodori podzemne vode	Zaptivanje aktivnih prodora podzemne vode
Oštećenje spojnica	Britvljenje spojnica
Nedovoljna lokalna čvrstoća betona	Lokalno CFRP ojačanje
Dislocirani tjubinci	Pasivna samobušeća sidra
Oštećen zaštitni sloj betona	Sanacija betona reparativnim malterima i pasivizacija armature
Oštećena drenaža	Sanacija drenažnih kanala
Neizvesnost tokom izvođenja	Probno polje i monitoring

Pre serijskih radova probno polje potvrđuje usvojene proračunske vrednosti, tehnologiju izvođenja i stvarni odziv obloge. Radni pritisak injektiranja iznosi 200 kPa; povećanje do 300 kPa dopušta se samo nakon uspešne provere bez prekoračenja SLS kriterijuma. Monitoring počinje nultom epohom, sprovodi se tokom svih radova sanacije i nastavlja se u eksploataciji. Obuhvata 3D geodetska i konvergentna merenja, pomeranja tjubinga i geometriju profila, vizuelni pregled novih deformacija i prodora podzemne vode i režime: redovno stanje, upozorenje, alarm i obustava radova. Rezultati omogućavaju prilagođavanje pritiska i tehnoloških parametara u proverenim SLS granicama.

7. ZAKLJUČCI

Studija slučaja tunela Vračar pokazuje da projekat sanacije postojeće TBM obloge mora da objedini projektnu dokumentaciju, terenska i laboratorijska istraživanja i numeričke ULS/SLS provere. Objedinjenom analizom podataka formiraju se pouzdani ulazni parametri za proračun, a svaka utvrđena pojava povezuje se sa odgovarajućom merom sanacije.

Obloga zadržava odgovarajuću nosivost duž većeg dela trase, dok su utvrđeni nedostaci lokalnog karaktera. CFRP ojačanje ograničeno je na zone u kojima su ispitivanja betonskih kernova i ULS provere pokazali nedovoljnu lokalnu nosivost, dok su pasivna sidra, nezavisno od toga, ograničena isključivo na zone dislokacije tjubinga. Neodgovarajući kontakt iza obloge, aktivni prodori podzemne vode, oštećenja spojnica i betona i nedostaci drenaže rešavaju se kontaktno-konsolidacionim injektiranjem, zaptivanjem aktivnih prodora, britvljenjem spojnica, sanacijom betona i radovima na drenaži. Probno polje potvrđuje proračunske vrednosti i tehnološke parametre, a radovi se nastavljaju samo ako odziv obloge ostaje u okviru SLS pragova. Mere ne menjaju globalni statički sistem, a njihovi efekti prate se monitoringom tokom sanacije i kasnije eksploatacije tunela.

ZAHVALNICA

Autorka zahvaljuje Saobraćajnom institutu CIP d.o.o., Beograd, na stručnoj podršci i omogućenom korišćenju projektne i istražne dokumentacije primenjene u ovom radu.

LITERATURA

- [1] Saobraćajni institut CIP d.o.o., Idejni projekat sanacije tunela Vračar, interna projektna dokumentacija, Beograd, 2026.
- [2] Geomehanika d.o.o., Geološka i geotehnička terenska istraživanja i laboratorijska ispitivanja tla za sanaciju tunela Vračar, interna tehnička dokumentacija.
- [3] Institut IMS a.d., Izveštaj o laboratorijskom ispitivanju betonskih kernova iz segmentne armiranobetonske obloge tunela Vračar; Izveštaj o laboratorijskom ispitivanju injekcione mase iza segmentne obloge tunela Vračar; Izveštaj o laboratorijskom ispitivanju podzemne vode za sanaciju tunela Vračar, komplet interna laboratorijska dokumentacija.
- [4] SRPS EN 1990, Evrokod; SRPS EN 1992-1-1, Evrokod 2; SRPS EN 1997-1, Evrokod 7; SRPS EN 1504-3; SRPS EN 1504-9.
- [5] Maidl B., Herrenknecht M., Maidl U., Wehrmeyer G., Mechanised Shield Tunnelling, 2nd ed., Ernst & Sohn, Berlin, 2012.
- [6] ITA Working Group 2, Guidelines for the Design of Segmental Tunnel Linings, ITA Report No. 22, ITA-AITES, 2019.
- [7] Thewes M., Budach C., Grouting of the Annular Gap in Shield Tunnelling, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, Budapest, 2009.
- [8] Fédération internationale du béton, Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, fib Bulletin No. 14, Lausanne, 2001.