

# ANALIZA UTICAJA BROJA I POLOŽAJA ZGLOBNIH VEZA NA VELIČINU NAPONA I DEFORMACIJA U MONTAŽNOJ OBLOZI SAOBRAĆAJNIH TUNELA

Ljiljana Tadić<sup>1</sup>

UDK: 624.191.81

**Rezime:** Kod građenja tunelskih konstrukcija sve je veća primena montažnih elemenata, odnosno prstenaste podgrade. U zavisnosti od uslova, u primeni su različite metode proračuna ovakve podgrade. Jedna od njih je proračun obloge kao prstena u elastičnoj sredini koja do sada predstavlja najuspešnije rešenje. U ovom radu je analiziran uticaj broja i položaja zglobnih veza na veličinu napona i deformacija u tunelskoj konstrukciji (montažnoj oblozi) saobraćajnog tunela. Analize su sprovedene za jednokolosečni železnički tunel i putni tunel sa dve saobraćajne trake a baziraju se na interaktivnom odnosu između stenske mase i tunelske obloge i na pretpostavci o homogenosti materijala i elastičnom ponašanju tunelske obloge.

**Ključne reči:** Tunel, tunelska konstrukcija, montažna obloga, analiza, naponi, deformacije, zglobne veze.

## 1. UVOD

Obloga tunela prstenastog oblika je široko rasprostranjena kod izgradnje metroa i hidrotehničkih tunela. Osim toga, ovaj oblik podgrade naročito je zastupljen kod izrade tunela u slabom stenskom materijalu, bilo metodom štita ili nekom drugom metodom. Primena štitne mehanizacije kod izgradnje tunela dovela je do masovne primene prstenaste podgrade sastavljene od više elemenata izrađenih od livenog gvožđa, betona ili nekog drugog materijala.

Problem stabilnosti ovakve tunelske konstrukcije razmatra se sa aspekta sadejstva obloge i stenske mase, kako po fazama građenja tako i u eksploataciji objekta, a jedan od ključnih uslova za njenu stabilnost je da pojedini elementi prstena budu dobro dimenzionisani.

Na izbor optimalnog rešenja tunelske konstrukcije utiče mnoštvo činilaca od kojih su najvažniji inženjersko-geološki sastav terena, reološka svojstva stenske mase, oblik i veličina tunelskog profila.

Podzemni pritisci su fenomen koji može da bude od presudnog značaja za stanje napona i deformacija montažne tunelske obloge. Međutim, njih je teško unapred eksplicitno odrediti, jer se njihova vrednost menja u interaktivnom odnosu i sa deformacijom obloge.

---

<sup>1</sup> Ljiljana Tadić, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, tel. 554-300, e-mail: tadic@gf.su.ac.yu

S obzirom da stenska masa i tunelska konstrukcija čine uzajamno delujući dvojni sistem, podzemni pritisak se može kontrolisati i ostvarivati do postavljenih granica odgovarajućim izborom tunelske konstrukcije. Pritisci manjih intenziteta se mogu dobiti primenom konstrukcija od montažnih elemenata ili fleksibilnih konstrukcija.

Broj prefabrikovanih montažnih elemenata u poprečnom preseku, odnosno njihova težina i veličina, zavise od niza faktora. Težnja da se ukupna dužina spojnica smanji, navodi na potrebu ukрупnjavanja elemenata, čime se smanjenjuje broj elemenata u poprečnom preseku što olakšava ne samo održavanje njegove pravilne geometrijske forme, već i vreme koje je potrebno za ugrađivanje elemenata. Međutim, njihovim ukрупnjavanjem (povećavanjem dimenzija), odnosno smanjivanjem njihovog broja u konstrukciji povećava se njihova težina a samim tim otežava i kompletna manipulacija sa elementima.

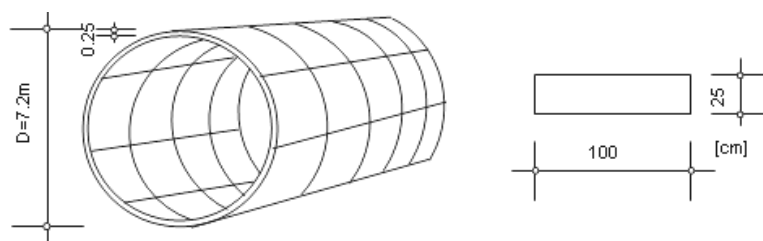
S druge strane, sa povećanjem broja montažnih elemenata u tunelskoj konstrukciji raste i broj zglobnih veza čime se osetno smanjuju ekstremne vrednosti momenata savijanja u elementima između zglobova što dovodi do značajne uštede armature u njima (broj segmenata u tunelskom prstenu uslovljava veličinu i preraspodelu statičkih uticaja) – ako se radi o AB elementima.

U slučajevima kada karakteristike stenskih masa imaju niske vrednosti, naročito ako je modul elastičnosti, odnosno koeficijent reaktivnog opterećenja mali, potrebno je voditi računa o broju zglobnih veza.

## 2. NAPONSKO-DEFORMACIJSKA ANALIZA

### 2.1. Diskretizacija stenske mase i obloge – numerički modeli

S obzirom da je dužina tunela velika u odnosu na dimenzije poprečnog preseka (tunelska konstrukcija predstavlja cilindar velike dužine koji se nalazi u kontaktu sa stenskom masom), stanje deformacije smatra se ravnim, pa se posmatra samo prsten širine 1.00 m, a karakteristike stenske mase omogućavaju tretiranje prstena kao nosača oslonjenog na elastičnu podlogu.



Slika 1. Izgled tunelske konstrukcije i dimenzije poprečnog preseka elemenata obloge

Montažni armirano-betonski elementi od kojih je sastavljena tunelska konstrukcija su jednakih debljina  $d=0.25$  m i širina  $b=1.00$  m (Slika 1). S obzirom da montažni elementi tunelske konstrukcije imaju istu dužinu i konstantnu debljinu<sup>1</sup> na celoj dužini tunela, centralni ugao je isti za sve elemente. Unutrašnji prečnik tunela je 6.70m za železnički tunel i 9.25m za putni tunel a svi elementi su međusobno zglobno vezani.

Elastična podloga zamenjena je elastičnim osloncima, takvim da im je deformacija jednaka odgovarajućoj deformaciji stenske mase.

Pošto tunel prolazi kroz stensku masu koja ne vrši bočni pritisak, proračun je vršen samo s obzirom na dejstvo vertikalnog opterećenja od težine stenske mase koja naleže na podgradnu konstrukciju (sračunato po Protođakonovu), sopstvenu težinu podgrade i pritisak injekcione mase. Vertikalno opterećenje od težine stenske mase je usvojeno kao ravnomerno, pri čemu je veličina ovog opterećenja uzeta sa izvesnom aproksimacijom. Sva opterećenja (sem sopstvene težine) deluju na spoljašnju površinu podgradne konstrukcije, ali je prilikom numeričke analize usvojeno da ova opterećenja deluju na osu konstrukcije. Na Slici 2 je dat šematski prikaz rasporeda zglobnih veza za tunelsku konstrukciju sastavljenu od 5, 6 i 7 montažnih elemenata.

## 2.2. Ulazni parametri za analizu

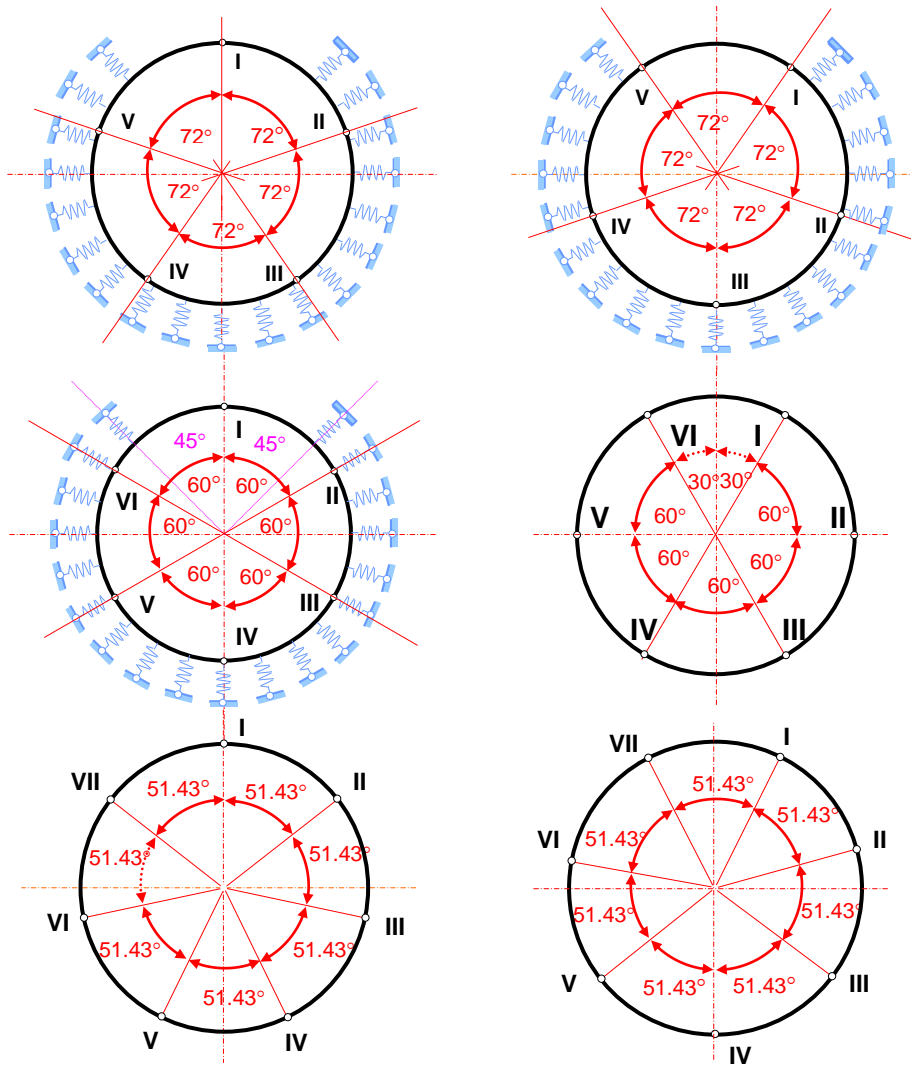
Ulaznim parametrima definisan je broj montažnih elemenata, odnosno statički sistem, geometrijske karakteristike montažnih elemenata i način ostvarivanja veze montažnih elemenata jednih sa drugim.

- Tunelska konstrukcija je analizirana kada se sastoji se od pet, šest i sedam montažnih elemenata.
- Elementi su međusobno zglobno vezani (dve varijante rasporeda zglobnih veza).
- Koeficijent posteljice tla sračunat je prema Galjerkinu.
- Montažna tunelska konstrukcija je kružnog preseka prečnika:
  - $D=6.95$ m (za železnički) i
  - $D=9.25$ m (putni tunel).

Pored ovih, među ulaznim parametrima za analizu nalaze se rezultati analize primarnog i sekundarnog naponskog stanja u stenskoj masi oko konture tunelskog iskopa dobijeni primenom programa *Phase2*.

---

<sup>1</sup> Obično se za celu dužinu tunela zbog velikog efekta rada tunelske mašine usvaja ista debljina tunelske konstrukcije. U slučajevima kada su elementi od armiranog betona za pojedine preseke menja samo procenat armiranja.



Slika 2.: Šematski prikaz rasporeda zglobnih veza za tunelsku konstrukciju sastavljenu od 5, 6 i 7 elemenata

## 2.3. Rezultati numeričke analize

U Tabeli 1 su date ekstremne vrednosti momenata savijanja, normalnih sila, napona i pomeranja (radijalnih i tangencijalnih) u tunelskoj konstrukciji za različite kombinacije opterećenja, kada je ona sastavljena od 5, 6 i 7 elemenata (za svaku po dve varijante rasporeda zglobnih veza).

*Tabela 1: Ekstremne vrednosti momenata, normalnih sila, napona i pomeranja u oblozi za razne vrste opterećenja, broj i položaj zglobnih veza u tunelskoj konstrukciji*

Br. el.	Opterećenje	M	N	$\sigma_{\max}$	$u_t$	$u_r$
		[kNm]	[kN]	[MPa]	$10^{-3}$ [m]	$10^{-3}$ [m]
Sistem sa zglobnom vezom u kaloti tunelskog otvora						
5	s.t.+s.m.*	53.86	-199.51 (56.89)	4.41 (-0.51)	55.43	129.07 (73.28)
	s.t.+s.m.+i.p.**	54.18	-305.39	4.01 (-0.93)	55.44	129.17 (-73.28)
6	s.t.+s.m.	13.36 (-9.28)	28.81 (-228.35)	0.91 (-0.67)	76.07	209.70 (-112.43)
	s.t.+s.m.+i.p.	13.36 (-9.32)	-334.46	0.49 (-1.09)	76.06	209.75 (-112.38)
7	s.t.+s.m.	8.94 (-14.41)	32.61 (-232.66)	1.42 (-0.69)	108.43	349.97 (-181.51)
	s.t.+s.m.+i.p.	8.94 (-14.44)	-338.77	0.99 (-1.11)	108.43	350.02 (-181.46)
Sistem sa zglobnom vezom van kalote tunelskog otvora						
5	s.t.+s.m.	139.12 (-229.76)	154.38 (-7.43)	22.67	18.07	31.34 (-24.43)
	s.t.+s.m.+i.p.	139.47 (-230.27)	48.97 (-113.08)	22.30	18.03	31.36 (-24.33)
6	s.t.+s.m.	174.80 (-147.33)	121.11 (-26.61)	16.71	26.89	43.58 (-45.01)
	s.t.+s.m.+i.p.	175.20 (-147.68)	15.66 (-132.26)	16.33 (-0.22)	26.85	43.58 (-44.92)
7	s.t.+s.m.	80.54 (-48.53)	52.31 (-147.38)	7.717 (-0.35)	53.21	88.52 (-101.85)
	s.t.+s.m.+i.p.	80.79 (-48.69)	-253.22	6.77 (-0.78)	53.21	88.58 (-101.86)
* - sopstvena težina tunelske obloge i težina stenske mase						
** - sopstvena težina tunelske obloge, težina stenske mase i injekcioni pritisak						

### 3. ZAKLJUČCI

Prilikom sprovedenih analiza tunelskih konstrukcija sastavljenih od različitog broja montažnih elemenata, tj. sa različitim brojem zglobnih veza, uočeno je da smanjivanje vrednosti modula elastičnosti stenske mase, odnosno koeficijenta reaktivnog opterećenja izaziva nagli porast vrednosti momenata savijanja (max i min). Da bi se konstrukcija u tom slučaju lakše prilagodila naponskom stanju stenskog masiva, potrebno je povećati broj zglobnih veza, odnosno broj montažnih elemenata u konstrukciji. To povećanje broja zglobnih veza izaziva osetno smanjenje vrednosti momenata u oblozi (konstrukciji). Međutim, u slučajevima kada se u konstrukciji zbog velikog broja elemenata dobiju praktično male vrednosti momenata, merodavne su normalne sile. Dakle, broj elemenata u tunelskoj konstrukciji, utiče na vrednost statičkih uticaja i njihovu distribuciju po osi tunelske obloge.

Na veličinu napona i deformacija u oblozi, osim broja, utiče i položaj zglobnih veza u tunelskoj konstrukciji. Analize su pokazale da se najveća pomeranja (radijalna i tangencijalna) dobijaju kada se jedna od zglobnih veza nalazi u vrhu kalote tunelske konstrukcije. Međutim, nasuprot deformacijama, vrednosti momenata i max napona u oblozi, u tom slučaju, osetno su smanjene.

Povećanje broja zglobnih veza doprinosi padu vrednosti momenata i lakšem prilagođavanju konstrukcije naponskom stanju, ali veoma često kod traženja optimalnog rešenja nisu merodavne vrednosti koje pokazuju otpornost konstrukcije. Sa povećavanjem broja zglobnih veza dobija se porast deformacija, koje su u određenim slučajevima odlučujuće za broj zglobnih veza u sistemu.

U slučaju naponskog injektiranja analizirane montažne tunelske konstrukcije, pritisak injekcione mase (uz pretpostavku da je distribucija pritiska po ekstradosu obloge ravnomerna) izazvao je porast prosečnih napona u tunelskoj oblozi.

Ali treba napomenuti da je naponsko injektiranje dovelo ne samo do smanjivanja, nego, u većem broju slučajeva, do eliminacije zatežućih normanih sila u oblozi.

Uticaj elastičnog otpora tla u pravcu tangente na oblogu, tj. uticaj trenja obloge o stensku masu pri deformaciji, je od važnosti za kinematičku stabilnost statičkog sistema diskretnog fizičkog modela, kao i za pomeranje obloge u pravcu tangente na oblogu (rotacija).

Svako uprošćavanje diskretnog fizičkog modela u vidu zanemarivanja napred navedenih veličina, čini statički sistem kinematički labilnim, ili bar preosetljivim na opterećenje u pravcu tangente na tunelsku oblogu, iako je statički sistem formalno kinematički stabilan.

Sprovedena analiza je pokazala da se statički uticaji zanemarljivo malo menjaju u odnosu na statičke uticaje dobijene za isti sistem bez trenja, ali da pomeranja u pravcu tangente na osu obloge bitno zavise od sila trenja, odnosno od elastičnog otpora tla u pravcu tangente. Dakle, navedeno uprošćavanje nije bitno uticalo na stanje napona u elementima tunelske obloge, ali je uticalo na dobijanje realnijih deformacija u pravcu tangente.

Kada su u pitanju dimenzije tunela, proračuni su pokazali da naponi u oblozi tunela ne zavise značajno od prečnika tunelskog otvora, dok su pomeranja veća kod tunelskog otvora većeg prečnika

Osim toga, prilikom izbora optimalnog broja montažnih elemenata u konstrukciji, mora se voditi računa i o konstruktivnim karakteristikama otkopne mašine koja će se

primenjivati, odnosno potrebno je imati u vidu uzajamnu veza između tehnološkog procesa gradnje i sistema tunelske konstrukcije.

Kao što je već navedeno, primena montažnih obloga nudi niz prednosti kada je reč o izgradnji tunela. Jedna od osnovnih prednosti ovog tehnološkog procesa je ta da izvođenje montažne obloge prati iskop, odnosno da je brzina izvođenja montažne obloge jednaka brzini napredovanja iskopa. Obloga se odmah uključuje u interakciju sa stenskom masom (sadejstvo stenske mase i obloge u preuzimanju podzemnih pritisaka zavisi od brzine napredovanja iskopa, odnosno od brzine aktiviranja obloge). Takođe, stvara se mogućnost za industrijsku proizvodnju elemenata obloge (izvan tunela) čime se postiže veća produktivnost što doprinosi ekonomičnijem građenju. Pošto se izrada montažnih elemenata vrši izvan tunela (u pogonima), postiže se i visok kvalitet betonskih i armiranobetonskih montažnih elemenata.

Ali, i pored svega navedenog, ipak treba težiti smanjenju broja zglobnih veza jer se time postiže sledeće:

- skraćanje vremena potrebnog za montažu,
- broj spojnica za zatvaranje je manji što daje ekonomičnije građenje,
- veće napredovanje i brža izgradnja, itd.

Iako tehnološki proces kojem bi odgovarao proračunski model iz ovog rada (trenutni iskop tunela i trenutno oblaganje) nije moguće realizovati u stvarnosti, modeliranje ravnog stanja deformacija je ipak korisno jer dobijeni rezultati ukazuju na red vrednosti napona i deformacija koje treba očekivati u realnosti. Tako, pravilnim izborom veličine i rasporeda elemenata i parametara koji definišu svojstva materijala dobijaju se rezultati koji mogu poslužiti za optimalno dimenzionisanje tunelske konstrukcije.

Dakle, da bi se odredio broj, odnosno veličina elemenata u montažnoj tunelskoj konstrukciji, neophodna je kompleksna tehničko-ekonomska analiza niza faktora.

## LITERATURA

- [1] Tadić, Lj.: Naponsko-deformacijska analiza montažnih obloga saobraćajnih tunela, Magistarski rad, Građevinski fakultet Subotica, 2008.
- [2] Popović, B.: Tuneli, Građevinska knjiga, Beograd, 1987.
- [3] Lukić, D., Prokić, A., Tadić Lj.: Hoek-Brown-ov kriterijum loma, Simpozijum, Zlatibor, Društvo građevinskih konstruktera Srbije, 24-26 Sepembar, 2008., str. 703- 713, ISBN 978-86-85073-04-5
- [4] Lukić, D., Zlatanović, E.: Naponsko-deformacijsko stanje za uslove reološkog modela, Kongres konstruktera, Vrnjačka Banja: Društvo konstruktera, 12-13 septembar, 2004., str. 387- 393
- [5] Lukić, D., Anagnosti, P.: Principi i primena NATM postupka, Izgradnja, 2000., No. 9-10/00, str. 268- 272, UDK: 624.192.001.4
- [6] Lukić, D.: Q sistem klasifikacije stenskih masa, Izgradnja, 2004, No. 1-2/2004., str. 20- 25, UDK: 624.131.2

## **ANALYSES THE IMPACT OF THE NUMBER AND POSITION OF JOINT COUPLINGS TO THE TENSION AND DEFORMATION OF THE MOUNTING LINING OF THE TRAFFIC TUNNEL**

**Summary:** *The prefabricated elements, that is, circular shaped reinforced support is in ever increasing application in building of tunnel constructions. Depending on the conditions, various methods of calculation for such reinforced supports are being applied. One of them is the calculation of the circular shaped lining in a flexible environment, which has proven to be the most efficient solution so far. This work analyses the impact of the number and position of joint couplings to the tension and deformation of the tunnel construction (mounting lining) of the traffic tunnel. The analyses have been made for the single-track railroad tunnel and for highway tunnel with two traffic lanes. They are based on the interactive relation between rock volume and tunnel lining, and on the presumption of the homogeneity of the material and flexible behaviour of the tunnel lining.*

**Key words:** *Tunnel, tunnel construction, mounting lining, analyses, tension, deformation, joint couplings.*