

Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa

Ekrem Bektašević

„PPG“ d.o.o. Sarajevo, dr. sc., bektasevic.ekrem@gmail.com

Hrvoje Antičević

„PPG“ d.o.o. Sarajevo, dr. sc., anticevic.zagreb@gmail.com

Reuf Kadrić

JP Autoceste FBiH Mostar, dipl. ing. rud., reuf.kadric@gmail.com

Sead Kadrić

„FM INŽENJERING“ d.o.o. Sarajevo, dipl. ing. rud., sead.kadric@gmail.com

Nermin Šehagić

„PPG“ d.o.o. Sarajevo, dipl. ing. građ., n.sehagic@ppg.ba

Sumeja Zukan

„PPG“ d.o.o. Sarajevo, BA. ing. geol., s.zukan@ppg.ba

Sažetak: Koridor Vc unaprjeđuje povezivanje Bosne i Hercegovine sa susjednim zemljama i poboljšava potencijal za razvoj gospodarstva. Autocesta koridor Vc u Bosni i Hercegovini se pruža od sjeverne granice s Republikom Hrvatskom od Svilaja do Čapljine na južnoj granici s Republikom Hrvatskom, u mjestu Bijača. Tunel Zenica je dio autoceste Koridora Vc na području općine Zenica i predstavlja trenutno najduži iskopani tunel ukupne dužine 3.330 metara. Radovi na iskopu izvođeni su kombinacijom miniranja i strojnim iskopom. Iskop tunela izvođen je u sedimentnim tvorevinama (flišolika gornjo vrandučka serija ²JK). Iskopom tunela miniranjem s prilagođenim bušačko-minerskim parametrima u stijenskoj masi lošijeg kvaliteta postižu se optimalniji rezultati u odnosu na strojni iskop.

Ključne riječi: tunel, stijenska masa, strojni iskop, bušenje, miniranje, prekopprofilni iskop

Determining the optimal method of excavation of the Zenica tunnel as a function of minimal damage to rock mass of poorer quality outside the excavation profile

Abstract: Corridor Vc enhances the connection of Bosnia and Herzegovina with neighboring countries and improves the potential for economic development. The Corridor Vc motorway in Bosnia and Herzegovina stretches from the northern border with the Republic of Croatia from Svilaj to Čapljina on the southern border with the Republic of Croatia, in Bijača. The Zenica tunnel is part of the Corridor Vc motorway in the municipality of Zenica and is currently the longest excavated tunnel with a total length of 3,330 meters. Excavation works were performed by a combination of blasting and machine excavation. The excavation of the tunnel was performed in sedimentary formations (flysch-like Upper Vranduk series ²JK). Excavation of tunnels by blasting with adjusted drilling and blasting parameters in rock mass of poorer quality achieves better results in relation to machine excavation.

Key words: tunnel, rock mass, machine excavation, drilling, blasting, overbreak

Bektašević, E., Antičević, H., Kadrić, R., Kadrić, S., Šehagić, N., Zukan, S.

Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa

1. UVOD

Tunel „Zenica“ nalazi se u sklopu autoceste na koridoru Vc, dionica Sjeverna administrativna granica općine Zenica (Nemila) – Zenica Sjever, poddionica Ponirak – južni izlaz iz tunela Zenica. Tunel je projektiran s dvije tunelske cijevi od kojih svaka ima po dvije prometne trake širine 3,50 m i rubnu traku širine 0,35 m.

Početak iskopa lijeve tunelske cijevi je od stacionaže km 0+153.62 a kraj tunela, odnosno iskopa je u stacionaži km 3+435,614, te dužina lijeve tunelske cijevi iznosi $L=3.281,994$ m'. Početak iskopa desne tunelske cijevi je od stacionaže km 0+155.76 a kraj tunela, odnosno iskopa je u stacionaži km 3+485,61, te dužina desne tunelske cijevi iznosi $L=3.329,850$ m'.

Tunelski iskop lijeve tunelske cijevi u dužini 2.395,36 m' i desne tunelske cijevi u dužini 2.440,14m' izveo je izvođač Euro-asfalt, dok je ostatak tunelskog iskopa izvršila turska kompanija Cengiz. Maksimalni nadsloj tunela „Zenica“ iznosi cca 470 m'.

Lijeva i desna tunelska cijev povezane su s deset poprečnih prolaza za pješake i tri prolaza za vozila.

Duž poddionice Ponirak – Južni izlaz iz tunela Zenica, prema programu istraživanja i projektnom zadatku izvedeni su sljedeći radovi:

- geodetsko iskolčenje položaja geotehničkih istražnih radova.
- bušenje četiri geotehničke istražne bušotine pojedinačnih dubina Bo1 12 m', Bt1 i Bt2 25 m' i Bt3 40 m'; ukupno 102 m' bušenja. Bušenje je izvedeno rotacijskom tehnikom s kontinuiranim jezgrovanjem uz pomoć dvostrukih jezgrenih cijevi.
- terenska inženjersko geološka determinacija jezgre istražnih bušotina.
- inženjersko geološko kartiranje lokacije.
- fotografiranje jezgre istražnih bušotina.
- geofizički istražni radovi (refrakcijska seizmika) i
- laboratorijska ispitivanja na uzorcima stijene.



Slika 1. Geografski položaj tunela Zenica na trasi koridora Vc

Bektašević, E., Antičević, H., Kadrić, R., Kadrić, S., Šehagić, N., Zukan, S.

Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa

2. INŽENJERSKO GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE STIJENSKE MASE U ZONI ISKOPA TUNELA „ZENICA“

Litološka građa terena predstavljena je mezozojskim tvorevinama (flišolika gornjo vrandučka serija ²JK). Na temelju mineralno-petrografske analize stijena iz iskopa konstatirano je kako su u litološkoj građi zastupljeni slijedeći litološki članovi: laporci, glinoviti laporci, glinci hematitni tektonizirani i podređeno pješčari.

Odlika jurskokrednog kompleksa duž tunelskog iskopa je i naizmjenično vertikalno i lateralno smjenjivanje litoloških članova. Litološki članovi su promjenljive debljine, ali tijekom iskopa na otvorenom čeonom profilu najčešći interval debljine slojeva je od 6 do 20 cm.

Pukotine su uglavnom ispunjene mekom glinovitom i tvrdom kalcitnom ispunom, a pojedine pukotine su otvorene i bez ispune. Zidovi pukotina koje su ispunjene kalcitnom ispunom su neznatno hrapavi, dok su zidovi pukotina koje su ispunjene glinovitom ispunom glatki do skliski. Pored ispućanosti na otvorenim čeonim profilima lako se uočavala i promjena u boji osnovne stijene.

Diskoloracija stijenske mase prisutna je u dobroj mjeri s naglašenim intenzitetom duž međuslojnih diskontinuiteta. Promjena boje ukazuje na trošnost i aliteraciju. Filtracija ili protjecanje podzemne vode kroz stijensku masu odvija se kroz pukotine, rasjede i rasjedne zone.

Niske vrijednosti RMR-a su uzrokovane geološkom građom terena u kojem se vrši iskop, u prvom redu, zbog heterogenosti i anizotropnosti građe, odnosno promjenljivih i dominantno loših fizičko-mehaničkih karakteristika, nepovoljnih vodno-fizičkih svojstava, smjenjivanju mekih i čvrstih stijena, nepovoljne orijentacije diskontinuiteta, te zbog utjecaja tektonskih aktivnosti.

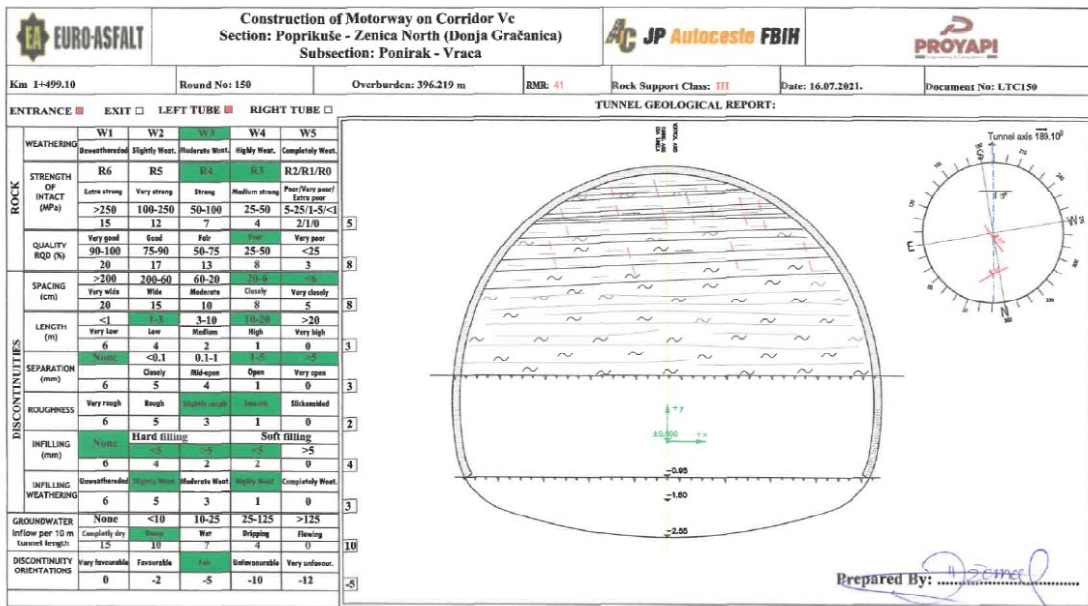
Na temelju geomehaničke RMR klasifikacije za stijensku masu, geološkim kartiranjem definirani su sljedeći parametri od stac. 1+499,10 do 1+536,00 u lijevoj tunelskoj cijevi:

- Litološku građu stijenske mase čine glinci i laporci. Udio glinca iznosi cca. 60%, a laporca cca. 40%. Glinac se odlikuje tankoslojevitom teksturom i slabim fizičko-mehaničkim karakteristikama, dok se laporac odlikuje slojevitom teksturom i pelitno-klastičnom strukturom.
- Jednoosna tlačna čvrstoća glinca na osnovu prethodnih laboratorijskih ispitivanja i terenskim opitom pomoću geološkog čekića jest u intervalu od 25 do 50 MPa, a laporca u intervalu od 50 do 100 MPa. Na temelju procentualnog udjela glinca i laporca određena je srednja vrijednost tlačne čvrstoće.
- Kvalitet stijenske mase (RQD) mjeren na čelu iskopa je u intervalu od 25 do 50%, što odgovara ispućalim stijenama lošeg kvaliteta.
- Razmak diskontinuiteta je manji, kreće se od 6÷20 cm, dok je dužina diskontinuiteta u granicama od 10÷20 m.
- Zijev diskontinuiteta je zatvoren, i kreće se od 1÷5 mm, dok su veći zabilježeni od 5 mm. Diskontinuiteti su glatki i blago hrapavi, ispunjeni tvrdom kalcitnom i mekom glinovitom ispunom. Dominantan je slojni diskontinuitet. Slojevi se pružaju okomito na os tunela uz zalijeganje od 15° suprotno pravcu napredovanja tunelskog iskopa, što predstavlja dobru orijentaciju slojevitosti u odnosu na os tunela.
- Procjeđivanje podzemne vode je evidentirano na kontaktu glinca i laporca u vidu vlaženja (manje od 10 l/min).

Bektašević, E., Antičević, H., Kadrić, R., Kadrić, S., Šehagić, N., Zukan, S.
Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa



Slika 2. Prikaz čela radilišta, stacionaža 1+499,10 - lijeva tunelska cijev



Slika 3. Geološko izvješće, stacionaža 1+499,10 - lijeva tunelska cijev

U tablici 1. dan je prikaz procentualnog udjela projektiranih kategorija stijenske mase i onih koje su definirane tijekom iskopa za obje tunelske cijevi.

Bektašević, E., Antičević, H., Kadrić, R., Kadrić, S., Šehagić, N., Zukan, S.

Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa

Tablica 1. Prikaz procentualnog udjela kategorizacije stijenske mase (Projektirano-Izvedeno)

Kategorizacija stijenske mase	Proc. udio projektiranih kategorija (%)	Proc. udio stvarnih kategorija def. iskopom (%)
III. kategorija	96,43	45,72
IV. kategorija	2,74	44,93
V. kategorija	0,83	9,35
Ukupno:	100,00	100,00

Prikaz procentualnog udjela kategorizacije stijenske mase (Projektirano-Izvedeno)

■ Procentualni udio projektiranih kategorija stijenske mase (%)

■ Procentualni udio stvarnih kategorija definiranih iskopom (%)

Iz prethodne tablice vidljivo je kako postoje značajne razlike u procentualnom udjelu kategorizacije stijenske mase između projektiranih i stvarnih kategorija koje su definirane iskopom. Kao podloga za izradu Glavnog projekta provedeni su geološki istražni radovi koji nisu bili dostatni za precizniju procjenu geološke građe u zoni iskopa tunela „Zenica“ radi čega je došlo do značajnih razlika između udjela projektiranih i stvarnih kategorija definiranih iskopom.

3. ODREĐIVANJE OPTIMALNE METODE ISKOPA TUNELA ZENICA U STIJENSKOJ MASI S MANJOM VRIJEDNOSTI RMR-A

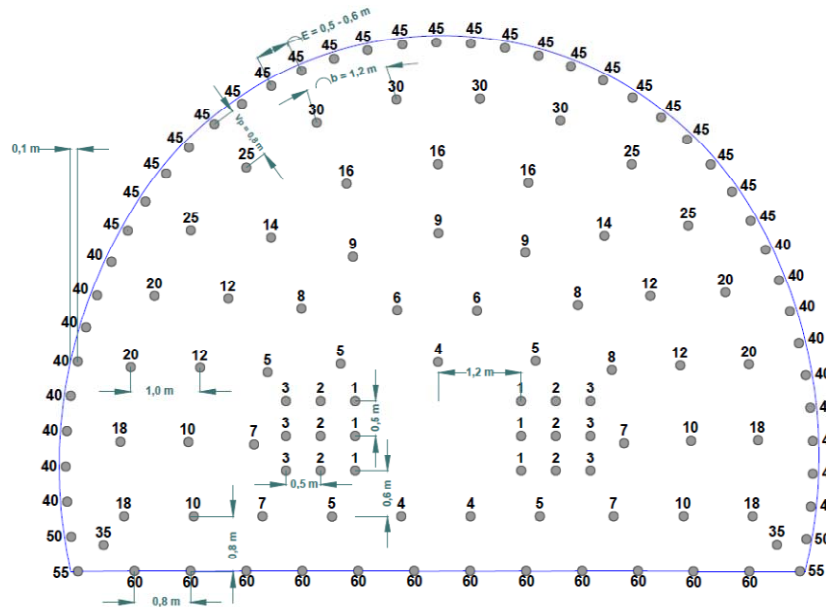
Iskop tunela Zenica rađen je uz primjenu Nove austrijske tunelske metode (NATM). Imajući u vidu česte promjene inženjersko-geoloških karakteristika stijenske mase u dijelu iskopa tunela, NATM je omogućavala primjenu višefaznog iskopa, uz istovremeno osiguranje iskopa primarnom podgradom. Iskop tunela je rađen strojno, miniranjem ili kombiniranjem miniranja sa strojnim iskopom, a sve u ovisnosti o geološkim karakteristikama stijenske mase u zoni iskopa tunela.

Glavnim geotehničkim projektom je procijenjeno (na temelju provedenih istražnih radova i raspoloživih geoloških podloga) kako će se iskop tunela Zenica izvoditi u III. kategoriji stijenske mase od 96,43% a kako će samo 3,57% biti IV. i V. kategorija. Na temelju procjene kategorizacije stijenske mase dopunskim rudarskim projektom (DRP) obrađeni su svi tehničko-tehnološki parametri bušenja i miniranja za stijensku masu jednoosne tlačne čvrstoće od 100 MPa, te je na temelju usvojene čvrstoće izvršen proračun svih tehničkih parametara za bušenje i miniranje, a koji su navedeni u nastavku:

- q - specifična potrošnja eksploziva 1,60 (kg/m³);
- N_{pom.} - broj pomoćnih minskih bušotina 69 (buš.);
- N_{pod.} - broj podnih minskih bušotina 12 (buš.);
- N_{kon.} - broj konturnih minskih bušotina 44 (buš.);
- N - broj svih minskih bušotina 125 (buš.).

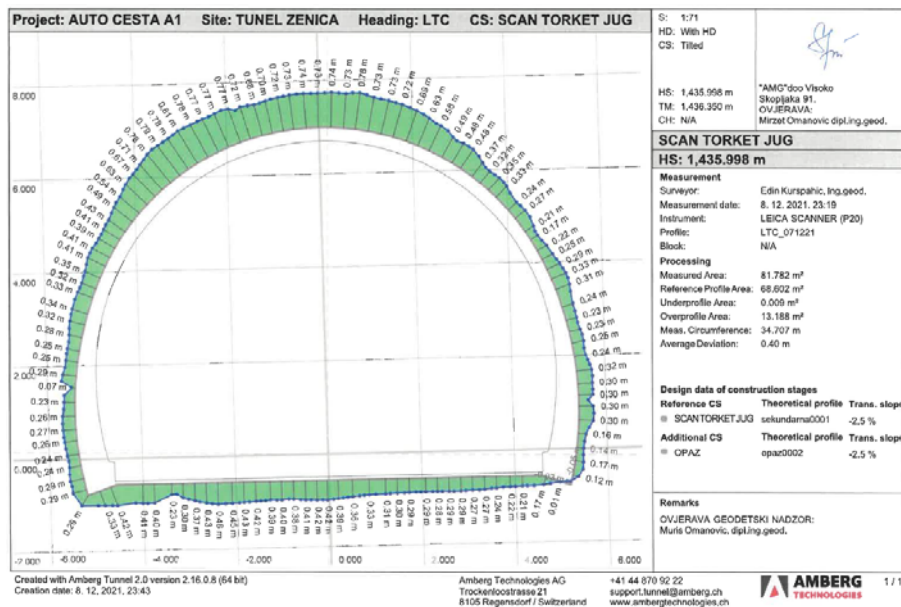
Bektašević, E., Antičević, H., Kadrić, R., Kadrić, S., Šehagić, N., Zukan, S.

Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa



Slika 4. Shema rasporeda minskih bušotina na profilu i raspored detonatora po bušotinama, za korak napredovanja od 3,0m' [1]

Iskop tunela metodom miniranja izvođač je primijenio u obje tunelske cijevi uz određene korekcije tehničkih parametara koje su određene orijentaciono bez detaljnih analiza inženjersko-geoloških karakteristika stijenske mase, kao i bušačko-minerskih parametara u slabijoj stijenskoj masi RMR-a (32=43), te je kao rezultat imao nepravilne oblike profila iskopa kao i značajne prekoprofilne iskope koji su prelazili i preko 13 m² po cijelom profilu tunela. Karakterističan jedan takav profil iskopa tunela miniranjem prikazan je na geodetskom snimku (Slika 5.) čela tunela u LTC, stacionaža 1+435,998.



Slika 5. Geodetski prikaz nakon provedenog iskopa miniranjem u slabijoj stijenskoj masi

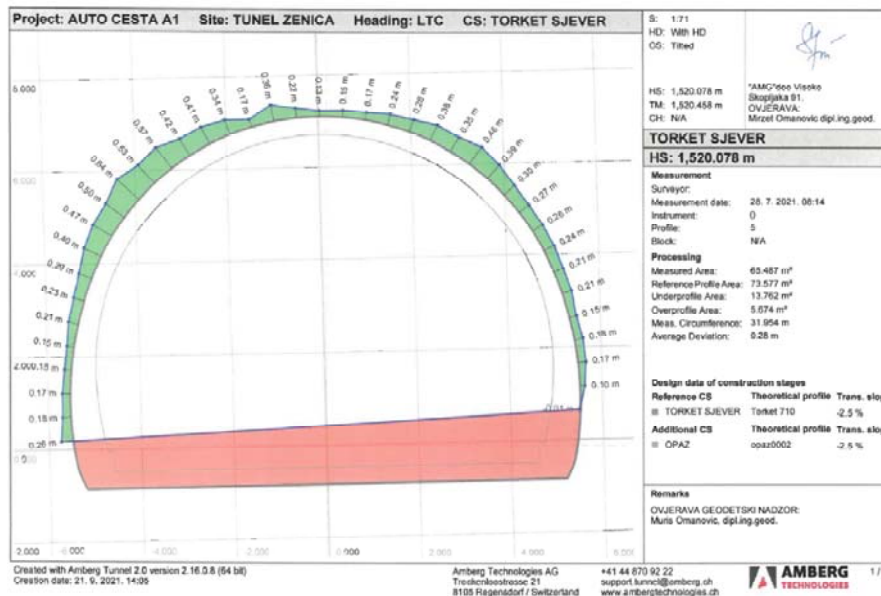
Bektašević, E., Antičević, H., Kadrić, R., Kadrić, S., Šehagić, N., Zukan, S.

Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa

Nakon jako loših rezultata nakon provedenog iskopa tunela miniranjem izvođač radova se odlučuje da iskop tunela u slabijim stijenskim masama (definirani RMR od 32÷43) izvodi strojnim putem. Na slici 6., dan je prikaz iskopa punog profila strojnim putem u LTC od stacionaže 1+518,00 do 1+520,00 dok je na slici 7., dan geodetski prikaz čela u LTC nakon provedenog iskopa strojnim putem od stacionaže 1+518,00 u dužini 2,0 metra.



Slika 6. Strojni iskop punog profila u LTC na stacionaži 1+518,00 do 1+520



Bektašević, E., Antičević, H., Kadrić, R., Kadrić, S., Šehagić, N., Zukan, S.

Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa

Svaki iskop tunela koji nema približno pravilan oblik, kao i veći prekopofilni iskop od 3 m² nije prihvatljiv s ekonomskog aspekta radi čega su autori ovog rada pristupili temeljitoj analizi određivanja svih neophodno potrebnih parametara bušenja i miniranja u slabijoj stijenskoj masi.

3.1 Određivanje koeficijenta čvrstoće stijenske mase (f)

Kako bi se računskim putem odredili orijentacijski bušačko-minerski parametri, potrebno je odrediti koeficijent čvrstoće stijenske mase (f), koji predstavlja osnovu za izračun broja minskih bušotina na profilu tunela (kom), kao i specifične potrošnje eksploziva (kg/m³). Koeficijent čvrstoće stijenske mase određen je po Baronovoj jednadžbi:

$$f = \frac{\sigma_p}{300} + \sqrt{\frac{\sigma_p}{30}} \quad (1)$$

Utvrđeni RMR od strane geologa Izvođača i Nadzora [8] od stacionaže 1+499,10 do stacionaže 1+536,00 iznosi 41, te je na temelju toga, usvojena jednoosna tlačna čvrstoća uz uvažavanje svih ostalih geomehaničkih parametara za proračun od 40 MPa tako da se može izračunati koeficijent čvrstoće stijenske mase za navedeni dio tunela.

$$f = \frac{\sigma_p}{300} + \sqrt{\frac{\sigma_p}{30}} = \frac{400}{300} + \sqrt{\frac{400}{30}} = 4,98 \approx 5$$

3.2 Određivanje specifične potrošnje eksploziva kod iskopa s jednom slobodnom površinom (q)

Specifična potrošnja eksploziva kod izrade cestovnih, željezničkih i hidrotehničkih tunela (većih poprečnih presjeka > 25,0 m²), određuje se na temelju površine poprečnog presjeka prostorije, broja slobodnih površina iskopa, promjera bušenja minskih bušotina, karakteristika eksploziva i karakteristika stijenske mase. Za proračun specifične potrošnje eksploziva može se koristiti jedan od najrasprostranjenijih obrazaca za određivanje ovog parametra miniranja - obrazac F. Laresa, koji u svom sastavu uzima u obzir vrstu stijenske mase (fizičko-mehaničke karakteristike), ali i upotrijebljenu vrstu eksploziva [7]:

$$q = q_1 \cdot v \cdot s \cdot \frac{e}{g} \cdot d \cdot k \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (2)$$

gdje je:

$$q_1 = \frac{\sigma_p}{2000} \quad (3)$$

σ_p - čvrstoća na tlak stijenskog masiva u kome se izvodi miniranje, 40 MPa = 400 bar;

v - koeficijent stiješnjenosti mine (za jednu slobodnu površinu-čelo tunela) 2,5;

s - koeficijent sklopa strukture stij. mase za uvjete masivne homogene strukture 1,0;

g - koeficijent zbijenosti eksplozivnog punjenja (za plastične eksplozive) 1,0;

d - koeficijent začepljenosti mine (za bušotine koje nisu dobro začepljene) 0,8;

Bektašević, E., Antičević, H., Kadrić, R., Kadrić, S., Šehagić, N., Zukan, S.

Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa

k – koef. korekcije (za odgovarajući odnos promjera bušotine i promjera eksploziva) 1,0;
 e - koeficijent relativne snage eksploziva koji se računa se preko sljedećeg izraza:

$$e = \frac{A}{A_x} \quad (4)$$

Koeficijent čvrstoće stijene za dane uvjeta iznosi:

$$q_1 = \frac{\sigma_p}{2000} = \frac{400}{2000} = 0,20$$

Koeficijent relativne snage eksploziva iznosi:

$$e = \frac{A}{A_x} = \frac{480}{390} = 1,23 \approx 1,25$$

Primjenom Laresovog obrasca i uvrštavanjem izračunatih vrijednosti koeficijenta u isti, dobijemo specifičnu potrošnju eksploziva:

$$q = q_1 \cdot v \cdot s \cdot \frac{e}{g} \cdot d \cdot k = 0,20 \cdot 2,5 \cdot 1,0 \cdot \frac{1,25}{1,0} \cdot 0,8 \cdot 1,0 = 0,50 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

Radi sigurnosti za pozitivan efekt miniranja, specifičnu potrošnju eksploziva dobivenu računskim putem potrebno je povećati za cca. 10 % tako da je usvojena specifična potrošnja eksploziva za daljnji proračun: 0,55 (kg/m³).

3.3 Određivanje broja minskih bušotina kod iskopa punog profila (N_b)

Postoji više empirijskih obrazaca i izraza pojedinih autora (Protođakonov, Sieberg, Š. I., Ibrajev) za približno određivanje broja minskih bušotina. Ukupni potreban broj minskih bušotina, kod jedne slobodne površine, ovisi o: vrsti upotrijebljenog eksploziva, veličini poprečnog presjeka tunela i koeficijentu čvrstoće stijene, a podijeljen je na dva različita proračuna:

$$N_b = N_p + N_k \text{ (buš.)} \quad (5)$$

gdje je:

N_p – broj pomoćnih minskih bušotina (buš.);

N_k – broj konturnih minskih bušotina (buš.).

3.4 Određivanje broja pomoćnih minskih bušotina (N_p)

Broj pomoćnih minskih bušotina može se odrediti na temelju više relacija, pri čemu je najbolje odabrati onu koja je u funkciji čvrstoće stijene koja se minira i površine presjeka koji se izbija, jedna od takvih je relacija [2] ima sljedeći oblik:

Bektašević, E., Antičević, H., Kadrić, R., Kadrić, S., Šehagić, N., Zukan, S.

Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa

$$N_p = 0,27 \cdot F_i \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot \sigma}{F_i}} \quad (6)$$

gdje je:

F_i - površina presjeka koji se izbija (77 m² bez plitkih temelja);

σ - čvrstoća na tlak stijenskog masiva u kojem se izvodi miniranje (40 MPa).

$$N_p = 0,27 \cdot F_i \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot \sigma}{F_i}} = 0,27 \cdot 77 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot 40}{77}} = 47,39 \approx 48(\text{buš.})$$

3.5 Određivanje broja konturnih minskih bušotina (N_k)

Kako bi se odredio broj konturnih minskih bušotina prije svega je potrebno odrediti rastojanje između konturnih minskih bušotina.

Rastojanje između konturnih mina (u svodu i zidovima tunela) može se izraziti kako slijedi [2]:

$$E = (12 \div 15) \cdot d(m') \quad (7)$$

gdje je:

d – promjer minske bušotine 0,045 m'.

$$E = (12 \div 15) \cdot d = (12 \div 15) \cdot 0,045 = 0,55 \div 0,65(m')$$

Imajući u vidu kako se radi o slabijoj čvrstoći stijene, usvaja se srednja vrijednost: $E=0,60 m'$.

Broj konturnih bušotina ovisi o opsegu prostorije bez podine (P_o) i o rastojanju između konturnih minskih bušotina, te se računa po jednadžbi:

$$N_k = \frac{P_o}{E}(\text{buš.}) \quad (8)$$

Oba podatka su poznata, pa slijedi:

$$N_k = \frac{P_o}{E} = \frac{21}{0,6} = 35(\text{buš.})$$

Ukupan broj minskih bušotina, prilikom miniranja u punom profilu jednak je:

$$N_b = N_p + N_k = 48 + 35 = 83(\text{buš.})$$

Na temelju izračunate udaljenosti između konturnih minskih bušotina, određuje se liniju najmanjeg otpora za konturne minske bušotine (W), prema sljedećoj jednadžbi:

$$W = \frac{E}{m}(m') \quad (9)$$

Bektašević, E., Antičević, H., Kadrić, R., Kadrić, S., Šehagić, N., Zukan, S.

Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa

gdje je:

E – udaljenost između konturnih bušotina 0,60 m';

m – koeficijent zblžavanja minskih bušotina, koji za slabije stijene iznosi u prosjeku 0,8.

$$W = \frac{E}{m} = \frac{0,6}{0,8} = 0,75 \approx 0,80(m')$$

3.6 Određivanje geometrije minskog polja (a, b)

Udaljenost konturnih minskih bušotina je poznata, kao i udaljenost podinskih minskih bušotina, dok se rastojanje između konturnih minskih bušotina i prvog reda odbojnih - pomoćnih minskih bušotina, određuje kod čvršćih stijena kako slijedi [1]:

$$V_p = W + (0,2 \div 0,3)(m') \quad (10)$$

gdje je:

W - linija najmanjeg otpora; u ovome slučaju iznosi 0,8 m', tako da je:

$$V_p = W + (0,2 \div 0,3) = 0,8 + (0,2 \div 0,3) = 1,0 \div 1,1(m')$$

Rastojanje između pomoćnih minskih bušotina jednako je liniji najmanjeg otpora pomoćnih minskih bušotina i računa se prema izrazu:

$$b = k_z \cdot W \quad (11)$$

gdje je:

k_z - koeficijent zblženja mina, za ovaj slučaj usvaja se: 0,95;

W - linija najmanjeg otpora pomoćnih minskih bušotina (m').

Linija najmanjeg otpora za pomoćne minske bušotine može se odrediti kako slijedi:

$$W = d \cdot \sqrt{\frac{7,85 \cdot \rho \cdot k_p}{q \cdot k_z}} (m') \quad (12)$$

gdje je:

d - promjer bušenja, u ovom slučaju iznosi: 45 mm tj. 0,45 dm;

ρ - zapreminska težina eksploziva: 1.45 kg/dm³;

q - specifična potrošnja eksploziva: 0,55 kg/m³;

k_z - koeficijent zblženja bušotina: 1,0;

k_p - koef. popunjenosti poprečnog presjeka minske bušotine koji se računa kako slijedi:

$$k_p = \frac{d_1^2}{d^2} \quad (13)$$

gdje je:

d_1 - promjer patrone eksploziva: 38 mm;

Bektašević, E., Antičević, H., Kadrić, R., Kadrić, S., Šehagić, N., Zukan, S.

Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa

d - promjer minske bušotine: 45 mm.

$$k_p = \frac{d_1^2}{d^2} = \frac{38^2}{45^2} = 0,72$$

Sada se može izračunati linija najmanjeg otpora za pomoćne minske bušotine primjenom jednadžbe (12):

$$W = d \cdot \sqrt{\frac{7,85 \cdot \rho \cdot k_p}{q \cdot k_z}} = 0,45 \cdot \sqrt{\frac{7,85 \cdot 1,45 \cdot 0,72}{0,55 \cdot 1,0}} = 0,45 \cdot \sqrt{14,9} \approx 1,74(m')$$

Rastojanje između pomoćnih minskih bušotina jednako je :

$$b = k_z \cdot W = 0,95 \cdot 1,74 = 1,65(m')$$

Usvaja se rastojanje između pomoćnih minskih bušotina od 1,60 do 1,70 (m'). Količina eksploziva za jedno miniranje računa se po jednadžbi:

$$Q = q \cdot S \cdot l(kg) \tag{14}$$

gdje je:

q - specifična potrošnja eksploziva: 0,55 kg/m³;

S - površina izbijenog profila: cca. 77 m²;

l - dužina minske bušotine cca. 2,0 m'.

U konačnici, dobije se potrošnja eksploziva po jednom miniranju za korak napredovanja od 2,0 m' u iznosu od:

$$Q = q \cdot S \cdot l = 0,55 \cdot 77 \cdot 2,0 = 84,70(kg)$$

Na temelju svih definiranih i proračunatih parametara izrađena je shema rasporeda minskih bušotina na čelu tunela, kao i raspored serija neelektričnih detonatora po bušotinama koja je prikazana na slici 8.

Bektašević, E., Antičević, H., Kadrić, R., Kadrić, S., Šehagić, N., Zukan, S.

Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa

Tablica 3. Prikaz korištenih neelektričnih detonatora

Korišteni serijski neelektrični detonatori označeni na shemi rasporeda min. bušotina	1	2	3	4	20	25	30	40	45	50	60	70	75
Usporenje (ms)	100	200	300	400	2000	2500	3000	4000	4500	5000	6000	7000	7500

Tablica 4. Prikaz osnovnih karakteristika korištenog eksploziva

Karakteristike korištenih eksploziva	Plastični eksploziv	Konturni eksploziv
Gustoća (kg/dm ³)	1,20	1,10
Energija eksplozije (KJ/kg)	4850,00	4850,00
Plinovita zapremina (l/kg)	921,00	921,00
Promjer patrone (mm)	38,00	27,00
Dužina patrone (mm)	400,00	230,00
Težina patrone (kg)	0,475	0,128

Definiranjem sheme minskih bušotina (Slika 8.) s rasporedom detonatora po bušotinama na profilu za iskop tunela Zenica u slabijoj stijenskoj masi RMR (33÷43) pristupilo se primjeni svih dobivenih bušačko-minerskih parametara na stacionaži 1+522.08, a što je prikazano na slikama u nastavku. Na slici 9. dan je prikaz čela LTC na stacionaži 1+522.08, nakon izvršenog bušenja svih minskih bušotina po definiranoj shemi (Slika 8.). Nakon izvršenog bušenja svih minskih bušotina na navedenoj stacionaži izvršeno je punjenje i miniranje uz uvažavanje svih definiranih tehničkih parametara (Slika 8. i tablice 2. i 3.). Nakon završetka miniranja i provjetravanja radilišta izvršen je utovar i odvoz odminiranog materijala, kao i obrada iskopnog profila (Slika 10.), te geodetska provjera iskopne linije u LTC na stacionaži 1+524,088 (Slika 11.).



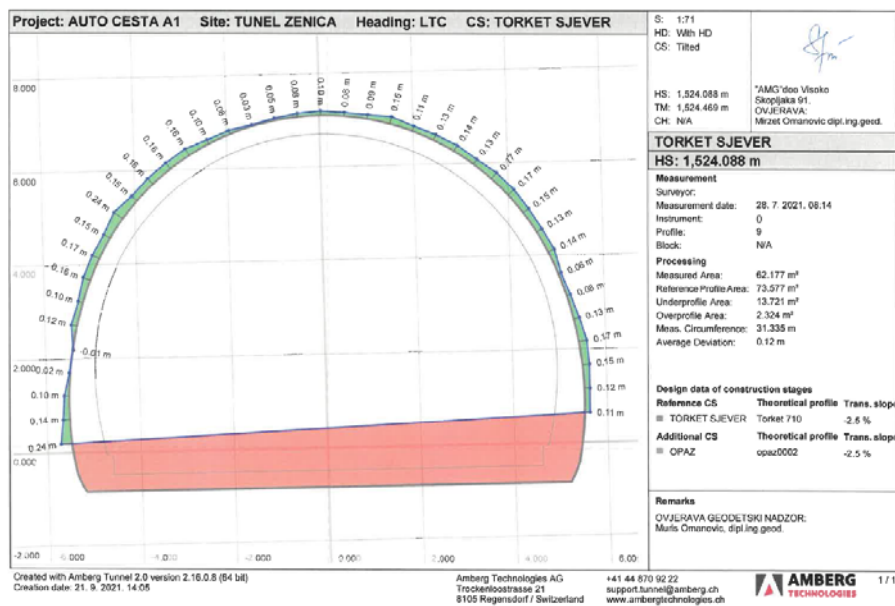
Slika 9. Profil čela LTC na stacionaži 1+522.08 nakon završetka bušenja svih bušotina za miniranje po definiranoj shemi

Bektašević, E., Antičević, H., Kadrić, R., Kadrić, S., Šehagić, N., Zukan, S.

Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa



Slika 10. Profil čela LTC na stacionaži 1+524.088 nakon provedenog miniranja i obrade profila



Slika 11. Geodetski prikaz čela u LTC na stac. 1+524,088 nakon završenog iskopa miniranjem po definiranoj shemi

Bektašević, E., Antičević, H., Kadrić, R., Kadrić, S., Šehagić, N., Zukan, S.

Određivanje optimalne metode iskopa tunela Zenica u funkciji minimalnih oštećenja stijenske mase lošijeg kvaliteta izvan profila iskopa

4. ZAKLJUČAK

Ponašanje konture podzemnog iskopa primarno je kontrolirano strukturnim geološkim karakteristikama stijenske mase. U karbonatnim stijenama, opća stabilnost konture iskopa svodi se na pojave lokalnih nestabilnosti u vidu ispadanja blokova zbog gubitka posmične čvrstoće diskontinuiteta. Najveći utjecaj na iniciranje lokalne nestabilnosti ima dubina zone oštećenja miniranjem, koja, ukoliko je prekomjerna, može dovesti do progresivnog lokalnog loma, odnosno ugrožavanja stabilnosti cijelog podzemnog otvora.

U praksi se, u svakoj kategoriji stijenske mase koja je u projektu predviđena za miniranje obavi probno miniranje zbog potvrde ili korekcija definiranih parametara bušenja i miniranja dopunskim rudarskim projektom.

Studioznom analizom svih raspoloživih tehničko-tehnoloških parametara na tunelu Zenica izvršen je izbor optimalne metode iskopa tunela a koja je osigurala približno pravilan oblik iskopa, te manji prekopprofilni iskop tunela.

Pri iskopu određenih sekcija tunela Zenica strojnim putem, oblik profila iskopa kao i površina prekopprofila u velikoj mjeri ovisile su o strukturnim geološkim karakteristikama stijenske mase i stručnosti radnika koji rukuje strojem za iskop, a što se izravno odrazilo na ekonomsku opravdanost iskopa tunela.

Također, iskop određenih sekcija tunela metodom bušenja i miniranja u slabijoj stijenskoj masi uslijed neprilagođenosti svih bušačko-minerskih parametara geološkim uvjetima u kojoj se izvodio iskop tunela, imao je za posljedicu negativnu ekonomsku opravdanost u odnosu na iskop tunela u istim uvjetima metodom strojnoga iskopa.

Odabirom optimalne metode iskopa zona oštećenja, koja je neminovna pri iskopu miniranjem, minimalizirana je u smislu da je minimalno reducirana čvrstoća i krutost stijenske mase oko konture iskopa, što je imalo za posljedicu očuvanje nosivosti stijenske mase kao najvažnijeg „podgradnog“ elementa. Takvim pristupom smanjene su količine elemenata podgradnog sklopa i troškovi izgradnje tunela Zenica.

LITERATURA

1. Dopunski rudarski projekat za izvođenje rudarskih radova, pri iskopu tunela „Zenica“ na autoputu koridora Vc, poddionica Ponirak – Južni portal tunela Zenica, decembar 2019.
2. Kovačević, J.: Savremeno građenje u podzemlju, AGM Knjiga, Beograd-Zemun, 2014.
3. Jovanović, P.: Izrada podzemnih prostorija velikog profila, Građevinska knjiga, Beograd, 1984.
4. Antičević, H., Dobrilović, M., Perković, H.: Zona oštećenja stijenske mase pri iskopu tunela miniranjem, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Zagreb, 2012.
5. Karlovac, Z.: Miniranje prilikom iskopa tunela Čardak na autocesti Rijeka – Zagreb, RGNF Zagreb, Seminarski rad, 2008.
6. Langefors, U., Kihlstrom, B.: The modern technique of rock blasting, Wiley, New York, 1978.
7. Bektašević, E., Antičević, H., Osmanović, F., Kadrić, S., Žutić, Đ., Konta, J., Tehnologije miniranja pri iskopu evakuacijskog tunela „Vranduk II“ na magistralnoj cesti M-17, Elektronički zbornik radova, Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Mostaru, (str. 49-60), (ISSN 2232-9080 (mrežno izdanje) i DOI: 10.47960/2232-9080), Glavni urednik: dr. sc. Mirna Raič
8. Inženjersko geološki izvještaj za Projekt tunel Zenica (Ponirak-Vraca), lijeva tunelska cijev TZ-LTC-150, od 19.07.2021. godine