

primljen: 22.02.2024.
korigovan: 29.03.2024.
prihvaćen: 03.04.2024.

Izvorni naučni rad

UDK : 624.191.3
<https://doi.org/10.62683/NiP27.13-19>

ODREĐIVANJE DUBINE ZONE OŠTEĆENJA STIJENSKE MASE OKO PROFILA ISKOPA MINIRANJEM SEIZMIČKOM CROSS-HOLE TOMOGRAFIJOM U TUNELU „ŠUBIR“ NA AUTOCESTI ZAGREB-SPLIT

Ekrem Bektašević¹, Hrvoje Antičević², Kemal Gutić³, Denijal Sikira⁴

Rezime: Miniranje je široko primijenjena metoda iskopa u podzemnoj gradnji u I, II, III i IV kategoriji stijenske mase. Međutim, vibracije izazvane eksplozijom, ako nisu pravilno kontrolisane, mogu negativno utjecati na stijensku masu koja okružuje tunel. Nekvalitetan iskop primjenom tehnike miniranja može uzrokovati povećani prekopprofilni iskop i prekomjerno rastresanje okolnog stijenskog masiva te smanjenje nosivosti stijene koja je osnovni podgradni element. Određivanje dubine zone oštećenja stijenske mase oko profila iskopa miniranjem seizmičkom cross-hole tomografijom imala su za cilj odrediti dubinu zone oštećenja i promjene fizičko-mehaničkih svojstava materijala oko konturne površine podzemnog iskopa u III kategoriji stijenske mase, odnosno odrediti intenzitet oštećenja unutar poremećene zone ovisno o udaljenosti od minskog polja i parametara bušenja i miniranja.

Ključne reči: iskop, tunel, miniranje, zona oštećenja, seizmika, cross-hole

DETERMINATION OF THE DEPTH OF THE ROCK MASS DAMAGE ZONE AROUND THE EXCAVATION PROFILE BY BLASTING WITH SEISMIC CROSS-HOLE TOMOGRAPHY IN THE "ŠUBIR" TUNNEL ON THE ZAGREB-SPLIT MOTORWAY

Abstract: Blasting is a widely used excavation method in underground construction in I, II, III and IV categories of rock mass. However, the vibrations caused by the blast, if not properly controlled, can adversely affect the rock mass surrounding the tunnel. Low-quality excavation using the blasting technique can cause increased over-profile excavation and excessive loosening of the surrounding rock mass, as well as a reduction in the load-bearing capacity of the rock, which is the basic supporting element. Determining the depth of the damage zone of the rock mass around the excavation profile by blasting with seismic cross-hole tomography aimed to determine the depth of the damage zone and changes in the physical and mechanical properties of the material around the contour surface of the underground excavation in III. category of rock mass, that is, determine the intensity of damage within the disturbed zone depending on the distance from the minefield and drilling and blasting parameters.

Key words: excavation, tunnel, blasting, damage zone, seismic, cross-hole

¹ Dr.sc. "PPG" d.o.o. Sarajevo, bektasevic.ekrem@gmail.com
ORCID 0000-0001-6742-966X

² Dr.sc. "Krešo Geo" d.o.o. Zagreb, anticevic.zagreb@gmail.com
ORCID N/A

³ Prof.dr.sc.Rudarsko-geološko-građevinski fakultet, Univerzitet u Tuzla, kemal.gutic@untz.ba
ORCID 0009-0008-9107-4641

⁴ "FM Inženjering" d.o.o. Sarajevo, denijal.sikira@gmail.com
ORCID N/A

1 UVOD

Primjena bušenja i miniranja kao metode iskopa tunela u širokoj je primjeni zbog praktične i ekonomske prirode. Obično se s nedovoljnom pažnjom pristupa ovoj fazi rada koja zbog nestručne izvedbe uzrokuje povećanje udjela ostalih radova u fazama izgradnje, a u konačnici i povećanje cijene same izgradnje tunela[1].

Oslobodena energija eksplozivnog punjenja pri miniranju troši se na razaranje i drobljenje stijene, dok se jedan dio pretvara u kinetičku energiju seizmičkih talasa[2].

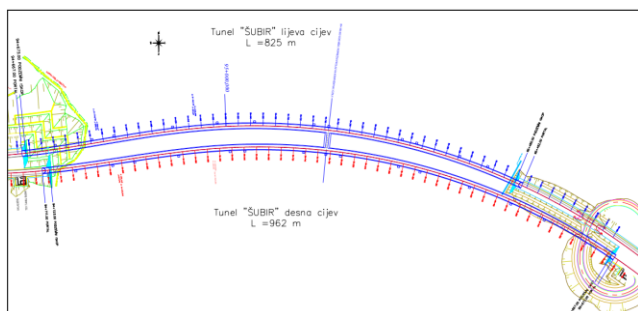
Pri prolasku seizmičkih talasa nastaju oscilacije tla, odnosno umjetni potresi prilikom čega mogu nastati zone oštećenja stijenske mase miniranjem, koja, ukoliko je prekomjerna, može dovesti do progresivnog lokalnog loma, odnosno ugrožavanja stabilnosti cijelog podzemnog otvora[3].

Zona oštećenja stijenske mase pri iskopu miniranjem uključuje prekopprofilni iskop i zonu oštećenja u kojoj su nepovratno promijenjene fizičko-mehaničke i hidrauličke osobine stijenske mase. Među prvima, istraživanje zone oštećenja oko profila iskopa cross-hole metodom izvršena je u galerijskim tunelima na izgradnji brane Martinje[4].

Određivanje zone oštećenja oko profila iskopa miniranjem metodom cross-hole u III. kategoriji stijenske mase vršeno je tokom izgradnje tunela „Šubir“ koji je smješten na autocesti Zagreb-Split-Dubrovnik (A1).

Ukupna dužina desne tunelske cijevi iznosi 962,00 m, dok je dužina podzemnog iskopa 944,00 m. Maksimalni nadsloj desne tunelske cijevi iznosi približno 111 m.

Lijeva tunelska cijev ukupne je dužine 825,00 m, a dužina podzemnog iskopa iznosi 807,00 m. Maksimalan nadsloj lijeve tunelske cijevi iznosi cca 120 m[5]. Prostorni položaj tunela šubir prikazan je na slici 1.



Slika 1. Prostorni položaj tunela „Šubir“ [5]

1.1 INŽENJERSKO-GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE STIJENSKOG MASIVA

Stijenski masiv u kojem je smješten tunel „Šubir“ najvećim dijelom izgrađen je od foraminiferskih krečnjaka paleocena – srednjeg i gornjeg eocena i rudistnih krečnjaka gornje krede.

Os tunela prolazi sedlom između brda Zveč sa sjeverozapadne strane i brda Šubir s jugoistočne strane. Na jugozapadnoj strani brda Zveč prisutne su u kraćim intervalima flišne naslage srednjeg i gornjeg eocena.

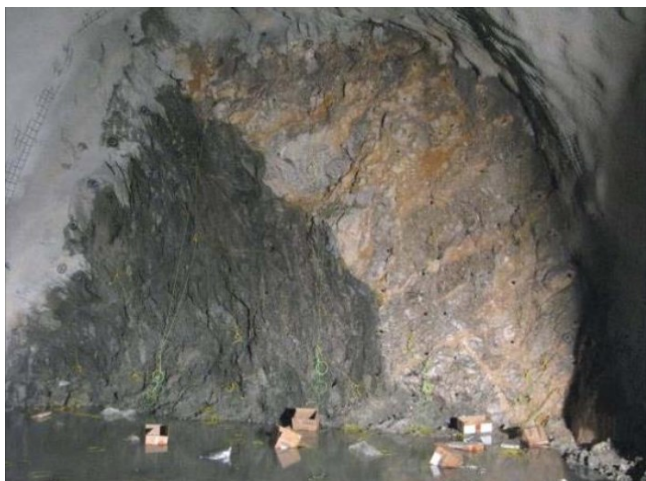
Od ulaznog portala pa do stacionaže 94+750 prisutne su naslage fliša u kojima prevladavaju lapori plavosive boje, koji su uz reversni rasjed u kontaktu s foraminiferskim krečnjacima vrlo razlomljeni.

Stijenski masiv zapadnog dijela tunela do stacionaže 94+915,00 izgrađuju foraminiferski krečnjaci paleocena – srednjeg i gornjeg eocena koji su kompaktni do slabo razlomljeni, a jača razlomljenost je u zonama reversnih rasjeda odvojenih od naslaga fliša.

U svjetlosmeđim foraminiferskim krečnjacima prevladavaju numuliti, osobito u ulaznoj zoni tunela „Šubir“. Brzine seizmičkih talasa (vp) veće su od 2500 m/s, a jednoosna pritisna čvrstoća od 100 – 150 MPa.



Slika 2. Geološki sklop čela u tunelu lijeve tunelske cijevi na stacionaži 94+794



Slika 3. Geološki sklop čela desne tunelske cijevi na stacionaži 94+783

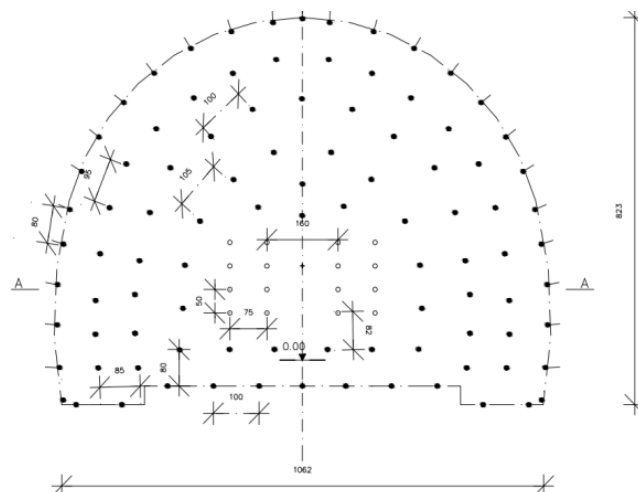
U središnjem i istočnom dijelu stijenskog masiva područja tunela nalaze se rudistni krečnjaci gornje krede. Stijena je kompaktna do slabo razlomljena, mjestimice, osobito bliže rasjedima jače razlomljena, slabo do srednje trošna.

Krečnjaci su svijetlosive do svijetlosmeđe boje i često sadrže zaobljene rožnjačke nodule promjera i do 10 cm. Mjestimice se može naići na pukotine ispunjene tamnosivim do crnim bitumenom. Brzine seizmičkih talasa (Vp) veće su od 3000 m/s, a jednoosna pritisna čvrstoća od 100 – 160 MPa.

1.1.1 Opis minskog polja i miniranja

Iskop tunela započeo je s istočnog portala u punom profilu primjenom tehnike bušenja i miniranja. U stijeni boljih fizičko-mehaničkih karakteristika, iskop se izvodio u cijelosti bušenjem i miniranjem, dok u slabijim stijenama kombinacijom miniranja i mašinskim iskopom. U kritičnim zonama primijenjen je isključivo mašinski iskop. Površina i faznost iskopa profila ovisila je o kategoriji stijenskog masiva.

Istraživanje je obavljeno u III. kategoriji stijenskog materijala, u kojima je površina iskopa iznosila cca 73m². Dubina bušenja iznosila je od 2,5 – 4,3 m, a promjer bušenja Ø 48 mm. Ukupni broj bušotina na čelu iznosio je od 103 – 124 kom uz utrošak od 271 do 501 kg eksploziva po ciklusu miniranja. Za stvaranje nove slobodne površine primjenjivao se dvostruki klinasti zalom s 16 bušotina i trostruki klinasti zalom s 24 bušotine i geometrijom bušenja prikazanom na slici 4.



Slika 4. Raspored minskih bušotina na čelu tunela za iskop u III. kategoriji stijenske mase primjenom dvostrukog klinastog zaloma

Prilikom ispitivanja korištene su dvije vrste eksploziva i to: Elexit – 1 i detonirajući štapin C – 80. Eksplozivom Elexit – 1, promjera Ø 38 mm punjene su sve minske bušotine, dok su konturne bušotine punjene kombinacijom Elexita – 1 i detonirajućeg štapina C - 80. Tehničke karakteristike eksploziva navedene su u tabeli 1.

Tabela 1. Tehničke karakteristike eksplozivnih sredstava upotrijebljenih u tunelu „Šubir“

Tehničke karakteristike	Prečnik (m)	Gustoća (kg/dm ³)	Brzina detonacije (m/s)	Gasna zapremina (l/kg)	Energija eksplozije (MJ/kg)
Elexit-1	0,038	1,4	5300-5800	851	4545
C - 80	0,012	1,4	7000	768	5810

Za miniranje u tunelu izabran je neelektrični sistem iniciranja koji je siguran i jednostavan za upotrebu.

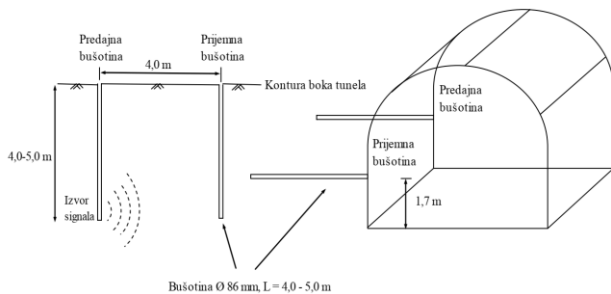
2 METODOLOGIJA

2.1 ISTRAŽIVANJE DUBINE ZONE OŠTEĆENJA STIJENSKE MASE OKO PROFILA ISKOPA SEIZMIČKOM CROSS-HOLE TOMOGRAFIJOM

U cilju definisanja što jasnije slike dubine zone oštećenja oko profila iskopa tunela pod utjecajem miniranja obavljena su geofizička seizmička istraživanja metodom seizmičke cross-hole tomografije. Osnovni razlog primjene ove metode ogleda se u tome da je ovo jedna od najtačnijih seizmičkih metoda ispitivanja u bušotinama, za precizno mjerenje brzina prostiranja elastičnih P (uzdužnih) i S (poprečnih) talasa između bušotina na

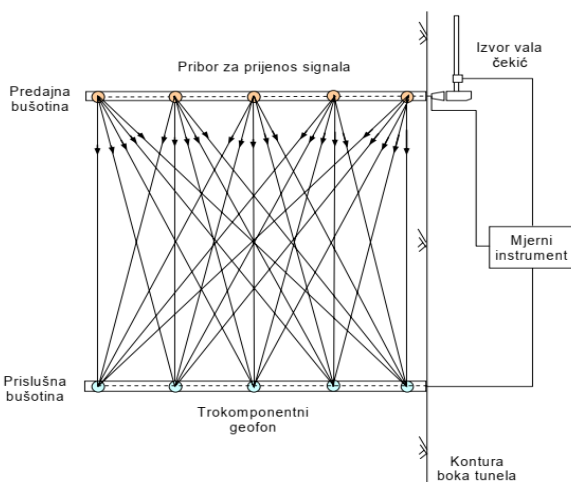
različitim udaljenostima od profila iskopa [6]. Detekcija varijacije ili promjene brzine seizmičkih talasa reflektirat će se na promjene krutosti stijenske mase oko profila iskopa.

Na temelju obrade rezultata vrijednosti brzina prostiranje elastičnih talasa ocjenjuje se stanje i struktura stijenskog masiva kroz lociranje trošnih zona, kaverni i stupanja razlomljenosti. Isto tako obradom rezultata mjerenja P i S talasa računaju se dinamičke konstante elastičnosti stijenske mase. Mjerenja ovom metodom se obično izvode u vertikalnim bušotinama, ali kod predmetnih istraživanja mjerenja su obavljena u horizontalnim bušotinama unutar tunela s prilagođenim mjernim instrumentima. Na slici 5. prikazan je način primjene seizmičke cross-hole tomografije u tunelu „Šubir“.



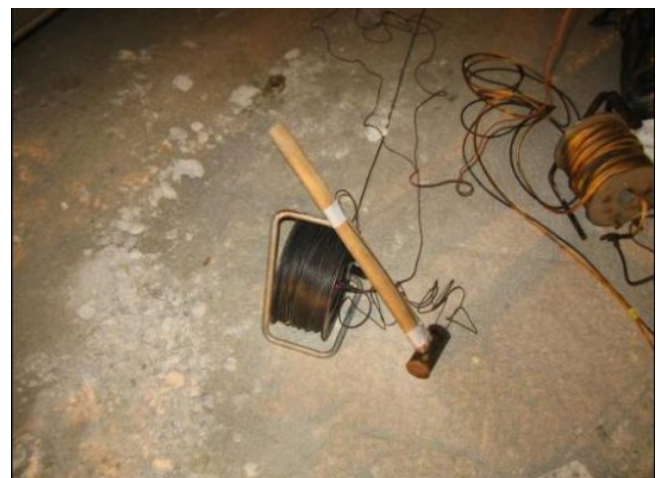
Slika 5. Prikaz primjene metode seizmičke cross-hole tomografije u tunelu „Šubir“ [7]

Postupak mjerenja obuhvaća kontrolirano pobuđivanje elastičnih talasa čekićem preko pribora za prijenos signala u predajnoj bušotini i precizno mjerenje vremena potrebnog da talas prijeđe put do trokomponentnog geofona (3D) u prijemnoj bušotini, kako je prikazano na slici 6.



Slika 6. Šematski prikaz generiranja i prijema talasa seizmičkom cross-hole tomografijom u tunelu „Šubir“ [7]

Generiranje seizmičkih talasa u pobudnoj bušotini izvodi se čekićem (slika 7.) na ušću bušotine, pri čemu se signal prenosi duž bušotine preko šipke na čijem kraju je cilindar koji predaje poremećaj stijenski masiv. S mjesta pobude (od dna bušotine prema ušću u predajnoj bušotini) snimaju se pristigli signali (valovi) na mjerni instrument preko trokomponentnog geofona (slika 8.) u prijemnoj ili prislušnoj bušotini. Snimanje vremena dolaska talasa obavlja se digitalnim seizmografom TERRALOC ABEM MARK VI sa širokom mogućnošću uzorkovanja, filtriranja i obrade registriranih seizmičkih signala. Instrument može obraditi i pohraniti od 256 do 8196 uzoraka po tragu, uz automatsko dinamičko pojačanje do 126 dB.



Slika 7. Pribor za generiranje seizmičkih talasa [7]



Slika 8. Instrumenti za prijem seizmičkih talasa [7]

Cijeli proces mjerenja obavlja se od dna prema ušću bušotine pri čemu se za svaki položaj izvora talasa u predajnoj bušotini obavlja snimanje i pomicanje 3D geofona za jedan metar na sljedeću

lokaciju prema ušću bušotine. Radi što boljeg prijenosa i prijema signala kroz stijenski masiv u bušotinama, koristi se uređaj za priljubljanje uz stijenku bušotine.



Slika 9. Postavljanje mjernih instrumenata i priprema za mjerenja na zadanoj lokaciji [7]

U tunelu „Šubir“ u III. kategoriji stijenskog masiva prema RMR klasifikaciji izbušene su po dvije bušotine (prislušna R i predajna P) Ø 86 mm, duljine u iznosu 4 - 5 m okomito na konturu boka tunela, tabela 2.

Tabela 2. Lokacija mjerenja seizmičkom cross-hole tomografijom

Stacionaža mjerenja Od-do	Kategorija iskopa	Nadsloj (m)	Vrsta bušotine	Oznaka bušotine	Prečnik bušotine (mm)	Dubina bušotine (m)	Rastojanje bušotina (m)
94+792	III	39,80	Prislušna	R-III 792	86	4,0-5,0	3,0
94+789			Predajna	P-III 789		4,0-5,0	

Obrada rezultata mjerenja cross-hole metode uključuju:

- korekciju vremena nailaska uzdužnih i poprečnih talasa,
- proračun brzina uzdužnih i poprečnih talasa,
- određivanje dinamičkih modula iz brzina elastičnih talasa.

Kada se u elastičnom materijalu dogodi pobuda, odmah se generiraju talasi počevši od točke pobude, te napreduju uz smanjenje amplitude oscilacija poremećaja. Svaki od tih talasa ponaša se na karakterističan način, a te karakteristike ovise o elastičnim osobinama materijala. Dobivene i obrađene brzine elastičnih talasa, koje ovise o elastičnim svojstvima materijala kroz koji se talas širi, što je prikazano u navedenim jednadžbama za brzinu

prostiranja P i S valova, služe za proračun dinamičkih konstanti elastičnosti:

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4G}{3}}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2)$$

gdje je:

- v_p - brzina primarnih P-talasa (m/s),
- v_s - brzina sekundarnih S-talasa (m/s),
- ρ - gustoća (10^3 kg/m^3),
- E - Youngov modul (GPa),
- G - modul smicanja (GPa),
- K - modul zapreminske stišljivosti (GPa).

Poznavajući brzine prostiranja elastičnih talasa kroz stijenski masiv i gustoću, moguće je rješavanjem dviju jednačina s dvije nepoznanice izračunati dvije dinamičke konstante kojima se mogu odrediti, odnosno izračunati, i ostale.

$$\alpha = \frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad (3)$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2}{2\left\{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 1\right\}} = \frac{\alpha^2 - 2}{2(\alpha^2 - 1)} \quad (4)$$

$$E = \rho v_p^2 \left(\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \right) \quad (5)$$

$$G = \rho v_s^2 \quad K = \rho v_p^2 \frac{1+\nu}{3(1-\nu)} \quad (6)$$

gdje je:

- ν - Poissonov koeficijent,
- ρ - gustoća stijene. (kg/m^3).

Preko gore navedenih formula izračunate su dinamičke konstante elastičnosti za svaku poziciju mjerenja, a gustoća je izračunata iz vrijednosti brzine uzdužnog (v_p) talasa prema poznatoj Anstyejevoj relaciji prikazanoj u jednačini br.7.

$$\rho = 0,31^4 \sqrt{v_p} \quad (7)$$

3 REZULTATI I DISKUSIJA

Mjerenja su obavljena u stijenskom masivu treće tunelske kategorije od stacionaže 94+792 do

stacionaže 94+789, pri čemu je nadsloj od kalote tunela na mjestu mjerenja iznosio cca. 40 m. Dubina mjerenja od konture iskopa u stijenski masiv iznosila je 4,5 – 5,0 m. U tabeli 3. prikazane su izmjerene i izračunate vrijednosti brzine prostiranja P i S talasa po intervalima dubine za III. kategoriju stijenske mase [8].

Također, prikazani su ukupni rezultati mjerenja brzine prostiranja P (kompresijskih) i S (smičućih) talasa po intervalima dubine i izračunate vrijednosti dinamičkih konstanti elastičnosti za III. kategoriju stijenskog masiva oko profila iskopa tunela „Šubir“.

Tabela 3. Prikaz rezultata mjerenja u III. kategoriji stijen. masiva po intervalima dubine, tunel „Šubir“ [8]

Interval dubine	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Gustoća (10^3 kg/m^3)	Poissonov koeficijent	Youngov modul (GPa)	Modul smicanja (GPa)	Modul zapreminske stišljivosti (GPa)
0,0-1,0	2295	1045	2,15	0,37	6,42	2,34	8,18
1,0-2,0	2540	1320	2,20	0,32	10,08	3,83	9,09
2,0-3,0	2810	1520	2,26	0,29	13,49	5,21	10,87
3,0-4,0	3000	1650	2,29	0,28	16,03	6,25	12,32
4,0-5,0	2700	1380	2,23	0,32	11,26	4,26	10,62

Od konture iskopa prema masivu može se zapaziti linearni rast brzine prostiranja P-talasa, modula elastičnosti kao i ostalih elastičnih karakteristika stijenskog masiva. Redukcija brzine prostiranja P-talasa u zoni oštećenja dubine 1,85 m iznosi od 6 do 15% u odnosu na vrijednost P-talasa neoštećenog masiva, što posljedično uzrokuje smanjenje Youngovog modula od 10 do 43%, modula smicanja od 10 do 45% i modula zapreminske stišljivosti od 14 do 23%. Prekopprofilni iskop na mjestu mjerenja iznosio je 0,48 m što daje ukupnu dubinu zone oštećenja stijenskog masiva od 2,53 m. Maksimalna masa eksploziva po stepenu paljenja na lokaciji mjerenja iznosila je 23,36 kg pri dubini bušenja od 3,6 m i napretku iskopa od 2,9 m.

4 ZAKLJUČAK

Dubina oštećenja u III kategoriji stijenske mase miniranjem sastoji se od prekopprofilnog iskopa i zone oštećenja stijenskog masiva oko konture iskopa, a određena je pomoću seizmičke cross-hole tomografije. Korištenjem dvostrukog klinastog zaloma do dubine bušenja 3 m postignut je praktički isti napredak iskopa u odnosu na dubinu bušenja, što znači da je energija eksploziva maksimalno utrošena u ostvarivanju napredovanja iskopa, čime se minimalizira ukupna zona oštećenja stijenske mase miniranjem. Navedenu tvrdnju može se potkrijepiti činjenicom da pravilan odabir zaloma i dubine bušenja utječe na smanjenje

specifične potrošnje eksploziva, što smanjuje vršne brzine oscilacija, odnosno dubinu zone oštećenja. Tako prekomjerno oštećenje konture iskopa koje se manifestira u vidu povećanog prekopprofila i dubine zone oštećenja povećava troškove podgrađivanja konture iskopa u odnosu na standardni podgradni sklop predviđen za dotičnu kategoriju stijenskog masiva.

Seizmičkom cross-hole tomografijom izmjerene su promjene brzine prostiranja uzdužnih i poprečnih talasa te izračunate vrijednosti dinamičkih konstanti elastičnosti stijenske mase. Na taj način utvrđeno je razgraničenje oštećene i neoštećene zone po dubini stijenskog masiva kako je prikazano u tabeli 4.

Tabela 4. Sistematizacija rezultata istraživanja dubine zone oštećenja stijen. mase miniranjem, tunel „Šubir“ [7]

Kategorija stijenskog masiva	Brzina P-talasa (m/s)		Dubina oštećenja (m)	Smanjenje modula elastičnosti (E)
	Oštećena zona	Neporemećena zona		
III	2295	2700	~ 2,5	10 – 43%

Iskustva pri gradnji tunela u našim krečnjačkim stijenama nedvojbeno pokazuju da je ponašanje konture podzemnog iskopa primarno kontrolirano strukturnim geološkim karakteristikama stijenske mase, te je u pravilu prisutna uobičajena početna opća stabilnost konture iskopa uz mogućnost pojave lokalnih nestabilnosti u vidu ispadanju blokova zbog gubitka čvrstoće diskontinuiteta. Značajan 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. Odabirom adekvatnih parametara miniranja i koraka iskopa može se zona oštećenja, koja je neminovna pri iskopu miniranjem, minimalizirati u smislu da se minimalno reducira čvrstoća i krutost stijenske mase oko konture iskopa, što ima za posljedicu očuvanje nosivosti stijenske mase kao najvažnijeg „podgradnog“ elementa. Takvim pristupom smanjuju se količine elemenata podgradnog sklopa i troškovi izgradnje.

LITERATURA

- [1] Antičević H., Dobrilović M., Perković H., **Zona oštećenja stijenske mase pri iskopu tunela miniranjem**, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Originalni znanstveni rad, Zagreb, 2012.
- [2] E. Bektašević, H. Antičević, F. Osmanović, S. Kadrić, Đ. Žutić, J. Konta, **Tehnologija miniranja pri iskopu evakuacionog tunela „Vranduk II“ na**

- magistralnoj cesti M-17**, Elektronički zbornik radova, Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Mostaru (Stručni rad), (strana 49-60), (ISSN 2232-9080 (mrežno izdanje) i DOI: 10.47960/2232-9080), Glavni urednik: dr.sc. Mirna Raič.
- [3] E. Bektašević, R. Kadrić, K. Gutić, S. Kadrić, **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**, Journal of faculty of mining, geology and civil engineering, University of Tuzla (Scientific paper), (page 09-23), (ISSN 2303-5161 (Online) and DOI 10.51558/2303-5161.2023.11.11.9), Editor-in-chief: Prof.dr.sc. Sunčica Mašić.
- [4] Kujundžić, B., Jovanović, L. & Radosavljević, Z. (1970): **Solution du revêtement d'une galerie en charge par application d'injections à haute pression**. Proc. of 2nd ISRM Congress, Belgrade. II: Theme 4–66. Belgrade.
- [5] Mustapić, I. (2010): **Građevinski projekt tunela „Šubir“**, Institut IGH d.d., Zagreb.
- [6] Husejnagić E., **Seizmičke metode istraživanja-teorijske osnove, primjeri iz prakse**, Univerzitet u Tuzli, Rudarsko-geološko-građevinski fakultet, Tuzla, 2023, str. 110.
- [7] Mitrović, G. (2010): **Postupak mjerenja brzina širenja elastičnih valova između bušotina – crosshole metodom**, Institut IGH d.d., Zavod za geotehniku, Zagreb, str. 1-10.
- [8] Antičević, H., **Određivanje zone oštećenja stijenske mase pri iskopu tunela miniranjem**, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 2011.