

ZONA OŠTEĆENJA STIJENSKE MASE PRI ISKOPU TUNELA MINIRANJEM

ROCK MASS DAMAGED ZONE CAUSED BY BLASTING DURING TUNNEL EXCAVATION

¹⁾ HRVOJE ANTIČEVIĆ, ²⁾ MARIO DOBRILLOVIĆ, ³⁾ HRVOJE PERKOVIĆ

^{1,3)} Hrvatske autoceste d.o.o., Širolina 4, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

²⁾ Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: iskop tunela miniranjem, zona oštećenja, metode određivanja zone oštećenja, parametri miniranja, brzine oscilacija

Key words: tunnel excavation by blasting, damaged zone, methods for damaged zone determination, blasting parameters, ground oscillation velocities

Sažetak

Izrada podzemnih rudničkih prostorija, tunela i odlagališta radioaktivnog otpada, podrazumijevaju primjenu jednakih odnosno sličnih tehnologija. Uslijed iskopa tunela miniranjem dolazi do određenog stupnja oštećenja stijenske mase oko konture presjeka iskopa. Oštećenja stijenske mase koja nastaju u neposrednoj okolini konture presjeka tunela izražene su proširenjem postojećih i stvaranjem novih pukotina, odnosno promjenom fizičko-mehaničkih svojstava stijenske mase. Prilikom izrade dubokih geoloških odlagališta radioaktivnog otpada zahtjevi po pitanju što manjeg oštećivanja stijene su jednaki ili veći u odnosu na tunele. Opisana istraživanja usmjerena su određivanju dubine zone oštećenja nastale miniranjem. Dubina zone oštećenja određivana je mjerenjem promjena fizičko-mehaničkih svojstava stijenske mase oko konture iskopa tunela. Istraživanjem su parametri bušenja i miniranja uspoređeni s dubinom i veličinom prostiranja oštećenja.

Abstract

Design of underground spaces, including tunnels, and repositories for radioactive waste include the application of the same or similar technologies. Tunnel excavation by blasting inevitably results in the damage in the rock mass around the excavation profile. The damage in the rock mass immediately next to the tunnel profile emerges as the expanding of the existing cracks and the appearance of new cracks, i.e. as the change of the physical and-mechanical properties of the rock mass. Concerning the design of deep geological repositories, requirements in terms of damaged rock are the same or more rigorous than for the design of tunnel. The aforementioned research is directed towards determining the depth of damage zone caused by blasting. The depth of the damage zone is determined by measuring the changes of physical and-mechanical properties of the rock mass around the tunnel excavation profile. By this research the drilling and blasting parameters were correlated with the depth and size of the damage zone.

1. Uvod

Izrada podzemnih prostorija odnosno građevina miniranjem, kod dubokih geoloških odlagališta radioaktivnog otpada, slična je izradi tunela, uz primjenu tehnologije „opreznog“ miniranja vezano na smanjenje područja oštećenja stijene neposredno uz konturnu površinu iskopa što je i jedan od osnovnih zahtjeva kod izrade dubokih geoloških odlagališta. Iako se strojni iskop nameće kao bolje rješenje, miniranje je često puta jedina ekonomski prihvatljiva tehnologija iskopa, osobito u magmatskim stijenama.

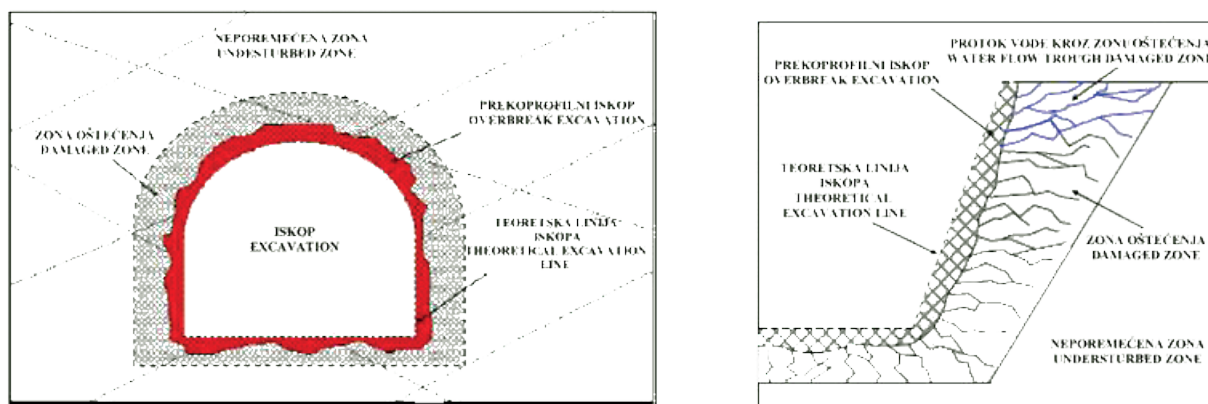
Zona oštećenja stijenske mase pri iskopu miniranjem uključuje prekoprofilni iskop i zonu oštećenja u kojoj su nepovratno promijenjene fizičko-mehaničke i hidrauličke osobine stijenske mase (slika 1). Iskop se može smatrati najvažnijom fazom radova u tunelu zbog niza posljedica koje može uzrokovati. Primjena 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.

Opisana istraživanja imala za cilj odrediti dubinu zone oštećenja i promjene fizičko-mehaničkih svojstava materijala oko konturne površine podzemnog iskopa u II., III. i IV. kategoriji stijenske mase, odnosno odrediti intenzitet oštećenja unutar poremećene zone ovisno o udaljenosti od minskog polja i parametara bušenja i miniranja. U radu su prikazani obrađeni rezultati istraživanja dubine zone oštećenja pri iskopu u II kategoriji stijenske mase. Poznavanje svojstava detonacijskog procesa pretvorbe eksploziva i značajki stijenke mase osigurava odabir optimalnih parametara bušenja i miniranja. Izvođenjem iskopa primjenom tehnike miniranja u stijenskoj masi redovito dolazi do promjene primarnog stanja naprezanja stijenske

mase i fizičko-mehaničkih te hidrauličkih osobina stijenske mase oko profila odnosno konturne površine iskopa. Područje u kojem su spomenuta svojstva izmijenjena, definira se kao zona utjecaja miniranjem izvan profila iskopa.

Te promjene iskazuju se putem stvaranja novih pukotina, otvaranju i zatvaranju postojećih pukotina te preraspodjeli naprezanja.



Slika 1. Shematski prikaz utjecaja iskopa miniranjem oko profila iskopa.

Figure 1. Schematic view of blasting influence beside excavation line

Značaj dubine zone oštećenja izvan projektirane konturne površine iskopa ovisi o vrsti, namjeni te zahtijevanom vijeku trajanja i kvaliteti iskopa, te se prema tome oni mogu podijeliti u tri grupe:

1. površinski i podzemni iskopi pri eksploataciji mineralnih sirovina,
2. iskopi prilikom gradnje prometnica, geotehničkih i hidrotehničkih građevina (usjeci i zasjeci, građevinske jame, cestovni, hidrotehnički, željeznički i ostali tuneli),
3. iskopi prilikom gradnje podzemnih odlagališta opasnih, energetskih i ostalih materijala (nuklearni, medicinski i kemijski otpad, nafta i plinovi).

Provedena istraživanja osnovana su potrebom određivanja prekoprofilnoga iskopa, promjena koncentracija napreznja na rubu profila, promjena mehaničkih i fizičkih svojstava stijenske mase uzrokovanih miniranjem. Navedene promjene za posljedicu imaju intenzivnije frakturiranje u toj zoni, što može dovesti do problema stabilnosti nepodgrađenog iskopa i promjene hidrauličkih svojstava, odnosno slobodnijeg prodora vode u prostor iskopa. Sve navedeno može stvoriti nesigurne uvjete rada i povećati troškove izgradnje prostorije. U pogledu zaštite okoliša podzemna odlagališta opasnoga materijala zahtijevaju poseban pristup prilikom izgradnje te se dubina oštećene zone oko konturne površine iskopa mora minimalizirati. Na taj način, uz primjenu primjerene primarne i završne podgrade, podzemnu prostoriju je moguće dugoročno stabilizirati i izolirati od prodora vode.

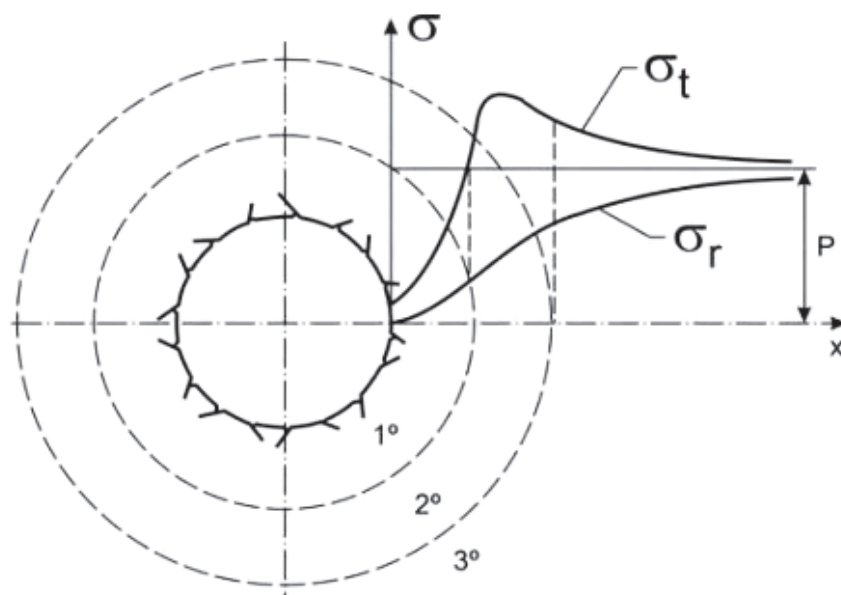
2. Pregled dosadašnjih značajnih istraživanja

Dugi niz godina u svijetu postoji interes u pogledu istraživanja i prikupljanja baza podataka o zoni oštećenja oko profila iskopa miniranjem. Glavnina autora skreće pažnju na vrlo složene uvjete koje obilježavaju anizotropnost i nehomogenost sredine u kojoj se obavljaju ispitivanja. Anizotropija i nehomogenost unutar zone oštećenja komplicira bilo koju metodu mjerenja kojom se pokušava procijeniti novonastalo stanje, stijenske mase. Istraživanja zone oštećenja usmjerena su određivanju njene dubine i fizičko-mehaničkih obilježja uz identifikaciju uzroka koji na nju utječu. Prema glavnini dostupne literature i prezentiranih rezultata istraživanja vidljivo je da ne postoji zajednički stav i određeno pravilo kojim se definira, klasificira i karakterizira zona oštećenja nastala miniranjem. Isto tako veći dio istraživanja zone oštećenja obavljen je na laboratorijskim modelima, a manji dio terenskim ispitivanjima u stvarnim uvjetima. Većina terenskih ispitivanja odnose se na stijensku masu koju izgrađuju eruptivne stijene, uglavnom graniti i gnajsevi. Primjeri tih istraživanja su projekti ZEDEX u Švedskoj i URL u Kanadi. Značajnija istraživanja u drugim vrstama stijena, što uključuje i vapnence, nisu objavljena ili autorima nisu poznata.

U većini objavljenih istraživanja obrađuje se utjecaj miniranja i uslijed njega nastanak neželjenih oštećenja. Značajan dio tih istraživanja usmjeren je procjeni mogućih oštećenja uzrokovanih miniranjem, na osnovi mjerenih brzina oscilacija čestica stijene. U tim istraživanjima, naglasak se stavlja na mogućnost nastanka oštećenja na objektima u neposrednoj blizini minskog polja. Među prvima, istraživanje zone oštećenja oko profila iskopa

predstavili su autori Kujundžić, B. et al. (1970) i objavili rezultate mjerenja cross-hole-metodom u galerijskim tunelima na izgradnji brane Martinje. Mjerenja su pokazala promjene vrijednosti brzina primarnih valova (vp), od ruba profila prema dubini stijenske mase, na temelju čega

su autori definirali tri značajne zone oko profila tunela, kao što je prikazano na slici 2. Prosječne promjene vrijednosti izmjerenih brzina (vp) bile su 3 500 m/s na konturi iskopa, 5 500 m/s na radijusu do 1 m od konture i 4 500 m/s u neporemećenoj stijenskoj masi.



1. zona oštećenja (s najmanjim brzinama) *damage zone (with the lowest velocities)*
2. nosivi prsten (s najvećim tangencijalnim napreznjima i brzinama) *bearing ring (with the highest tangential stresses and velocities)*
3. zona bez utjecaja – neporemećena zona (s opadajućim brzinama i napreznjima) *zone without impact – undisturbed zone (with decreasing velocities and stresses)*

Slika 2. Shematski prikaz interpretacije zone oštećenja pomoću sekundarnih napreznja (Kujundžić, B. et al. 1970).

Figure 2. Schematic view of damaged zone described by secondary stress

Slična istraživanja istom metodom obavili su autori Malmgren, L., Saiang, D., Töyrä, J. i Bodare, A. (2006) u rudniku željezne rude u Švedskoj. Prosječna brzina vp valova varirala je između 5 600 i 6 200 m/s za neoštećenu, te 4 200 i 5 400 m/s za oštećenu stijensku masu (trahit i ruda magnetita) do dubine 1 m od konture iskopa. Autori Nyberg, U. et al. (2000) istraživanje dubine zone oštećenja stijenske mase u rudniku magnetita u Švedskoj obavili su vizualnim pregledom zasječene stijenske mase iza konturnih bušotina. Vizualno primijećena duljina pukotina nastalih miniranjem kretala se u rasponu od 0,1 – 0,4 m. Autori Fjellborg, S. & Olsson, M. (1996) obavili su istraživanja oštećenja stijenske mase miniranjem iza konture iskopa, pri čemu su usporedili dvije vrste mjerenja i to snimanjem kamerom u bušotini i kartiranjem rezova pilom. Snimanjem kamerom u bušotini dobiveni su rezultati koji su pokazali duljinu pukotina od 0,8 – 1,2 m, dok su pregledi rezanja pilom pokazali duljinu pukotina od 0,35 – 0,5 m. Sve navedene metode ispitivanja

obavljana su iza čela iskopa, što znači da postoje podaci samo poslije miniranja.

3. Promjene fizičkih, mehaničkih i hidrauličkih svojstava stijenske mase u zoni oštećenja

Promjene fizičkih svojstava stijenske mase iskazuju se stvaranjem novih pukotina i proširenjem ili zatvaranjem postojećih pukotina u makroskopskim ili mikroskopskim veličinama koje se mogu egzaktno utvrditi vizualnim pregledom površine prije i nakon procesa iskopa. Mikroskopske pukotine mogu imati značajan utjecaj na brzinu širenja posmičnih valova (vs), a ta je veličina vezana za krutost i modul smicanja, a s povećanjem gustoće pukotina povećava se poroznost i hidraulička vodopropusnost. Mehanička svojstva stijenske mase mogu se u zoni oštećenja značajno izmijeniti, što je od posebne važnosti za stabilnost iskopa. Ova se svojstva ne mogu mjeriti direktnim postupcima, već posredno preko brzina prostiranja

elastičnih (seizmičkih) valova i to longitudinalnoga (primarnog) (vp) i transversalnoga (sekundarnog) (vs) vala, koje ovise o elastičnim svojstvima materijala kroz koji se val prostire. Njihove vrijednosti mogu se izračunati jednadžbama (1) i (2).

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

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

gdje je:

- v_p - brzina primarnih (kompresijskih ili longitudinalnih) P-valova (m/s),
- v_s - brzina sekundarnih (posmičnih ili transversalnih) S-valova (m/s),
- E - Youngov modul (modul elastičnosti) (GPa),
- K - modul stišljivosti (GPa),
- G - modul smicanja (GPa),
- ρ - gustoća (kg/m³),
- ν - Poissonov koeficijent

Poznavajući brzine prostiranja elastičnih valova u stijenskoj masi i njenu gustoću mogu se izračunati Poissonov koeficijent ν , Youngov modul, modul smicanja i stišljivosti prema jednadžbama br. (3, 4, 5 i 6), odnosno elastična svojstva stijenske mase.

$$\nu = \frac{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2}{2\left\{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 1\right\}} \quad (3)$$

$$E = \rho v_s^2 \left(\frac{3v_p^2 - 4v_s^2}{v_p^2 - v_s^2} \right) \quad (4)$$

$$G = \rho v_s^2 \quad (5)$$

$$K = \rho \left(v_p^2 - \frac{4}{3} v_s^2 \right) \quad (6)$$

Promjene hidrauličnih svojstava stijenske mase izražene su kroz povećanje ili smanjenje priliva ili odliva vode. Promjene hidrauličnih svojstava ne samo da utječu na protok i karakteristike transporta vode, već i na čvrstoću same stijenske mase.

4. Istraživanje dubine zone oštećenja oko profila iskopa tunela

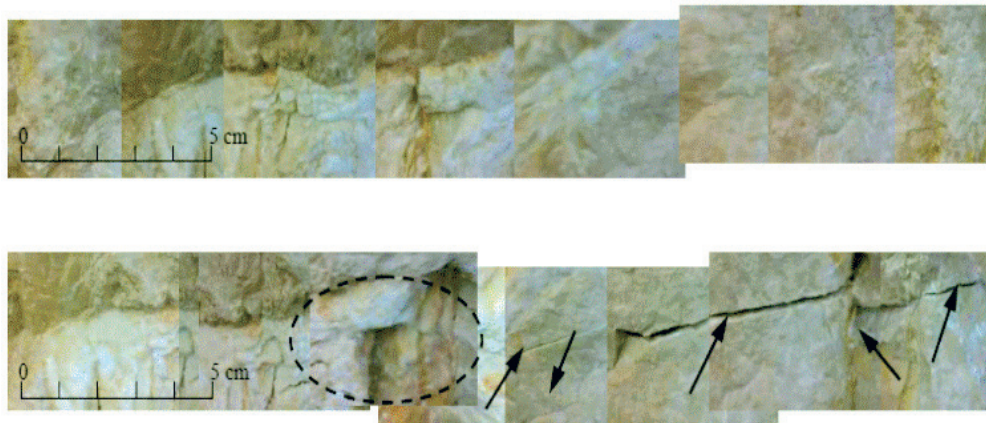
Utjecaj miniranja na dubinu zone oštećenja stijenske mase oko profila iskopa u karbonatnoj stijenskoj masi primjenom različitih metoda istraživani je prilikom iskopa tunela: „Mačkovac-Zapad“, „Klis-Grlo - Zapad“, „Šubir“ i „Mali Prolog“. Pri tome su obavljena sljedeća istraživanja: istražno bušenje s jezgrovanjem, karotažna mjerenja gama i gama-gama, kartiranje jezgre, kartiranje čela iskopa, kategorizacija stijenske mase, laboratorijsko ispitivanje jednoosne i troosne posmične čvrstoće, seizmička cross-hole tomografija, modificirana seizmička cross-hole tomografija u boku tunela – horizontalne bušotine, modificirana seizmička cross-hole tomografija u boku tunela – iniciranje signala po konturi profila, plitka refrakcijska seizmika, video prospekcija istražnih bušotina, geodetsko snimanje profila, mjerenja vršnih brzina oscilacija, snimanje parametara bušenja i miniranja. Cjelokupno područje oštećenja stijenske mase uzrokovano miniranjem sastoji se od prekoprofilnog iskopa i zone oštećenja oko konture iskopa, koje je u opisanim istraživanjima određeno pomoću:

- geodetskog snimanja profila iskopa,
- vizualnog pregleda istražnih bušotina video kamerom,
- seizmičke cross-hole tomografije.

Vizualnim pregledom istražne bušotine video kamerom ustanovljeno je postojanje pukotinskih sustava prije iskopa miniranjem te proširenje i stvaranje novih pukotina poslije miniranja. Detektirana oštećenja u istražnim bušotinama klasificirana su u sljedeće tri grupe:

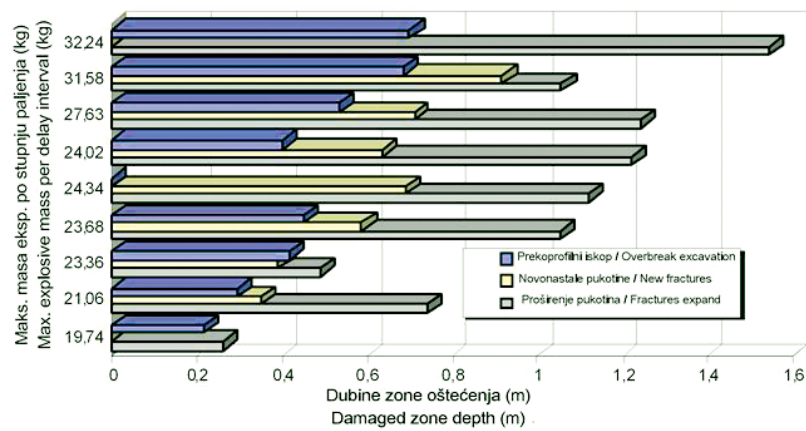
- prekoprofilni iskop na mjestu istražne bušotine,
- ljuskanje stijenske bušotine i proširenje postojećih pukotina,
- formiranje novih pukotina.

Video kamerom obavljen je vizualni pregled i pohrana podataka kvalitete stijenske istražne bušotine prije i poslije miniranja (slike 3 i 4).



Slika 3. Primjer snimke istražne bušotine prije i poslije miniranja u tunelu „Šubir“.

Figure 3. Example of the prospecting borehole sample view before and after blasting- tunnel “Šubir”

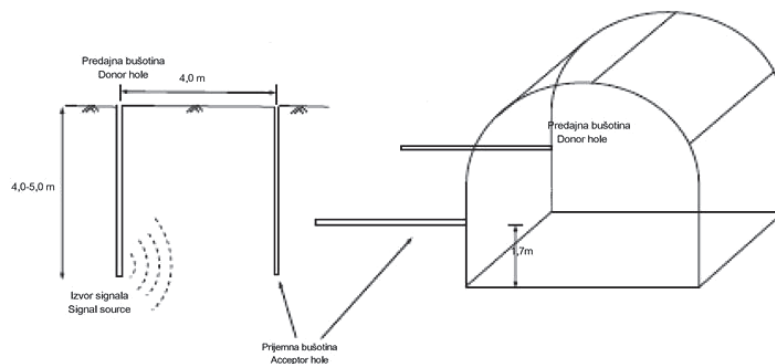


Slika 4. Primjer dijagramskog prikaza ukupne dubine oštećenja stijenske maseu odnosu na maksimalnu masu eksploziva po stupnju paljenja, tunel „Šubir“

Figure 4. Graphic view of total damaged zone length regarding to max. explosive mass per delay interval, tunnel “Šubir”

U sklopu istraživanja dubine zone oštećenja oko konture iskopa tunela uzrokovane miniranjem obavljena su i geofizička seizmička istraživanja metodom seizmičke cross-hole tomografije (slika 5). Osnovni razlog primjene ove metode je precizno mjerenje brzina prostiranja

elastičnih P (uzdužnih ili kompresijskih) i S (poprečnih ili posmičnih) valova između bušotina na različitim udaljenostima od profila iskopa. Detekcija promjena brzina seizmičkih valova mjera je promjene fizičko mehaničkih svojstava stijenske mase oko konture iskopa.

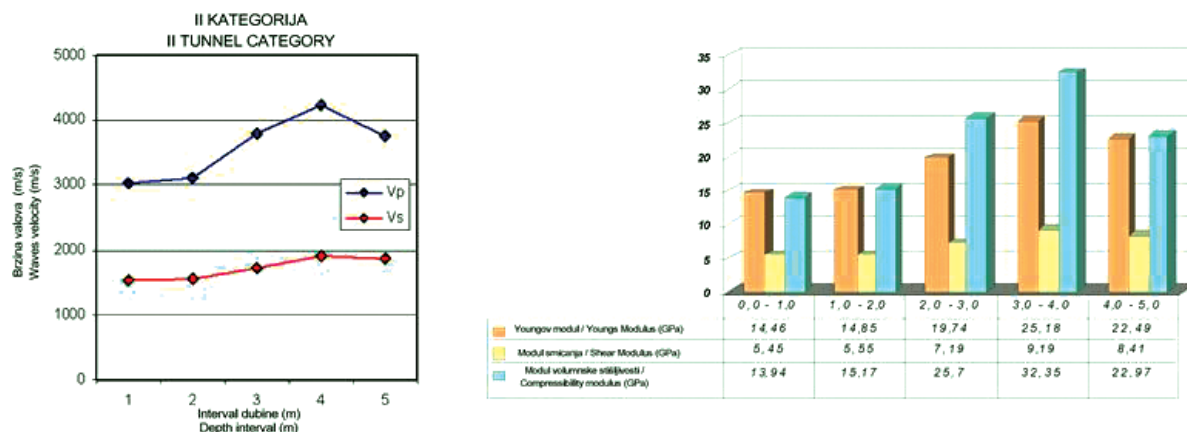


Slika 5. Prikaz primjene metode seizmičke cross-hole tomografije u tunelu „Šubir“.

Figure 5. Cross hole tomography method application, example tunnel “Šubir”

Na temelju obrade rezultata vrijednosti brzina prostiranja elastičnih valova ocjenjuje se stanje i struktura stijenske mase kroz lociranje trošnih zona, kaverni i stupanja

razlomljenosti. Isto tako obradom rezultata mjerena P i S valova računaju se dinamičke konstante elastičnosti stijenske mase (slika 6).

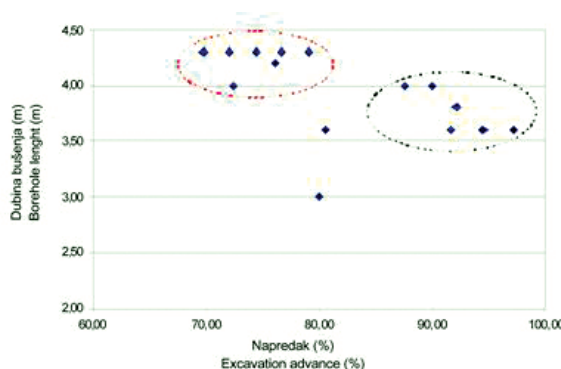


Slika 6. Dijagramski prikaz po intervalima dubine za II. kategoriju stijenskog masiva u tunelu „Šubir“: a) brzina prostiranja v_p i v_s valova, b) dinamičkih konstanti elastičnosti.

Figure 6. Graphic view, trough depth for II tunnel category, tunnel “Šubir”: a) v_p and v_s wave velocities, b) dynamic constant of elasticity

U ovoj kategoriji stijenskog materijala mogu se izdvojiti dvije zone oštećenja. U najbližoj zoni dubine 1,5 m mjereno od konture profila stijenski masiv znatno je oštećen, pri čemu je brzina prostiranja P- valova smanjena do 19%, a modul elastičnosti (Youngov modul) do 36% u odnosu na neporemećenu stijensku masu. Dubina ove zone približno je identificirana video prospekcijskim bušotinama i to u smislu proširenja postojećih pukotina i ljuskanja stijenske istražne bušotine. Druga je zona manje oštećena i prostire se (od završetka znatno oštećene zone) od 1,5 m do 2,95 m. U ovoj zoni na dubini od 1,5 – 2,95 m brzina prostiranja P-valova polako se povećava do vrijednosti brzine prostiranja P-valova neoštećenog masiva. Modul elastičnosti u ovom području reduciran do 12% u odnosu na modul neoštećene stijenske mase. Obzirom da se dubina zone oštećenja stijenskog masiva definira od teoretske linije iskopa, potrebno je na izmjerene vrijednosti dubine oštećenja (2,95 m) dodati prekopprofilni iskop (0,14 m) na lokacijama mjerenja, što predstavlja ukupnu dubinu oštećenja od 3,09 m.

Izmjerena vrijednost dubine oštećenja uključuje tri ciklusa miniranja, pri čemu je maksimalna masa eksploziva po stupnju paljenja varirala od 23,68 do 31,58 kg za dubinu bušenja od 4,0 do 4,3 m i ostvareni napredak iskopa od 3,3 do 3,6 m. U sklopu istraživanja razmatrani su i slijedeći utjecajni parametri na dubinu zone oštećenja stijenske mase oko profila iskopa tunela miniranjem: inženjersko-geološke značajke stijenske mase, parametri bušenja i miniranja: dubina i inklinacija minskih bušotina, geometrija bušenja, povezivanje i redoslijed otpucavanja minskih bušotina, vrsta zaloma, vrsta eksploziva, maksimalna masa eksploziva po stupnju paljenja, specifična potrošnja eksploziva, ukupna potrošnja eksploziva, ostvareni napredak iskopa te vršna brzina oscilacija čestica stijene. Iz dijagrama na slici 7, može se uočiti primjenjivost odabranog dvostrukog klinastog zaloma u odnosu na dužinu bušenja i postignuti napredak (Antičević, H., 1992).

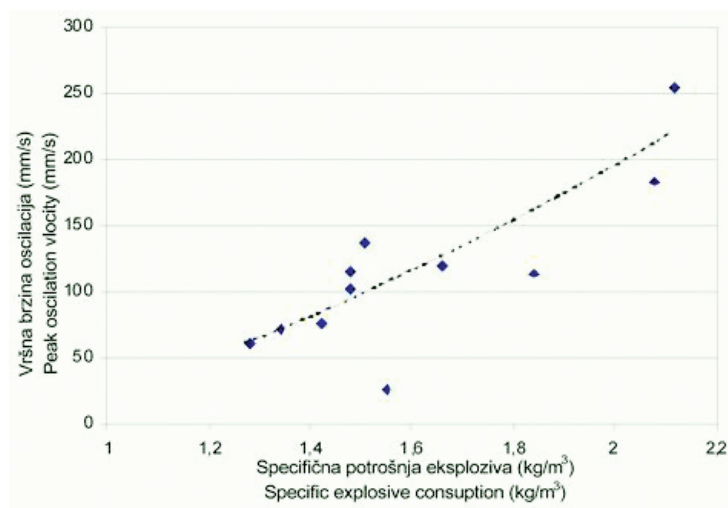


Slika 7. Dijagramski prikaz odnosa dubine bušenja i napretka u tunelu „Šubir“.

Figure 7. Graphic view of the correlation between borehole length and excavation length per cycle, tunnel “Šubir”

Obradom podataka (slika 8) uspostavljena je korelacija između specifične potrošnje eksploziva i vršne brzine oscilacija. Povećane vrijednosti vršnih brzina oscilacija koje su u stvari odraz neiskorištene energije eksploziva

u razaranje stijene u smjeru napredovanja iskopa, a što se može interpretirati iz odnosa duljine bušenja i napretka, odnosno specifične potrošnje eksploziva (Antičević, H. et al., 2004).



Slika 8. Dijagram odnosa specifične potrošnje eksploziva i vršne brzine oscilacija u tunelu „Šubir“.

Figure 8. Correlation diagram of specific explosive consumption vs peak ground oscillation velocity, tunnel „Šubir“

Osim što dio energije eksploziva nije iskorišten za dobljenje, odnosno za napredovanje iskopa, dodatni problem predstavlja činjenica da neiskorišteni dio energije eksploziva prekomjerno povećava oštećenje konture iskopa, što se očituje povećanim prekopprofilom i povećanom

dubinom zone oštećenja, a u konačnici povećava troškove izrade primarne podgrade i betonske obloge.

Na primjeru iskopa u II. kategoriji stijenske mase u tablici 1 prikazana je dubina zone oštećenja u ovisnosti o parametrima bušenja i miniranja.

Tablica 1. Prikaz dubine zone oštećenja u ovisnosti o parametrima miniranja u II. kategoriji stijenske mase na tunelima „Šubir“ i „Mali Prolog“.

Table 1. Damage zone depth related to blasting parameters for II rock mass category, tunnels „Šubir“ and „Mali Prolog“

Lokacija i kategorija <i>Location and category</i>	Broj bušotina <i>Quantity of blast holes</i>	Dubina bušenja <i>Drilling length</i>	Napredak iskopa <i>Excavation length</i>		Masa eksploziva po stupnju paljenja <i>Explosive mass per delay</i>	Specifična potrošnja eksploziva <i>Specific explosive consumption</i>	Vršna brzina oscilacija <i>Max. oscillation velocity</i>	Dubina zone oštećenja <i>Damage zone depth</i>
II kategorija II category		(m)	(m)	(%)	(kg)	(kg/m ³)	(mm/s)	(m)
Tunel „Šubir“ „Šubir“ tunnel	124-110	4,3-4,0	3,6-3,2	90-74	32,9-24,0	2,12-1,48	254,0-76,0	3,0
Tunel „M.Prolog“ „M.Prolog“ tunnel	123-106	3,0-2,5	3,0-2,5	100-93	18,4-12,5	1,38-0,98	68,2-32,2	1,9

Vizualnim pregledom istražne bušotine pomoću video kamere ustanovljeno je postojanje pukotinskih sklopova prije iskopa miniranjem, te proširenje i stvaranje novih pukotina poslije miniranja. Postojeći diskontinuiteti i razna oslabljenja u primarnom stanju naprezanja stijenske mase pri iskupu miniranjem postaju žarišta oštećenja u formi proširenja postojećih i stvaranja novih pukotina, što je dokumentirano na video snimkama stijenki istražnih bušotina prije i poslije iskopa. Rezultati video prospekcije opisuju oštećenja neposredno uz konturu iskopa u zoni koja je seizmičkim metodama istraživanja klasificirana kao jako oštećena, te kao takva predstavlja samo dio zone

oštećenja. Ova metoda sama po sebi nije dostatna za detektiranje cjelokupne zone oštećenja jer je njome moguće utvrditi samo vidljiva oštećenja na stijenkama istražne bušotine, dok je za definiranje dubine zone oštećenja stijenske mase potrebno detektirati promjene deformabilnosti stijenske mase. Seizmičkom cross-hole tomografijom izmjerene su promjene brzine prostiranja uzdužnih i poprečnih elastičnih valova te izračunate vrijednosti dinamičkih konstanti elastičnosti stijenske mase. Na taj način utvrđeno je razgraničenje oštećene i neoštećene zone po dubini stijenske mase kako je prikazano u tablici 2.

Tablica 2. Pregled rezultata istraživanja dubine zone oštećenja stijenske mase miniranjem na tunelu „Šubir“ i „Mali Prolog“.

Table 2. Summary data for damage zone depth, tunnel „Šubir“ and tunnel „Mali Prolog“

Kategorija stijenske mase <i>Rock mass category</i>	Brzina P - val (m/s) <i>Velocity P wave</i>		Dubina (m) <i>Depth</i>		Smanjenje modula elastičnosti (E) <i>Modulus of elasticity reduction</i>	
	Oštećena zona <i>Damaged zone</i>	Neporemećena zona <i>Undisturbed zone</i>	Oštećena zona <i>Damaged zone</i>		Oštećena zona <i>Damaged zone</i>	
			Jače <i>More</i>	Slabije <i>Less</i>	Jače <i>More</i>	Slabije <i>Less</i>
Tunel „Šubir“ <i>„Šubir“ tunnel</i>						
II	3036	3753	~ 1,6	1,6 - 3,0	~ 36%	~ 12%
III	2295	2700	~ 2,5		10 – 43%	
IV. ktg.	2165	3100	~ 3,0		do 36 %	
Tunel „Mali Prolog“ <i>„Mali Prolog“ tunnel</i>						
II	1544	3069	do 1,9		42 – 98%	

5. Zaključak

Na temelju rezultata istraživanja dubine zone oštećenja može se zaključiti sljedeće:

pri iskupu tunela konvencionalnim načinom miniranja u II. kategoriji stijenske mase, dubina zone oštećenja može se prostirati do približno 3 m u stijensku masu, dok pri odabiru prvenstveno primjerene dubine bušenja minskih bušotina (i pripadajućih parametara miniranja), dubina zone oštećenja reducira se na približno 2 m (od teoretske linije iskopa). Korištenjem dvostrukoga klinastoga zaloma do dubine bušenja 3 m postignut je napredak iste duljine, što znači da je energija eksploziva maksimalno utrošena u ostvarivanju napredovanja iskopa. Na taj način, posredno se smanjuje dubina ukupne zone oštećenja stijenske mase miniranjem. Pravilnim odabirom zaloma i dubine bušenja utječe se na smanjenje specifične potrošnje eksploziva a time se smanjuju vršne brzine oscilaci-

ja te dubina zone oštećenja. U tom slučaju smanjuje se prekomjerno oštećenje konture iskopa koje se očituje u vidu povećanoga prekopprofila i dubine zone oštećenja te povećava troškove podgrađivanja konture iskopa u odnosu na geotehničkim projektom predviđenu podgradu za određenu kategoriju stijenske mase. Iskustva pri gradnji tunela u Republici Hrvatskoj u okršenoj stijenskoj masi karbonatnog porijekla zbog povoljnoga omjera čvrstoće stijenske mase i in-situ stanja naprezanja pokazuju da je ponašanje konture podzemnoga iskopa primarno kontrolirano strukturnim geološkim značajkama stijenske mase. U pravilu, prisutna je uobičajena početna opća stabilnost konture iskopa uz mogućnost pojave lokalnih nestabilnosti u vidu ispadanju blokova zbog gubitka čvrstoće na diskontinuitetima. Značajan utjecaj na iniciranje lokalne nestabilnosti ima zona oštećenja uzrokovana miniranjem koja, ukoliko je prekomjerna, može dovesti do progresivnoga lokalnog loma, odnosno ugrožavanja stabilnosti ci-

jelog podzemnog otvora. Odabirom adekvatnih parametara miniranja i koraka iskopa može se zona oštećenja, koja je neizbježna pri iskopu miniranjem, smanjiti u smislu da se minimalno smanji čvrstoća i krutost stijenske mase oko konture iskopa. Takav pristup ima za posljedicu očuvanje nosivosti stijenske mase kao najvažnijeg „podgradnog“ elementa čime se smanjuju potrebne količine elemenata podgrade i troškovi izgradnje. Iskustva stečena pri izradi tunela miniranjem svakako bi se mogla primijeniti i na izradu dubokog geološkog odlagališta radioaktivnog otpada. Određivanje dubine oštećenja stijenske mase predstavlja značajan parametar kod projektiranja i izrade dubokih geoloških odlagališta radioaktivnog otpada, budući da se radi o objektima koji tijekom dugog vremena moraju osigurati izolaciju spremnika s radioaktivnim materijalom od okoliša, uključujući i što manje oštećenu stijensku masu kao prirodnu barijeru.

6. Literatura

- Antičević, H. (2011): Određivanje zone oštećenja stijenske mase pri iskopu tunela miniranjem. Doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb
- Antičević, H. (1992): Izbor najpovoljnijeg zaloma pri iskopu tunela „Tuhobić“. Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
- Antičević, H. & Iličić, F. (2004): Tunnel excavation with use of controlled blasting method in proximity of constructed tunnels. - Raw materials and coal: New perspectives., Osmanagić, M. (ur.), IP Svjetlost, Sarajevo, str. 1-12.
- Fjellborg, S. & Olsson, M. (1997): Long drift rounds with large cut holes at LKAB. SveBoFo Report 27, Swedish Rock Engineering Research, Stockholm
- 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.
- Malmgren, L., Saiang, D., Töyrä, J. & Bodare, A. (2007): The excavation disturbed zone (EDZ) at Kiirunavaara mine, Sweden – by seismic measurements. Journal of Applied Geophysics 61, str. 1-15.
- Nyberg, U., Fjellborg, S., Olsson, M. & Ouchterlony, F. (2000): Vibration measurements, damage prediction and crack mapping in magnetite ore and waste rock. SveBoFo Report 50 Stockholm, str. 23-32.

ROCK MASS DAMAGED ZONE CAUSED BY BLASTING DURING TUNNEL EXCAVATION

Design of underground spaces, including tunnels, and repositories for radioactive waste include the application of the same or similar technologies. Tunnel excavation by blasting inevitably results in the damage in the rock mass around the excavation profile. The damage in the rock mass immediately next to the tunnel profile emerges as the expanding of the existing cracks and the appearance of new cracks, i.e. as the change of the physical and mechanical properties of the rock mass. Concerning the design of deep geological repositories, requirements in terms of damaged rock are the same or more rigorous than for the design of tunnel. According to available data, consider damage zone depth, researches were performed in magmatic and homogenous rock formation. Researches described in paper, on other hand were performed during tunnel excavation on highway Zagreb Dubrovnik, in limestone and dolomites. The aforementioned research is directed towards determining the depth of damage zone caused by blasting. Different methods were applied, including geodetic excavation profile mapping, visual prospection of bore holes, seismic cross hole tomography and velocity of oscillation measurements. Detected damage were classified in further groups: over break detected in prospection boreholes, forming of peels on bore hole wall, new fractures forming and expansion of existing fractures.

The depth of the damage zone is determined by measuring the changes of physical and-mechanical properties of the rock mass around the tunnel excavation profile. By this research the drilling and blasting parameters were correlated with the depth and size of the damage zone. Experience achieved during tunnel excavation by blasting can be applied on excavation of deep geologic radioactive waste deposits. Determination of damage zone depth in rock mass is significant parameter in phase of design for deep radioactive waste deposits consider that those facilities must insure isolation of waste material from near structures including less damaged rock mass in role of natural barrier.