

# Kontrolna ispitivanja seizmičkih utjecaja miniranja

---

**Pintera, Ana**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:442450>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-25**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij rudarstva

**KONTROLNA ISPITIVANJA SEIZMIČKIH UTJECAJA MINIRANJA**

Diplomski rad

Ana Pintera

R265

Zagreb, 2021.

## KONTROLNA ISPITIVANJA SEIZMIČKIH UTJECAJA MINIRANJA

Ana Pintera

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

Miniranje predstavlja skup kompleksnih radnji za koje je uz pravilne proračune i metode važna i sigurnost. Sigurnost i sve veća točnost se mogu odrediti iz već postojećih sličnih radnji na sličnim okruženjima, no ako se i jedan parametar promijeni vrlo važno je uz pomoć kontrolnih opažanja postići najoptimalnije uvijete.

Seizmički utjecaji miniranja vrlo su važan dio prilikom izrade plana miniranja, utjecaji se temelje na nizu normi, proračuna i raznih preporuka. Osnovni parametar na kojem se bazira daljnja aktivnost prilikom proračuna je brzina oscilacije tla. Do sada je poznato nekoliko metoda koje matematički opisuju navedenu problematiku. Danas uz sve veće širenje gradova i naselja, javlja se potreba sa sve zahtjevnijim miniranjima koja uzimaju u obzir objekte u blizini miniranja. Kako bi se točno odredio utjecaj i dozvoljena količina eksploziva kod koje neće doći do oštećenja objekata koriste se razne kontrolne metode i ispitivanja. Cilj rada bio je prikazati kako se uz što više kontrolnih mjerenja postižu točniji rezultati, te kako je miniranje i sve popratne aktivnosti moguće obaviti u blizini naseljenog mjesta uz dodatne otežavajuće okolnosti kao što su podzemni spremnici za vodu, dalekovodi i telefonski vodovi.

Ključne riječi: Kontrolna ispitivanja, miniranje, indeks korelacije, brzina oscilacije tla

Završni rad sadrži: 56 stranica, 21 tablicu, 39 slika, 1 prilog, i 16 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr.sc. Siniša Stanković, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr.sc. Siniša Stanković, docent RGNF  
Dr.sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF  
Dr.sc. Vinko Škrlec, docent RGNF

Control examination of seismic effects of blasting

Ana Pintera

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Mining Engineering and Geotechnics  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Blasting is a set of complex actions for which, in addition to proper calculations and methods, very important is safety. Safety and accuracy increase can be determined from pre-existing similar actions in similar environments, but if even one parameter changes, it is very important to achieve the most optimal conditions with the help of control examination.

The seismic impacts of blasting is a very important part when designing a blasting plan, the impacts are based on a series of norms, budgets and recommendations. The basic parameter on which further activity is based during the calculation is the speed of oscillation. Oscillation velocity far, several methods that mathematically describe this problem, are known,. Today, with the increasing expansion of cities and settlements, there is a need for increasingly demanding blasting that takes place near account facilities. In order to accurately determine the impact and allowable amount of explosives that will not damage buildings, various control and testing methods are used. The aim of the work was to show how accurate results are achieved with as many control measurements as possible and how blasting and all accompanying activities can be performed in the vicinity of the settlement with additional aggravating circumstances such as underground water cisterns, transmission lines and telephone lines.

Keywords: Control Examination, Blasting, Correlation Indeks, Ground Oscillation Velocity

Thesis contains: 56 pages, 21 tables, 39 figures, 1 appendixes, i 16 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Assistant Professor, Siniša Stanković, PhD

Reviewers: Assistant Professor, Siniša Stanković, PhD  
Professor, Mario Dobrilović, PhD  
Assistant Professor, Vinko Škrlec, PhD

Defence date: July 16, 2021., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

**Zahvala:**

*Zahvaljujem se svim djelatnicima Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta koji su mi pomogli da postanem inženjerka, te se posebno zahvaljujem doc.dr.sc. Siniši Stankoviću koji mi je pomogao pri izradi i mentorstvu ovoga rada.*

*Također zahvaljujem obitelji, prijateljima i svima koji su bili uz mene tijekom proteklih pet godina te me podržavali i motivirali.*

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. SUSTAVI INICIRANJA</b> .....	3
2.1. Sustav iniciranja sporogorećim štapinom i rudarskom kapicom br. 8 .....	3
2.2. Sustav iniciranja detonirajućim štapinom .....	4
2.3. Sustav iniciranja električnim detonatorima .....	6
2.4. Neelektrični sustav iniciranja .....	8
<b>3. GOSPODARSKI EKSPLOZIVI</b> .....	11
3.1. Podjela eksploziva prema karakteru eksplozije.....	12
3.2. Podjela eksploziva prema namjeni .....	12
3.3. Podjela eksploziva prema uporabnom obliku.....	13
3.4. Podjela rudarskih eksploziva.....	14
3.5. Primjena gospodarskih eksploziva u miniranju.....	15
<b>4. EKSPLOZIJA I DETONACIJA</b> .....	16
4.1. Detonacija na okolnu stijenu .....	18
4.2. Seizmičko djelovanje miniranja .....	20
<b>5. ODREĐIVANJE DOZVOLJENE MASE EKSPLOZIVNOGA PUNJENJA PO STUPNJU PALJENJA PREMA M. A. SADOVSKOM</b> .....	28
<b>6. ISKOP USJEKA MINIRANJEM NA PRIMJERU ISKOPA USJEKA AUTOCESTE ZAGREB-SPLIT-DUBROVNIK NA DIONICI BISHANOVAC</b> .....	30
6.1. Geološke i inženjerskogeološke značajke terena.....	31
6.2. Kalkulacija parametara miniranja.....	32
6.3. Postavljanje instrumenata .....	34
6.4. Proračun dozvoljene količine eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja.....	36
6.5. Otpucavanje minskih bušotina .....	37
<b>7. KONTROLNA MJERENJA – OBRADA PODATAKA I ANALIZA</b> .....	39
<b>8. ZAKLJUČAK</b> .....	54
<b>9. LITERATURA</b> .....	55

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Sporogoreći štapin.....	3
Slika 2-2. Presjek sporogorećeg štapina .....	4
Slika 2-3. Konstrukcija rudarske kapice.....	4
Slika 2-4. Detonirajući štapin .....	5
Slika 2-5. Milisekundni usporivač za detonirajući štapin.....	5
Slika 2-6. Trenutni električni detonator.....	6
Slika 2-7. Električni detonator s kašnjenjem .....	7
Slika 2-8. Dinamo električni stroj za paljenje električnih detonatora .....	7
Slika 2-9. Poprečni presjek udarne cjevčice .....	8
Slika 2-10. Neelektični detonator .....	9
Slika 2-11. Konektor .....	9
Slika 3-1. ANFO eksploziv .....	13
Slika 3-2. Slurry eksploziv .....	14
Slika 4-1. Nuklearna eksplozija.....	16
Slika 4-2. Kemijska eksplozija .....	17
Slika 4-3. Fizikalna eksplozija.....	17
Slika 4-4. Zone djelovanja detonacije eksplozivnog naboja .....	18
Slika 4-5. Nastajanja tlačnih udarnih valova i reflektiranih vlačnih valova.....	19
Slika 4-6. Dijagram ovisnosti faktora udaljenosti $F_d$ od udaljenosti mjesta miniranja do . 23 promatranog objekta .....	23
Slika 4-7. Granica brzine osciliranja tla za razne tipove konstrukcija prema normi USBM RI8507 and OSMRE.....	24
Slika 4-8. Dijagram granica brzina čestica za rezne konstrukcije u funkciji frekvencije ...	25
Slika 6-1. Trnbusi (blizina naseljenih objekata).....	30
Slika 6-2. Novo stanje nakon izgrađene autoceste (Trnbusi) .....	31
Slika 6-3. Postojeći teren .....	33
Slika 6-4. Instrument za mjerenje brzina oscilacija tla Instantel Minimate Plus .....	34
Slika 6-5. Načina rada geofona .....	36
Slika 6-6. Prikaz minskog polja, te prvog i drugog mjesta opažanja (MO1, MO2).....	37
Slika 7-1. Grafički prikaz regresijske krivulje za probno minsko polje.....	41
Slika 7-2. Grafički prikaz regresijske krivulje za prvo minsko polje.....	41
Slika 7-3. Grafički prikaz regresijske krivulje za drugo minsko polje.....	42

Slika 7-4. Grafički prikaz regresijske krivulje za treće minsko polje .....	43
Slika 7-5. Grafički prikaz regresijske krivulje za četvrto minsko polje .....	44
Slika 7-6. Grafički prikaz regresijske krivulje za peto minsko polje .....	45
Slika 7-7. Grafički prikaz regresijske krivulje za šesto minsko polje .....	46
Slika 7-8. Grafički prikaz regresijske krivulje za sedmo minsko polje.....	48
Slika 7-9. Grafički prikaz regresijske krivulje za osmo minsko polje.....	49
Slika 7-10. Grafički prikaz regresijske krivulje za deveto minsko polje.....	50
Slika 7-11. Grafički prikaz regresijske krivulje za deseto minsko polje.....	51
Slika 7-13. Grafički prikaz R/Q odnosa za sva minska polja.....	53



## POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Određivanje vrijednosti  $v_0$

Tablica 4-2. Određivanje vrijednosti faktora materijala  $F_m$

Tablica 4-3. Određivanje vrijednosti faktora vrste zgrade  $F_b$

Tablica 4-4. Granične vrijednosti brzina oscilacija prema normi DIN 4150

Tablica 4-5. Dozvoljene brzine čestica za drugačije tipove objekata definirane British Standard 7385 normom.

Tablica 4-6. Ljestvica intenziteta potresa izazvanih miniranjem (prema S.V.Medvedev-u).

Tablica 6-1. Generalne značajke seizmografa Instantel Minimate i Instantel Blast Mate III

Tablica 7-1. Proračunata i stvarno utrošenih količina eksploziva, udaljenosti i stacionaže

Tablica 7-2. Parametri za dobivanje krivulje probnog minskog polja

Tablica 7-3. Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje prvog minskog polja.

Tablica 7-4. Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje drugog minskog polja.

Tablica 7-5. Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje trećeg minskog polja.

Tablica 7-6. Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje četvrtog minskog polja.

Tablica 7-7. Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje petog minskog polja.

Tablica 7-8. Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje šestog minskog polja.

Tablica 7-9. Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje sedmog minskog polja.

Tablica 7-10. Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje osmog minskog polja.

Tablica 7-11. Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje devetog minskog polja.

Tablica 7-12. Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje desetog minskog polja.

Tablica 7-13. Zajednički prikaz svih jednadžbi krivulja

Tablica 7-14. Zajednički prikaz indeksa korelacije  $R^2$

## POPIS PRILOGA

Prilog 1 CD

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$R_s$	m	radijus ugrožene zone
$Q$	kg	masa jednovremeno detoniranoga eksplozivnoga punjenja
$v$	mm/s	brzina oscilacija tla
$D$	m	udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja
$W$	kg	masa jednovremeno detoniranoga eksplozivnoga punjenja
$a$	/	eksponent količine punjenja
$b$	/	eksponent faktora stijene
$R$	m	udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja
$k$	/	koeficijent načina miniranja
$n$	/	koeficijent prigušenja seizmičkih valova na putu širenja
$v_o$	mm/s	nekorrigirana vertikalna komponenta brzina oscilacija tla
$F_d$	/	faktor najkraće udaljenosti od mjesta miniranja do promatranog objekta
$F_t$	/	faktor trajanja minerskih radova;
$F_k$	/	faktor kvalitete gradnje promatranog objekta
$v_1$	cm/s	brzina oscilacija tla na prvom instrumentu
$v_2$	cm/s	brzina oscilacija tla na drugom instrumentu
$R_1$	m	udaljenost između minskog polja i prvog mjesta opažanja
$R_2$	m	udaljenost između minskog polja i drugog mjesta opažanja
$W_{\max}$	m	linija najmanjeg otpora
$D_b$	mm	promjer bušotine
$g$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća punjenja eksploziva u minskoj bušotini
$E$	/	relativna masena snaga eksploziva;
$s$	kg/m <sup>3</sup>	faktor minirljivosti stijene obzirom na uvjete uklještenja
$v_k$	/	koeficijent uklještenosti pri dnu minske bušotine;
$m$	/	koeficijent gustoće minskih bušotina

## 1. UVOD

Miniranje predstavlja djelatnost koja ima za cilj razoriti, usitniti ili djelovati na pojedini objekt, odnosno stijensku masu. Primjena miniranja je vrlo široka, kako na površini tako i u podzemlju, odnosno tamo gdje se javi potreba za promjenom prirodne konfiguracije terena ili potreba za slobodnim prostorom u stijenskoj masi. Kako je tehnologija napredovala, tako je miniranje u sve većem obimu moguće izvoditi i u više naseljenim područjima.

Prilikom samog izvođenja miniranja uz pomoć što točnijih proračuna i nadzora minerskih radova teži se što sigurnijim uvjetima za okolinu. Do sada su poznati određeni pristupi za određivanje kriterija mogućnosti nastanka oštećenja na samim objektima na određenoj udaljenosti od izvora oštećenja (minerskih radova): iskustvene formule, opisne tablice i ljestvice intenziteta potresa izazvanih miniranjem te baza dopuštenih vrijednosti brzine osciliranja tla.

Prilikom korištenja bilo kojeg pristupa nužno je znati ovisnost brzina osciliranja tla na određenoj udaljenosti od morskog polja za stijensku masu u kojoj se miniranje izvodi. Što je bolje poznavanje i obrada podataka to je i sigurnije korištenje eksploziva te mogućnost kontrole i provjere minerskih radova. Danas postoji puno prediktora koji se koriste za predviđanje brzine oscilacije tla prilikom miniranja (Kumar i dr., 2016.). Također za postavljanje prediktora koriste se i Artificial Neural Network (ANN) metode (Khandelwal i dr., 2007.).

Na samom početku shvaćanja problematike koristila se kategorizacija stupnja potresa prema oštećenjima koja su prouzrokovana uz kasniji dodatak iznosa brzina oscilacija kao dodatan parametar (ljestvica S.V.Medvedeva i modificirana Mercallijeva ljestvica). Slijedeći pristup bio je uz primjenu empirijskih formula na kojima je radio veliki broj znanstvenika (Medvedev, Sadovski, Hendron, Dowding...) no takvi pristupi su često pratili specifične situacije i sredine u kojima se izvodi miniranje, te nisu bili uniformni. Veliki problem koji nije obuhvaćen ovom tematikom je upravo sama udaljenost od izvora miniranja i zone zahvaćenosti (objekata) te različite vrijednosti dopuštene mase jednovremeno detoniranog eksploziva. Treći način koji definira oštećenja i mogućnost njihova nastanka se izrađuje uz pomoć raznih normi na nacionalnoj i internacionalnoj razini. Praćenjem normi, svi parametri koji su neophodni za miniranje kontroliraju se i prate prilikom probnog miniranja na sigurnoj udaljenosti, te se krajnji rezultati korigiraju da bi se dobile prihvatljive

oscilacije ili drugi parametri koji se nalaze ispod dopuštene granice propisan normom ili zakonom. Veći nedostatak takvom pristupu je upravo subjektivnost, odnosno potrebno iskustvo na kojem će se temeljiti odluke (Stanković, 2011.).

## 2. SUSTAVI INICIRANJA

Inicijalni sustav se koristi kada treba pretvoriti početnu toplinsku energiju pomoćnog sredstva za pripaljivanje ili dovesti energiju iz uređaja za iniciranje do eksploziva u kojem će se potaknuti detonacija.

Zatajivanje iniciranja punjenja minske bušotine ili više njih dovodi do narušavanja prostorno-vremenskog slijeda otpucavanja, te se gubi raspoloživa energija. Na sami volumen stijenske mase koja se minira djeluje samo energija detoniranih punjenja, te izostaje optimalan odnos energije za postizanje stupnja drobljenja koji je proračunat. Također jedan od velikih problema koji se javlja prilikom zatajenja je mijenjanje geometrije minskog polja. Kako se povećava razmak susjednih minskih bušotina i izbojnica, dolazi se do problema nedovoljnog drobljenja ili potpunog izostanka drobljenja te pomaka stijenske mase, samim time povećava se energija seizmičkih valova te njezino štetno djelovanje kako na izvor paljenja tako i na susjedne objekte (Stanković, 2011.).

### 2.1. Sustav iniciranja sporogorećim štapinom i rudarskom kapicom br. 8

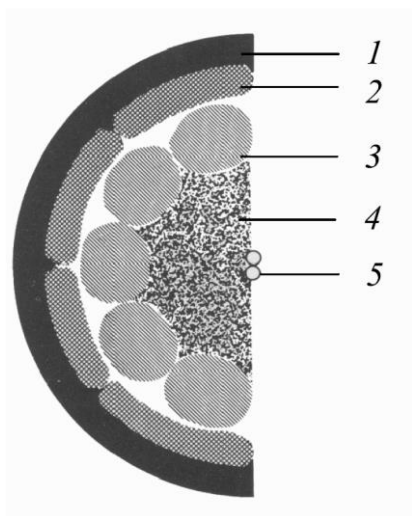
Najstarije inicijalno sredstvo koje danas više nije u upotrebi za izravno iniciranje punjenja u bušotini je sporogoreći štapin (Slika 2-1) zajedno s rudarskom kapicom br. 8. Danas se ovakav sustav koristi za iniciranje detonirajućeg štapina i neelektričnog detonatora.



Slika 2-1 Sporogoreći štapin

Presjek sporogorećeg štapina vidljiv je na slici 2-2, dok je prikaz rudarske kapice na slici 2-3. Pokretanje samog sustava radi se pomoću plamena pirotehničke šibice. Vrijeme

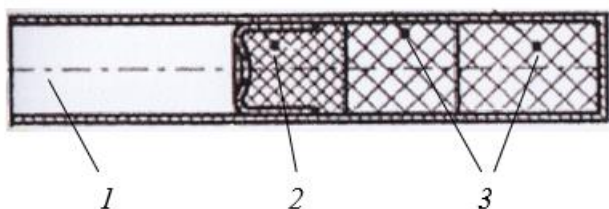
sagorijevanja jednog metra štapina je 120 sekundi, ali također ovisno o proizvođaču i tipu vrijeme se može razlikovati.



*Kazalo:*

- 1 - plastični zaštitni omotač,
- 2 - zaštitno pletivo,
- 3 - zaštitno pletivo,
- 4 - štapinski barut,
- 5 - pamučne niti.

**Slika 2-2** Presjek sporogorećeg štapina (Dobrilović i dr., 2016.)



*Kazalo:*

- 1 - kućište i prostor za smještaj sporogorećeg štapina,
- 2 - primarno-inicijalno punjenje,
- 3 - sekundarno-brizantno punjenje.

**Slika 2-3** Konstrukcija rudarske kapice (Dobrilović i dr., 2016.)

Sami plamen na kraju sporogorećeg štapina inicira primarno punjenje rudarske kapice br. 8, nakon toga detonacija se kreće prema sekundarnom punjenju (brizantno punjenje). Podjela rudarskih kapica se vrši prema jačini inicijalnog impulsa koji je ovisan o masi eksplozivnog punjenja, dok se kućišta razlikuju na ona od aluminijevog lima i druga od bakarnog lima (Dobrilović, 2008.)

## 2.2. Sustav iniciranja detonirajućim štapinom

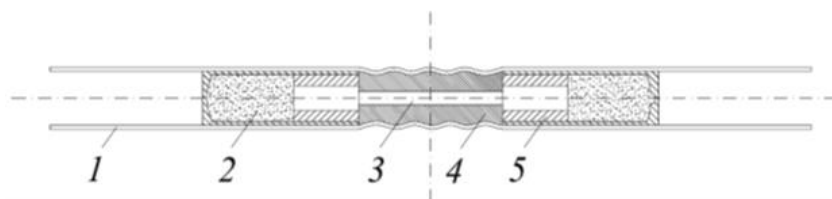
Detonirajući štapin je konstrukcijom sličan sporogorećem štapinu. Izgled (boja) ovisi kako o proizvođaču tako i o tipu (Slika 2-4). Postoji više vrsta detonirajućeg štapina koji se razlikuju prema duljinskoj koncentraciji mase eksplozivnog punjenja te poprimaju oznake od C-4 do C-100, odnosno od 4 g/m do 100 g/m. Detonirajući štapin duljinske mase punjenja

od 12 g/m' se najčešće koristi pri iniciranju eksplozivnog punjena minske bušotine i za prijenos detonacije u mreži minskog polja (Stanković, 2011).



**Slika 2-4** Detonirajući štapin

Brzina detonacije detonirajućeg štapina iznosi oko 7000 m/s, dok se kašnjenje vremenskog redosljeda otpucavanja postiže milisekundnim usporivačima (Slika 2-5). Milisekundni usporivač ima standardne vrijednosti kašnjenja od 13 ms, 20 ms, 25 ms, 40 ms, 50 ms i 100 ms (Dobrilović, 2008).



Kazalo:

- 1 - kućište,
- 2 - inicijalno punjenje,
- 3 - sporogoreći umetak
- 4 - brtva,
- 5 - prelazni element.

**Slika 2-5** Milisekundni usporivač za detonirajući štapin (Dobrilović, 2008.)

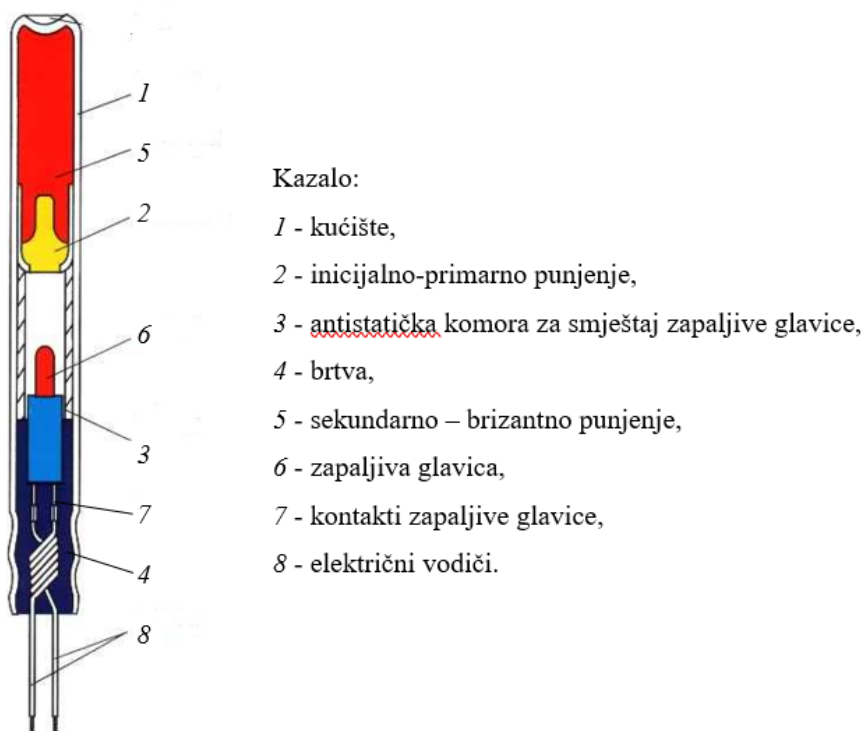
Prednosti detonirajućeg štapina su jednostavnost upotrebe, vizualna kontrola mreže, mogućnost ugradnje dodatnog sigurnosnog voda za pouzdano iniciranje, potpuno sagorijevanje.

Nedostatci detonirajućeg štapina su stvaranje buke i zračni udarni val, samo vizualna kontrola povezivanja, destruirana čep minske bušotine, uzrokuje stvaranje prašine, u kontaktu razara eksplozive neosjetljive na inicijalni impuls rudarske kapice br. 8 (Stanković, 2011.).

### 2.3. Sustav iniciranja električnim detonatorima

Električni detonator je inicijalno sredstvo u kojem se inicijalno punjenje rudarske kapice zapaljuje plamenom zapaljive glavice koji nastaje zbog Jouleove topline električne struje. Detonatori se mogu podijeliti s obzirom na izvedbu pripale zapaljive glavice te s obzirom na vrijeme kašnjenja. Prvi se dijele na detonatore s mostićem i detonatore s rascjepkom, dok se s obzirom na vrijeme kašnjenja dijele na trenutne i vremenske.

Trenutni detonator nema u sebi element za usporavanje i nakon iniciranja detonira u vremenu koje je manje od 10 ms, slika 2-6.

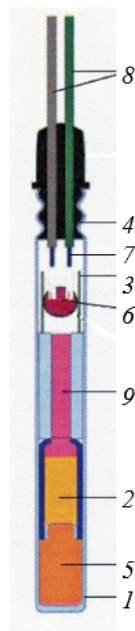


Slika 2-6 Trenutni električni detonator

Električni detonator, slika 2-7, s kašnjenjem se dijeli na milisekundne, četvrtsekundne i polusekundne serije. Vrijeme usporenja je definirano brojem detonatora, a



postoje do broja trideset, kada se pomnože detonatori u seriji i vremenska oznaka serije dobije se ukupno kašnjenje detonatora.



Kazalo:

- 1 - kućište,
- 2 - inicijalno-primarno punjenje,
- 3 - antistatička komora za smještaj zapaljive glavice,
- 4 - brtva,
- 5 - sekundarno – brizantno punjenje,
- 6 - zapaljiva glavica,
- 7 - kontakti zapaljive glavice,
- 8 - električni vodiči,
- 9 - usporivački element.

**Slika 2-7** Električni detonator s kašnjenjem

Prilikom iniciranja električnih detonatora koriste se posebne naprave koje mogu biti dinamo-električne, generatori istosmjerne ili izmjenične struje, baterijske, slika 2-8. Baterijski se najčešće koriste za veći broj električnih detonatora u mreži.



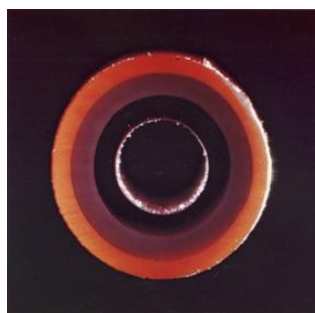
**Slika 2-8** Dinamo električni stroj za paljenje električnih detonatora

Prednosti električnih detonatora: iniciranje minskog polja je u potpunosti pod kontrolom palitelja; jednostavna kontrola ispravnosti svakog detonatora zasebno, mjerenjem električnog otpora; kontrola povezanosti minskog polja obavlja se jednostavno, mjerenjem električnog otpora; jednostavno lociranje eventualnog prekida polja; nema stvaranja zračnog udarnog vala i buke; istovremenost iniciranja svih detonatora u električnoj mreži minskog polja i neosjetljivost na prekide uzrokovane mehaničkim djelovanjem dijela odminirane stijenske mase, osim kod paljenja sekvencijalnim strojevima (Stanković, 2011).

Nedostaci električnih detonatora: nepreglednost prilikom spajanja minskih polja s velikim brojem bušotina i male površine, te kod primjene razdjelnog punjenja s više stupnjeva otpucavanja u minskoj bušotini; izostanak paljenja prilikom iniciranja nedovoljnom strujom; nemogućnost precizne kontrole spajanja svih detonatora u paralelnom spoju mjerenjem otpora i mogućnost izostanka iniciranja pojedinih detonatora; mogućnost neželjenog iniciranja u uvjetima gdje postoje elektromagnetski izvori zračenja ili pojave lutajućih struja prilikom podzemnih radova, a zbog pojave indukcije elektromotorne sile u otvorenoj petlji električnih vodiča detonatora; mogućnost oštećenja spojnih električnih vodiča detonatora prilikom ugradnje i čepljenja bušotine; ograničenje raspoloživih stupnjeva paljenja u pojedinim serijama (Stanković, 2011.).

#### **2.4. Neelektrični sustav iniciranja**

Komponente neelektričnog sustava miniranja su udarna niskoenergetska cjevčica, neelektrični konektori ili spojnice i neelektrični detonatori. Unutarnji sloj cjevčice je izrađen od PVC-a, a prah eksploziva se nanosi na cjevčicu u toplom stanju. Dovoljna prekidna čvrstoća na vlačna naprezanja i savijanje je osigurana pomoću drugog sloja cjevčice, dok vanjski sloj služi kao zaštita cjevčice od ultraljubičastog zračenja i abrazivnog djelovanja okoline, poprečni presjek cjevčice nalazi se na slici 2-9. Cjevčica služi kao kanal za prijenos energije.



**Slika 2-9** Poprečni presjek udarne cjevčice (Stanković, 2011.)

Primarno punjenje može biti inicijalni ili brizantni eksploziv, dok je sekundarno punjenje jednako kao i kod rudarske kapice br. 8.

Također unutar cijeloga sustava razvijeni su podsustavi za podzemna i površinska miniranja. Detonatori, slika 2- 10, s jednakim vremenom kašnjenja postavljaju se u bušotine tako da se vremensko razdvajanje postiže konektorima na površini.



**Slika 2-10** Neelektični detonator

Pravilnom kombinacijom konektora i vremena kašnjenja formira se redosljed otpucavanja u prostoru i vremenu.

Neelektrični konektori, slika 2-11, imaju za svrhu povezivanje i prijenos inicijalnog impulsa među detonatorima, samim time rade vremenski razmak paljenja (Ester, 2005).



**Slika 2-11** Konektor

Prednosti neelektričnih detonatora: jednostavnost rukovanja; preglednost spajanja na minskom polju, što umanjuje mogućnost pogreške pri ugradnji; ne razaranje strukture emulzijskih i ANFO eksploziva u minskoj bušotini; velika mehanička čvrstoća i nosivost cjevčice; neosjetljivost na vlagu; u minskom polju neograničen broj minskih bušotina; neosjetljivost na lutajuće struje i statički elektricitet; ne razaranje čepa minske bušotine; ne izazivanje zračnog udarnoga vala; mogućnost višestrukoga vremenskoga razdvajanja detonacije eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini (Stanković, 2011.).

Nedostaci neelektričnih detonatora: kod velikih usporenja nepreciznost vremena kašnjenja; nemogućnost provjere ispravnosti mreže nakon spajanja i povezivanja, osim vizualnog pregleda te ne destruiranje cjevčice, već njeno zaostajanje u materijalu, što može potencijalno predstavljati problem prilikom separacije (Stanković, 2011.).

### 3. GOSPODARSKI EKSPLOZIVI

Eksplozivna tvar je bilo koji spoj koji pod određenim uvjetima eksplodira, dok je eksploziv bilo kakav proizvod koji je razvijen upravo zbog cilja za iskorištavanjem energije koja je procesom eksplozije oslobođena.

Gospodarski eksplozivi su energetske materijali koji mijenjaju potencijalnu kemijsku energiju u kinetičku energiju. Nastala kinetička energija se manifestira u obliku udarnog vala i energije širenja plinovitih produkata iz primarne kemijske reakcije. Upravo takvo djelovanje je zaslužno za odlamanje, drobljenje i pomak stijenske mase. Neke od glavnih značajki koje su vezane za gospodarske eksplozije i поближе ih definiraju su brzina detonacije, snaga i stabilnost detonacije, gustoća eksploziva, prijenos detonacije, osjetljivosti na iniciranje, volumen plinova, vodootpornost, sigurnost rukovanja, štetan utjecaj, ravnoteža kisika.

Brzina detonacije je definirana kemijskom promjenom eksploziva i brzini prolaska detonacijskog vala kroz eksploziv.

Snaga podrazumijeva mogućnost eksploziva da oslobodi što više energije te udarnim djelovanjem, obavi rad, dok stabilnost detonacije podrazumijeva održavanje stabilnog stanja kemijske reakcije detonacije.

Prijenos detonacije je definiran najvećom udaljenošću između dvije patrone eksploziva sa zrakom među njima koji je dovoljan da omogućava prelazak detonacije s jedne patrone na drugu.

Osjetljivost na iniciranje definirana je kemijskim sastavom eksploziva i minimalnom energijom koja je potrebna za njenu aktivaciju.

Volumen plinova prilikom detonacije ovisan je od kemijskog sastava.

Vodootpornost ulazi u jedan od glavnih parametara za uporabu eksploziva u vlažnom ili podvodnom okruženju.

Sigurnost rukovanja kao vrlo bitan parametar označava osjetljivost eksploziva na vanjske impulse.

Štetan utjecaj koji može biti na okolinu ovisi i o postojanosti tijekom skladištenja te je važno uz pravilno korištenje, pravilno i skladištiti eksploziv.

Ravnoteža kisika ima veliku važnost iz razloga što uz sami nedostatak kisika dolazi do moguće pojave štetnih plinova ( $CO$  i  $NO_x$ ) te otpornosti na smrzavanje.

Gospodarski eksplozivi su smjese goriva, oksidansa, senzibilizatora i monomolekularnih eksploziva (Stanković, 2011.). Eksplozivi imaju razne podjele, no u ovom radu biti će objašnjenje neke od njih, tj. podjela eksploziva prema karakteru eksplozije, podjela eksploziva prema namjeni, podjela eksploziva prema uporabnom obliku te podjela rudarskih eksploziva.

### **3.1. Podjela eksploziva prema karakteru eksplozije**

Eksplozivi se prema karakteru eksplozije dijele na jake i slabe eksplozive i pirotehničke smjese.

Jaki eksplozivi su oni eksplozivi koji u normalnoj upotrebi detoniraju te kao cilj imaju preko pretvorbe energije u mehanički rad razoriti stijensku masu. Svi eksplozivi navedenog svojstva spadaju u jake eksplozive bez obzira na kemijski sastav i namjenu.

Slabi eksplozivi su oni eksplozivi kojima je primarni mehanizam kemijske promjene eksplozivno sagorijevanje. Neki od slabih eksploziva su baruti i propelanti, kod njih se djelovanje događa zbog djelovanja stlačenih produkata raspada.

Pirotehničke smjese su svi oni materijali koji nisu svrstani ni u jake eksplozive niti u slabe. Njihov proces djelovanja je uz eksplozivno sagorijevanje ili sagorijevanje s prisutnošću kisika iz okoline. Podjela pirotehničkih smjesa je na one kojima je svrha zabava i na pirotehničke smjese za tehničku namjenu.

### **3.2. Podjela eksploziva prema namjeni**

Eksplozivi se prema namjeni dijele na eksplozive i pirotehničke smjese za vojne namjene i na eksplozive i pirotehničke smjese za gospodarske namjene.

U eksplozive za vojnu namjenu spadaju svi oni eksplozivi iz grupe jakih i slabih eksploziva, te služe kao punjenja minsko-eksplozivnih sredstava i municije (Stanković, 2011.)

Gospodarski eksplozivi su našli svoju primjenu prilikom dobivanja mineralne sirovine, za iskope, kod rušenja građevina, otvaranja slobodnih površina itd.

Također postoje i pojedine eksplozivne tvari koje imaju primjenu u obje grane, ali se razlikuju proizvodi u koje se oni ugrađuju, te se samim time prilikom korištenja i njihova uloga razlikuje.

### 3.3. Podjela eksploziva prema uporabnom obliku

Eksplozivi se prema konzistenciji, odnosno obliku u kojem se primjenjuju dijele na:

Čvrste eksplozive koji dobivaju svoj oblik tehnološkim postupkom te se oblikuju lijevanjem, glavni eksploziv u grupi čvrstih eksploziva je pentolit;

Sljedeća grupa su granulirani eksplozivi koji su građeni od zrna kao na primjer ANFO eksploziv (Slika 3-1), te od kristala određene granulacije kao na primjer pentrit ili heksogen;



Slika 3-1 ANFO eksploziv

Naredna grupa su mljeveni eksplozivi koji se dobivaju pomoću mljevenja čvrstih ili granuliranih eksploziva, eksploziv koji pripada ovog grupi je mljeveni amonij-nitrat;

Plastični eksplozivi su još jedna grupa eksploziva koji zapravo sadrže plastifikatore koji omogućavaju pravilnu konzistenciju za upotrebu;

Posljednja grupa su emulzijski eksplozivi koji sadrže vodu te posjeduju kašastu konzistenciju.

### 3.4. Podjela rudarskih eksploziva

Rudarski eksplozivi se dijele na:

Amonij-nitratni praškasti eksploziv koji je smjesa organskih goriva i amonij-nitrata koji je u mljevenom stanju, dok se njegova stabilizacija postiže nitroglicerinom.

ANFO eksplozivi koji kao glavni sastojak imaju granulirani amonij-nitrat s dodatkom mineralnih ulja.

Plastični eksploziv se sastoji od organskih i anorganskih tvari koje poboljšavaju detonaciju te daju eksplozivu potrebnu plastičnost. Osnovni sastojak je želatizirani amonij-nitrat.

Slurry eksplozivi, slika 3-2, su vodene otopine nitrata u kojoj se nalazi i uljna faza, te se uz pomoć plastifikatora postižu određena svojstva i nazivaju se vodoplastični eksplozivi.



Slika 3-2 Slurry eksploziv (IndiaMART, 2012)



Emulzijski eksplozivi koji predstavljaju koloidne smjese nitrata koji su otopljeni u vodi i dispergirani u uljnoj fazi, senzibiliziraju se pomoću mjehurića zraka u mikrokuglicama. U svome sastavu nemaju eksplozivnih tvari koje samostalno reagiraju već se mora postići određena smjesa svih sastojaka.

### **3.5. Primjena gospodarskih eksploziva u miniranju**

Najekonomičniji pristup za eksploataciju, odvajanje, drobljenje stijenskog materijala je upravo pomoću gospodarskih eksploziva. Miniranje s odabranim eksplozivom omogućava formiranje velike površine izvođenjem mreže minskih bušotina. Tehnički i normativni uvjeti određuju veličinu i broj minskih polja i bušotina. Tehnički uvjeti su propisani zbog samog utjecaja miniranja te su oni izraženi kada se miniranje obavlja u naseljenim ili urbanim područjima.

Sama priprema polja za miniranje zahtjeva osiguravanja puteva za dovod bušilice i svih potrebnih strojeva, u nastale bušotine stavlja se eksploziv sa inicijalnim sredstvom na dubinu koja je određena proračunom. Tako postavljeni sustav se inicira sa sigurne udaljenosti (Dobrilović, 2008.).

Sam proces otpucavanja minskih bušotina traje u milisekundama, dok cijeli proces miniranja traje nekoliko sekundi, ako se u prostoru miniranja stvorila prašina, ona se sliježe unutar nekoliko minuta.

Iako eksplozija, ako je ispravno postavljena i otpucana, nema štetan kemijski utjecaj, seizmički valovi mogu izazvati potencijalne probleme. Valovi koji se prenose tlo se mjere u obliku oscilacija koje se prenašaju na građevine ili okolno tlo. Nastali valovi uzrokuju vibracije tla koje su kvantificirane pomoću brzine čestica na određenom mjestu u tlu (Hosseini i dr., 2013.). Također jedan od potencijalnih problema korištenja eksploziva je stvaranje buke iz razloga što dio oslobođene energije prelazi u tlačne valove koji se manifestiraju kao zračni udarni val.

Uz pravilnu kontrolu i analizu moguće je povećanje sigurnosti i ekonomske isplativosti prilikom izvođenja minerskih radova (Dobrilović, 2008.).

#### 4. EKSPLOZIJA I DETONACIJA

Eksplorzija je fizikalni proces koji nastaje zbog ljudskih aktivnosti ili prirodnih djelovanja/pojava. Sam opis odnosno definicija eksplozije varira od autora do autora, a u ovom radu ćemo spomenuti neke od njih. Prema Dremiu eksplozija je proces gdje se događa brzo oslobođenje energije u volumenu koji je ograničen (Dremiu, 1991.). Prema Sućeski je eksplozija brza i egzotermna reakcija u kojoj dolazi do pretvorbe tvari ili sustava uz ekspanziju plinovitih produkata koji su nastali (Sućeska, 2001.).

Eksplorzije se mogu podijeliti, u tri skupine, prema karakteru procesa pretvorbe u nuklearne, kemijske i fizikalne eksplozije. Nuklearne eksplozije su zapravo reakcije fisije i fuzije gdje dolazi do velike ekspanzije energije, ovakve reakcije su karakteristične za ljudska djelovanja (Sućeska, 2001.)(Slika 4-1). Kemijske eksplozije su one eksplozije koje nastaju u eksplozivnim tvarima čija se energija koristi u svrhu dobivanja mehaničkog rada (Slika 4-2). Fizikalne eksplozije su takve eksplozije koje uz visoki tlak sredine, ekspandiraju te tvore eksplozivne pojave (Slika 4-3).



**Slika 4-1** Nuklearna eksplozija (Survivethewrath, 2021)



**Slika 4-2** Kemijska eksplozija (NPR50, 2019)



**Slika 4-3** Fizikalna eksplozija (Wallpaperflare, 2021)

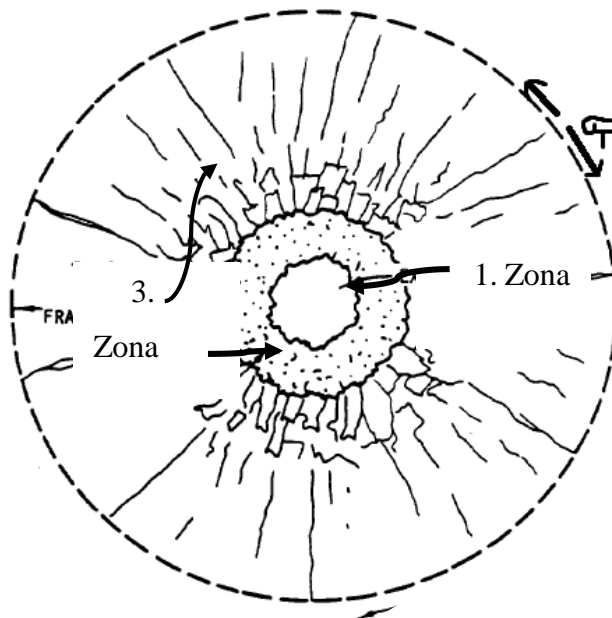
Detonacija predstavlja kemijsku reakciju koja je egzotermna i ta reakcija je zapravo reakcija oksidacije gdje dolazi do vrlo brze izmjene početne eksplozivne tvari u kratkom vremenskom periodu. Detonaciju je moguće postići ako su zadovoljeni uvjeti da materijal ima svojstva eksploziva (da se formira detonacija), te da inicijalni impuls posjeduje energiju koja je nužna za nastanak stabilne detonacije.

Dovođenje topline eksplozivnom materijalu jedan je od načina za inicijaciju detonacije, naravno detonaciju je još moguće postići prelaskom sagorijevanja te uz pomoć djelovanja udarnog impulsa i toplih točkica. Kako su prilikom detonacije potrebni vrlo visoki tlakovi materijal će reagirati u segmentima, a ne kao jedna cjelina. Nakon detonacije plinovi koji su nastali, nalaze se u volumenu relativno identičnom kao i volumen polazne tvari,

nastali plinovi su pod velikim tlakom i pod utjecajem visokih temperatura. Upravo su navedeni parametri zaslužni za oslobađanje energije koja se širi kroz okolinu, eksplozivnu tvar ili objekt (Dobrilović, 2008.).

#### 4.1. Detonacija na okolnu stijenu

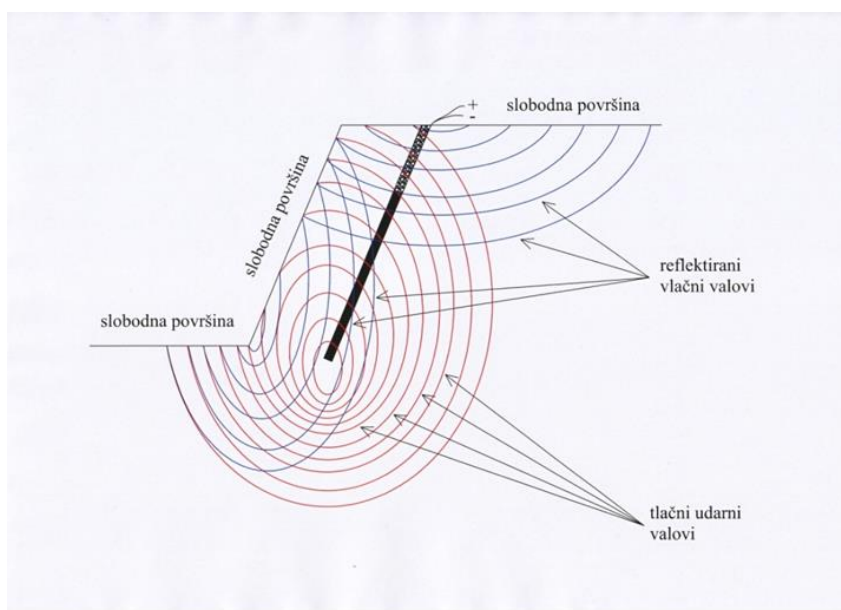
Reakcija detonacije u stijeni uzrokuje deformacije koje su posljedica tlačnog udarnog vala same detonacije. Deformacije koje nastaju mogu biti elastične ili plastične. Prilikom oscilacija čestica u stijeni dolazi do formiranja tri zone. Prva zona je dio u kojem dolazi do usitnjavanja i drobljenja stijenske mase zbog tlačnog naprezanja koja postaju veća od tlačne čvrstoće stijene. Unutar druge zone nalazimo trajne deformacije zbog vlačnih naprezanja koja su veća od vlačne i tlačne čvrstoće stijene. U trećoj zoni vidljive su elastične deformacije koje nastaju zbog oscilacije čestica stijene koje su izazvane poremećajem valova s njihovim napredovanjem od bušotine u okolnu stijensku masu. Prikaz zona je vidljiv na slici 4-4.



Slika 4-4 Zone djelovanja detonacije eksplozivnog naboja (Geoengineer, 2015)

Prilikom prolaska vala kroz stijenu, slika 4-5, on slabi te samim tim i njegova energija opada, do prigušenja dolazi upravo zbog sve veće mase stijene koja oscilira, odnosno širi se duljina od izvora poremećaja, te se samim time i gubi energija koja se troši

zbog trenja čestica koje osciliraju. Također važne stavke zbog kojih dolazi do prigušenja su i gubljenje energije zbog topline te prolazak vala kroz heterogen materijal. Generirani val prolazi sve do određene točke, ali nikada ne širi iznad površine kroz atmosferu (Hu i dr., 2018.). Tlačni valovi koji se prostiru brzinom zvuka, prilikom prelaska u drugačiju sredinu u kojoj se nalazi drugačija impedancija, reagiraju na način da dio energije reflektiraju, dok se preostali dio prenosi u novi medij (Ester, 2005.).



**Slika 4-5** Nastajanja tlačnih udarnih valova i reflektiranih vlačnih valova (Stanković, 2011.)

Razni autori su predložili i dali svoja objašnjenja mehanizma drobljenja stijene kojem je uzrok detonacija eksploziva. Svi autori navode nekoliko zona oko minske bušotine, koje se razlikuju po uzroku drobljenja stijene, po valovima koji unutar njih djeluju te po naprezanjima. Unutar prostornih granica lomljenja i drobljenja stijene mogu se definirati tri područja, primarno, sekundarno i tercijarno područje.

Primarno područje koje zahvaća neposrednu blizinu bušotine, sadrži vlačna, tlačna i posmična naprezanja koja su glavni uzrok loma stijenske mase. Primarna zona je reda veličine dva promjera bušotina i zove se hidrodinamička zona. Tlakovi koji se nalaze u toj zoni, odnosno koji se razvijaju su višestruko veći od tlačne čvrstoće stijene, a period u kojem postignuta naprezanja djeluju mjere se u desetinkama milisekunde (Stanković, 2011.).

Slijedeće područje koje se javlja je sekundarno i ono dolazi iza granica primarnog područja, te se sastoji od nekoliko podzona. Nelinearna zona je prva koja se javlja i u njoj se zbog tlačnog djelovanja vala pojavljuju pukotine. Napredovanjem tlačnih i vlačnih valova,

koji imaju vlačna naprezanja veća od vlačne čvrstoće stijene, kroz stijensku masu dolazi do lokalnih odloma. Pukotine koje nastaju se manifestiraju pod pravim kutom u smjeru u kojem se kreće udarni val, te prilikom nailaska vala na pukotinu dolazi do pojave reflektiranja i transmitiranja vala kao dva smična i dva tlačna vala (Stanković, 2011).

Zona u kojoj je tlačno naprezanje manje od Youngovog modula elastičnosti je elastična zona u kojoj udarni val prelazi u tlačni-elastično-seizmički val. Oscilacije čestica koje nastaju služe kao medij za prijenos energije koja se s udaljenošću smanjuje. Naravno oscilacije čestica nisu posljedica samo jednog vala već je to posljedica više čimbenika kao što su vremensko razdvajanje punjenja minskih bušotina kao izvorišta novih tlačnih valova i raznim djelovanjima unutar heterogene i anizotropne sredine.

#### 4.2. Seizmičko djelovanje miniranja

Prilikom izazivanja eksplozije dio energije koja se oslobodila nije utrošen na razaranje i drobljenje stijena već dolazi do pojavljivanja kinetičke energije elastičnih valova koji se razlikuju po intenzitetu, obliku deformacije i brzini širenja (Krsnik, 1989.). Prolaskom tako nastalih valova dešavaju se oscilacije čestica stijene koje predstavljaju neželjenu pojavu prilikom miniranja u naseljenim mjestima.

Ocjenjivanje utjecaja seizmičkog djelovanja prilikom miniranja na objekte sastoji se od tri dijela, prvi dio se odnosi na procjenu oscilacije tla koja se dešava kao posljedica miniranja u određenoj blizini objekta, slijedeće je analiza podataka koja će dati odgovarajuće podatke za procjenu reakcije objekta na nastale oscilacije, te krajnji dio obuhvaća određivanje graničnih vrijednosti brzina oscilacija da ne nastane oštećenje na objekt.

Određivanje radijusa sigurne zone predstavlja jedan od pristupa za proračun brzina oscilacija stijenskog materijala/tla. Ova metoda obuhvaća primjenu sigurnih miniranja prije metode izračuna brzine oscilacija, te se danas više ne primjenjuje. Radijus ugrožene zone ( $R_s$ ) se prema Genschel-u izračunava:

$$R_s = 7^3 * \sqrt{Q^2} \quad (4-1)$$

Gdje je:  $R_s$  - radijus ugrožene zone (m);

$Q$  - masa jednovremeno detoniranoga eksplozivnoga punjenja (kg)

Očekivane brzine oscilacija tla moguće je izračunati ako je poznata masa eksplozivnog punjenja (koja se može odnositi na više bušotina ili na jednu bušotinu) koja trenutno detonira te ako znamo udaljenost točke promatranja od minskog polja. Prema Nichols-u, Johnson-u i Duvalu-u brzina oscilacije tla računa se:

$$v = 714 \left( \frac{D}{W^a} \right)^b \quad (\text{mm/s}) \quad (4-2)$$

Gdje je:  $v$  – brzina oscilacija tla (mm/s);

$D$  – udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja (m);

$W$  – masa jednovremeno detoniranoga eksplozivnoga punjenja (kg);

$a$  – eksponent količine punjenja;

$b$  – eksponent faktora stijene

Dok se prema formuli Sadovskog očekivana brzina oscilacija računa:

$$v = k \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^n \quad (\text{cm/s}) \quad (4-3)$$

Gdje je:  $v$  – brzina oscilacija tla (cm/s);

$Q$  – masa jednovremeno detoniranoga eksplozivnoga punjenja (kg);

$R$  – udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja (m);

$k$  – koeficijent načina miniranja;

$n$  – koeficijent prigušenja seizmičkih valova na putu širenja

Prema Oriard-u, Hendron-u, Dowding-u i duPond-u izračun je slijedeći:

$$v = 1725 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1,6} \quad (\text{mm/s}) \quad (4-4)$$

Gdje je:  $v$  – brzina oscilacija tla (mm/s),

$D$  – udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja (m),

$W$  – masa jednovremeno detoniranoga eksplozivnoga punjenja (kg).

Također postoji još određivanje brzine oscilacija tla i prema švedskoj normi u kojoj se brzina oscilacija (dozvoljena) računa s obzirom na obližnje objekte prema formuli 4-5, dok se pojedini parametri određuju iz tablice 4-1, 4-2, 4-3 i 4-4.

$$v = v_0 F_k F_d F_t \quad (\text{mm/s}) \quad (4-5)$$

Gdje je:  $v$  – brzina oscilacija tla (cm/s);

$v_0$  – nekorigirana vertikalna komponenta brzina oscilacija tla (mm/s);

$F_d$  – faktor najkraće udaljenosti od mjesta miniranja do promatranog objekta;

$F_t$  – faktor trajanja minerskih radova;

$F_k$  – faktor kvalitete gradnje promatranog objekta

Parametri koji se dodatno određuju pomoću tablica su  $v_0$ ,  $F_b$ ,  $F_m$  i  $F_t$ . Faktor  $F_b$  predstavlja faktor vrste zgrade, dok je  $F_m$  faktor materijala od kojega je zgrada izgrađena i oni zajedno daju umnožak  $F_k$ .

**Tablica 4-1** Određivanje vrijednosti  $v_0$

Sastav tla	$v_0$ (mm/s)
Nepovezani šljunak, pijesak, glina	18
Čvrst šljunak, pješčenjak, meki vapnenac	35
Granit, gnajs, čvrsti vapnenac, pješčenjak, dijabaz	70

**Tablica 4-2** Određivanje vrijednosti faktora materijala  $F_m$

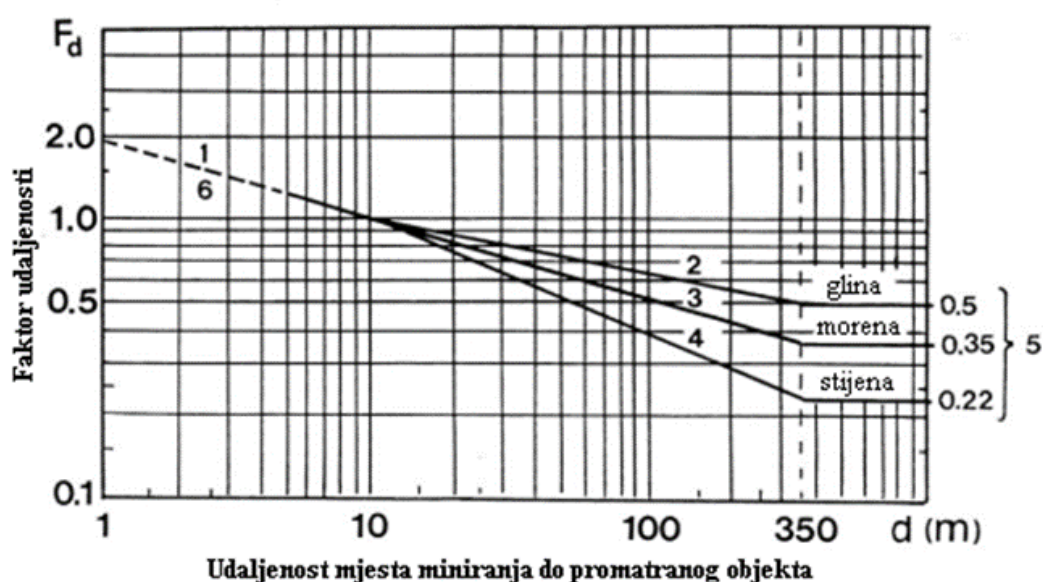
Vrsta građevinskog materijala	Vrijednost $F_m$
1 Armirani beton, željezo, drvo	1.20
2 Nearmirani beton, opeka, klinker opeka	1.00
3 Porozni beton	0.75
4 Umjetni blokovi (vapnenačka opeka)	0.65



**Tablica 4-3** Određivanje vrijednosti faktora vrste zgrade  $F_b$

Vrsta zgrade ili građevinske konstrukcije		Vrijednost $F_b$
1	Teške konstrukcije (mostovi, lukobrani, bunkeri)	1.70
2	Industrijske i uredske zgrade	1.20
3	Standardne stambene zgrade	1.00
4	Specijalno osjetljive zgrade s velikim lukovima, ili konstrukcije s velikim rasponima, crkve i muzeji	0.65
5	Povijesne zgrade u lošem stanju	0.50

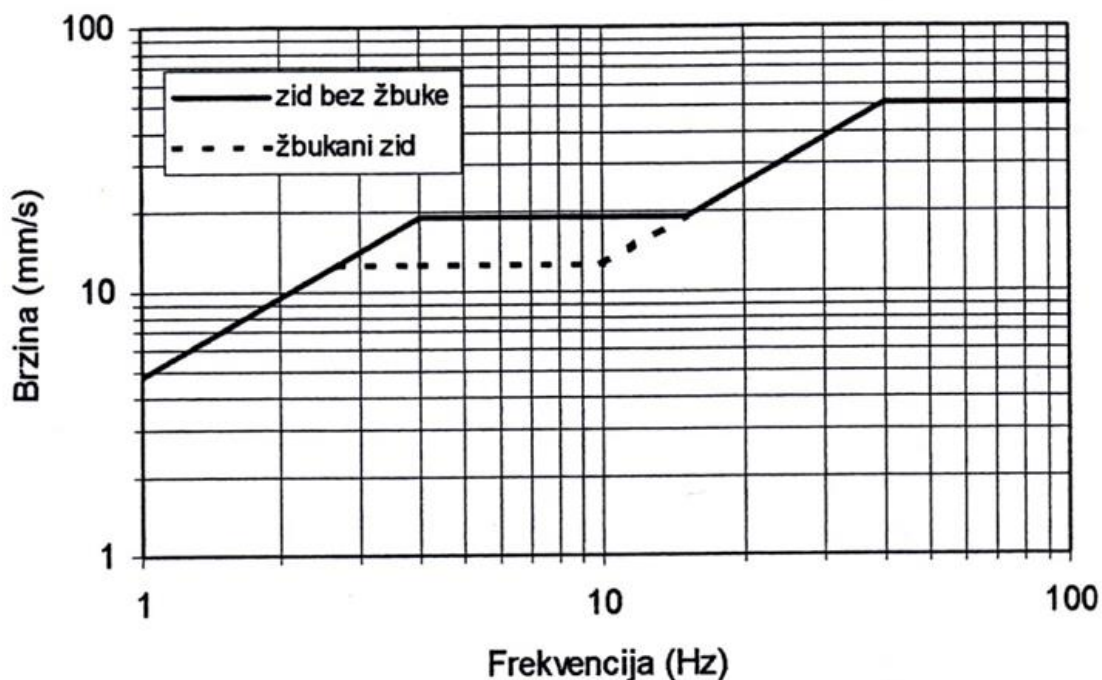
Faktor  $F_d$  se određuje pomoću grafa na slici 4-6.



**Slika 4-6** Dijagram ovisnosti faktora udaljenosti  $F_d$  od udaljenosti mjesta miniranja do promatranog objekta (Stanković, 2011.)

Svaka namjerno izazvana ljudska radnja koja ima određeni cilj mora se pridržavati određenih normi i propisa. Norme se razlikuju po različitim granicama uz pomoć kojih se određuju veličine dopuštenih oscilacija za različite tipove građevina. Sve veća brzina oscilacija je dozvoljena kod što novijih i kvalitetnije izgrađenih objekata. Neke od najzastupljenijih normi su USBM RI8507 and OSMRE; ISO 4866:1990; DIN 4150; British Standard 7385; Švedska norma (Stanković, 2011.).

USBM RI8507 and OSMRE norma pripada američkom normiraju, odnosno njena najveća primjena je unutar SAD-a i ona određuje kriterij seizmičkog utjecaja miniranje uz pomoć brzine i frekvencije oscilacija. Prikaz maksimalne dozvoljene brzine oscilacija u odnosu na frekvenciju osciliranja nalazi se na slici 4-7.



**Slika 4-7** Granica brzine osciliranja tla za razne tipove konstrukcija prema normi USBM RI8507 and OSMRE

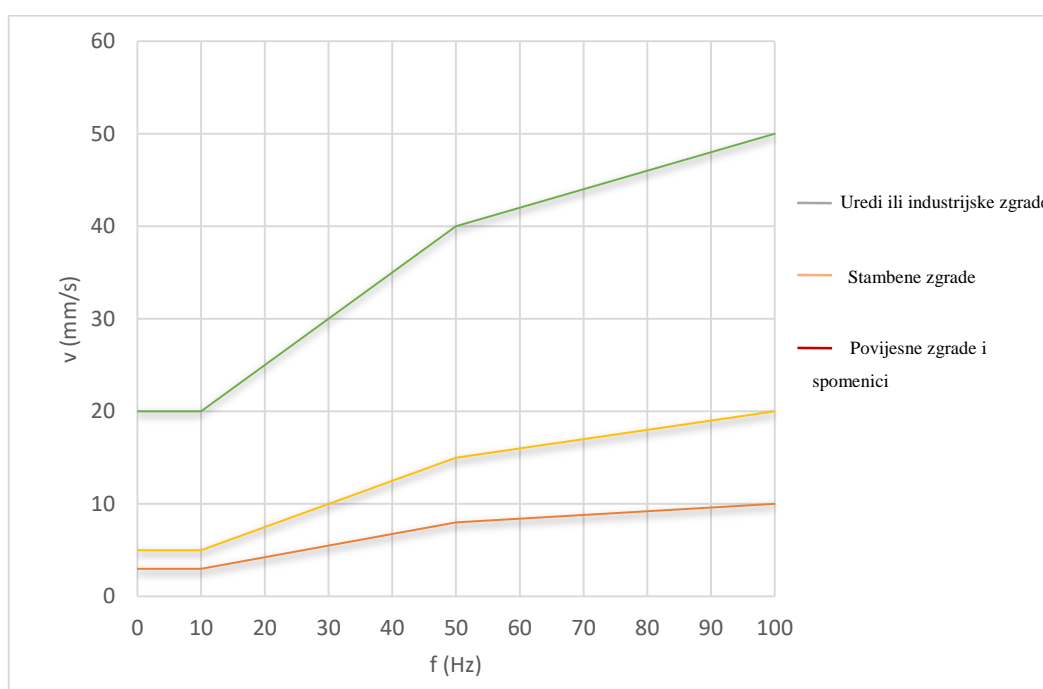
Norma ISO 4866:1990 predstavlja internacionalnu normu uz pomoć koje su definirani principi izvođenja za mjerenje vibracije i sama obrada podataka koja uzima u obzir procjenu efekta vibracije na sami objekt. Sama ta procjena dobivena je na temelju oscilacija od objekta koje su onda uz pomoć analitike obrađene na frekvenciju, amplitudu vibracija i vrijeme trajanja samih vibracija. Unutar ove norme nisu obuhvaćena mjerenja zračnog udarnog vala i ostala djelovanja dinamičkih tlakova. Norma je primjenjiva i na podzemne i na nadzemne objekte, ali ne i na specijalne objekte kao što su nuklearne elektrane. Kao što je već spomenuto pomoću ove norme može se kontrolirati amplituda, frekvencija i vrijeme trajanja vibracija, ali ne ograničava brzinu osciliranja tla.

Norma DIN 4150, koja je preuzeta za hrvatsku normu HRN DIN 4150:2011 najstrože je definirana norma od svih navedenih te ima najširu primjenu. Vrijednosti unutar norme se razlikuju s obzirom na građevinu koja se promatra te također ovise i o mjestu mjerenja, tablica 4-4.

**Tablica 4-4** Granične vrijednosti brzina oscilacija prema normi DIN 4150

	Temelji			Pod najvišeg kata u zgradi
	<10 (Hz)	10-50 (Hz)	50-100 (Hz)	Bilo koja frekv.
<b>Uredske ili industrijske zgrade</b>	20 mm/s	20 – 40 mm/s	40 – 50 mm/s	40 mm/s
<b>Stambene zgrade sa žbukanim zidom</b>	5 mm/s	5 – 15 mm/s	15 – 20 mm/s	15 mm/s
<b>Povijesne i druge osjetljive zgrade</b>	3 mm/s	3 – 8 mm/s	8 – 10 mm/s	8 mm/s

Unutar norme gleda se i na frekvenciju nastalu iz izvora vibracije u kombinaciji sa brzinom oscilacija tla. Iz svega toga proizlazi da se dozvoljena veličina brzina oscilacija tla povećava s povećanjem frekvencije (Stanković, 2011.). Kod miniranja frekvencije oscilacija se kreću od 20 do 100 Hz te samim tim ne spadaju u najopasnije područje ispod 10 Hz. Dijagram koji određuje granicu brzina čestica za različite konstrukcije u funkciji frekvencije nalazi se na slici 4-8.



**Slika 4-8** Dijagram granica brzina čestica za rezne konstrukcije u funkciji frekvencije

British Standard 7385 norma je koja se koristi u Velikoj Britaniji te je također utvrđena uz pomoć odnosa frekvencije oscilacija i brzine oscilacija, prikaz maksimalnih vrijednosti brzina osciliranja za pojedine građevine u odnosu na frekvenciju oscilacija nalazi se unutar tablice 4-5.

**Tablica 4-5** Dozvoljene brzine čestica za drugačije tipove objekata definirane British Standard 7385 normom.

Vrste objekata	Dopuštene vrijednosti komponentnih brzina čestica za određeni frekventijski raspon	
	4 Hz – 15 Hz	>15 Hz
Armirane ili rešetkaste konstrukcije (industrijske i poslovne hale)	50 mm/s kod 4 Hz i više	
Nearmirane ili lake rešetkaste konstrukcije (stambene i komercijalne zgrade)	15 mm/s kod 4 Hz uz povećanje do 20 mm/s kod 15 Hz	20 mm/s kod 15 Hz uz povećanje do 50 mm/s kod 40 Hz i više

Također danas su u primjeni i razne ljestvice koje daju veličinu i tip štete koja se temelji na brzini osciliranja tla. Veliki nedostatak većini ljestvica proizlazi iz činjenice da su vrijednosti dobivene za prirodne potrese, a ne one koji su nastali ljudskom djelatnošću, te su same vrijednosti podložne subjektivnim dojmovima pojedinaca. No, S.V.Medvedev je dao ljestvicu intenziteta potresa koji su posljedica miniranja, te se ona nalazi u tablici 4-6.

**Tablica 4-6** Ljestvica intenziteta potresa izazvanih miniranjem (prema S.V.Medvedev-u).

<b>Stupanj potresa</b>	<b>Brzina oscilacija (cm/s)</b>	<b>Karakteristike potresa</b>
1.	<0,2	Oscilacije mogu registrirati samo instrumenti
2.	0,2 - 0,4	Oscilacije se mogu osjetiti samo u potpunoj tišini
3.	0,4 - 0,8	Oscilacije mogu osjetiti samo osobe koje su obaviještene o miniranju
4.	0,8 - 1,5	Oscilacije mogu osjetiti mnogi ljudi i pojavljuje se zveckanje stakala
5.	1,5 - 3,0	Počinje osipanje žbuke; nastaju oštećenja na starijim zgradama
6.	3,0 - 6,0	Pojavljaju se veće pukotine u žbuci, oštećenja zgrada su lakše uočljiva
7.	6,0 - 12,0	Pojavljaju se oštećenja na solidnijim zgradama; otpadaju komadi žbuke; nastaju tanke pukotine na zidovima i dimnjacima; počinje klizanje vodom zasićenog pjeskovitog tla; otpadanje nestabilnih blokova na strmim nagibima
8.	12,0 - 24,0	Nastaju znatna oštećenja zgrada; pojavljaju se velike pukotine na zidovima i konstrukcijama; dimnjaci se ruše; pada žbuka; počinje obrušavanje kosina uz rub tektonskih pukotina; u slabo vezanim stijenama nastaju trajne deformacije
9.	24,0 - 48,0	Zgrade se ruše, pojavljaju se velike pukotine u zidovima i stijenama; odronjavanje čvrstih kosina; obrušavanje rubnih dijelova slabo vezanih stijena i tla sa sistemom pukotina nepovoljno orijentiranih
10.	48,0 - 96,0	Nastaju velika razaranja i rušenja zgrada; pojavljaju se pukotine u čvrstim stijenama; zarušavanje rubnih dijelova u slabo vezanim srednje čvrstim stijenama; zarušavanje jamskih hodnika
11.-12.	>96,0	Znatna obrušavanja kosina u čvrstim stijenama

## 5. ODREĐIVANJE DOZVOLJENE MASE EKSPLOZIVNOGA PUNJENJA PO STUPNJU PALJENJA PREMA M. A. SADOVSKOM

Jedan od najčešće korištenih modela za proračun dozvoljene mase eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja je formula M. A. Sadovskog (4-3). Za vrijeme probnog miniranja postave se dva seizmografa koji mjere brzinu oscilacija koja putuje u smjeru objekta. Seizmografi se moraju postaviti na točno određenim udaljenostima od minskog polja kako bi se uz poznatu masu eksplozivnog punjenja i izmjerenu brzinu oscilacija mogao riješiti sustav jednačbi s dvije nepoznanice. Glavna formula za dobivanje koeficijenta načina miniranja ( $k$ ) i koeficijenta prigušenja seizmičkih valova na putu prostiranja ( $n$ ) je:

$$v_{1,2} = k \cdot \rho_{1,2}^n \quad (5-1)$$

uz:

$$\rho = \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \quad (5-2)$$

Gdje je:  $v_1$  – brzina oscilacija tla na prvom instrumentu (cm/s);

$v_2$  – brzina oscilacija tla na drugom instrumentu (cm/s);

$Q$  – maksimalna količina eksplozivnog punjenja po stupnju otpucavanja (kg);

$R_1$  – udaljenost između minskog polja i prvog mjesta opažanja (m);

$R_2$  – udaljenost između minskog polja i drugog mjesta opažanja (m);

$k$  – koeficijent načina miniranja;

$n$  – koeficijent prigušenja seizmičkih valova na putu širenja.

Iz formula proizlazi:

$$n = \frac{\log \frac{v_1}{v_2}}{\log \frac{\rho_1}{\rho_2}} = \frac{\log \frac{v_1}{v_2}}{\log \frac{R_1}{R_2}} \quad (5-3)$$

$$k = \frac{v_1}{\rho_1^n} = \frac{v_2}{\rho_2^n} \quad (5-4)$$

Nakon što se koeficijenti  $n$  i  $k$  uvrste u početnu formulu dobije se ovisnost brzine oscilacija o masi jednovremenog detoniranog eksplozivnog punjenja na određenoj udaljenosti od mjesta miniranja (Krsnik, 1989.).

Također i unutar ove problematike i određivanja ovisnosti i koeficijenata se javljaju problemi. Jedan od glavnih problema je što dolazi do odstupanja izračunatih vrijednosti brzina oscilacija prilikom malih odnosno velikih udaljenosti od minskog polja. Drugi problem koji se javlja je potreba za stalnim korigiranjem proračunate mase eksplozivnog punjenja koje se odnose na mjerene brzine oscilacija, za svako miniranje, kako se približavamo promatranom objektu (Stanković, 2011.)

## 6. ISKOP USJEKA MINIRANJEM NA PRIMJERU ISKOPA USJEKA AUTOCESTE ZAGREB-SPLIT-DUBROVNIK NA DIONICI BISHKOŠESTANOVAC

Dio Jadranske autoceste obrađen u ovom radu odnosi se na dionicu Bisko-Šestanovac koji je dio Autoceste Zagreb-Split-Dubrovnik, te prolazi kroz mjesto Trnbusi, slika 6-1 i 6-2. Projektirana dionica je sastavni dio Jadransko-jonske autoceste kojom su povezani Jadransko i Egejsko more uz pomoć Jadranskog i kontinentalnog koridora. Unutar samog teritorija Republike Hrvatske autocesta omogućava povezivanje priobalnog područja i jadranskih luka te povezuje i zapadno europske dijelove sa jugoistočnom Europom i Bliskim Istokom.



**Slika 6-1** Trnbusi (blizina naseljenih objekata)





**Slika 6-2** Novo stanje nakon izgrađene autoceste (Trnbusi)

Glavni problem prilikom izvođenja miniranja na prikazanoj lokaciji je upravo udaljenost na kojoj se nalaze naseljeni objekti, dalekovodi i telefonski vod. Samo mjesto Trnbusi dobivaju zalihe pitke vode uz pomoć cisterni te se ona skladišti u podzemnim spremnicima koji također predstavljaju jedan od problema za izvođenje miniranja.

### **6.1. Geološke i inženjerskogeološke značajke terena**

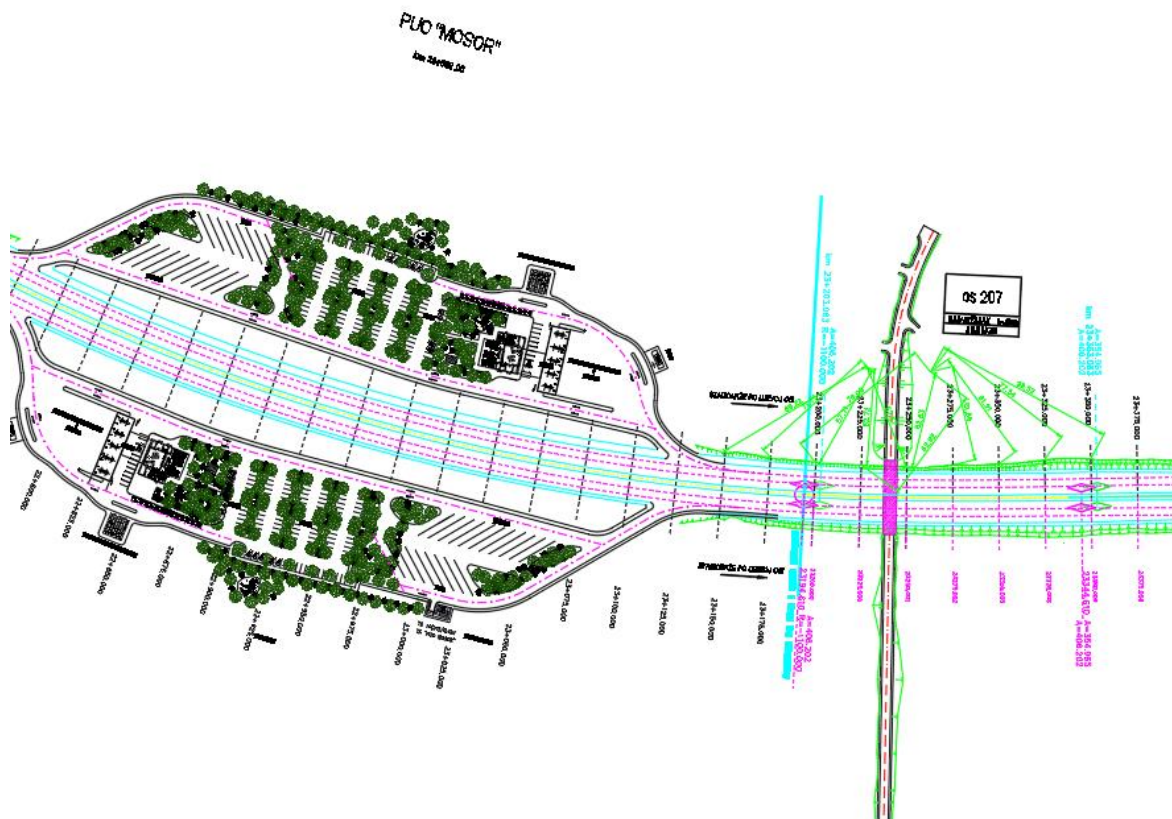
Na temelju inženjerskogeoloških istraživanja određeni su litološki članovi od kojih se područje sastoji. Litološki član Jura-titon ( $J_3^3$ ) sastoji se od vapnenačkih naslaga titonske starosti te predstavljaju debeloslojne vapnence sive boje. Slijedeći član su Kotišinske naslage ( $K_2^1 - K_2^3$ ) te one predstavljaju gromadaste svijetlosive vapnence unutar kojih su prisutni prosljoci karbonatnih breča. Gornja kreda ( $K_2^{1,2}$  i  $K_2^3$ ) se odnose na vapnenačke naslage koje su dobro uslojene. Unutar Paleogena ( $E_{1,2}$ ) nalaze se vapnenci s miliolidama i drugim sitnim foraminiferima. Kvartarne naslage (Q) su utvrđene izvan trase i unutar njih se nalaze prašinate gline s nejednolikom raspodjelom vapnenačkog krša.

Hydrogeološke značajke ukazuju na postojanje međuzrnske poroznosti unutar kvartarnih sedimenata, dok pukotinska poroznost karakterizira raspucane vapnenačke naslage. Unutar samih vapnenačkih naslaga uz pomoć prostora koji je formiran zbog pukotina, kaverni, rasjednih diskontinuiteta i sl. teče oborinska voda te se kreće prema nižim zonama. Ostale vodene površine koje direktno utječu na dionicu su one nastale i u blizini rijeke Cetine.

Inženjerskogeološke značajke upućuju na to da je zbog intenzivne tektonske aktivnosti došlo do promjene i narušavanja fizikalno-mehaničkih karakteristika stijenske mase te samim tim otvoren put za prodor vode te nastaju krške morfološke pojave kao što su škrape i vrtače. Stijenska masa je u površinskom dijelu poprilično raspucana te je debljina ovako raspucane zone otprilike 3 do 4 metra. Raspucane naslage pripadaju očvrslim sedimentnim karbonatnim stijenama. Duž cijele trase dionice predviđa se skidanje površinskoj sloja koji iznosi u prosijeku 30 cm. Prema seizmologiji dionica se nalazi unutar zone za koju je predviđeni maksimalni intenzitet potresa od 8 stupnjeva za povratni period od 200 godina, te intenzitet potresa od 9 stupnjeva za povratni period od 500 godina prema MSK-64 ljestvici.

## **6.2. Kalkulacija parametara miniranja**

U mjestu Trnbusi miniranje i bušenje se izvodilo izmjenično sa istoka i sa zapada, slika 6-3. Minsko polje je podijeljeno u dva osnovna dijela, odnosno na konturne minske bušotine i produktivne minske bušotine. Konturne bušotine se otpucavaju prve te za njima slijedi otpucavanje produktivnih minskih bušotina. Zbog samog područja koje je naseljeno i zbog dopuštene količine eksploziva po stupnju paljenja, konturno miniranje se izvelo prije izrade produktivnih bušotina. Upravo ovakav način onemogućava da se u slučaju prekida otpucavanja konturnih bušotina pokrenu produktivne te proizvede jači seizmički val.



Slika 6-3 Postojeći teren

Za izvođenje minerskih radova potrebno je prvo napraviti kalkulaciju parametara miniranja. Kalkulacija je izvedena prema Langeforsu. Odredile su se geometrije konturnih minskih bušotina i geometrije produktivnih minskih bušotina. Maksimalna linija najmanjeg otpora dobivena je:

$$W_{\max} = \frac{D_b}{33} * \sqrt{\frac{g * E}{s * v_k * m}} \quad (6-1)$$

Gdje je:  $W_{\max}$  - linija najmanjeg otpora (m);

$D_b$  - promjer bušotine (mm);

$g$  - gustoća punjenja eksploziva u minskoj bušotini ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$E$  - relativna masena snaga eksploziva;

$s$  - faktor minirljivosti stijene obzirom na uvjete uklještenja ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$v_k$  - koeficijent uklještenosti pri dnu minske bušotine;

$m$  - koeficijent gustoće minskih bušotina

Vrijednosti koje su se dobile ovakvim proračunom korigirane su prema podacima dobivenim iz probnog miniranja te one iznose 1,0m x 1,0m kod najplićih dijelova, dok za najdublji dio usjeka one iznose 2,0m x 2,0m, kako bi se osigurala dovoljna količina eksploziva po m<sup>3</sup> srasle stijene.

### 6.3. Postavljanje instrumenata

Za mjerenje su se koristili seizmografi vodećeg proizvođača InstanTEL inc. vrste Minimate i Blast Mate, slika 6-4, pokazuje instrument InstanTEL Minimate Plus generalno istih karakteristika kao i prethodna dva, karakteristike korištene opreme se nalaze u tablici 6-1, koji su bilježili podatke dobivene probnim miniranjem, nakon čega su se jednim instrumentom izvodila kontrolna mjerenja na najbližem objektu.



Slika 6-4 Instrument za mjerenje brzina oscilacija tla InstanTEL Minimate Plus

**Tablica 6-1** Generalne značajke seizmografa InstanTEL Minimate i InstanTEL Blast Mate III

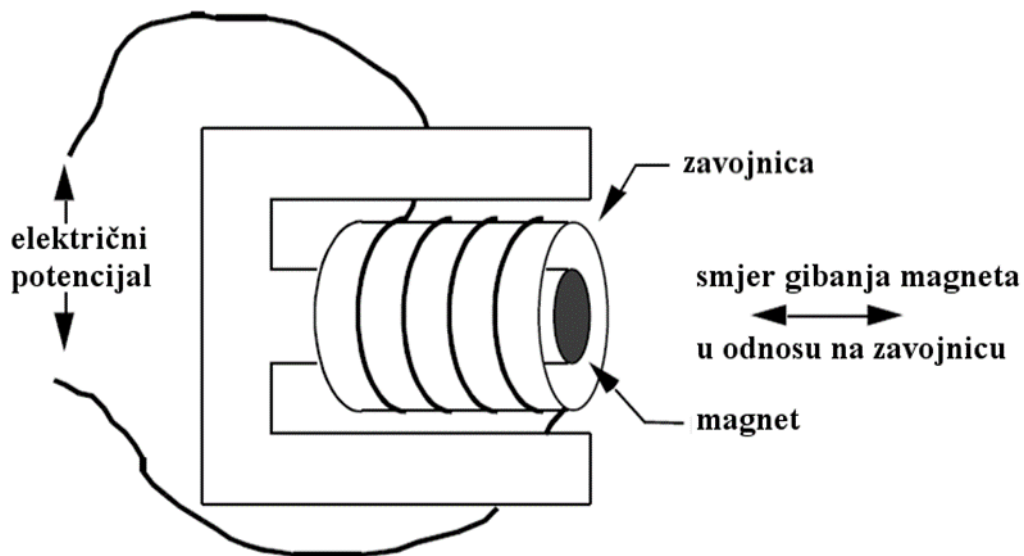
<b>InstanTEL Minimate</b>	
Mikrofon i troosni geofon	
Maks.raspon	127 mm/s
rezolucija	0,125 mm/s
Raspon	100 do 142 dB (2 do 250 Pa)
Min. rezolucija	$2,9 \times 10^{-4}$ (0,5 Pa)
Obrada podataka	programski paket InstanTEL BlastWare

<b>InstanTEL BlastMate Series III</b>	
Seizmički kanali x 3	1024-16,384 uzoraka/s/kanal
Maks.raspon	254 mm/s
rezolucija	0,0159 mm/s
Akceleracija i pomak	proračun računalnom obradom
Pomak	0,00023-3,5 cm
Buka i zračni udar x 1	1024-16,384 uzoraka/s/kanal
Raspon	88-148 dB (linearni), 50-110 dB («A»)
Rezolucija	0,25 Pa (linearni), 0,1 dB («A»)
Obrada podataka	programski paket InstanTEL BlastWare

Instrumenti se nalaze u liniji koja prolazi sredinom bušotine za koju se rade mjerenja. Mjerni sustav sastoji se od uređaja i geofona. Unutar sustava mjeri se brzina oscilacija na mjestu gdje se nalazi geofon, a mjerni zapis daje krivulju tog kretanja. Geofon mora biti dobro učvršćen za podlogu i spojen na instrument.

Pomoću geofona je omogućeno istovremeno mjerenje brzine oscilacija u tri međusobno okomita smjera. Svaki smjer oscilacije se mjeri pomoću posebne komponente, te tako razlikujemo longitudinalnu, transverzalnu i vertikalnu komponentu. Princip rada geofona,

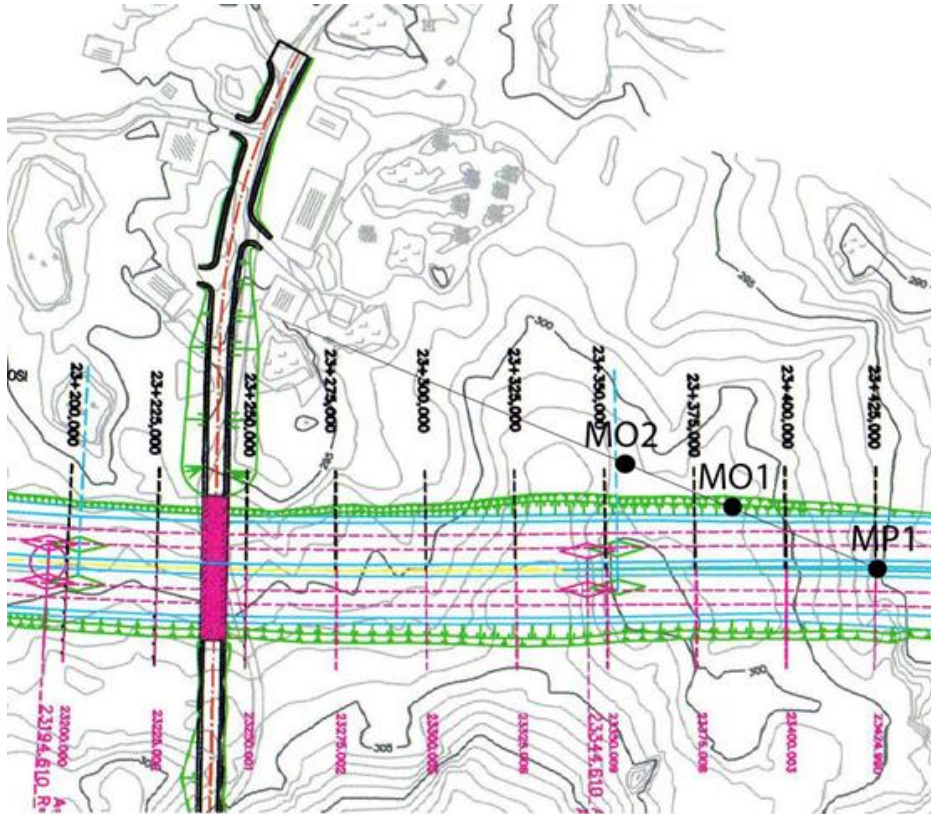
odnosno svitka, za svaku komponentu posebno, je uz pomoć elektromagnetske indukcije slika 6-5.



**Slika 6-5** Načina rada geofona – (BlastMate III Operator Manual 2001.)

#### **6.4. Proračun dozvoljene količine eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja**

Maksimalna dozvoljena količina eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja odredila se uz pomoć probnog miniranja i to za različite udaljenosti izvora oscilacija od objekata koji su naseljeni ili u blizini. Proračun je izrađen prema M. A. Sadovskom (4-3), odnosno prema njegovoj empirijskoj formuli gdje je uzeta dozvoljena brzina oscilacija tla 1,5 mm/s. Na temelju rezultata koji su dobiveni iz probnog miniranja minskog polja 1 (MP1) u smjeru MP1/MO1 i MP1/MO2 (Slika 6-6), dobiven je proračun dozvoljenih količina eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja.



Slika 6-6 Prikaz minskog polja, te prvog i drugog mjesta opažanja (MO1, MO2)

Za maksimalnu količinu eksplozivnog punjenja od 20 kg, udaljenosti prvog mjesta opažanja od minskog polja koja iznosi 40 m i udaljenosti drugog mjesta opažanja od minskog polja od 76 m dobivene su brzine oscilacija u pojedinim mjestima opažanja, te one iznose 58,9 mm/s za prvo mjesto, te 6,7 mm/s za drugo mjesto opažanja.

## 6.5. Otpucavanje minskih bušotina

Kako je već ranije rečeno samo otpucavanje minskih bušotina izvodilo se u dvije faze. Konturno miniranje se izvodilo prvo, prije izrade produktivnih bušotina, bušotine su punjenje od dna sa polovicom patrone Perunita  $\phi$  50 mm i detonirajućim štapinom dužinskog punjenja 80 g/m' oznake C-80 do zone čepa. Kroz zonu čepa te za spoj sa ostalim konturnim bušotinama korišten je detonirajući štapin dužinskog punjenja 12 g/m' oznake C-12. Retarderer (usporivači) su postavljeni između bušotina, ovisno o blizini naseljenih objekata. Nakon njihovog otpucavanja kreće se u izradu produktivnih bušotina.

Unutar produktivnih bušotina punjenje ovisi o dubini usjeka i udaljenosti naseljenih objekata iz kojih proizlazi granica za količinu eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja. Na udaljenijim i plićim dijelovima u bušotinu je postavljena jedna patrona Perunita  $\phi$  50 mm, a do zone čepa stavljen je ANFO eksploziv. Unutar dijelova koji se nalaze bliže naseljenim zonama te unutar dubljih dijelova usjeka punjenje se izvodilo razdjelno korištenjem do pet detonatora po bušotini, gdje svaki detonator mora zasebno detonirati, te ne smije doći do vremenskog preklapanja. Razbacivanje odminirane mase se smanjilo uz pomoć korištenja neelektričnih detonatora i povećanjem čepa za 10-15%. Povećanje čepa je služilo kao dodatna sigurnost protiv razbacivanja materijala, jer zbog povećanja minskog polja i kratkog vremena izvedbe radova sama zaštita nije bila izvediva pomoću prekrivanja polja.



## 7. KONTROLNA MJERENJA – OBRADA PODATAKA I ANALIZA

Kontrolna mjerenja su se izvodila prilikom deset proizvodnih miniranja, odnosno deset minskih polja, polja su postavljena tako da tvore jednu liniju krećući se iz vanjskog dijela prema unutrašnjosti, samim time najudaljenije bušotine minskih polja se nalaze na 94,05 m s jedne strane, te 74,54 s druge strane mjesta opažanja. Kako se teren prema sredini sve više izdizao tvoreći oblik brežuljka dublje bušotine se nisu punile po cijeloj dužini već razdjelno do maksimalno 5 razdijeljenih punjenja po bušotini. Tako su prve i najudaljenije bušotine zapunjene cijele dok se svakom slijedećem paru povećavao broj razdjela. Sredstvo za razdvajanje je među čep dužine jedan metar od inertnog materijala poput drobljenog kamena.

Potpuni podaci o masi eksploziva koji se dobio proračunom prema probnom polju, stvarnom stanju utrošenog eksploziva prema stupnju paljenja te udaljenosti bušotine od mjesta opažanja nalaze se u tablici 7-1.

Prilikom same izvedbe početna stacionaža za izvođenje miniranja je bila 23+345-23+360 te je proračunom prema probnom miniranju određena masa eksploziva od 77,40 kg, no samom dubinom usjeka prema projektu količina eksploziva po bušotini / stupnju paljenja iznosila je 32,5 kg.. Slijedeće punjenje bušotina na stacionaži 23+330-23+345 proračunom koji je obuhvatio i probno i prvo produktivno miniranje dobivena je maksimalna količina po stupnju paljenja od 26,14 kg. Kako bi ta količina zapunila oko 65% dubine bušotine odabrano je da se bušotina puni u dvije etaže po 15,5 kg po stupnju paljenja dok je proračunom prema probnom miniranju masa punjenja trebala biti 51,62 kg. Bušotine na stacionaži 23+138-23+165 zapunjene su sa 17,7 kg eksploziva po stupnju paljenja, dok su bušotine na stacionaži 23+320-23+330 zapunjene sa 8,7 kg eksploziva po stupnju paljenja. Nadalje, na stacionaži 23+165-23+195 u bušotine se stavljalo 10,3 kg eksploziva po stupnju paljenja, bušotine na stacionaži 23+305-23+320 zapunjene su sa 7,5 kg, dok su bušotine na stacionaži 23+195-23+305 zapunjene sa 11 kg eksploziva po stupnju paljenja. 7,9 kg eksploziva po stupnju paljenja postavljeno je unutar bušotina koje su se nalazile na: 23+195-23+215, dok je za bušotine na stacionaži 23+260-23+290 bilo potrebno 12,26 kg prema proračunu baziranom na probnom miniranju, odnosno s uzetim korekcijama ta masa iznosi 7,2 kg po stupnju paljenja. Bušotine zadnjeg minskog polja se nalaze na stacionaži 23+215-23+260 te masa eksploziva izračunata prema probnom miniranju iznosi 13,47 kg, dok je stvarna masa koja je utrošena po stupnju paljenja 8,8 kg.

**Tablica 7-1** Proračunata i stvarno utrošenih količina eksploziva, udaljenosti i stacionaže

Stacionaža	Udaljenost (m)	Proračun prema probnom polju (kg)	Stvarno utrošeno po stupnju paljenja (kg)	Izmjerena vrijednost PVS (mm/s)
23+138-23+165	74,54	38,53	17,7	12,0
23+165-23+195	60,38	20,48	10,3	22,2
23+195-23+215	53,81	14,50	7,9	13,7
23+215-23+260	52,51	13,47	8,8	13,8
23+260-23+290	50,89	12,26	7,2	15,9
23+290-23+305	57,76	17,93	11,0	23,0
23+305-23+320	65,63	26,30	7,5	0,8
23+320-23+330	74,34	38,22	8,7	2,3
23+330-23+345	82,17	51,62	15,5	20,1
23+345-23+360	94,05	77,40	32,5	27,2

Kako je već ranije objašnjeno osnovni proračun je temeljen na miniranju probnog polja. Izračun je proveden uz pomoć formula od 5-1 do 5-4. Koeficijent prigušenja ( $n$ ) iznosi 3,387, svedena količina eksploziva  $\rho_1 = 0,0678$  i  $\rho_2 = 0,0357$ , te koeficijent načina miniranja ( $k$ ) iznosi 533358,3. Prikaz krivulje probnog minskog polja kao i potrebni parametri prikazani su grafom na slici 7-1, te u tablici 7-2.

**Tablica 7-2** Parametri za dobivanje krivulje probnog minskog polja

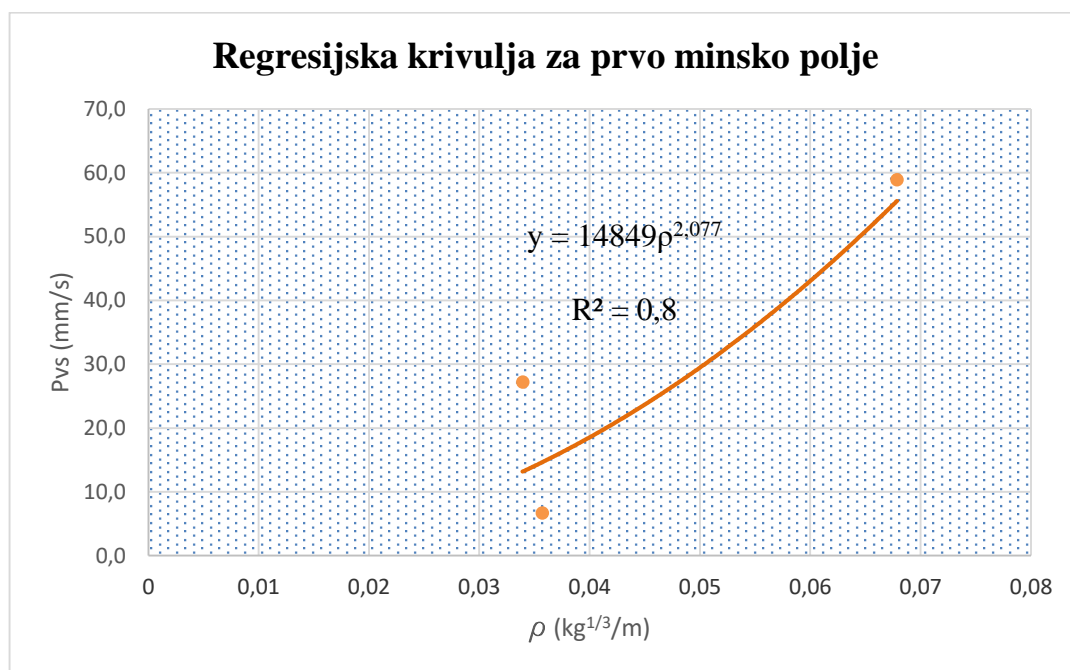
$\rho$	Pvs
0,06786	58,9
0,03572	6,7

Navedeni podaci rezultirali su jednadžbom krivulje  $y = 533358\rho^{3,3866}$ . Također za svako minsko polje s točkama opažanja dobivena je vrijednost indeksa korelacije  $R^2$ . Indeks korelacije predstavlja poklapanje originalnih vrijednosti sa regresijskom krivuljom, što je indeks veći (bliži 1) to je bolje poklapanje, a upravo suprotno, što je indeks manji to se originalne vrijednosti manje poklapaju sa regresijskom krivuljom.



**Slika 7-1** Grafički prikaz regresijske krivulje za probno minsko polje

Krivulja koja se dobila opažanjem za prvo minsko polje, odnosno za dvije točke probnog polja i jednom kontrolnom točkom opažanja prilikom produktivnog miniranja nalazi se na slici 7-2, a pripadajući podaci u tablici 7-3.



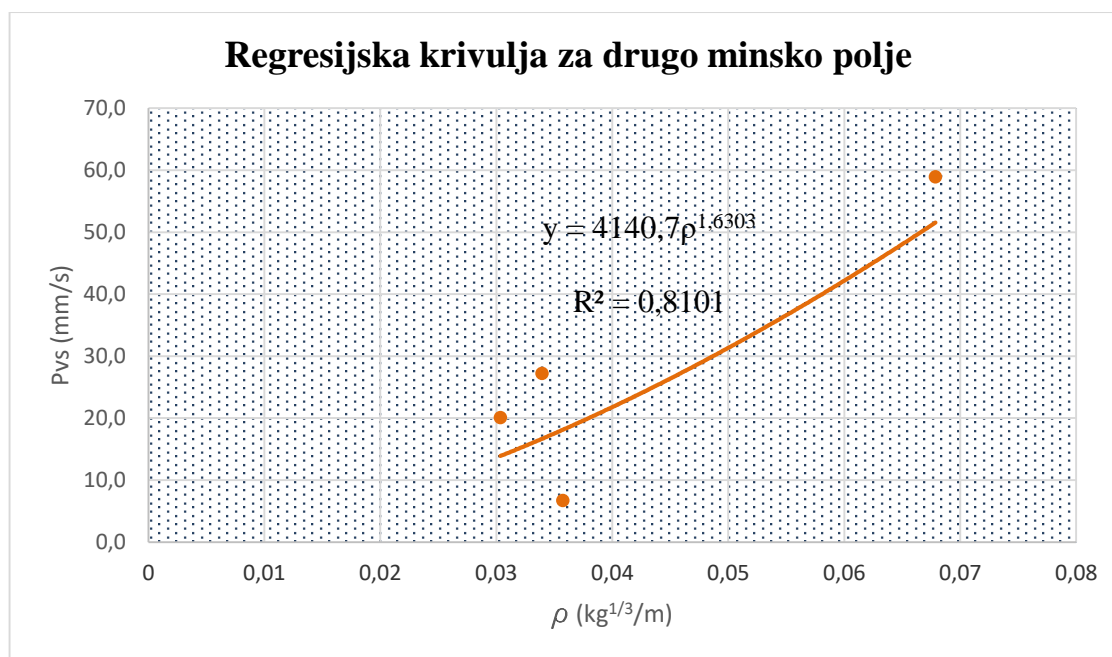
**Slika 7-2** Grafički prikaz regresijske krivulje za prvo minsko polje

**Tablica 7-3** Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje prvog minskog polja.

R	Q	k	$\rho$	n
10	0,05			
15	0,16			
20	0,38			
25	0,74			
30	1,27			
35	2,02			
40	3,02			
45	4,29			
50	5,89			
55	7,84	14849	0,036118	2,077
60	10,18			
65	12,94			
70	16,16			
75	19,88			
80	24,12			
85	28,94			
90	34,35			
95	40,40			
100	47,12			

Jednadžba krivulje za prvo minsko polje iznosi  $y = 14849\rho^{2,077}$ , a indeks korelacije  $R^2$  iznosi 0,7522.

Za drugo minsko polje gdje je dodano još jedno mjesto opažanja, odnosno sada u obzir ulaze četiri točke, dobivamo krivulju sa grafa na slici 7-3, dok su njezini pripadajući podaci sadržani unutar tablice 7-4. Indeks korelacije  $R^2$  za drugo minsko polje iznosi 0,8101.



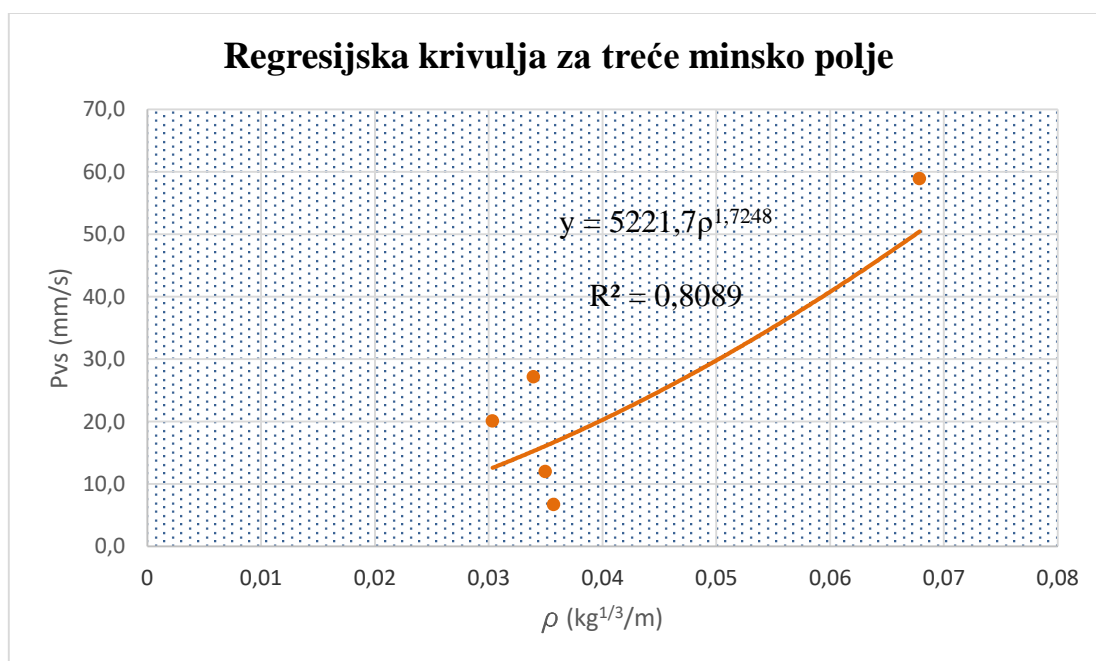
**Slika 7-3** Grafički prikaz regresijske krivulje za drugo minsko polje

**Tablica 7-4** Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje drugog minskog polja.

R	Q	k	$\rho$	n
10	0,03			
15	0,11			
20	0,26			
25	0,50			
30	0,87			
35	1,38			
40	2,06			
45	2,94			
50	4,03			
55	5,36	4140,7	0,031823	1,6303
60	6,96			
65	8,85			
70	11,05			
75	13,60			
80	16,50			
85	19,79			
90	23,49			
95	27,63			
100	32,23			

Krivulja sa grafa 7-3. ima jednadžbu  $y = 4140,7\rho^{1,6303}$ .

Treće minsko polje koje se sastoji od pet točaka od kojih su tri točke kontrolnih opažanja sadrži krivulju sa grafa na slici 7-4, a potrebne vrijednosti parametara prikazane su u tablici 7-5. Indeks korelacije  $R^2$  za treće minsko polje iznosi 0,8089.



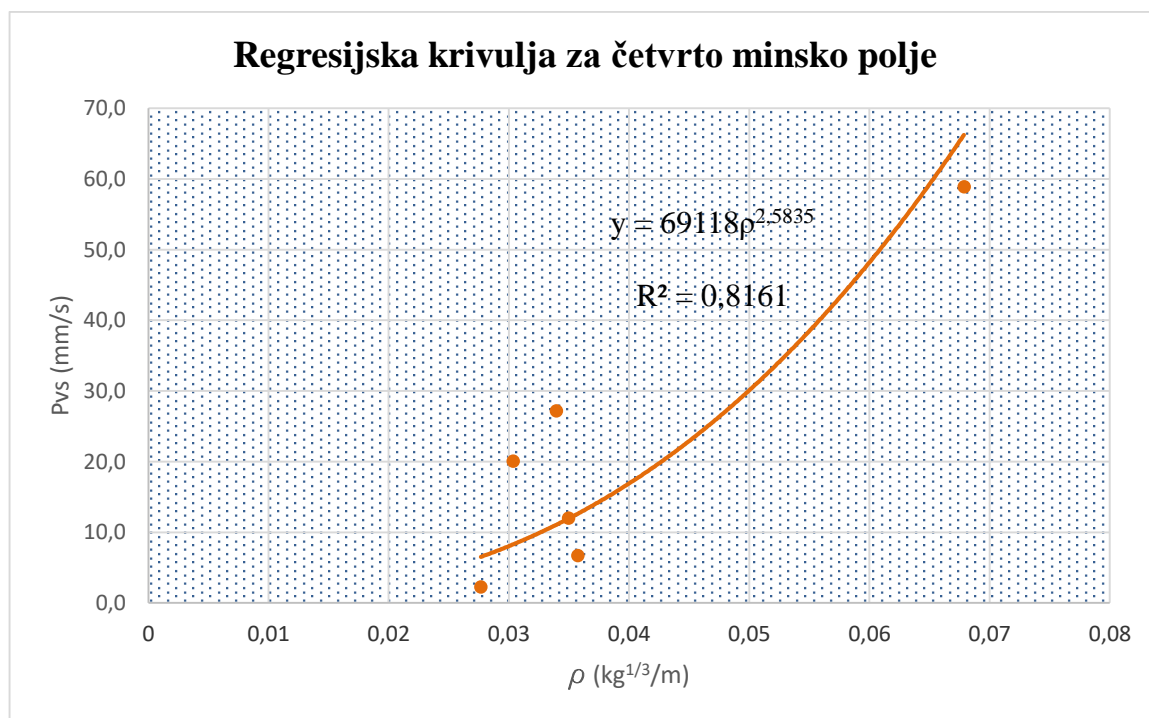
**Slika 7-4** Grafički prikaz regresijske krivulje za treće minsko polje

Jednadžba krivulje za treće minsko polje iznosi  $y = 5221,7x^{1,7248}$ .

**Tablica 7-5** Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje trećeg minskog polja.

R	Q	k	$\rho$	n
10	0,04			
15	0,13			
20	0,30			
25	0,59			
30	1,02			
35	1,63			
40	2,43			
45	3,46			
50	4,74			
55	6,31	5221,7	0,033602	1,7248
60	8,20			
65	10,42			
70	13,01			
75	16,01			
80	19,43			
85	23,30			
90	27,66			
95	32,53			
100	37,94			

Krivulja i podaci za četvrto minsko polje obuhvaćeni su u grafu na slici 7-5, te tablici 7-6. Ovaj slučaj sastoji se od šest točaka, tj. četiri točke su točke kontrolnih opažanja.



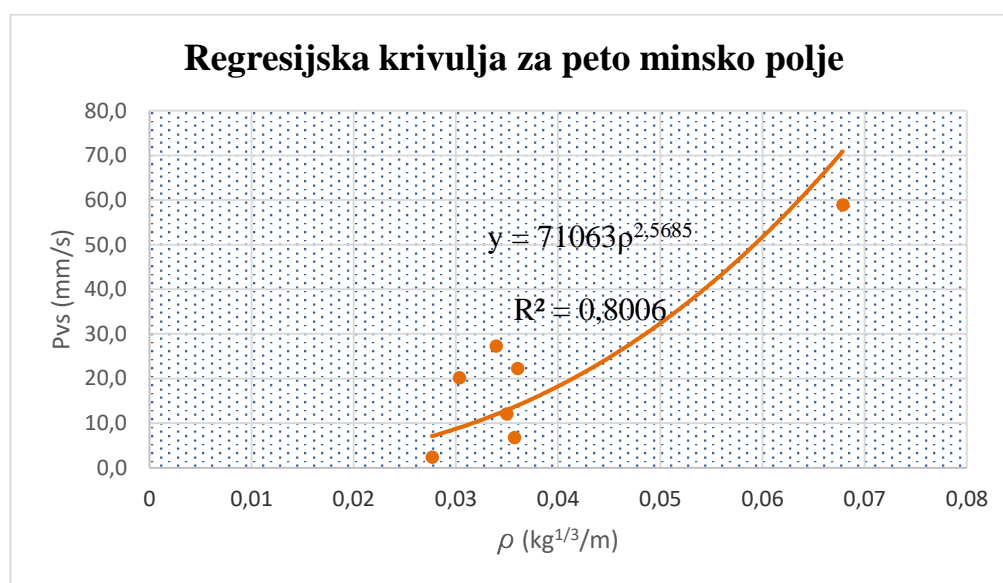
**Slika 7-5** Grafički prikaz regresijske krivulje za četvrto minsko polje

Indeks korelacije  $R^2$  za četvrto minsko polje iznosi 0,8161, a jednadžba regresijske krivulje glasi:  $y = 69118\rho^{2,5835}$ .

**Tablica 7-6** Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje četvrtog minskog polja.

R	Q	k	$\rho$	n
10	0,06			
15	0,19			
20	0,45			
25	0,87			
30	1,50			
35	2,39			
40	3,57			
45	5,08			
50	6,96			
55	9,27	69118	0,038191	2,5835
60	12,03			
65	15,30			
70	19,11			
75	23,50			
80	28,52			
85	34,21			
90	40,61			
95	47,76			
100	55,70			

Regresijska krivulja za peto minsko polje sastoji se od pet točaka kontrolnih promatranja, prikaz krivulje nalazi se na grafu na slici 7-6, a podaci dobiveni iz jednadžbe krivulje u tablici 7-7.



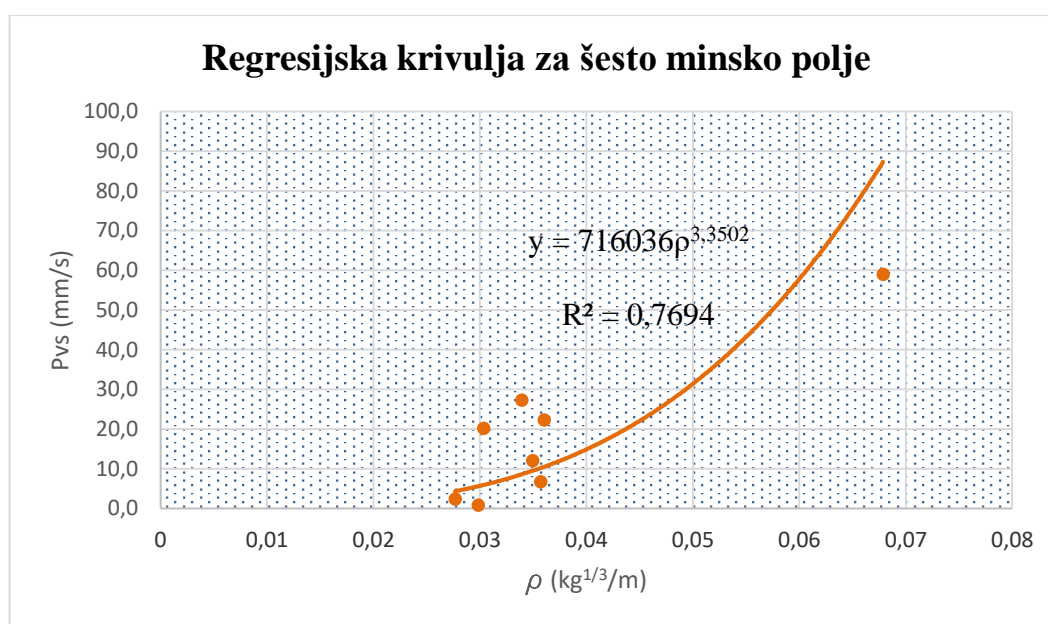
**Slika 7-6** Grafički prikaz regresijske krivulje za peto minsko polje

Za peto minsko polje indeks korelacije  $R^2$  iznosi 0,8006, dok je jednačba regresijske krivulje  $y = 71063\rho^{2,5685}$ .

**Tablica 7-7** Parametri dobiveni iz jednačbe regresijske krivulje petog minskog polja.

R	Q	k	$\rho$	n
10	0,05			
15	0,17			
20	0,41			
25	0,80			
30	1,38			
35	2,18			
40	3,26			
45	4,64			
50	6,37			
55	8,47	71063	0,037067	2,5685
60	11,00			
65	13,99			
70	17,47			
75	21,49			
80	26,08			
85	31,28			
90	37,13			
95	43,67			
100	50,93			

Šesto minsko polje sastojalo se od šest točka kontrolnih opažanja, odnosno ukupno do osam točaka koje tvore regresijsku krivulju na slici 7-7, dok su parametri prikazani dobiveni iz jednačbe prikazani u tablici 7-8.



**Slika 7-7** Grafički prikaz regresijske krivulje za šesto minsko polje

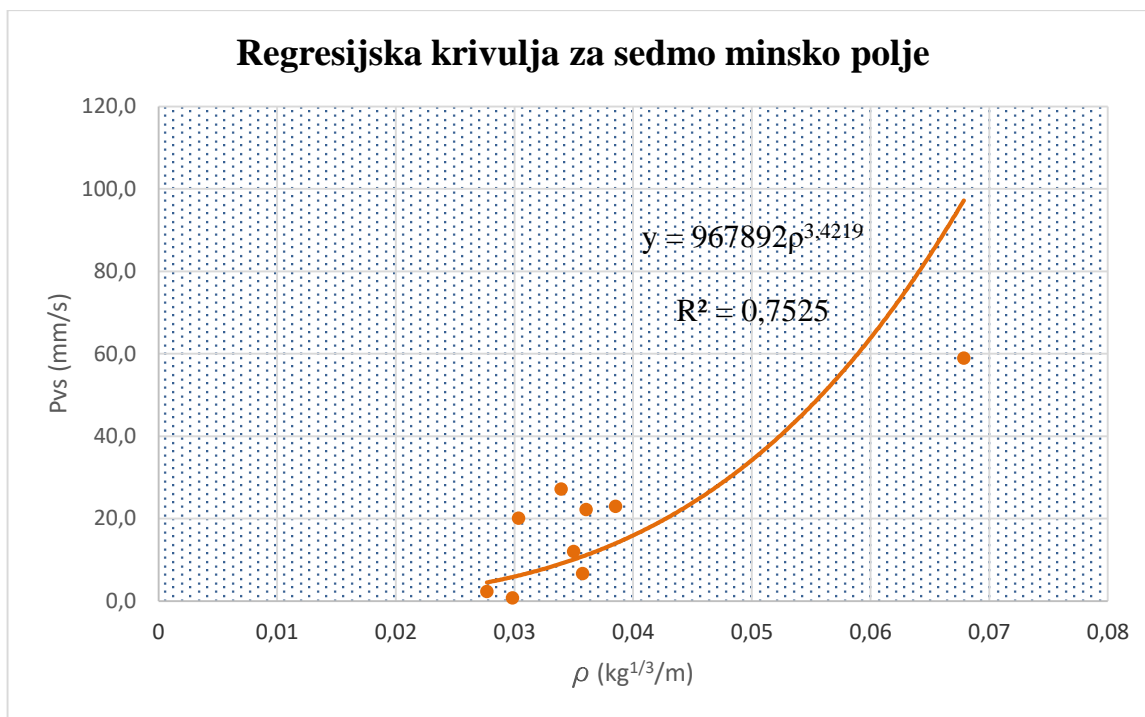


Jednadžba krivulje za šesto minsko polje iznosi  $y = 716036\rho^{3,3502}$ , a indeks korelacije  $R^2$  iznosi 0,7694.

**Tablica 7-8** Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje šestog minskog polja

R	Q	k	$\rho$	n
10	0,06			
15	0,22			
20	0,52			
25	1,01			
30	1,74			
35	2,77			
40	4,13			
45	5,89			
50	8,08			
55	10,75	716036	0,040125	3,3502
60	13,95			
65	17,74			
70	22,16			
75	27,25			
80	33,08			
85	39,67			
90	47,09			
95	55,39			
100	64,60			

Regresijska krivulja za sedmo minsko polje sastoji se od sedam točaka kontrolnih opažanja. Prikaz krivulje se nazali na grafu na slici 7-8, dok su parametri dobiveni iz jednadžbe sadržani unutar tablice 7-9. Indeks korelacije  $R^2$  za sedmo minsko polje iznosi 0,7527.



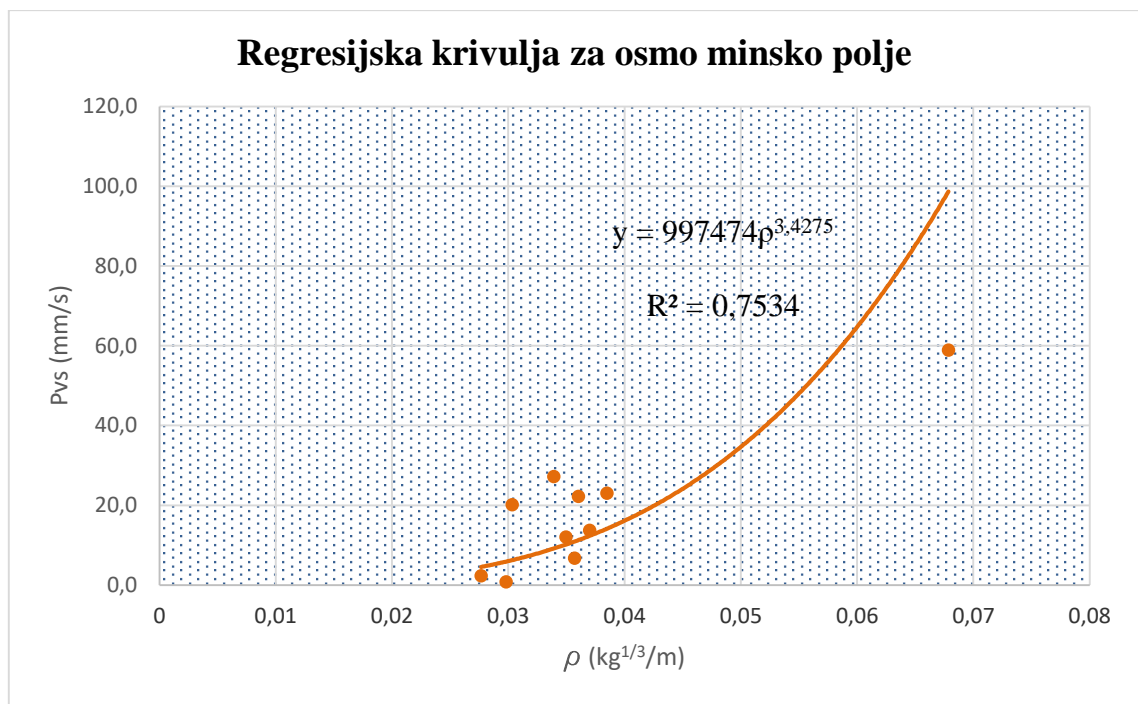
Slika 7-8 Grafički prikaz regresijske krivulje za sedmo minsko polje

Tablica 7-9 Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje sedmog minskog polja.

R	Q	k	ρ	n
10	0,06			
15	0,20			
20	0,49			
25	0,95			
30	1,64			
35	2,60			
40	3,89			
45	5,53			
50	7,59			
55	10,10	967892	0,039303	3,4219
60	13,11			
65	16,67			
70	20,82			
75	25,61			
80	31,08			
85	37,28			
90	44,26			
95	52,05			
100	60,71			

Jednadžba regresijske krivulje za sedmo minsko polje iznosi  $y = 967892\rho^{3,4219}$ .

Opažanja za osmo minsko polje prikazana su na grafu na slici 7-9, a parametri dobiveni iz jednadžbe u tablici 7-10. Iz grafa je vidljivo da je jednadžba regresijske krivulje  $y = 997474\rho^{3,4275}$ , a indeks korelacije  $R^2$  iznosi 0,7534.

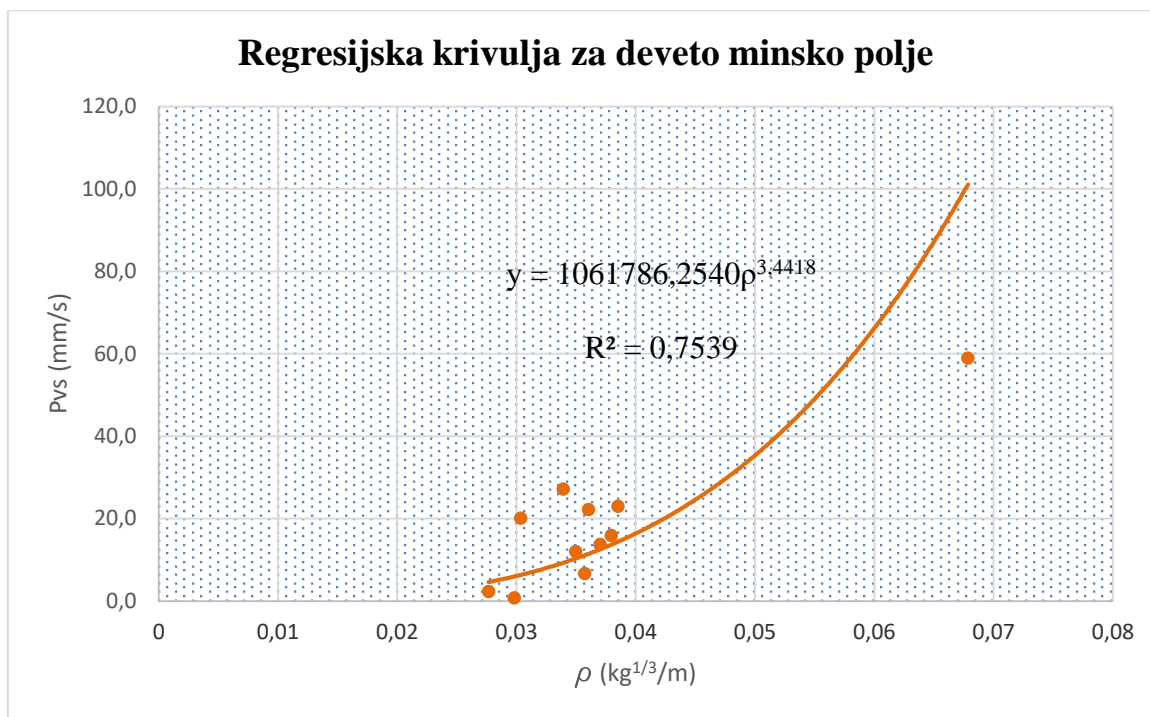


**Slika 7-9** Grafički prikaz regresijske krivulje za osmo minsko polje

**Tablica 7-10** Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje osmog minskog polja.

R	Q	k	ρ	n
10	0,06			
15	0,20			
20	0,48			
25	0,94			
30	1,62			
35	2,58			
40	3,85			
45	5,47			
50	7,51			
55	10,00	997474	0,039166	3,4275
60	12,98			
65	16,50			
70	20,61			
75	25,35			
80	30,76			
85	36,90			
90	43,80			
95	51,51			
100	60,08			

Za deveto minsko polje regresijska krivulja se nalazi na slici 7-10, a pripadajuće vrijednosti parametara dobivenih iz jednadžbe u tablici 7-11. Jednadžba krivulje iznosi  $y = 1061786,2540\rho^{3,4418}$ , a indeks korelacije  $R^2$  iznosi 0,7539.

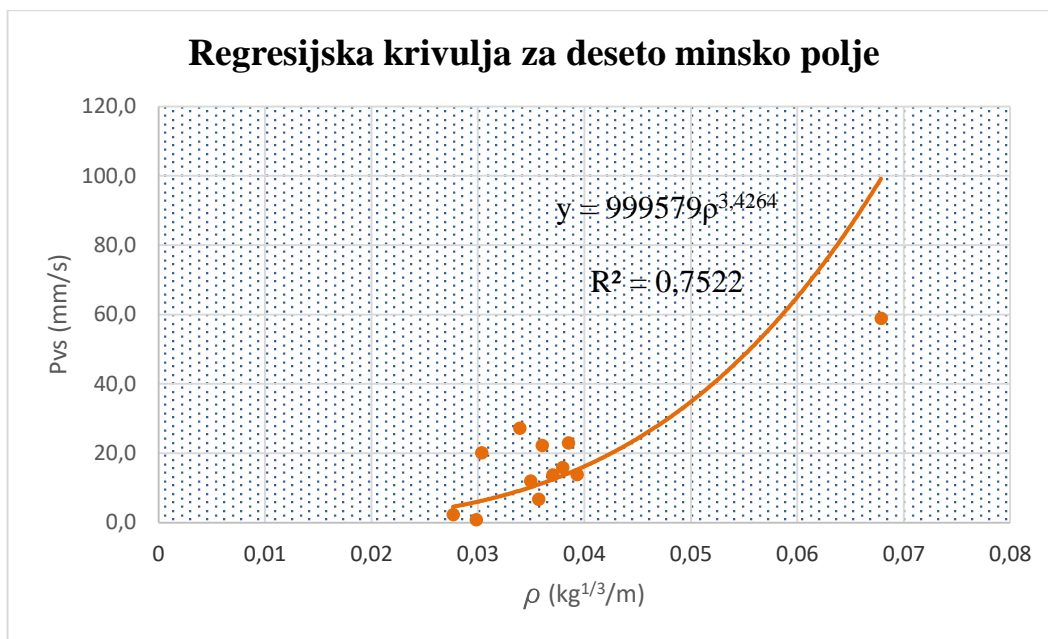


**Slika 7-10** Grafički prikaz regresijske krivulje za deveto minsko polje

**Tablica 7-11** Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje devetog minskog polja.

R	Q	k	$\rho$	n
10	0,06			
15	0,21			
20	0,50			
25	0,98			
30	1,69			
35	2,68			
40	3,99			
45	5,69			
50	7,80			
55	10,38	1000000	0,039667	3,4418
60	13,48			
65	17,14			
70	21,41			
75	26,33			
80	31,96			
85	38,33			
90	45,50			
95	53,51			
100	62,42			

Deseto, posljednje minsko polje sadrži kontrolna opažanja sa deset točaka, regresijska krivulja je prikazana na grafu na slici 7-11, a vrijednosti parametara dobivenih iz jednadžbe unutar tablice 7-12.



**Slika 7-11** Grafički prikaz regresijske krivulje za deseto minsko polje

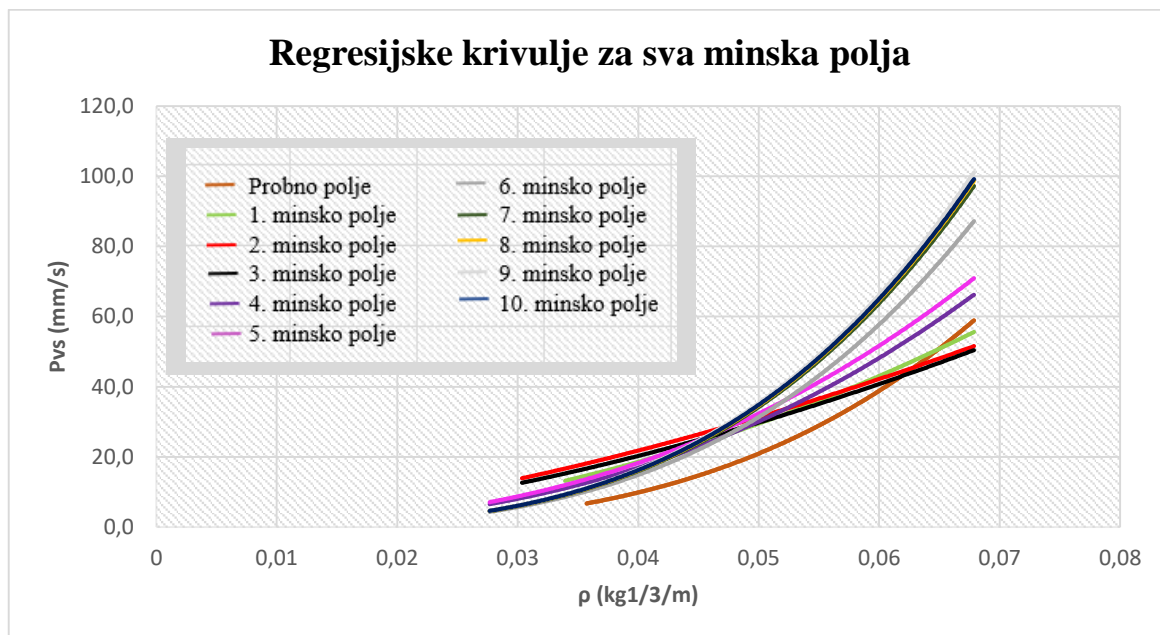
Indeks korelacije  $R^2$  za deseto minsko polje iznosi 0,7522, a regresijska krivulja sadrži jednadžbu  $y = 999579\rho^{3,4264}$ .

**Tablica 7-12** Parametri dobiveni iz jednadžbe regresijske krivulje desetog minskog polja.

R	Q	k	$\rho$	n
10	0,06			
15	0,20			
20	0,48			
25	0,93			
30	1,61			
35	2,56			
40	3,83			
45	5,45			
50	7,47			
55	9,95	999579	0,039101	3,4264
60	12,91			
65	16,42			
70	20,50			
75	25,22			
80	30,61			
85	36,71			
90	43,58			
95	51,25			
100	59,78			

Sumiranjem svih prikazanih podataka vidljivo je kako za sve veći broj kontrolnih točaka dolazimo do sve preciznijih podataka. Tako za deset točaka dobivamo jednadžbu  $y = 999579\rho^{3,4264}$ . Na grafu sa slike 7-12 usporedno su prikazane sve krivulje dobivene iz probnog miniranja i svih deset mjesta opažanja. Zajednički prikaz svih dobivenih jednadžbi

krivulja nalazi se u tablici 7-13, dok se zajednički prikaz indeksa korelacije nalazi u tablici 7-14.

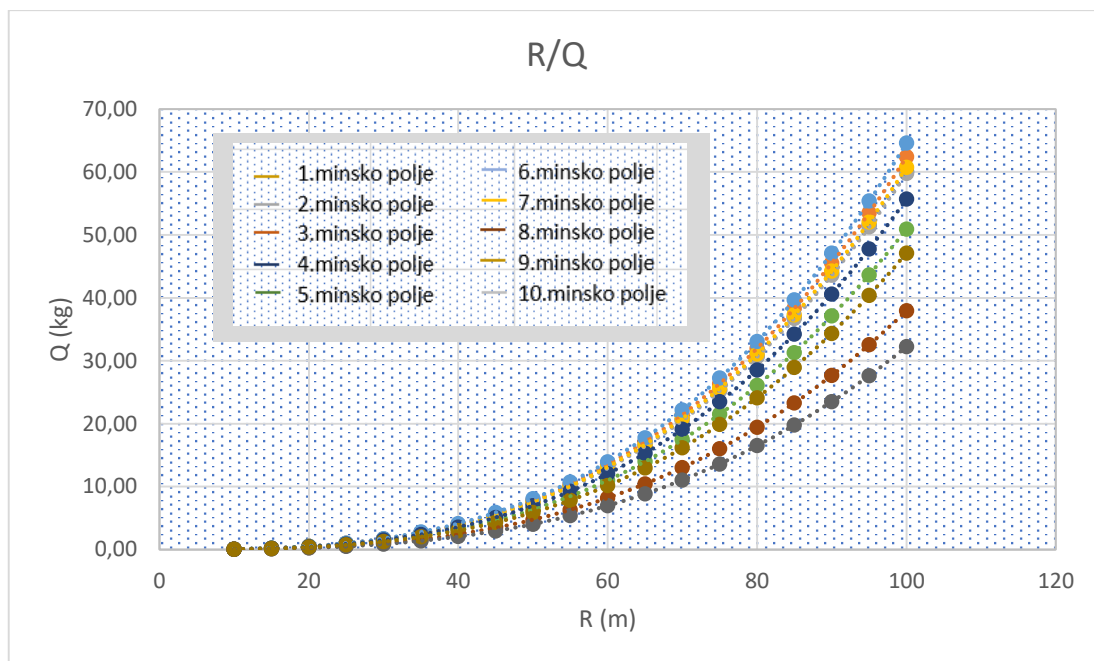


Slika 7-12 Grafički prikaz svih regresijskih krivulja za sva minska polja

Tablica 7-13 Zajednički prikaz svih jednadžbi krivulja

Broj minskog polja	Jednadžba krivulje
Probno polje	$y = 533358\rho^{3,3866}$
Prvo minsko polje	$y = 14849\rho^{2,077}$
Drugo minsko polje	$y = 4140,7\rho^{1,6303}$
Treće minsko polje	$y = 5221,7\rho^{1,7248}$
Četvrto minsko polje	$y = 69118\rho^{2,5835}$
Peto minsko polje	$y = 71063\rho^{2,5685}$
Šesto minsko polje	$y = 716036\rho^{3,3502}$
Sedmo minsko polje	$y = 967892\rho^{3,4219}$
Osmo minsko polje	$y = 997474\rho^{3,4275}$
Deveto minsko polje	$y = 1061786,2540\rho^{3,4418}$
Deseto minsko polje	$y = 999579\rho^{3,4264}$

Odnos R/Q prikazan je grafom na slici 7-13. Vidljivo je kako je dobiveni odnos najstrmiji kod šestog minskog polja, odnosno predstavlja najveći raspon unutar količine eksploziva, dok je najmanji raspon postignut za drugo minsko polje.



**Slika 7-13** Grafički prikaz R/Q odnosa za sva minska polja

**Tablica 7-14** Zajednički prikaz indeksa korelacije  $R^2$

Broj minskog polja	Indeks korelacije ( $R^2$ )
Probno polje	/
Prvo minsko polje	0,8000
Drugo minsko polje	0,8101
Treće minsko polje	0,8089
Četvrto minsko polje	0,8161
Peto minsko polje	0,8006
Šesto minsko polje	0,7694
Sedmo minsko polje	0,7525
Osmo minsko polje	0,7534
Deveto minsko polje	0,7539
Deseto minsko polje	0,7522

Iz tablice 7-14 uočljivo je kako je najveće podudaranje dobiveno za četvrto minsko polje i ono iznosi 0,8161, dok je za deseto minsko polje najmanji indeks korelacije koji iznosi 0,7522, odnosno najmanje podudaranje je upravo kod ovog minskog polja.

## 8. ZAKLJUČAK

Cilj rada bio je prikaz ovisnosti brzine oscilacije tla o parametrima miniranja iz razloga što niti jedna metoda ne daje dovoljno precizne podatke, već se sve bazira na izmjerenim vrijednostima sa različitih mjesta opažanja od minskog polja. Unutar rada je prikazana važnost kontrolnih mjerenja odnosno njihov utjecaj na proračun dozvoljene mase eksploziva po stupnju paljenja.

Upravo prilikom izvođenja svih radnji vezanih za miniranje, unutar naseljenih mjesta, dolaze do izražaja korekcije postojećih metoda i proračuna. Korekcije rezultata dobivenih probnim miniranjem se rade prema rezultatima kontrolnih točaka opažanja. Unutar samog dijela autoceste Zagreb-Split-Dubrovnik na dionici Bisko-Šestanovac kod mjesta Trnbusi izmjerene su vrijednosti na deset kontrolnih točaka prilikom miniranja deset produktivnih minskih polja. Kako je već ranije navedeno otpucavanja su išla od najudaljenijih bušotina pa sve bliže prema unutrašnjosti sa svake strane odnosno sve bliže okolnim objektima.

Takvim pristupom dobivene su jednadžbe regresijskih krivulja za probno polje i za svih deset produktivnih minskih polja, te indeks korelacije za sva minska polja s kontrolnim opažanjima. Kako se približavalo objektima, odnosno uzimala su se u obzir opažanja sa sve više točaka, regresijska krivulja se sve više poklapala, kako je prikazano na slici 7-12. Za deseto minsko polje jednadžba krivulje iznosi  $y = 999579\rho^{3,4264}$ , dok su jednadžbe regresijskih krivulja za preostala minska polja vidljiva u prethodnom poglavlju, u tablici 7-13. Indeks korelacije pokazuje kako je najveće podudaranje regresijske krivulje i originalnih vrijednosti kod četvrtog minskog polja i ono iznosi 0,8161, dok su svi ostali indeksi korelacije prikazani u tablici 7-14. Odnos udaljenosti i količine eksploziva dan je na slici 7-13.

Primjena kontrolnih mjerenja pokazuje da se njihovom upotrebom dobiju precizniji rezultati te se jednostavnije vrši odabir svih ostalih parametara miniranja, što dokazuje to da prilikom izvođenja radova nije došlo do oštećenja okolnih objekata. Ovakav pristup daje mogućnost izvedbe minerskih radova i u okolnostima koje su otežane zbog prisustva naseljenih objekata, podzemnih spremnika za vodu, blizine telefonskih vodova i dalekovoda te mnogo drugih prepreka.



## 9. LITERATURA

BlastMate III Operator Manual, priručnik (uputa za rad)

Dobrilović, M. 2008. *Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranje elektroničkog detonatora*, Disertacija, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Dobrilović, M., Bohanek V., Škrlec, V., Stanković, S., Pećina, D., 2016. *Priručnik za laboratorijske vježbe iz Miniranja 1*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Ester, Z. 2005. *Miniranje I. – Eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Hosseini, M., Baghikham, M.S., 2013. *Analysing the Ground Vibration Due to Blasting at AlvandQoly Limestone Mine*, International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing, 2(2), str. 17-23.

Hu, X., Qu, S., 2018. *A new approach for predicting bench blasting-induced ground vibrations: a case study*, The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 118, str. 531-538.

Khandelwal, M., Singh, T.N., 2007. *Evaluation of blast-induced ground vibration predictors*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27, str. 116-125.

Krsnik, J. 1989. *Miniranje*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Kumar, R., Choudhury, D., Bhargava, K., 2016. *Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties*, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8, str. 341-349.

Stanković, S. 2011. *Određivanje ovisnosti brzina oscilacija tla o parametrima miniranja*, Disertacija, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Sućeska, M. 2001, *Eksplozije i eksplozivi – njihova mirnodopska primjena*, Zagreb: Brodarski institut

Web izvori:

IndiaMART. 2012. Slurry Explosive. URL: <https://www.indiamart.com/proddetail/slurry-explosive-7222529097.html> (19.5.2021.)

Survivethewrath. 2021. Effects Of A Nuclear Explosion. URL: <https://survivethewrath.com/effects-of-a-nuclear-explosion> (19.5.2021.)

NPR50. 2019. Massive Explosion Rips Through Texas Chemical Plant. URL: <https://www.npr.org/2019/11/27/783263942/massive-explosion-rips-through-texas-chemical-plant> (20.5.2021.)

Wallpaperflare. 2021. URL: <https://www.wallpaperflare.com/red-fire-explosion-army-smoke-physical-structure-military-wallpaper-ppntu> (20.5.2021.)

Geoengineer. 2015. Summary of Surface Blasting and Damages with Analysis of Two Mitigation Techniques Presplit and Smooth Blasting. URL: <https://www.geoengineer.org/> (21.5.2021.)



KLASA: 602-04/21-01/186  
URBROJ: 251-70-11-21-12  
U Zagrebu, 15.6.2021.

Ana Pintera, studentica

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/186, URBROJ: 251-70-11-21-11 od 07.05.2021. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### KONTROLNA ISPITIVANJA SEIZMIČKIH UTJECAJA MINIRANJA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Doc.dr.sc. Siniša Stanković nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

(potpis)

Doc.dr.sc. Siniša Stanković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Doc.dr.sc. Dubravko  
Domitrović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)