

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

PROCJENA BRZINA OSCILACIJA PRILIKOM MINIRANJA NA KAMENOLOMU

Diplomski rad

Martin Omazić

R4176

Zagreb, 2023.



KLASA: 602-01/23-01/8  
URBROJ: 251-70-11-23-2  
U Zagrebu, 24.01.2023.

**Martin Omazić, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/8, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 24.01.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### Procjena brzina oscilacija prilikom miniranja u kamenolomu

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

Voditelj

(potpis)

Prof.dr.sc. Mario Dobrilović

(titula, ime i prezime)

Suvoditelj

(potpis)

Doc.dr.sc. Siniša Stanković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)

## PROCJENA BRZINA OSCILACIJA PRILIKOM MINIRANJA NA KAMENOLOMU

Martin Omazić

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

### Sažetak

Miniranje je tehnika eksploatacije čvrstih mineralnih sirovina, iskopa u građevinarstvu te primjene eksploziva za različite ostale tehničke namjene. Raspoloživa energija eksploziva vrlo brzim kemijskim procesom transformira se u energiju stlačenih produkata eksplozije koji u ekspanziji obavljaju mehanički rad nad okolinom, odnosno drobe stijenu u oblik pogodan za preradu i upotrebu. Prilikom djelovanja eksploziva u minskom polju, na okolinu se javlja i neželjeni potresni odnosno seizmički utjecaj. Analiza utjecaja miniranja na lokaciji kamenoloma vapnenca i dolomita Špica je provedena u skladu s primijenjenim rješenjima miniranja. Pri tome su izdvojeni značajni utjecajni parametri te su definirani postupci za smanjenje brzina oscilacija, odnosno vibracija, kao mjere intenziteta i potencijalne štetnosti seizmičkog utjecaja miniranja.

Ključne riječi: brzina česica tla, oscilacije tla, seizmički utjecaj, vibracije

Diplomski rad sadrži: 47 stranice, 16 tablica, 12 slika, i 6 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentori: Prof.dr.sc. Mario Dobrilović

Pomagao pri izradi/komentor: doc.dr.sc. Siniša Stanković

Ocjenjivači: Prof.dr.sc. Mario Dobrilović  
Izv.prof.dr.sc. Vinko Škrlec  
Doc.dr.sc. Anamarija Grbeš

**Ovaj diplomski rad je izrađen u okviru projekta „RGN START – STručnA pRaksa za živoT“ (UP.03.1.1.04).**

## ESTIMATION OF OSCILLATION VELOCITY DURING BLASTING IN A QUARRY

Martin Omazić

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

### Abstract

Blasting is a technique of exploitation of solid mineral raw materials, excavation in construction and application of explosives for various other technical purposes. The available energy of the explosive is transformed by a very fast chemical process into the energy of the compressed explosion products, which in the expansion perform mechanical work on the environment, that is, crush the rock into a form suitable for processing and use. During the action of explosives in a minefield, an unwanted shaking or seismic impact occurs on the environment. The analysis of the impact of blasting at the location of the Špica limestone and dolomite quarry was carried out in accordance with the applied blasting solutions. At the same time, significant influential parameters were identified and procedures were defined for reducing the speed of oscillations, that is, vibrations, as a measure of the intensity and potential damage of the seismic impact of blasting.

Keywords: peak particle velocity, ground oscillations, seismic effects, vibrations

Thesis contains: 47 pages, 16 tables, 12 figures and 6 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: Prof.dr.sc. Mario Dobrilović

Tech. assistance: doc.dr.sc. Siniša Stanković

Reviewers: Prof.dr.sc. Mario Dobrilović  
Izv.prof.dr.sc. Vinko Škrlec  
Doc.dr.sc. Anamarija Grbeš

**This final/diploma thesis has been made within the project "RGN START – Stručna praksa za živoT" (UP.03.1.1.04)**

Defence date: January 26, 2023, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. SEIZMIČKI UTJECAJ MINIRANJA.....	2
2.1. Mjerenje brzina oscilacija.....	3
2.2. Proračun brzine oscilacija tla .....	5
2.3. Određivanje intenziteta potresa .....	6
2.4. Smanjenje oscilacija tla .....	14
2.5. Granične vrijednosti brzina oscilacija i intenziteta potresa .....	15
3. METODE PROCJENE UTJECAJA I NORME .....	17
3.1. Određivanje sigurne zone .....	17
3.3. Određivanje očekivanih brzina oscilacija tla .....	18
3.4. Svjetske norme za određivanje dozvoljenih brzina oscilacija tla za različite vrste i stanje objekata .....	25
3.4.1. USBM RI8507 And OSMRE .....	25
3.4.2. ISO 4866:1990 .....	26
3.4.3. British Standard 7385.....	26
3.4.4. Švedska norma .....	27
3.4.5. Norma HRN DIN 4150:1-3, 2011.....	28
4. ISTRAŽIVANJE I MJERENJA .....	29
4.1. Hidrografske i klimatske prilike .....	31
4.2. Geološko – tektonske i hidrogeološke značajke šireg područja .....	31
4.3. Podaci o vrsti, količini i kakvoći mineralne sirovine, tipu i karakteristikama ležišta.. .....	31
4.3.1. Vrsta, količina i kakvoća mineralne sirovine .....	31
4.3.2. Potreba i mogućnost oplemenjivanja mineralne sirovine .....	33
4.3.3. Geomehaničke karakteristike mineralne sirovine i pratećih stijena .....	33
4.3.3.1. Bušenje minskih bušotina i miniranje tehničko građevnog kamena.....	33
4.4. Mjerenja seizmičkih utjecaja miniranja .....	36
4.5. Utvrđivanje intenziteta seizmičkog djelovanja miniranja.....	40
5. REGRESIJSKA ANALIZA I ODREĐIVANJE DOZVOLJENE MASE EKSPLOZIVNOG PUNJENJA PO STUPNJU INICIRANJA .....	43
5.2. Određivanje dozvoljenih masa eksplozivnog punjenja po stupnju iniciranja.....	44
6. ANALIZA I ZAKLJUČAK.....	46

7. LITERATURA ..... 47

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Nomogram za određivanje brzine i ubrzanja oscilacija na temelju poznatih vrijednosti amplitude i frekvencija (Krsnik, 1989). .....	3
Slika 2-2. Načina rada geofona – (BlastMate III Operator Manual 2001.).....	5
Slika 2-3. Instrument za mjerenje brzina oscilacija tla Instatel Minimate Plus .....	6
Slika 2-4. Dijagram za utvrđivanje najpovoljnijeg intervala otpucavanja (Krsnik, 1989)..	15
Slika 3-1. Dijagram ovisnosti faktora udaljenosti $F_d$ o udaljenosti mjesta miniranja do promatranog objekta (Stanković, 2011) .....	24
Slika 3-2. Dijagram granica brzina oscilacija tla za različite tipove konstrukcija u funkciji frekvencije (definirano normom USBM RI8507 And OSMRE) (Stanković, 2011).....	25
Slika 3-3. Dijagram graničnih vrijednosti brzine vibracija u ovisnosti o frekvenciji vala (HRN DIN 4150, 2011) (Stanković, 2011). .....	28
Slika 4-1. Zemljopisni položaj Eksploatacijskog polja špica (M 1:100 000).....	30
Slika 4-2. Shema konstrukcije minske bušotine za visinu etaža 30 m .....	35
Slika 4-3. Situacijska karta s ucrtanim minskim poljima i mjestima mjerenja za miniranje 11.05.2022 .....	37
Slika 4-4. Etaže eksploatacijskog polja Špica .....	40
Slika 5-1. Regresijska krivulja komponenta brzina oscilacija (preslika iz računalnog programa Blastware).....	44

## POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Značajke seizmografa Instantel Minimate plus.....	6
Tablica 2-2. Stupanj potresa po skali S. V. Medvedeva (Krsnik, 1989). .....	8
Tablica 2-3. Značajnije formule predikcije .....	13
Tablica 2-4. Dozvoljene brzine oscilacija za tri razreda objekata (HRN DIN 4150, 2011). .....	16
Tablica 3-1. Sažetak modela različitih istraživača (Kumar, 2016).....	20
Tablica 3-2. Određivanje vrijednosti $v_0$ (Stanković, 2011) .....	23
Tablica 3-3. Određivanje vrijednosti faktora vrste zgrade $F_b$ (Stanković, 2011) .....	23
Tablica 3-4. Određivanje vrijednosti faktora materijala $F_m$ (Stanković, 2011).....	24
Tablica 3-5. Određivanje vrijednosti faktor trajanja minerskih radova $F_t$ (Stanković, 2011) .....	24
Tablica 3-6. Dozvoljene brzine čestica za različite tipove konstrukcija za određeni frekvencijski raspon (definirano normom British Standard 7385) (Stanković, 2011) .....	27
Tablica 3-7. Švedska norma (Stanković, 2011).....	27
Tablica 4-1. Rekapitulacija rezervi na eksploatacijskom polju „Špica“ sa stanjem na dan 31. prosinac 2017. godine.....	32
Tablica 4-2. Jalovina proračunata elaboratom o petoj obnovi proračuna rezervi sa stanjem na dan 31. prosinac 2018. godine. ....	32
Tablica 4-3. Duljine minskih bušotina i količine eksploziva za visine etaža 15-30 m.....	35
Tablica 4-4. Parametri minskih polja i rezultati mjerenja brzina oscilacija .....	37
Tablica 5-1. Najveće dozvoljene mase eksplozivnog punjenja po stupnju iniciranja za miniranja i dozvoljenu brzinu oscilacija od 20 mm/s.....	45



## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$v$	m/s	brzina
$s$	cm	pomak
$v$	m/s	brzina
$a$	cm/s <sup>2</sup>	ubrzanje
$A$	cm	amplituda (vršna vrijednost)
$f$	Hz	frekvencija oscilacije
$T$	s	vrijeme
$E_E$		raspoloživa energija eksploziva
$E_F$		energija fragmentacije
$E_S$		seizmička energija
$E_K$		kinetička energija
$E_{NM}$		oblici energije koji se ne mjere
$k$		konstanta,
$b$	kg/m	svedena masa eksploziva ili svedena udaljenost
$n$		eksponent ili koeficijent prigušenja.
$Q$	kg	najveća masa eksplozivnog punjenja po stupnju otpucavanja
$R$	m	udaljenost mjesta opažanja od minskog polja
$\rho$	kg <sup>1/3</sup> /m	svedena masa eksplozivnog punjenja
$k$		koeficijent
$q$		koeficijent
$p$		koeficijent
$n$		koeficijent
$SD$	$\frac{m}{kg^{\frac{1}{2}}}$	svedena udaljenost
$\tau$	s	interval usporenja
$n$		broj intervala usporenja
$R_s$	m	radijus ugrožene zone pri miniranju
$Q$	kg	količina eksplozivnog punjenja koja detonira trenutno
$D$	m/kg <sup>1/2</sup>	skalirana udaljenost
$k$		konstanta mjesta
$b$		konstanta mjesta
$D$	m	udaljenost između minskog polja i mjesta opažanja

$W$	kg	maksimalna količina eksplozivnog punjenja po stupnju otpucavanja
$a$		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
$v_o$		nekorrigirana vertikalna komponenta brzina oscilacija tla (mm/s)
$c_p$		brzina prostiranja primarnih valova (m/s)
$F_k$		faktor kvalitete gradnje promatranog objekta
$F_b$		faktor vrste zgrade
$F_m$		faktor materijala od kojeg je zgrada izgrađena
$w$	m	linija najmanjeg otpora
$D$	mm	promjer minske bušotine
$\gamma_e$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća eksploziva
$E_g$		relativna snaga eksploziva za glavni eksplozivni naboj
$m$		koeficijent gustoće minskih bušotina
$v$		koeficijent uklještenosti stijene pri dnu minske bušotine
$a$	m	razmak između bušotina u redu
$b$	m	razmak između redova bušotina
$L$	m	dužina minske bušotine
$V$	m <sup>3</sup>	obujam odloma u minskoj bušotini
$kb$		normativ bušenja
$u$	m <sup>3</sup> /m'	učinak bušenja i miniranja
$q$	kg/m <sup>3</sup>	specifična potrošnja eksploziva
$v_r$ -	mm/s	rezultantna najveća vrijednost brzina oscilacija u određenom trenutku
$v_t$ -	mm/s	transverzalna komponenta brzina oscilacija
$v_v$ -	mm/s	vertikalna komponenta brzina oscilacija
$v_l$ -	mm/s	longitudinalna odnosno radijalna komponenta brzina oscilacija

## 1. UVOD

Miniranje je tehnika eksploatacije čvrstih mineralnih sirovina, iskopa u građevinarstvu te primjene eksploziva za različite ostale tehničke namjene. Raspoloživa energija eksploziva vrlo brzim kemijskim procesom transformira se u energiju stlačenih produkata eksplozije koji u ekspanziji obavljaju mehanički rad nad okolinom, odnosno drobe stijenu u oblik pogodan za preradu i upotrebu. Miniranjem se eksploatira većina čvrstih mineralnih sirovina zbog primjenjivosti tehnologije te zbog niskih jediničnih troškova u odnosu na ostale metode dobivanja. Prilikom djelovanja eksploziva u minskom polju, na okolinu se javlja i neželjeni potresni odnosno seizmički utjecaj. On se manifestira u vidu vibracija induciranih eksplozijom na mjestu miniranja, koje se propagiraju u okolnu stijenu. Nailaskom seizmičkog vala na građevine dolazi do pobuđivanja vibriranja dijelova i cjeline građevine što može uzrokovati njena oštećenja. Kontrolom seizmičkog djelovanja miniranja, odnosno pravilnim projektiranjem minerskih radova, ispravnim izvođenjem miniranja te primjenom mjerenja intenziteta vibracija, taj utjecaj moguće je minimalizirati. Proučavanjem intenziteta vibracija u odnosu na parametre miniranja određene su generalne fizikalne zavisnosti i utjecajni parametri te su definirane metode smanjenja seizmičkog utjecaja. Priroda nastajanja i djelovanja seizmičkog utjecaja uz generalne parametre, svakako se mijenja obzirom na pojedinu lokaciju kamenoloma odnosno geološke značajke stijene te način miniranja. Analiza utjecaja miniranja na određenoj lokaciji kamenoloma vapnenca i dolomita je provedena u skladu s primijenjenim rješenjima miniranja. Pri tome su izdvojeni značajni utjecajni parametri te su definirani postupci za smanjenje brzina oscilacija, odnosno vibracija, kao mjere intenziteta i potencijalne štetnosti seizmičkog utjecaja miniranja.

## 2. SEIZMIČKI UTJECAJ MINIRANJA

Prema Krsniku (1989) prilikom svakog miniranja najveći dio oslobođene energije eksplozivnog punjenja potroši se na razaranje i drobljenje stijene, drugi dio te energije se potroši za odbacivanje i pomicanje minirane mase na određenu udaljenost od mjesta miniranja, dok se primjetni dio oslobođene energije eksplozivnog punjenja koji se nije potrošio na razaranje i drobljenje stijene pretvara se u kinetičku energiju različitih tipova elastičnih valova koji se međusobno razlikuju u brzini širenja, intenzitetu i obliku deformacije.

Pri prolasku elastičnih valova nastaju oscilacije tla odnosno umjetni potresi. To je nepoželjna pojava kada se minira u blizini građevinskih objekata i naseljenih mjesta, jer kod određenog intenziteta potresa mogu nastati oštećenja pa čak i rušenje građevinskih objekata

Intenzitet potresa ovisi o količini i vrsti eksplozivnog punjenja, udaljenosti od mjesta miniranja i sredini kroz koju se valovi šire.

Djelovanje seizmičkih valova vrlo je slično potresima i za obje pojave vrijedi slične zakonitosti. Prema tome miniranja treba promatrati kao slabiji potres, a mjesto eksplozije kao njegov epicentar.

Brzina napredovanja seizmičkih valova i njihov domet ovisi o vrsti stijene i o prigušenju na njihovom putu. Na prigušenje seizmičkih valova utječu:

- frekvencija seizmičkih valova
- porozitet i raspucalost stijene
- sastav i struktura stijena
- sadržaj vode i temperatura stijene

Oscilacije stijene ili tla mogu se aproksimirati sinusnim oscilacijama a intenzitet se može pratiti te izražavati u različitim veličinama kao što su pomak, brzina osciliranja na mjestu promatranja te ubrzanje na istom mjestu. Mjereći jednu od veličina, druge se mogu izračunati iz postavki sinusnog oscilatornog gibanja:

Pomak točke koja titra, njezina brzina i ubrzanje u određenom trenutku, vremenu računaju se prema obrascima ili formulama 2-1, 2-2 i 2-3.

$$s = A \sin 2\pi f \cdot T \text{ (cm)} \quad (2-1)$$

$$v = 2\pi f \cdot A \text{ (cm/s)} \quad (2-2)$$

$$a = 4\pi^2 \cdot f^2 \cdot A \text{ (cm/s}^2\text{)} \quad (2-3)$$

gdje su:

s - pomak (mm, cm)

v - brzina (mm/s; cm/s)

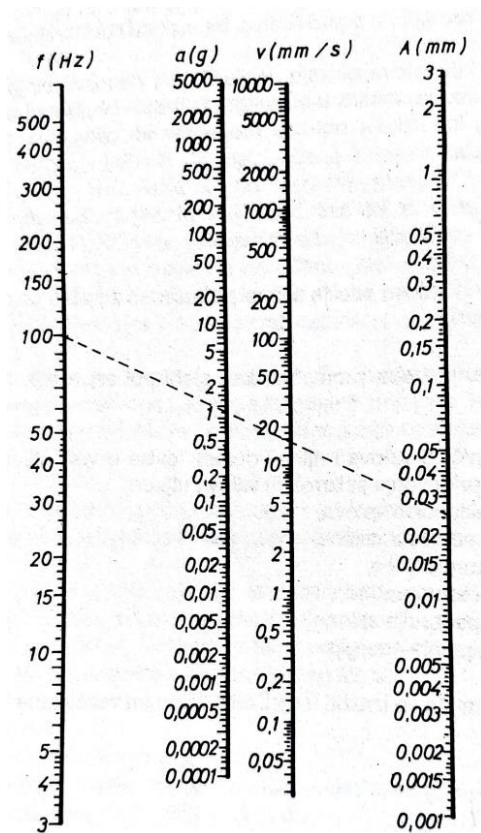
a - ubrzanje (mm/s<sup>2</sup>; cm/s<sup>2</sup>)

A - amplituda (vršna vrijednost) (mm; cm)

f - frekvencija oscilacije (Hz),

T - vrijeme (s)

Na osnovi poznatih vrijednosti amplitude i frekvencije mogu se, osim računskim putem, odrediti brzina i ubrzanje oscilacija pomoću nomograma na slici 2-1. Nomogrami su predstavljali koristan alat za brzo određivanje drugih veličina, dok osobna računala i danas dostupni elektronički uređaji i mediji nisu postojali.



**Slika 2-1.** Nomogram za određivanje brzine i ubrzanja oscilacija na temelju poznatih vrijednosti amplitude i frekvencija (Krsnik, 1989).

## 2.1. Mjerenje brzina oscilacija

Seizmičko djelovanje miniranja na građevinske objekte ocjenjuje se indirektnim postupkom na osnovi izmjerenih veličina pomaka, brzina i ubrzanja oscilacija. Navedene veličine mjere se pomoću prijenosnih seizmografa koji se mogu postaviti na bilo kojem mjestu gdje je potrebno izmjeriti veličine oscilacija.

Oscilacije objekata prema preporukama je potrebno mjeriti na temeljima i katovima zgrada, jer se vibracije u vodoravnom smjeru povećavaju linearno s visinom zgrade.

Metodologija mjerenja te ocjena mjerenih rezultata s procjenom utjecaja na okolinu i objekte opisana je u nizu nacionalnih i međunarodnih normi koje obrađuju seizmički utjecaj miniranja. U skladu s primijenjenim dokumentima sam pristup i relevantne veličine mjerenja se donekle razlikuju ali u većini je brzina oscilacija relevantni kriterij. Preporučene dozvoljene vrijednosti brzina oscilacija daju se za mjerenja na temeljima ili na osnovnom terenu pored temelja građevine čime se eliminiraju teškoće povezane s mjerenjem na katovima građevina. Na taj način uključuje se i koeficijent sigurnosti za takav postav mjerenja.

Većina seizmografa konstruirana je stoga za mjerenje brzine oscilacija, a noviji tipovi instrumenata opremljeni su za mjerenje pomaka, brzine i ubrzanja oscilacija te zračnog udarnog vala. Seizmografi registriraju tri međusobno okomite komponente brzina oscilacija i to:

- transverzalnu komponentu
- vertikalnu komponentu
- longitudinalnu komponentu

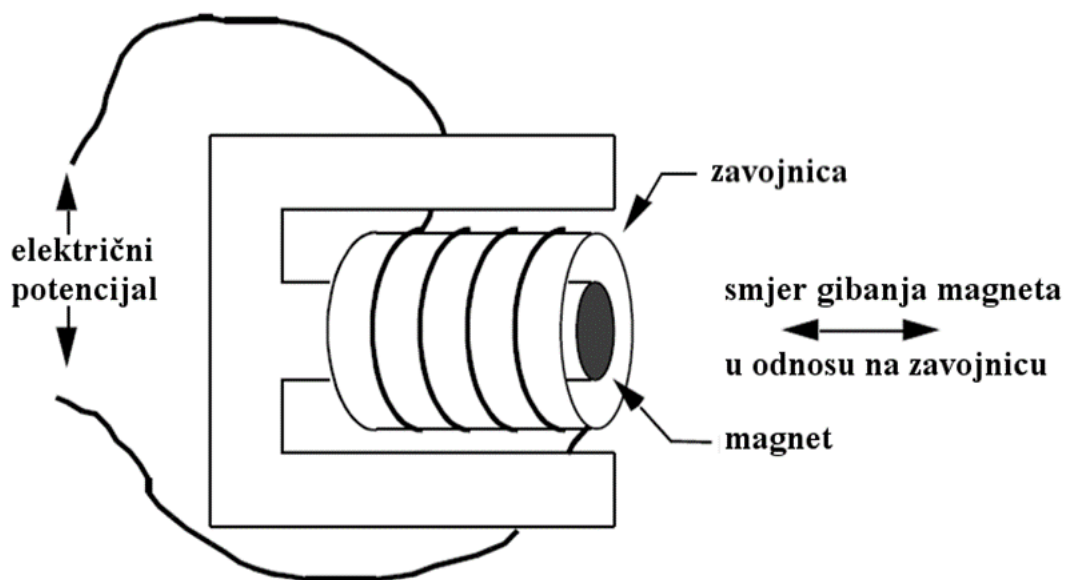
Prema Krsniku (1989) inženjerski seizmografi se sastoje od seizmometra, odnosno geofona i registratora koji su međusobno električni spojeni. U kućištu seizmometra nalaze se tri međusobno okomita elektromagnetska svitka koji su pričvršćeni na seizmičku masu i spojeni s registratorom.

Seizmometar se postavlja na mjesto opažanja sa strelicom usmjerenom prema minskom polju i nakon toga se horizontira pomoću tri podnožna vijka. Preko podnožnih vijaka vibracije se prenose na seizmičku masu, a zatim se prenose na elektromagnetske svitke rastavljene na tri međusobno okomite komponente. 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, bazira se na principu elektromagnetske indukcije (slika 2-2.).

Komponente vibracija induciraju u elektromagnetskim svitcima električne impulse koji se šalju u uređaj-registrator gdje se digitalno obrađuju. Računalni programi omogućuju obradu snimljenog signala, analizu i preračunavanje pomaka i ubrzanja, frekvencijsku analizu signala, procjenu veličina s postavljenim parametrima minskog polja za buduća miniranja te različite simulacije.

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.



Slika 2-2. Načina rada geofona – (BlastMate III Operator Manual 2001.)

## 2.2. Proračun brzine oscilacija tla

Seizmografi za mjerenje seizmičkih utjecaja miniranja proizvođača Instantel inc. koriste se redovito prilikom praćenja utjecaja miniranja na domaćim pogonima. Oni su sličnih svojstava kao i ostali na tržištu dostupni instrumenti. Seizmograf Instantel Minimate Plus prikazan je na slici 2-3., a njegove tehničke značajke dane su tablicom 2-1.



Slika 2-3. Instrument za mjerenje brzina oscilacija tla InstanTel Minimate Plus

Tablica 2-1 Značajke seizmografa InstanTel Minimate plus

<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

### 2.3. Određivanje intenziteta potresa

Dio oslobođene energije eksplozivnoga punjenja koji nije utrošen na drobljenje stijene pretvara se u kinetičku energiju različitih tipova elastičnih valova, koji se međusobno razlikuju u brzini širenja, intenzitetu i obliku deformacije (Krsnik, 1989). Prolazak tih valova



izaziva oscilacije tla. Pojava oscilacija tla nepoželjna je kad se minira u urbanim sredinama, odnosno u blizini objekata, jer može doći do oštećenja istih.

Energija koja se oslobađa pri eksploziji, detonaciji naboja, nakon završetka kemijske reakcije pretvara se u toplinu i djeluje na okolinu prema prvom općem zakonu termodinamike. Pri tome, oslobođena energija se prenosi na stijensku okolinu i djeluje kao mehanički rad u slijedećim oblicima:

- rad loma, koji se u konačnici pojavljuje kao nova površina između fragmenata stijena
- rad prenesen kao udarni val u stijenu, koji djeluje prvo kao plastični a zatim kao elastični valovi koji u konačnici djeluju u vidu seizmičkih valova odnosno vibracija (oscilacija) tla; i
- rad pomicanja stijene i odbacivanja komada stijene.

Ovakva podjela energije je donekle proizvoljna i temeljena na krajnjim učincima miniranja. Npr., dio rada loma je u svojoj prvoj fazi povezan sa prolaskom udarnog vala u blizini bušotine a, u kasnijim fazama sa pomicanjem stijene nakon stvaranja pukotina. Takva je podjela prikladna zato što se fizičke veličine povezane sa svakom komponentom mogu mjeriti.

Druga faza prijenosa energije se odvija na manje očigledan način, idućim redoslijedom:

- rad širenja pukotina, koji se apsorbira kao elastična i plastična deformacije stijene na površini pukotina jer u njih prodiru plinovi;
- toplina prenesena na stijenu iz vrućih plinova detonacije; i
- toplina i rad koji se prenose kao entalpija plinova odzračivanjem u atmosferu kroz otvorene pukotine

Energetska ravnoteža eksplozije se stoga može izraziti kao:

$$E_E = E_F + E_S + E_K + E_{NM} \quad (2-4)$$

Gdje su:

$E_E$  – raspoloživa energija eksploziva

$E_F$  – energija fragmentacije

$E_S$  – seizmička energija

$E_K$  – kinetička energija

$E_{NM}$  – oblici energije koji se ne mjere ( Sanchidrian i dr., 2006)

Evaluacija utjecaja seizmičkog djelovanja miniranja na objekte, u osnovi, sastoji se od tri koraka (C. H. Dowding, 1985). Ti koraci su:

1. procjena oscilacije tla kao posljedice miniranja u blizini objekta,

2. analiza dobivenih podataka da se dobije procjena reakcije objekta na proizvedene oscilacije tla,

3. postavljanje graničnih vrijednosti brzina oscilacija tla, odnosno granične vrijednosti reakcije objekta, da bi se spriječila oštećenja [5].

Brzina oscilacija stijene, objekta ili dijela objekta na mjestu mjerenja prihvaćena je veličina za ocjenu mogućnosti nastanka oštećenja na njima. Oštećenja se svrstavaju u više kategorija na više načina te se mogu podijeliti na oštećenja koja su estetske prirode (oštećenja na fasadama, prevlakama, žbukama, spojevima dilatacijama i sl.) i na oštećenja bitnih, nosivih elemenata građevine. Unutar te grupe oštećenja, ona se mogu vrednovati kao mikroskopska, mala, srednja i velika do razine koja uzrokuje kolaps građevine.

Prilikom miniranja potrebno je osigurati izostanak nastanka oštećenja bilo koje razine, budući da i ona kozmetičke naravi pretpostavljaju potrebu saniranja, što osim kroz troškove utječe i stvaranjem psihološkog otpora stanovništva te nepovjerenjem u sigurno izvođenje miniranja. S druge strane, kozmetička oštećenja na objektima redovito nastaju kao posljedica temperaturnih i mikroklimatskih promjena, slijeganja terena, loše izvedenog građenja i normalnih aktivnosti tijekom upotrebe objekta. Ta oštećenja često se pripisuju radovima miniranja iako nisu njima uzrokovana.

Intenzitet potresa izazvan miniranjem može se odrediti na osnovi izmjerenih veličina, pomaka, brzine ili ubrzanja oscilacija tla u mjestima opažanja. Međutim, u praksi se za određivanje potresa koristi veličina brzina oscilacije tla. Na osnovi izračunate rezultante brzine oscilacije može se odrediti stupanj potresa po ljestvici S.V. Medvedeva (Krsnik, 1989), što je prikazano u tablici 2-1.

**Tablica 2-2.** Stupanj potresa po skali S. V. Medvedeva (Krsnik, 1989).

<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

Prikazana ljestvica daje kvalitativan opis mogućnosti nastanka oštećenja i budući da se aktualno primjenjuju nacionalne norme koje reguliraju dozvoljene brzine oscilacija, ljestvica je ilustrativna.

Procjena seizmičkog utjecaja miniranja na okolinu i okolne objekte zasniva se na kriterijima dozvoljenih pomaka (deformacija), brzine ili ubrzanja osciliranja na mjestu promatranja odnosno interesa. Najčešće primjenjivani parametar je brzina oscilacija koji se ograničava različitim kriterijima, propisima ili normama. Granične dozvoljene vrijednosti proizašle su iz različitih istraživanja i studija kojima su se pratile posljedice djelovanja miniranja odnosno nastanak i mjera oštećenja na objektima (nastanak i povećanje dimenzija pukotina). Iz prirodnih odnosa evidentno je da se vršna brzina oscilacija prigušuje, odnosno smanjuje s udaljavanjem od mjesta nastanka odnosno morskog polja a s povećanjem mase otpucanog eksploziva po stupnju iniciranja, promatrano na jednakoj udaljenosti, povećava.

Ta zakonitost je opisana općim obrascem eksponencijalnog smanjenja vršnih brzina oscilacija.

Tijekom istraživanja i opažanja izvelo se više različitih metoda izračuna brzina oscilacija tla na udaljenosti u ovisnosti od mase eksploziva te s druge strane, izračuna udaljenosti, radijusa sigurne zone prilikom miniranja s obzirom na dozvoljenu brzinu oscilacija. Svi obrasci uključuju eksponencijalnu zavisnost brzine oscilacija na promatranom mjestu od udaljenosti i mase punjenja minske bušotine odnosno vremenskom stupnju iniciranja minskog polja. Opći oblik zavisnosti može se izraziti obrascem 2-5:

$$v = k \cdot b^n \quad (2-5)$$

gdje je:

$v$  - brzina oscilacija na mjestu mjerenja (mm/s; cm/s),

$k$  - konstanta,

$b$  - svedena masa eksploziva ili svedena udaljenost (kg/m; m/kg),

$n$  - eksponent ili koeficijent prigušenja.

Koncept korištenja svedene udaljenosti odnosno svedene mase proizašao je iz potrebe odnosno mogućnosti uspoređivanja brzina oscilacija nastalih miniranjima na jednoj ili više lokacija na različitim udaljenostima od minskog polja s različitim parametrima odnosno masama eksploziva po stupnju iniciranja, a temeljen je na evidentnom prigušenju energije koja se propagira iz minskog polja zbog povećanja volumena stijene koja je zahvaćena osciliranjem. Pri tome barata se s kvadratnom, kubnom i općim svedenim veličinama. Kubna je posljedica prigušenja iz koncentriranog, kuglastog naboja. Kvadratna izlazi iz cilindričnog naboja koji je oblik punjenja minske bušotine te se površina kroz koju djeluje valno prenesena energija, odnosno volumen povećavaju volumenom valjka. Opći eksponent ocrtava realno stanje u relanoj stijeni gdje obzirom na značajke stijene kao medija te nehomogenost, anizotropnost i raspucalost dolazi do degradacije idelanih površina odnosno volumena propagiranja vala.

Kvadratna i kubna svedena udaljenost su u češćoj primjeni jer u idealiziranom slučaju, prilikom procjene se eliminira jedna od nepoznanica. Korištenjem različitih eksponenti može se poboljšati koeficijent determinacije statističke regresije čime se omogućuje primjena realnijih koeficijenata. Najkorektniji je pristup određivanje realnog eksponenta za danu lokaciju i miniranja.

Svedena masa, odnosno svedena udaljenost međusobno su recipročne veličine i unose se u obrazac ovisno o predznaku eksponenta.

Ukoliko se koristi svedena udaljenost odnosno  $R_{sv}$ , predznak eksponenta je negativan čime se opisuje smanjenje brzina oscilacija s udaljavanjem od mjesta miniranja. U slučaju kada se koristi svedena masa eksploziva iz matematičkog odnosa izlazi da je predznak eksponenta pozitivan što znači da se udaljavanjem od minskog polja povećava dozvoljena masa eksploziva za zadani kriterij dozvoljenih brzina oscilacija.

Gornja formula opisuje zakonitost kojom se oscilacije prigušuju s udaljenosti od mjesta eksplozije, odnosno kako im jača s većom masom otpucanog eksploziva po stupnju paljenja (po određenim spoznajama unutar intervala od 8 ms).

Svedena udaljenost, odnosno razlomak ispod eksponenta prigušenja proizlazi iz svojstava prigušivanja vibracija u krutom, stijenskom materijalu.

Do prigušivanja dolazi zbog interakcije čestica sredstva koje vibrira pri valnom prolasku eksplozivom induciranog poremećaja, te zbog gubitka energije trenjem, toplinom, prigušenjem unutar granice sredstava (pukotine, kaverne, voda i ispune originalne stijene).

Isto tako do smanjenja intenziteta dolazi zbog kuglastog napredovanja vala te zbog smanjenja gustoće polazne energije zbog povećanja površine fronte vala i disipacije energije na rastući volumen zahvaćene stijene s povećanjem radijusa od mjesta eksplozije.

Kod izračuna svedenih veličina koriste se kvadratni ili kubni korijen ovisno o preporukama pojedinih autora proizašlih iz postavljenih dozvoljenih brzina oscilacija (OSMRE & USBM - 2 inch/sec).

Drugo ishodište za korištenje kvadratnog ili kubnog korijena leži u dvodimenzionalnom odnosno trodimenzionalnom povećanju prostora zahvaćene stijene za cilindrični ili za kuglasti naboj.

Prema rezultatima opažanja u nizu istraživanja, smatra se da je kvadratni korijen primjereniji za procjenu prigušenja u zoni bližoj minskom polju dok je kubni korijen primjereniji za zonu daljnju minskom polju.

Vrijednosti pojedinih koeficijenata su prema literaturi različiti a izvedeni su iz rezultata istraživanja i mjerenja u određenim okolnostima stjenke mase i parametara miniranja te želji da se predlože formule koje bi vrijedile općenito za sve situacije. U konkretnim uvjetima miniranja, na nekoj lokaciji, one više i manje odgovaraju stvarnim mjerenim vrijednostima brzina oscilacija, te su stoga prethodne procjene više ili manje uspješne. Želi li se točnije odrediti ovisnost brzina oscilacija induciranih miniranjem o udaljenosti i masi eksploziva na konkretnom radilištu u prisutnoj stjenkoj masi potrebno je provesti probno

miniranje s mjerenjem brzina oscilacija na odgovarajuće postavljanim mjernim točkama. Pri tome treba uzeti u obzir smjerove na kojima se nalaze objekti i promjene geoloških uvjeta na pojedinim smjerovima. Za napomenuti je da i takvim pristupom, a obzirom na izmjenu geološke situacije na trasi tunela može doći do odstupanja stvarnih, mjerenih veličina brzina oscilacija od procijenjenih odnosno proračunatih vrijednosti. Kontinuiranim mjerenjem odnosno praćenjem na mjestima od interesa, odnosno šticećenim objektima, u slučaju prelaska dozvoljenih vrijednosti moguća je intervencija u parametre miniranja i na taj način i smanjenje brzina oscilacija. Budući da navedeni pristup zahtjeva značajne dodatne vremenske i materijalne troškove te može poremetiti dinamiku radova razvijene su statističke metode evaluacije i procjene brzina oscilacija koje mogu dati zadovoljavajuće rezultate ako se primijene na odgovarajući način.

Jedan od češće korištenih obrazaca za procjenu brzina oscilacija koji je korišten za određivanja utjecaja miniranja na okolne objekte je obrazac M.A. Sadovskog. Ovim obrascem se određuju koeficijenti u konkretnim uvjetima iz rezultata mjerenja brzina oscilacija na dva mjerna mjesta prilikom probnog miniranja. Primjena obrasca na domaćim radilištima, u različitim uvjetima miniranja i stjenske mase pokazala je da izračunati rezultati u zadovoljavajućoj mjeri odgovaraju mjerenim podacima. Prednost primjene obrasca, odnosno metode je i manjem broju mjernih mjesta i broju probnih miniranja koje je potrebno provesti. Primjena navedenog obrasca omogućuje brzi izračun dozvoljenih masa punjenja u odnosu na dozvoljeni iznos brzine na bazi mjerenih rezultata sa dvije mjerne točke.

Obrazac M.A. Sadovskog definira funkcijsku vezu brzina oscilacija tla sa masom eksplozivnog punjenja stupnja iniciranja i udaljenosti mjesta opažanja od minskoga polja na slijedeći način:

$$v = k \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^n \quad (2-6)$$

$v$  - brzina oscilacija (cm/s), (mm/s),

$k$  - koeficijent načina miniranja,

$Q$  - najveća masa eksplozivnog punjenja po stupnju otpucavanja (kg),

$R$  - udaljenost mjesta opažanja od minskog polja (m),

$n$  - koeficijent prigušenja.

Koeficijenti  $k$  i  $n$  egzaktno se računaju iz sustava jednadžbi koje se mogu postaviti kad se brzine oscilacija tla mjere u dva mjesta opažanja prilikom jednog miniranja:

$$v_{r1} = k \rho_1^n ; \quad (2-7)$$

$$v_{r2} = k \rho_2^n ; \quad (2-8)$$

Pri tome je:

$$\rho = \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \quad (2-9)$$

gdje je:

$\rho$ -svedena masa eksplozivnog punjenja ( $\text{kg}^{1/3}/\text{m}$ ).

Obrazac M.A. Sadovskog po obliku odgovara prije spomenutoj eksponencijalnoj funkciji prigušenja.

Niz istraživača je, na bazi promatranja i mjerenja, ustanovilo zakonitosti prigušenja s različitim koeficijentima k i n te eksponentima kojima se potencira udaljenost od minskog polja i masa jednovremeno otpucanog eksploziva.

Opća formula procjene brzina oscilacija na određenoj udaljenosti od minskog polja može se napisati:

$$v = k \cdot \left(\frac{R^q}{Q^p}\right)^n \quad (2-10)$$

Gdje su:

-k, q, p, n-koeficijenti

Pri tome se vrijednosti q kreću od 1-2, a vrijednosti p od 1/3 do 2/3.

Uspješnost primjene pojedine predikcijske formule ovisi o sličnosti uvjeta stijene i miniranja prilikom nastanka formule te uvjetima koji se nalaze na konkretnom radilištu, predmetu procjene. Prve studije koje su se ustanovile zakonitosti povezanosti brzina oscilacija, mase eksploziva po stupnju paljenja i udaljenosti od mjesta eksplozije pojavile su se četrdesetih godina prošlog stoljeća. Nakon toga niz istraživača bavio se tom temom i prezentirao svoje obrasce procjene brzina oscilacija.

U tablici 2-3. dani su odabrani prediktori a u tablici 3-1 širi popis formula za procjenu brzina oscilacija različitih autora:

**Tablica 2-3.** Značajnije formule predikcije

	Autor	Iskustvena formula/model
1	Nicholson (2005)	$v=438(SD)^{-1,52}$

2	Ozer (2008) (limestone-region 5)	$v=186,21(SD)^{-0,81}$
3	ISEE (The Blasters' Handbook)	$v=1725(SD)^{-1,6}$
4	Ak et al. (2009)	$v=1367(SD)^{-1,59}$
5	Badal (2010)	$v=290,12(SD)^{-1,296}$
6	Mesec et al. (2010)	$v=508(SD)^{-1,37}$

Svedena udaljenost dana je formulom

$$SD = \frac{D}{\sqrt{Q}} \quad (2-11)$$

odnosno eksponent je kvadratni, gdje je:

–SD svedena udaljenost, „scaled distance“  $\left(\frac{m}{kg^{\frac{1}{2}}}\right)$ ,

-D udaljenost od minskog polja (m),

-Q masa jednovremeno otpucanog eksploziva, masa prema stupnju paljenja (kg)

#### 2.4. Smanjenje oscilacija tla

Pri miniranju velikih serija minskih bušotina treba primjeniti milisekundno otpucavanje eksplozivnih naboja kako bi se povećao stupanj drobljenja stijene. U tom slučaju dolazi do međusobnog djelovanja seizmičkih valova nastalih otpucavanjem susjednim eksplozivnih naboja. Do međusobnog djelovanja seizmičkih valova od susjednih eksplozivnih naboja dolazi kad je interval usporenja  $\tau < 3T$ , gdje je

$$T = \frac{1}{f} - \text{vrijeme jednog titraja (s)} \quad (2-12)$$

Ako je interval usporenja  $\tau$  veći od vremena titraja T, dolazi do međusobnog djelovanja različitih stupnjeva usporenja, a efekt interferencije je pojačavanje oscilacija. Do toga dolazi kada je K cijeli broj u izrazu:

$$\tau = K \cdot T \quad (2-13)$$

Međutim, kada je interval otpucavanja jednak neparnom broju polovice vremena titraja, tj.:

$$K = \frac{1}{2}, \frac{3}{2} \text{ i } \frac{5}{2} \quad (2-14)$$

Seizmički valovi se pri međusobnom djelovanju oslabljuju. Međutim, ako je vrijednost  $K > 5/2$ , efekt je zanemariv zbog prigušivanja. Interferencija se može ostvariti kada je:

$$n \cdot \tau = k \cdot \tau \quad (2-15)$$

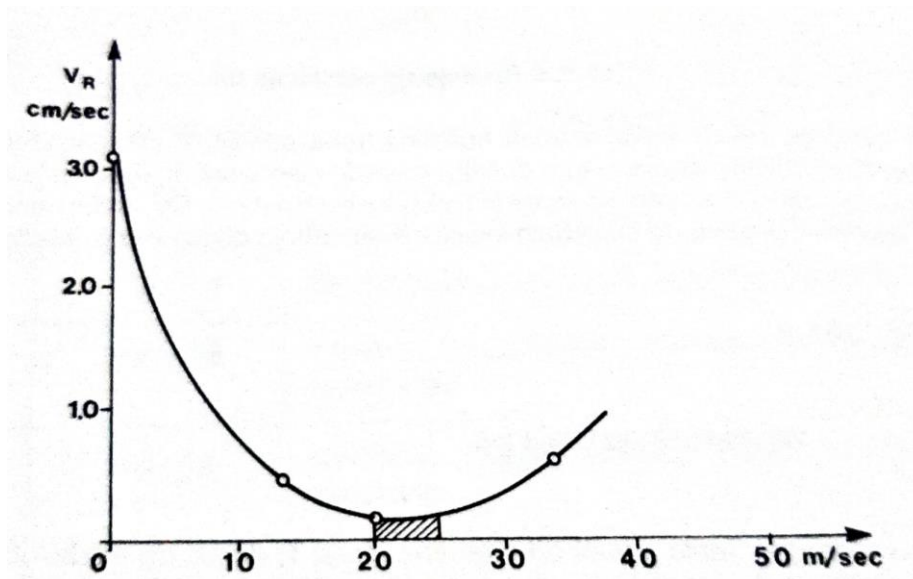


uz uvjet da je  $k$  cijeli broj, odnosno:  $kn = 1, 2, 3 \dots$

gdje je:

$n$  – broj intervala usporenja.

Najpovoljniji interval milisekundnog otkucavanja pri kojemu se seizmički valovi oslabljuju egzaktno se utvrđuje miniranjem serija minskih bušotina s različitim intervalima otpucavanja. Prilikom tih miniranja izmjere se brzine oscilacija tla na osnovi koji se pomoću dijagrama  $\tau:v$  utvrđuje najpovoljniji interval otpucavanja pri kojem su brzine oscilacija tla minimalne. Dijagram za utvrđivanje najpovoljnijeg intervala od otpucavanja na osnovi izmjerenih brzina oscilacija pri miniranju s različitim intervalima usporenja prikazani na slici 2-4.



**Slika 2-4.** Dijagram za utvrđivanje najpovoljnijeg intervala otpucavanja (Krsnik, 1989)

Broj stupnjeva milisekundnog otpucavanja bitno utječe na intenzitet oscilacija, jer se s povećanjem broja stupnjeva paljenja smanjuje količina eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja.

Prilikom nekoliko prvih stupnjeva otpucavanja intenzitet seizmičkih valova se povećava do određene granice, a pri daljnjem otpucavanju održava se postignuti intenzitet koji ovisi o količini eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja (Krsnik, 1989).

## 2.5. Granične vrijednosti brzina oscilacija i intenziteta potresa

Štetno djelovanje seizmičkih valova na građevinske objekte može se procijeniti na osnovi izmjerenih veličina pomaka brzine i ubrzanja oscilacija tla. U praksi se najčešće primjenjuje kriterij zasnovan na brzini oscilacija tla.

Pri kritičnoj brzini oscilacije u građevinskim konstrukcijama nastaju trajne deformacije uslijed naprezanja koja su veća od čvrstoće konstrukcije. Veličina kritične brzine ovisi o nizu faktora kao što su:

- čvrstoća materijala od kojeg je objekt sagrađen
- konstruktivne karakteristike objekta
- stupanj važnosti objekta

Prema tome, dozvoljenu kritičnu brzinu treba odrediti posebno za svaki objekt. U Republici Hrvatskoj koristi se norma HRN DIN 4150 i u tablici 2-2. vidljivo je da ova norma prepoznaje razliku u veličini dozvoljenih oscilacija za različite tipove zgrada (uredske ili industrijske zgrade, stambene zgrade, povijesne zgrade). Zbog različitog utjecaja vibracija, ovisno o tome da li se mjerenja obavljaju u temeljima građevine ili na katu, u tablici su dani rasponi veličina u oba slučaja (Stanković, 2011).

**Tablica 2-4.** Dozvoljene brzine oscilacija za tri razreda objekata (HRN DIN 4150, 2011).

Razred objekta	Vrsta građevine	Dozvoljene vrijednosti brzina oscilacija			
		Temelj			Najviši kat objekta
		<10 Hz	10-50 Hz	50-100 Hz	Sve frekvencije
1	Industrijske građevine	20 mm/s	20 – 40 mm/s	40 – 50 mm/s	40 mm/s
2	Stambene građevine	5 mm/s	5 – 15 mm/s	15 – 20 mm/s	15 mm/s
3	Delikatne konstrukcije, povijesni spomenici i sl.	3 mm/s	3 – 8 mm/s	8 – 10 mm/s	8 mm/s

### 3. METODE PROCJENE UTJECAJA I NORME

Procjena utjecaja seizmičkog djelovanja miniranja na objekte sastoji se od tri koraka. Ti koraci su:

1. procjena oscilacije tla kao posljedica miniranja u blizini objekta
2. analiza podataka da se dobije procjena reakcije objekta na proizvedene oscilacije tla
3. postavljanje graničnih vrijednosti brzina oscilacija tla, odnosno granične vrijednosti reakcije objekta, da bi se spriječila oštećenja

Danas se koristi nekoliko različitih metoda izračuna brzina oscilacija tla i sigurne zone kod miniranja (Stanković, 2011.)

#### 3.1. Određivanje sigurne zone

Određivanje sigurne zone kod miniranja bio je način provedbe sigurnih miniranja prije metoda izračuna brzina oscilacija tla, te danas više nisu u uporabi.

Radijus ugrožene zone može se izračunati po empirijskoj formuli:

Formula Genschela:

$$R_s = 7\sqrt[3]{Q^2} \quad (\text{m}) \quad (3-1)$$

gdje je:

$R_s$  – radijus ugrožene zone pri miniranju (m),

$Q$  – količina eksplozivnog punjenja koja detonira trenutno (kg).

Za određivanje sigurne zone pri izvođenju minerskih radova postoje još metoda M. F. Drukovanija i S. V. Medvedeva (Stanković, 2011).

#### 3.2. Radijus ugrožene zone pri miniranju

Krajnja granica do koje seizmički valovi uzrokuju oštećenja građevinskih objekata, a određuje se jednadžbom:

$$R_U = 0,12 \cdot \sqrt[3]{Q} \quad (\text{m}) \quad (3-2)$$

$R_U$  – radijus ugrožene zone pri miniranju (m)

$Q$  – količina eksplozivnog punjenja koja detonira trenutno (kg)

Orijentacijski se radijus ugrožene zone može odrediti pomoću empirijskih formula raznih autora (Krsnik, 1989).

Formula Genschela je jednostavna i dana je izrazom:

$$R_U = Q^{2/3} \quad (\text{m}) \quad (3-3)$$

Ova formula vrijedi za srednje stanje tla i objekata te je područje njene primjene nedefinirano.

Za određivanje radijusa ugrožene zone još se koriste formule autora S.V. Medvedeva i Sadovskog.

Prema Krsniku (1989), udaljenost za koju je utvrđena dozvoljena količina eksplozivnog punjenja predstavlja radijus ugrožene zone prilikom otpucavanja dotične količine eksplozivnog punjenja.

Na osnovi izmjerenih vrijednosti brzina oscilacija tla određuje se intenzitet potresa izazvan miniranjem i procjenjuje se njegovo djelovanje na obližnje građevinske objekte. Međutim, točnu granicu za određena oštećenja teško je utvrditi ali se općenito smatra:

- pri brzini manjoj od 0,5 cm/s ne mogu nastati nikakve štete
- kod brzine oscilacija od 1 cm/s oštećenja su već malo vjerojatnija
- kod brzine oscilacija od 5 cm/s oštećenja su vjerojatna, odnosno moguća
- pri brzini oscilacija od 10 cm/s štete su vrlo vjerojatne, odnosno posve moguće

Veličina deformacija u građevinskim konstrukcijama ovisi o intenzitetu oscilacija koji je definiran veličinom amplitude, frekvencijom i valnom duljinom. Frekvencija seizmičkih valova je važna veličina koja određuje njihovo djelovanje na objekt, jer kod konstantne amplitude oscilacije objekta su veće kod više frekvencije. Frekvencija seizmičkih valova izazvanih miniranjem nalazi se u području od 5 do 100 Hz.

Analize teorijskih i eksperimentalnih istraživanja su pokazale da frekvencija seizmičkih oscilacija ovisi o nizu činitelja od kojih su najvažnije svojstva stijene i udaljenost od mjesta miniranja. Na osnovi podataka mjerenja utvrđeno je da su oscilacije najintenzivnije u slabim stijenama, a u čvrstim i homogenim stijenama intenzitet seizmičkih oscilacija je znatno manji (Krsnik, 1989).

### **3.3. Određivanje očekivanih brzina oscilacija tla**

Učinci eksplozije uključuju promjenu u ponašanju stijena koja ima implikacije na stabilnost i cjelovitost struktura. Konstrukcije se projektiraju i izvode tako da podnosi statička i dinamička opterećenja uz vođenje računa o slijeganju temelja u dopuštenim granicama. Dinamička opterećenja uključuju opterećenje od potresa, vibracijska opterećenja strojeva, opterećenje od eksplozije itd. Opterećenje od eksplozije na konstrukcije uzrokovano je vađenjem kamena rudarskim aktivnostima, slučajnim eksplozijama podzemnih eksploziva, aktivnostima iskapanja i slično. Postoje složenosti u karakteristikama valova i kretanja tla, parametrima miniranja i faktoru lokacije.

Stoga se provode razne eksperimentalne studije specifične za lokaciju kako bi se predvidjeli i kontrolirali učinci miniranja. Parametri povezani s vibracijom su pomak, brzina i ubrzanje sa svojim odgovarajućim frekvencijama. Iz različitih literatura se može zaključiti da je vršna brzina čestica – PPV (eng. peak particle velocity) općenito dobar pokazatelj oštećenja strukture.

Razina vibracija na udaljenosti ovisi o najbolju po kašnjenju, frekvenciji vibracija, karakteristikama stijene (vrsta stijene, specifična težina, slojevitost, nagib slojeva), uvjetima u minskoj bušotini, prisutnosti vode, širenju valova u tlu, a manjim dijelom na metodu inicijacije. Lomovi u stijenama se razvijaju zbog vlačnih i posmičnih naprezanja. Stoga su istraživanja vibracija tla u stijenama uzrokovanih eksplozijom postala važna.

Odnos između vršne brzine čestica i skalirane udaljenosti može se napisati kao:

$$v = kD^{-b} \quad (3-4)$$

Gdje je:

$v$  – vršna brzina čestica (PPV) (m/s)

$D$  – skalirana udaljenost ( $m/kg^{1/2}$ ), udaljenost od točke punjenja  $R$  (m) podijeljena sa kvadratnim korijenom mase punjenja  $Q$  (kg), izražena u TNT neto ekvivalentu mase punjenja, tj.

$$D = \frac{R}{Q^{1/2}} \quad (3-5)$$

Ukoliko se skalira s ekvivalentom TNT a dobije se univerzalnost koja uključuje energetska razliku eksplozivne tvari a ne i dinamičke karakteristike kao što su brzina detonacije i impuls tlaka.

$k$  – konstanta mjesta

$b$  - konstanta mjesta

Konstante mjesta  $k$  i  $b$  su određene pokusima eksplozije. U nedostatku podataka o eksploziji na terenu za procjenu ovih konstanti koriste se empirijski modeli. Postoje različiti empirijski modeli slični prikazanoj jednadžbi koje su razvili razni istraživači za različite lokacije stijena i tla na temelju podataka o eksplozijama. Tablica 3-1. prikazuje sažetak raznih istraživačkih modela sastavljenih od ukupno 23 različita modela predviđanja vibracija od eksplozije.

**Tablica 3-1.** Sažetak modela različitih istraživača (Kumar, 2016)

No.	Researchers	Empirical models
1	Duvall and Petkof (1959)	$v = k(R/Q^{1/2})^{-b}$
2	Langefors and Kihlstrom (1963)	$v = k(Q/R^{2/3})^{b/2}$
3	Ambraseys and Hendron (1968)	$v = k(R/Q^{1/3})^{-b}$
4	Nicholls et al. (1971)	$v = 0.362D^{-1.63}$
5	IS 6922 (1973)	$v = k(Q^{2/3}/R)^{1.25}$
6	Siskind et al. (1980)	$v = 0.828D^{-1.32}$
7	Ghosh and Daemen (1983)	$v = k(R/Q^{1/2})^{-b}e^{-\alpha R}$
8	Ghosh and Daemen (1983)	$v = k(R/Q^{1/3})^{-b}e^{-\alpha R}$
9	Pal Roy (1991)	$v = n + k(R/Q^{1/2})^{-1}$
10	Pal Roy (1991)	$v = n + k(R/Q^{1/3})^{-1}$
11	CMRI (1993)	$v = n + k(R/Q^{1/2})^{-1}$
12	Kahriman (2002)	$v = 1.91D^{-1.13}$
13	Kahriman (2004)	$v = 0.34D^{-1.79}$
14	Kahriman et al. (2006)	$v = 0.561D^{-1.432}$
15	Rai and Singh (2004)	$v = kR^{-b}Q_{\max}e^{-\alpha}$
16	Nicholson (2005)	$v = 0.438D^{-1.52}$
17	Rai et al. (2005)	$Q_{\max} = k(vD^2)^b$
18	Ozer (2008) (sandstone)	$v = 0.257D^{-1.03}$
19	Ozer (2008) (shale)	$v = 6.31D^{-1.9}$
20	Ozer (2008) (limestone)	$v = 3.02D^{-1.69}$
21	Ak et al. (2009)	$v = 1.367D^{-1.59}$
22	Badal (2010)	$v = 0.29D^{-1.296}$
23	Mesec et al. (2010)	$v = 0.508D^{-1.37}$

Ove empirijske jednadžbe specifične su za određena područja i ne mogu se generalizirati za upotrebu na drugim područjima. Iako postoji značajna raznolikost podataka o eksplozijama istraživača, svaki model daje jasno predviđanje vrijednosti vršne brzine čestica na odgovarajućem području.

U prošlosti je nekoliko istraživača proučavalo učinke različitih karakteristika stijena na vršnu brzinu čestica. Npr. učinak diskontinuiteta stijena na širenje udarnog vala, učinak različitih formacija stijena na model predviđanja, učinak spojeva stijena na širenje valova izazvano eksplozijom i sl.

Razlike u formiranju stijena uključivale su promjene u debljini, pad slojeva, otvore glavnih pukotina i slojeva, itd. Brzina čestica manje je osjetljiva na promjene geoloških uvjeta od ubrzanja ili pomaka, stoga je dosljednija i predvidljivija. Modeli čestica korišteni su za modeliranje statičkih ispitivanja grubih valovitih spojeva stijena pri smicanju. Vibracija najbrže slabi ako se širi u smjeru koji je okomit na spoj stijene. Prisutnost podzemne vode i dodirne površine tla i stijene utječe na nagib krivulje prigušivanja. Stoga formula za izračun vršne brzine čestica ovisi o vrsti stijene. Karakteristike vršne brzine čestica ispitivane su na površini tla, granici tlo stijena i na terenu bez stijena. Uočeno je da je vršna brzina čestica na površini tla veća od onog na granici tla i stijene za istu skaliranu

udaljenost. Neki autori ističu da u slučaju masivne stijene ili horizontalno slojevitih stijena postoji mala razlika u širenju smjera valova, a u slučaju anizotropije i geološke složenosti širenje valova može se razlikovati po smjeru.

Prema Kumaru i dr. (2015), geologija može imati veliki učinak i na razinu amplitude i širenje valova. Učinak Youngovog modula i brzine primarnih valova na vršnu brzinu čestica proučavali su Singh i dr (2008). Veća brzina primarnih valova stvara veće vibracije tla. Ako je Youngov modul stijene visok, tada dolazi do manjeg slabljenja i manjeg gubitka energije, tako da dolazi do povećanja vibracija tla.

Učinak Hoekova geološkog indeksa čvrstoće (GSI) proučavali su Ozer (2008.) i Mesec i dr. (2010.).

Adhikari i dr. (1999.). raspravljali su o primjenjivosti kvalitete stijenske mase za projektiranje mehanizama miniranja u različitim fazama iskopa.

Khandelwala i Singh (2006, 2009) razvili su PPV model uključivanjem stijenskih svojstava poput Poissonovog omjera, Youngovog modula, brzine P-valova itd., pomoću umjetne neuronske mreže (ANN).

Učinci parametra čvrstoće stijena na eksploziju proučavali su Chakraborty i sur. (1998).

ISRM (1992) je proučavao učinke tipa stijena, gustoće stijena, stratifikacije itd. Provedene su različite studije o vršnoj brzini čestica s obzirom na sigurnost strukture i osoblja.

Odnos između PPV-a na površinskoj strukturi i vršne brzine čestica na razini temelja proučavao je Pal Roy (1998). Minimalna sigurna udaljenost odbacivanja fragmenata uzrokovanih eksplozijom određena je različitim zakonima. Utjecaj projektnih parametara eksplozije na udaljenost odbačenih fragmenata proučavao je Adhikari (1999). DGMS (1982) određuje radijus opasne zone za odbačene fragmente nastao eksplozijom na 500 m.

Jednoosna tlačna čvrstoća i gustoća se gotovo ne mjenjaju na malom području eksplozije. Za procjenu specifičnog naboja u različitim uvjetima miniranja u tunelu korištenjem umjetne neuronske mreže ispitivali su Alipour i dr. (2012).

Proveden je program ispitivanja eksplozije za predviđanje rastapanja u slučaju dubokog temelja (Ashford i dr., 2004).

Iz ovih analiza jasno je da su učinci različitih karakteristika stijena na model vršne brzine čestica proučavani na različite načine. Međutim, učinci važnih inženjerskih svojstava stijene, npr. specifična težina, GSI i RQD oznake kvalitete stijene još nisu proučavani na model predviđanja vršne brzine čestica, ali u velikoj mjeri utječu na širenje udarnog vala.

Stoga postoji potreba za razvojem PPV modela koji uključuje navedena svojstva stijena.

Brzinu oscilacija tla može se izračunati u željenoj točki, ako je poznata količina eksplozivnog punjenja po minskoj bušotini koja detonira trenutno i udaljenost točke od minskoga polja. Prema Stanković (2011), postoje različite metode i norme izračuna.

U.S. Bureau of Mines Bulletin 656 (Nichols, Johnson, Duval, 1971)

Prema toj metodi, brzina oscilacija tla računa se:

$$v = 714 \left( \frac{D}{W^a} \right)^b \quad (3-6)$$

gdje je:

$v$  – brzina oscilacija tla (mm/s)

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

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

$a$  – eksponent količine punjenja (0,512, uzima se 0,5)

$b$  – eksponent faktora stijene (-1,63, uzima se -1,6)

Formula ISEE, Blasters Handbook (Oriard, Hendron, Dowding, duPond)

$$v = 1725 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1,6} \quad (3-7)$$

gdje je:

$v$  – brzina oscilacija tla (mm/s)

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

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

Brzina oscilacija računa se i po formuli Sadovskog:

$$v = k \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^n \quad (3-8)$$

gdje je:

$v$  – brzina oscilacija tla (cm/s)

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

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

$k$  – koeficijent načina miniranja

$n$  – koeficijent prigušenja seizmičkih valova na putu širenja

Metoda prema švedskoj normi

Za miniranje se računa dozvoljena brzina oscilacija tla s obzirom na obližnje objekte.

$$v = v_0 \cdot F_k \cdot F_d \cdot F_t \quad (3-9)$$

gdje je:

$v$  – brzina oscilacija tla (cm/s)



$v_o$  – 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

Određivanje vrijednosti  $v_o$  prikazano je u tablici 3-2. Ako je poznata brzina prostiranja primarnih valova  $c_p$ , što znači da je mjerena u tlu na kojem je fundirana zgrada, može se vrijednost  $v_o$  izračunati po formuli:

$$v_o = \frac{c_p}{65} \quad (3-10)$$

gdje je:

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

$c_p$  – brzina prostiranja primarnih valova (m/s)

**Tablica 3-2.** Određivanje vrijednosti  $v_o$  (Stanković, 2011)

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

Faktor  $F_k$  je produkt faktora vrste zgrade  $F_b$  i faktora materijala od kojeg je zgrada izgrađena  $F_m$

$$F_k = F_b \cdot F_m \quad (3-11)$$

gdje je:

$F_k$  – faktor kvalitete gradnje promatranog objekta

$F_b$  – faktor vrste zgrade

$F_m$  – faktor materijala od kojeg je zgrada izgrađena

Određivanje vrijednosti faktora vrste zgrade  $F_b$  prikazan je u tablici 3-3., a određivanje vrijednosti faktora materijala od kojeg je izrađena u tablici 3-4.

**Tablica 3-3.** Određivanje vrijednosti faktora vrste zgrade  $F_b$  (Stanković, 2011)

Broj	Vrsta zgrade ili građevinske konstrukcije	Vrijednost $F_b$
1	Teške konstrukcije (mostovi, lukobrani, bunker)	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

**Tablica 3-4.** Određivanje vrijednosti faktora materijala  $F_m$  (Stanković, 2011)

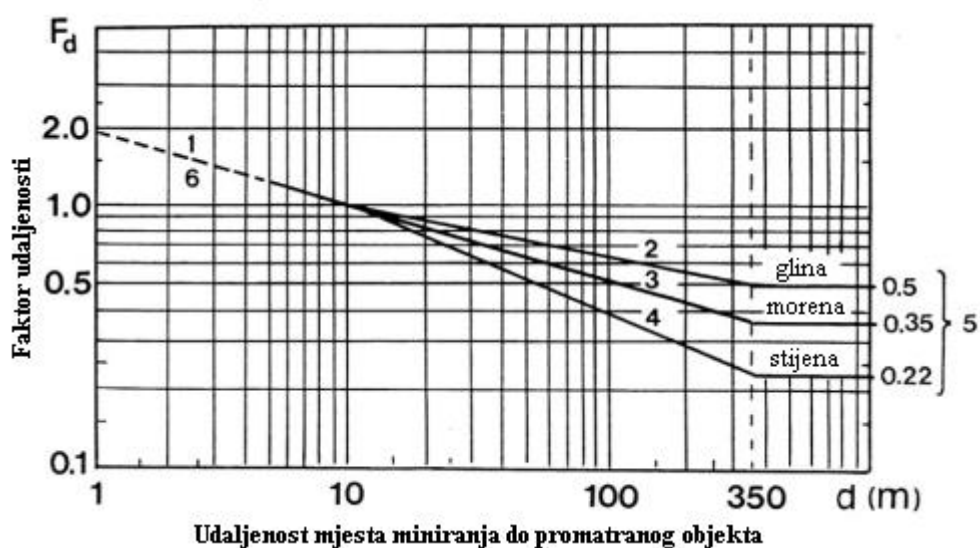
Broj	Vrsta građevinskog materijala	Vrijednost $F_m$
1	Armirani beton, željezo, drvo	1.20
2	Nearmirani beton, opeka, klinker opeka	1.00
3	Porozni beton	0.75
4	Umjetni blokovi (vapnenačka opeka)	0.65

Vrijednost faktora trajanja minerskih radova  $F_t$  određuje se iz tablice 3-5.

**Tablica 3-5.** Određivanje vrijednosti faktor trajanja minerskih radova  $F_t$  (Stanković, 2011)

Vrsta minerskih aktivnosti	Vrijednost $F_t$
Građevinski radovi na tunelima, cestama, iskopima temelja	1.0
Stacionirani radovi, kamenolomi i rudnici	0.75 - 1.0

Faktor udaljenosti  $F_d$  određuje se iz dijagrama na slici 3-1.:



**Slika 3-1.** Dijagram ovisnosti faktora udaljenosti  $F_d$  o udaljenosti mjesta miniranja do promatranog objekta (Stanković, 2011)

### 3.4. Svjetske norme za određivanje dozvoljenih brzina oscilacija tla za različite vrste i stanje objekata

Poznato je nekoliko najčešće korištenih normi čije se dozvoljene veličine međusobno razlikuju.

Svaka norma ima nekoliko različitih granica kojima se određuju veličine dopuštenih oscilacija za pojedine tipove građevina. Za novije i kvalitetnije izgrađene objekte raste i dozvoljena brzina oscilacija. Upravo s takvim odnosima srećemo se kod uspoređivanja izmjerenih veličina kroz norme (Stanković, 2011).

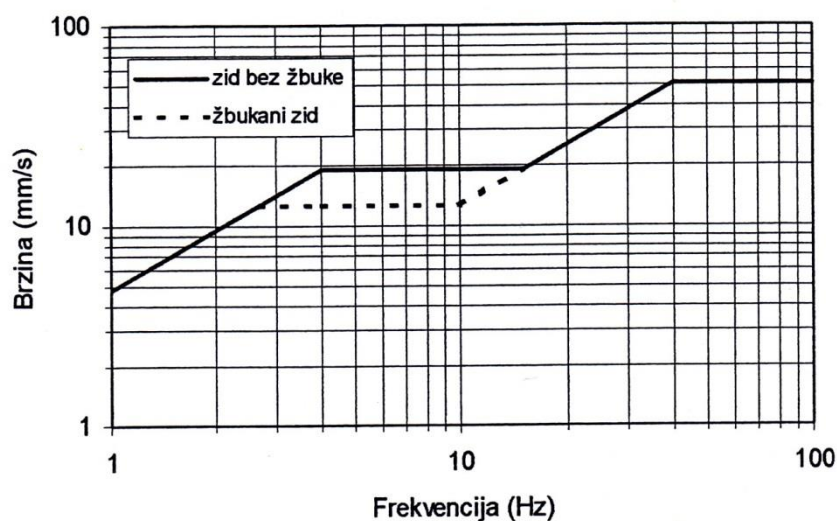
Prema Stankoviću (2011), najčešće korištene norme su:

- USBM RI8507 And OSMRE
- ISO 4866:1990
- British Standard 7385
- Švedska norma
- DIN 4150

Sve norme određuju dozvoljene veličine na osnovu brzine oscilacija tla (mm/s) i frekvencije (Hz).

#### 3.4.1. USBM RI8507 And OSMRE

U SAD - u kriterij seizmičkog utjecaja miniranja utvrđen je preko odnosa brzina i frekvencija oscilacija. Na slici 3-2 prikazana je linija maksimalne brzine oscilacija u odnosu na frekvenciju oscilacija.



**Slika 3-2.** Dijagram granica brzina oscilacija tla za različite tipove konstrukcija u funkciji frekvencije (definirano normom USBM RI8507 And OSMRE) (Stanković, 2011)

### **3.4.2. ISO 4866:1990**

Ova internacionalna norma postavlja principe za izvođenje mjerenja vibracija i procesuiranje podataka obzirom na procjenu efekata vibracija na građevinu.

Ne pokriva izvor pobude osim kad izvor diktira dinamički raspon, frekvenciju ili drugi bitan parametar.

Procjena utjecaja vibracija na objekt, primarno je dobivena iz reakcije objekta na vibraciju, korištenjem prikladne analitičke metode kojom se mogu definirati frekvencija, vrijeme trajanja i amplituda.

Ova norma obrađuje mjerenja vibracija na objektima i isključuje mjerenja zračnog udarnog vala i drugih fluktuacija tlakova, iako je uzeta u obzir reakcija objekta na takve pobude.

Ova se norma odnosi na sve nadzemne i podzemne objekte. Ti objekti se koriste ili održavaju a uključuju zgrade, objekte arheološke ili povijesne baštine (kulturološko naslijeđe), mostovi i tuneli, instalacije i cjevovodi za plin i tekućine, zemljani objekti (npr. rovovi i nasipi), i lučni objekti (npr. pristaništa i molovi).

Norma ISO 4866:1990 ne odnosi se na neke specijalne objekte, uključujući nuklearne elektrane i brane.

Reakcija objekata ovisi o pobudi. Ova norma kontrolira metode mjerenja pod utjecajem izvora pobude to jest frekvenciju, vrijeme trajanja i amplitudu izazvane bilo kojim izvorom (npr. potres, uragan, eksplozija, udar vjetra, zvučni val, probijanje zvučnog zida, postrojenja unutar objekata, promet, aktivnosti prilikom gradnje).

Navedena norma ne daje ograničenja brzina oscilacija tla, taj dio je prepušten svakoj državi/regiji da odredi za svoje područje.

### **3.4.3. British Standard 7385**

Kriterij seizmičkog utjecaja miniranja u Velikoj Britaniji, također, je utvrđen preko odnosa brzina i frekvencija oscilacija.

U tablici 3-6. prikazane su maksimalne vrijednosti brzine oscilacija za određene građevine, a u odnosu na frekvenciju oscilacija.

**Tablica 3-6.** Dozvoljene brzine čestica za različite tipove konstrukcija za određeni frekvencijski raspon (definirano normom British Standard 7385) (Stanković, 2011)

Vrste objekata	Dopuštene vrijednosti komponentnih brzina čestica za određeni frekventni 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

#### 3.4.4. Švedska norma

U Švedskoj je kriterij seizmičkoga utjecaja miniranja, ovisno o tipu građevine, utvrđen graničnom vrijednosti jednog ili više parametra, a to su pomak, brzina i ubrzanje. Ova norma prikazana je u tablici 3-7.

**Tablica 3-7.** Švedska norma (Stanković, 2011)

Tip građevine	Granična vrijednost parametara		
	Pomak (mm)	Brzina (mm/s)	Ubrzanje (mm/s <sup>2</sup> )
Armiranobetonske građevine	-	200	-
Visoke stambene zgrade – moderna gradnja ili gradnja armiranobetonskim okvirima	0,4	100	-
Strop kaverne u čvrstoj stijeni raspona 15-18m	-	70-100	-
Stambene zgrade – cigleni zid	-	70	-
Betonski objekt - nearmiran	-	35	-
Švedski Nacionalni Muzej – zgrada muzeja	25	-	-
Švedski Nacionalni Muzej – osjetljivi izložbeni primjerci	5	-	-

Računalni centar	0,1	-	2,5
Kontrolna soba s prekidačima	-	-	0,5-2

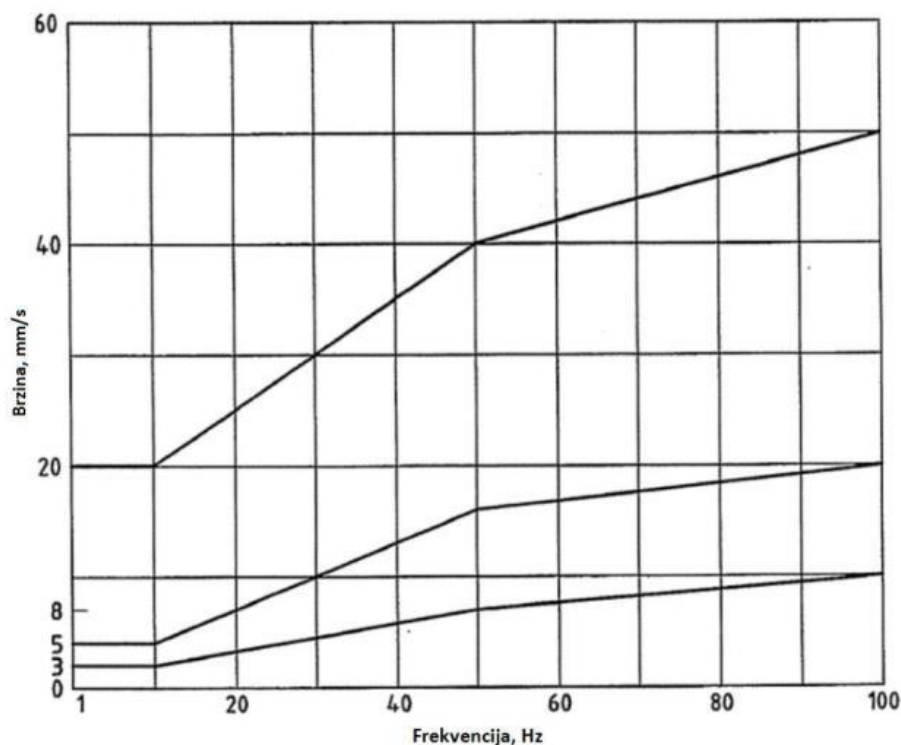
### 3.4.5. Norma HRN DIN 4150:1-3, 2011

Zahtjevi ove norme su najstroži i najčešće je korištena te je prihvaćena za hrvatsku normu. Rasponi dozvoljenih vrijednosti oscilacija obzirom na vrstu građevine koja se promatra i mjesta mjerenja u objektu (temelji ili kat zgrade) prikazani su u tablici 2-2.

Vidi se da su u obzir uzete i frekvencije nastale iz izvora vibracija zajedno sa brzinom oscilacija tla pa tako možemo zaključiti da se dozvoljena veličina brzina oscilacija tla povećava s povećanjem frekvencije.

Budući da je utjecaj oscilacija frekvencija nižih od 10Hz štetniji od onih viših, granice dozvoljenih veličina oscilacija tla, vidljive u dijagramu na slici 2-7., prate takav raspored.

Prilikom miniranja frekvencije se najčešće kreću u veličinama oko 20 do 100 Hz, tako da se ne nalaze u najopasnijem području ispod 10 Hz.



**Slika 3-3.** Dijagram graničnih vrijednosti brzine vibracija u ovisnosti o frekvenciji vala (HRN DIN 4150, 2011) (Stanković, 2011).

#### 4. ISTRAŽIVANJE I MJERENJA

Ležište tehničko građevnog kamenoloma Špica, prema Glavnom Projektu.

Na području Općine značajna su nalazišta nemetalne mineralne sirovine – tehničkog građevinskog kamena (vapnenca i dijabaza). Ležišta vapnenca i dolomitiziranog vapnenca, koja nalazimo na području Općine, su vezana uz naslagetrijasa. Za šire područje Kalnika karakteristično je da su stijene vapnenca okružene tercijskim sedimentima (slabo vezani pješčenjaci i pjeskovite gline). Proces dolomitizacije (sekundarni proces) izvršen je prije očvršćivanja karbonatnog taloga, uz visoku koncentraciju magnezija. Postojeća eksploatacija vapnenca se vrši u kamenolomu “Špica” koji obuhvaća južni dio grebena Veliki Drenovec. Postojeće rezerve vapnenca u ovom kamenolomu svrstane su u kategorije A, B i C1 u vrijednosti od 1.420.000 m<sup>3</sup>. Potencijalne rezerve, potvrđene istražnim radovima, iznose 5.400.000 m<sup>3</sup>. Vapnenac ima veoma široku primjenu u niskogradnji i visokogradnji. Npr. koristi se za proizvodnju kamene sitneži (za izradu asfaltnih mješavina, tamponskih mješavina i betona), te za proizvodnju lomljenog kamena (za zidanje potpornih zidova i obaloutvrda). Zbog povoljnog kemijskog sastava primjenjuje se u poljoprivredi za kalcitizaciju kiselih tala, te u industriji za proizvodnju stočne hrane

Eksploatacijsko polje „Špica“ nalazi se na sjeverozapadnim obroncima Kalnika, a od mjesta Ljubešćica udaljeno je oko 2 km (Slika 4-1.). Obuhvaća područje grebena Velikog Drenovca, izduženog u pravcu jugozapad-sjeveroistok. Površinski kop obuhvaća jugozapadni dio uzvišenja Špica, koji se pruža u pravcu jug-jugozapad prema sjever-sjeveroistoku u dužini oko 700 m. Od vrha Špice, teren se blago spušta po bilu brda do sedla na visini 338 m. Potok Ljuba, teče jugozapadno i jugoistočno od granice eksploatacijskog polja „Špica“.



Eksploatacijsko polje “Špica”

Slika 4-1. Zemljopisni položaj Eksploatacijskog polja špica (M 1:100 000)



#### **4.1. Hidrografske i klimatske prilike**

Hidrološku mrežu šireg područja čini potok Ljuba, koji teče jugozapadno od eksploatacijskog polja i potok Rakovec, koji teče jugoistočno. Ovi potoci dreniraju oborinsku vodu. Kod eksploatacijskog polja razina potoka Ljuba varira od 198 do 200 m n.m., što je znatno niže od kote osnovnog platoa (214 m n.m.). To je povoljno s obzirom na dreniranje oborinske vode.

Područje eksploatacijskog polja „Špica“ ima umjereno toplu, kišnu klimu s toplim ljetom i maksimalnom količinom oborina u toplom dijelu godine. Klimatske prilike u ovom dijelu Hrvatskog zagorja omogućuju eksploataciju praktički tijekom cijele godine, a zastoji mogu biti uzrokovani snijegom i kišom, naročito u zimskom periodu.

#### **4.2. Geološko – tektonske i hidrogeološke značajke šireg područja**

Šire područje eksploatacijskog polja dominantno sačinjavaju pješčenjaci, konglomerati, šljunci, lapori i gline ( $M_1$ ). Samo ležište predstavlja lokalnu pojavu dolomita, dolomitnih breča i vapnenaca ( $T_{2,3}$ ).

Južno i jugoistočno od eksploatacijskog polja „Špica“ prisutni su bazični eruptivi: dijabazi, spilitizirani dijabazi i spiliti ( $\beta\beta$ ), smješteni unutar pješčenjaka, šejlova, lapora, vapnenaca i rožnjaka ( $K_{1,2}$ ). Tehničko-građevni kamen dijabaz eksploatira se na eksploatacijskom polju „Hruškovec“.

Vapnenci su dobro uslojeni. Slojevi su pada  $45^\circ$ - $70^\circ$  prema jug-jugoistoku. Debljina im varira od 0,2-2,0 m, a prevladavaju slojevi debljine oko 1,0 m. Dolomiti su masivno-homogene, laminarne ili šupljikave teksture.

Na otkopnim frontama nisu registrirani izvori, kao niti procjeđivanja vode. Dosadašnjom eksploatacijom se nije naišlo na probleme uzrokovane hidrološkim i hidrogeološkim prilikama. Značajnijih količina vode u podzemlju nema. Istražnim bušenjima nije registrirana razina podzemne vode.

#### **4.3. Podaci o vrsti, količini i kakvoći mineralne sirovine, tipu i karakteristikama ležišta**

##### **4.3.1. Vrsta, količina i kakvoća mineralne sirovine**

Centralni dio eksploatacijskog polja „Špica“ izgrađuje mineralna sirovina vapnenac i dolomitizirani vapnenac i dolomit srednje i gornjotrijaske starosti ( $T_{2,3}$ ). Prevladava vapnenac.

Elaboratom o petoj obnovi proračuna rezervi popravni koeficijent iznosi 0,85, a eksploatacijski gubici iznose 3%.

Rekapitulacija bilančnih, izvanbilančnih i eksploatacijskih rezervi tehničko-građevnog kamena C<sub>1</sub> kategorije za eksploatacijsko polje „Špica“ prikazana je u tablici 4-1., sukladno rješenju Povjerenstva za utvrđivanje rezervi mineralnih sirovina (klasa: UP/I-310-01/18-03/343, urbroj: 526-03-03/2-19-4, od 26. veljače 2019. godine). Rezerve su potvrđene sa stanjem na dan 31. prosinac 2017. godine.

**Tablica 4-1.** Rekapitulacija rezervi na eksploatacijskom polju „Špica“ sa stanjem na dan 31. prosinac 2017. godine.

Klase / Kategori ja	Rezerve			Eksploatacijs ki gubici %	Eksploa ta-cijske rezerve m <sup>3</sup>
	Bilančne m <sup>3</sup>	Izvanbilančne m <sup>3</sup>	Ukupno m <sup>3</sup>		
<b>A</b>	-	-	-	-	-
<b>B</b>	-	-	-	-	-
<b>C<sub>1</sub></b>	10 879 402	2 060 406	12 939 808	3	10 553 020
<b>A+B+C<sub>1</sub></b>	<b>10 879 402</b>	<b>2 060 406</b>	<b>12 939 808</b>	<b>3</b>	<b>10 553 020</b>

Površinu zapadnog, sjevernog i istočnog rubnog dijela eksploatacijskog polja izgrađuju jalovinske naslage miocena promjenjive debljine (od nekoliko metara do više desetaka metara). Klastične naslage izgrađene su od pjeskovitih vapnenaca, prašinih glina, kvarcnih siltita, pješčenjaka te lapora. Površinska trošna zona s humusom je prosječne debljine 1 metar. Elaboratom o petoj obnovi proračuna rezervi proračunata površinska trošna zona odvojeno od klastičnih naslaga miocena. Proračunata je i jalovina unutar stijenske mase. Jalovina proračunata elaboratom o petoj obnovi proračuna rezervi prikazana je u tablici 4-2.

**Tablica 4-2.** Jalovina proračunata elaboratom o petoj obnovi proračuna rezervi sa stanjem na dan 31. prosinac 2018. godine.

OPIS	BILANČNE	IZVAN- BILANČNE	UKUPNO
Količina klastičnih naslaga miocena površ rezervi C <sub>1</sub> kategorije (m <sup>3</sup> )	1 339 917	561 705	1 901 622

Količina površinske jalovine povrh rezervi C <sub>1</sub> kategorije (m <sup>3</sup> )	125 280
Količina jalovine u stijenskoj masi (m <sup>3</sup> )	1 919 895

#### 4.3.2. Potreba i mogućnost oplemenjivanja mineralne sirovine

Tehničko-građevni kamen se drobi i melje, te separira u kamene agregate za izradu asfaltnih mješavina, nosivih slojeva od bitumeniziranog materijala, tamponskih slojeva, betona, tucanika, izradu mortova i žbuka. Izlazni produkti sitnjenja i klasiranja (frakcije) su: -2, -4, 8/4, 11/8, 16/8, 22/16, 32/16, -30, 60/30, -32 i -63 mm. Mogu se proizvoditi i druge frakcije ako su tražene na tržištu.

#### 4.3.3. Geomehaničke karakteristike mineralne sirovine i pratećih stijena

U ležištu se mogu izdvojiti dvije vrste stijena:

- *tehničko-građevni kamen (vapnenac i dolomit)* povoljnih geomehaničkih karakteristika; temeljem dosadašnje eksploatacije pojedinačne kosine stabilne su pod nagibom od 70°,
- *klastične naslage (zastupljeni lapori, siltiti, pijesci i pješčenjaci)* slabijih geomehaničkih karakteristika; kosine pojedinih etaža u klastitima konstruiraju se pod nagibom 50°.

##### 4.3.3.1. Bušenje minskih bušotina i miniranje tehničko građevnog kamena

Eksploatacija se obavlja metodom bušenja I miniranja dubokim minskim bušotinama. Proračun parametara bušenja I miniranja proveden je prema metodi U. Langerforsa.

Maksimalna veličina odminiranog materijala određena je veličinom otvora primarne drobilice odnosno 76 cm. Proračun geometrijskih veličina miniranja je za visinu etaže 30 m.

**Linija najmanjeg otpora** prema formuli U. Langeforsa:

$$W = \frac{D}{33} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot E_g}{s \cdot v \cdot m}} = \frac{88}{33} \cdot \sqrt{\frac{0,8 \cdot 0,85}{0,25 \cdot 0,9 \cdot 1,4}} = 3,9 \text{ m, gdje je:}$$

- D = 88 mm – promjer minske bušotine
- $g = 1,15 \cdot \frac{d^2}{D^2} \cdot \gamma_e = 1,15 \cdot \frac{0,7^2}{0,88^2} \cdot 1,06 = 0,8 \text{ kg/dm}^3$  – gustoća eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini,
- $\gamma_e = 1,06 \text{ kg/dm}^3$  – gustoća eksploziva
- $E_g = 0,85$  – relativna snaga eksploziva za glavni eksplozivni naboj (literaturni podatak),

- $s = s_0 + 0,05 = 0,25 \text{ kg/m}^3$  – pokazatelj minirljivosti stijene,
- $v = 0,9$  – koeficijent uklještenosti stijene pri dnu minske bušotine,
- $m = \frac{a}{W} = 1,4$  – odnos razmaka minskih bušotina i linije najmanjeg otpora (koeficijent gustoće minskih bušotina); koncesionar „in situ“ može odabrati od  $m = (0,8-1,6)$ , ovisno o traženoj granulaciji i uvjetima u ležištu.

Usvojena linija najmanjeg otpora: **W = 4,0 m.**

**Razmak između bušotina u redu:**

$$a = 1,4 \cdot W = 5,5 \text{ m.}$$

**Razmak između redova bušotina:**

$$b = 0,9 \cdot W = 3,6 \text{ m.}$$

**Dužina minske bušotine:**

$$L = \frac{H}{\sin\alpha} + P_b = \frac{30}{0,94} + 1,2 = 33 \text{ m}$$

$\alpha = 70^\circ$  kut nagiba minske bušotine,

$$P_b = 0,3 \cdot W = 1,2 \text{ m dužina podbušenja.}$$

**Obujam odloma po minskoj bušotini** prema izrazu:  $V = \frac{a \cdot W \cdot H}{\sin\alpha} = \frac{5,5 \cdot 4 \cdot 30}{0,94} = 702 \text{ m}^3$ .

**Količina eksploziva za glavni naboj:**

$$Q_g = P_g \cdot L_g = 6 \cdot 5,2 = 31,5 \text{ kg, gdje je:}$$

$$P_g = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot \gamma_e = \frac{0,07^2 \cdot \pi}{4} \cdot 1,5 \cdot 1\,000 \approx 6 \text{ kg/m}^3 \text{ – koncentracija glavnog eksplozivnog}$$

punjenja u minskoj bušotini (gustoća glavnog eksploziva  $\gamma_e = 1,5 \text{ kg/dm}^3$ ).

$$L_g = 1,3 \cdot W = 1,3 \cdot 4 = 5,2 \text{ m – dužina glavnog punjenja,}$$

**Količina eksploziva za pomoćni naboj:**

$$Q_p = P_p \cdot L_p = 5 \cdot 23,8 = 118,5 \text{ kg, gdje je:}$$

$$P_p = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot \gamma_e = \frac{0,07^2 \cdot \pi}{4} \cdot 1,06 \cdot 1\,000 \approx 5 \text{ kg/m}^3 \text{ – koncentracija pomoćnog eksplozivnog}$$

punjenja u minskoj bušotini (gustoća pomoćnog eksploziva  $\gamma_e = 1,06 \text{ kg/dm}^3$ ).

$$L_p = L - L_g - L_{\check{c}} = 33 - 5,2 - 4 = 23,8 \text{ m – dužina pomoćnog eksplozivnog naboja, gdje}$$

je: dužina čepa  $L_{\check{c}} = (0,8 - 1,2) \cdot W$ , usvaja se  $L_{\check{c}} = W$ .

**Ukupno eksplozivno punjenje minske bušotine** prema izrazu:

$$Q = Q_g + Q_p = 31,5 + 118,5 = 150 \text{ kg.}$$

**Normativ bušenja:**

$$k_b = \frac{L}{V} = \frac{33}{702} = 0,0047 \text{ m}^3/\text{m}^3.$$

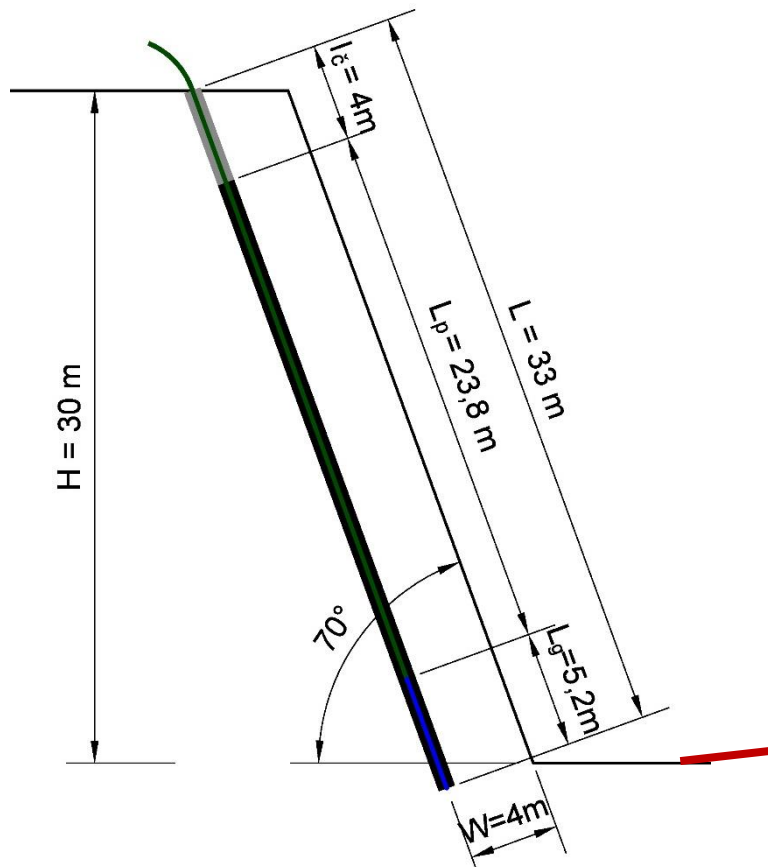
**Učinak bušenja i miniranja:**

$$u = \frac{V}{L} = \frac{702}{33} = 21,2 \text{ m}^3/\text{m}'.$$

**Specifična potrošnja eksploziva:**

$$q = \frac{Q}{V} = \frac{150}{702} = 0,21 \text{ kg/m}^3.$$

Shema konstrukcije minske bušotine prikazana je na slici 10.



**Slika 4-2.** Shema konstrukcije minske bušotine za visinu etaža 30 m

Na slici 4-2. prikazana je pomoćna subhorizontalna bušotina. Izrađuje se radi formiranja ravnog odloma (reza) i sprečavanja formiranja stopa pri dnu bušotine. Koristi se isti eksploziv i promjer bušenja kao kod dubokih minskih bušotina, dužina subhorizontalne bušotine 4,1 m, dužina čepa 2 m.

U tablici 4-3. su date duljine minskih bušotina i potrebne količine eksploziva za visine etaža  $H = 15-30$  m.

**Tablica 4-3.** Duljine minskih bušotina i količine eksploziva za visine etaža 15-30 m

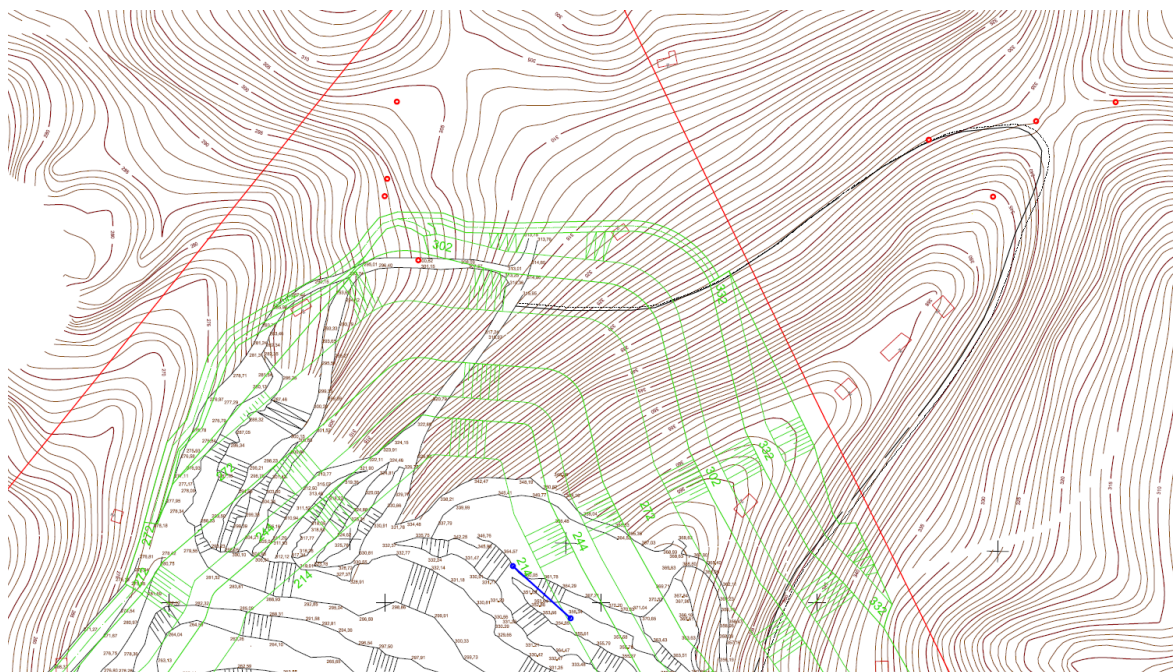
Visina etaže (m)	Duljina bušotine (m)	Duljina čepa (m)	$Q_g$ (kg)	$Q_p$ (m)	$Q$ (kg)
15	17	3	31,5	43,5	75
16	18	3	31,5	48	79,5

17	19	3	31,5	52,5	84
18	20,3	3	31,5	60	91,5
19	21,5	3	31,5	66	97,5
20	22,5	3	31,5	72	103,5
21	23,5	3,5	31,5	75	106,5
22	24,5	3,5	31,5	79,5	111
23	25,5	3,5	31,5	84	115,5
24	26,5	3,5	31,5	88,5	120
25	28	3,5	31,5	96	127,5
26	29	4	31,5	99	130,5
27	30	4	31,5	103,5	135
28	31	4	31,5	108	139,5
29	32	4	31,5	112,5	144
30	33	4	31,5	118,5	150

Preuzeto iz Glavnog rudarskog projekta Špica, Calx d.o.o.

#### 4.4. Mjerenja seizmičkih utjecaja miniranja

U okolini eksploatacijskog polja Špica nalaze se stambeni objekti stalne i vikend upotrebe. Budući da se eksploatacija miniranjem odvija u smjeru objekata pojavila se potreba za mjerenjem i karakteriziranjem očekivanih brzina oscilacija za daljnja miniranja. Provedeno je više probnih mjerenja čiji su rezultati obrađeni i analizirani u skladu sa zahtjevima norme HRN DIN 4150, 1-3:2011. Prema provedenoj matematičkoj regresijskoj analizi donesene su i smjernice za daljnje minerske radove, odnosno za dozvoljene mase eksplozivnog punjenja po stupnju iniciranja. Situacijska karta s ucrtanim minskim poljima i mjestima mjerenja za miniranje 11.05.2022. prikazana je na slici 4-3. Mjesta mjerenja označena su crvenim kružnicama a minsko polje plavom crtom.



**Slika 4-3.** Situacijska karta s ucrtanim minskim poljima i mjestima mjerenja za miniranje 11.05.2022

Analiza je provedena na 18 miniranja prilikom kojih su mjerene brzine oscilacija na jednom do osam mjernih mjesta. U tablici 4-4. prikazani su parametri minskih polja i rezultati mjerenja brzina oscilacija.

**Tablica 4-4.** Parametri minskih polja i rezultati mjerenja brzina oscilacija

Datum miniranja	Instrument	Tran (mm/s)	Vert (mm/s)	Long (mm/s)	Rezultanta PVS (mm/s)	Udaljenost (m)	Masa eksploziv po stupnju iniciranja (kg)
24.9.2021	5937	7,874	7,874	8,382	9,604	223,41	140
28.9.2021	5937	3,81	1,524	3,429	4,54	174,63	160
27.10.2021	5937	12,19	7,366	5,461	12,75	272,87	147
11.11.2021	BE13570	12,32	13,21	24	25,85	230,11	150
24.11.2021	BE13570	3,302	1,524	3,81	4,438	315,02	115
	BE12945	9,017	4,572	6,731	10,89	202,39	
	5937	0,889	0,508	0,889	1	493,31	
8.12.2021	5937	8,636	9,144	6,731	9,589	210,75	145
15.12.2021	5937	6,731	5,842	8,128	10,29	220,89	145
21.12.2021	4327	8,382	5,08	6,731	9,731	246,51	150

	3793	2,667	1,715	2,667	3	377,47	
	5938	2,667	2,095	2,667	3,366	345,58	
	BE13570	6,477	3,175	0,127	6,578	294,53	
	5937	1,715	0,508	1,334	1,81	475,91	
8.2.2022	5937	13,72	8,382	7,112	15,95	208,36	130
11.2.2022	5937	6,858	4,509	7,366	9,319	196,74	150
21.2.2022	5937	8,636	4,191	10,16	11,86	209,98	135
23.2.2022	5938	2,794	1,651	4,89	5,001	316,35	150
	3793	11,43	4,445	8,128	11,87	166,13	
	4327	4,635	1,715	4,001	5,842	350,46	
	5937	8,382	15,75	11,68	16,18	158,44	
3.3.2022	5937	4,953	2,794	5,271	7,017	243,66	100
10.3.2022	UM6978	17,84	12,63	14,44	17,9	196,87	150
	5938	11,94	6,35	4,445	12	236,68	
	BE13570	11,81	12,83	17,14	17,5	162,29	
	3793	2,35	1,588	3,683	4,001	346,79	
	4327	2,413	1,461	3,048	3,493	365,78	
24.3.2022	5938	19,3	5,016	4,064	19,42	157,47	135
	5794	0,127	9,906	7,112	9,985	149,52	
	3793	4,509	2,032	3,429	4,651	365,33	
	4327	3,81	1,909	4,699	5,239	300,31	
	1280	17,27	17,4	13,34	21,26	117,33	
	5937	17,53	10,16	8,89	18,38	150	
21.4.2022	5937	4,572	3,556	4,254	5,112	241,81	100
29.4.2022	BE13570	5,588	1,524	2,921	5,664	322,31	135
	5938	13,46	5,08	6,604	13,67	192,72	
	3793	13,72	15,24	12,19	16,61	130,95	
	5794	4,89	2,413	5,588	6,652	234,35	
	MP13021	3,854	1,876	3,35	4,32	267,61	



	UM6978	3,2	1,907	4,887	5,083	283,13	
	4327	14,48	9,398	10,41	15,94	162,16	
	1280	12,45	5,842	7,747	14,87	181,05	
	BE13570	9,144	2,921	9,144	11,77	197,82	
11.5.2022	BE13570	8,636	5,969	12,06	12,15	221,75	137,5
	5794	9,652	9,398	6,477	11,65	188,59	
	5938	5,842	2,794	8,89	9,335	276,39	
	BE13570	3,429	2,032	5,715	5,991	275,79	
	UM6978	3,279	2,459	7,756	8,084	315,91	
	3793	5,779	2,032	3,175	6,033	347,62	
	4327	13,72	16	13,21	17,08	148,31	
	1280	8,509	5,207	4,699	8,985	181,35	

Rezultati mjerenja seizmičkih utjecaja miniranja osnova su za određivanje utjecaja miniranja na okolinu te su prema provedenoj analizi obrađenih podataka mjerene vrijednosti ocijenjene prema zahtjevima norme HRN DIN 4150, 1-3:2011.

Tri prostorne, međusobno okomite ravnine te najveća prostorna, resultantna brzina oscilacija izračunata automatskom obradom računalnim programom instrumenta, odnosno prema obrascu 4-1.

$$v_r = \sqrt{v_t^2 + v_v^2 + v_l^2} \text{ (mm/s)}, \quad (4-1)$$

gdje je:

- $v_r$  - resultantna najveća vrijednost brzina oscilacija u određenom trenutku (mm/s),
- $v_t$  - transverzalna komponenta brzina oscilacija (mm/s),
- $v_v$  - vertikalna komponenta brzina oscilacija (mm/s)
- $v_l$  - longitudinalna odnosno radijalna komponenta brzina oscilacija (mm/s).



**Slika 4-4.** Etaže eksploatacijskog polja Špica

#### **4.5. Utvrđivanje intenziteta seizmičkog djelovanja miniranja**

Intenzitet seizmičkog djelovanja miniranja odnosno potresa izazvanog miniranjem može se određivati na osnovu iznosa mjerenih pomaka oscilacija, brzina oscilacija ili akceleracija oscilacija. U ovom slučaju intenzitet je određen je na osnovi izmjerenih brzina oscilacija na mjestima mjerenja, budući da hrvatska norma HRN DIN 4150, 1-3: 2011 kao fizikalnu veličinu prema kojoj se ocjenjuje mogućnost štetnog djelovanja miniranja na okolinu odnosno građevine određuje brzinu oscilacija terena ili građevine na mjestu mjerenja.

Prilikom mjerenja brzina oscilacija na tunelu Podmurvice (Rijeka), korišteni su instrumenti serija INSTANTEL BlastMate Series II i III, INSTANTEL Minimate, INSTANTEL Minimate Blaster i INSTANTEL Minimate plus, InstanTEL Series Pro IV, InstanTEL MicroMate i White mini-seis II.

Instrumenti mjere brzine oscilacija određenom frekvencijom uzorkovanja tijekom miniranja, što omogućuje vremenski grafički prikaz trajektorija brzina oscilacija te daljnju analizu i prikaz i ispis pojedinih parametara oscilacija.

Obradom podataka mjerenja računalnim programom BlastWare vrijednosti komponentnih brzina oscilacija sa pripadajućim frekvencijama oscilacija za svaku mjerenu vrijednost ucrtavaju se u grafički prikaz dozvoljenih brzina oscilacija norme HRN DIN 4150 1-3:2011.

Mjerna mjesta su postavljena uz građevine u okolnom naselju te na referentnim mjernim mjestima unutar kamenoloma, kako bi se u daljnjoj analizi koristile mjerene a ne procijenjene, odnosno proračunate brzine oscilacija.

Sa druge strane, udaljenost mjernih mjesta na sličnim udaljenostima i sličnim redom mase punjenja bušotina odnosno stupnja paljenja pretpostavljaju pouzdanije rezultate kasnije provedene regresijske analize. Sa svrhom određivanja obrasca matematičkog modela zavisnosti, odnosno prigušenja brzina oscilacija o udaljenosti od minskog polja, na terenu između građevina i minskog polja postavljena su dodatna mjerna mjesta.

U slučaju svedenja seizmičkog djelovanja miniranja s različitim masama punjenja po stupnju otpucavanja, odnosno zbog određivanja dozvoljene mase punjenja uvodi se svedena (skalirana) udaljenost  $D$ , koja je definirana formulom 4-2 i 4-3.

$$D = \frac{R}{\sqrt[m]{Q}} \quad (4-2)$$

gdje je :

$D$  - svedena udaljenost ( $m/kg^{1/m}$ ),

$R$  - udaljenost od minskog polja (m),

$Q$  - masa punjenja eksploziva po stupnju iniciranja (kg).

Zavisnost brzina oscilacija uvođenjem svedene udaljenosti dana je formulom (4-3).

$$v = k \cdot \left(\frac{R}{\sqrt[m]{Q}}\right)^{-n} \quad (4-3)$$

Uobičajeno, vrijednosti eksponenta  $m$ , su 2 za kvadratnu svedenu udaljenost, odnosno 3 za kubnu svedenu udaljenost.

Statističkom regresijskom analizom rezultata mjerenja određuju se regresijske krivulje, te uz primjenu pouzdanosti procjene od 95 %, i zadanu graničnu brzinu oscilacija, definirane su dozvoljene mase eksploziva po stupnju iniciranja na određenim udaljenostima od minskih polja za slijedeća miniranja.

Analiza intenziteta djelovanja miniranja za pojedinu mjernu točku provedena je prema izmjerenim brzinama oscilacija u odnosu na frekvencije oscilacija prema zahtjevima hrvatske norme HRN DIN 4150, 1-3:2011.

Norme izvornog niza DIN 4150 su slijedeće (preuzete za hrvatske norme):

-DIN 4150-1 2001 Erschütterung im Bauwesen-Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen. (Structural vibration, Part 1: Predicting vibration parameters)

-DIN 4150-2 1999 Erschütterung im Bauwesen-Teil 2: Einwirkungen auf Menschen und Gebäuden. (Structural vibration, Part 2: Human exposure to vibration in buildings)

-DIN 4150-3 1999 Erschütterung im Bauwesen-Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen. (Structural vibration, Part 3: Effects of vibration on structures)

Norma HRN DIN 4150:2011. prepoznaje tri vrste objekata i za njih određuje dozvoljene brzine oscilacija:

-industrijske građevine (Linija 1):

za frekvencije do 10 Hz dozvoljene su brzine oscilacija do 20 mm/s,

za frekvencije od 10 do 50 Hz dozvoljene su brzine oscilacija 20 - 40 mm/s,

za frekvencije od 50 do 100 Hz dozvoljene su brzine oscilacija 40 - 50 mm/s,

-stambene građevine (Linija 2):

za frekvencije do 10 Hz dozvoljene su brzine oscilacija do 5 mm/s,

za frekvencije od 10 do 50 Hz dozvoljene su brzine oscilacija 5 - 15 mm/s,

za frekvencije od 50 do 100 Hz dozvoljene su brzine oscilacija 15 - 20 mm/s,

-delikatne konstrukcije, povijesni spomenici i sl. (Linija 3):

za frekvencije do 10 Hz dozvoljene su brzine oscilacija do 3 mm/s,

za frekvencije od 10 do 50 Hz dozvoljene su brzine oscilacija 3 - 8 mm/s,

za frekvencije od 50 do 100 Hz dozvoljene su brzine oscilacija 8 - 10 mm/s,

## **5. REGRESIJSKA ANALIZA I ODREĐIVANJE DOZVOLJENE MASE EKSPLOZIVNOG PUNJENJA PO STUPNJU INICIRANJA**

Višegodišnjim opažanjima i mjerenjem utvrđena je međusobna zavisnost između brzina oscilacija tla, mase eksplozivnog punjenja i udaljenosti mjesta opažanja od minskog polja koja se može opisati nizom obrazaca raznih autora.

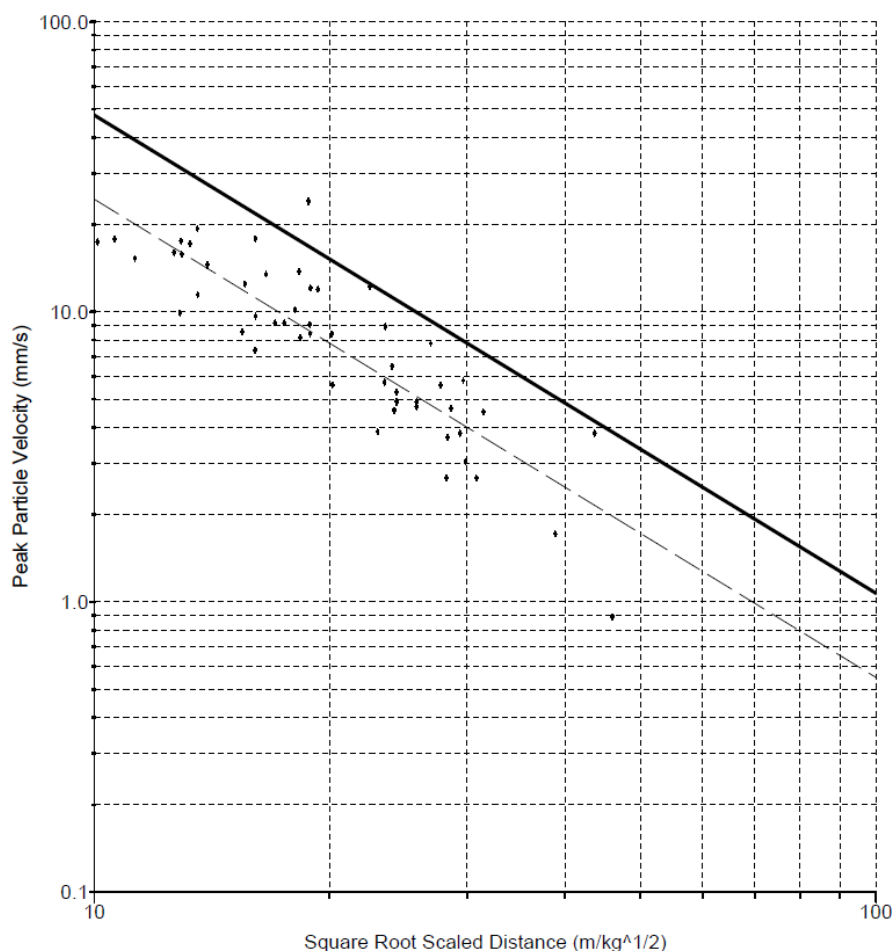
Primjenom obrade podataka mjerenih brzina oscilacija metodom regresijske analize, određene su krivulje regresije dijagrama rasprostiranja te stupanj povezanosti brzina oscilacija i svedene udaljenosti te je određen stupanj povezanosti za probno miniranje na kamenolomu Špica.

Prema dijagramu rasprostiranja podataka mjerenja prilikom probnih miniranja u logaritamskom prikazu ovisnosti brzina oscilacija o svedenoj udaljenosti matematički je određen granični pravac ispod kojeg ulazi 95 % mjerenih rezultata (slika 5-1.)

Regression Line For LJUBESCICA 2021\_2022.SDF

$$95\% \text{ Line Equation: } V = 2112.9 * (SD)^{-1.648}$$

Coefficient of Determination = 0.752 Standard Deviation = 0.145



**Slika 5-1.** Regresijska krivulja komponenta brzina oscilacija (preslika iz računalnog programa Blastware)

## 5.2. Određivanje dozvoljenih masa eksplozivnog punjenja po stupnju iniciranja

Određivanje dozvoljenih masa eksplozivnog punjenja po vremenskih stupnjevima iniciranja proveden je obzirom na najbliže udaljenosti od granice projektiranog područja iskopa u odnosu na okolne objekte, njihovo stanje i izvedbu a koji se nalaze u naselju južno od kamenoloma.

Granične, dozvoljene brzine oscilacija su određena u skladu sa zahtjevima norme HRN DIN 4150,1-3; 2011, kriterij za stambene građevine uz najpovoljniji slučaj frekvencija oscilacija a obzirom na vrijednosti i frekvencije mjerenih brzina oscilacija 15 mm/s. Svedena udaljenost je određena s eksponentom  $m=2$ , što se pokazalo odgovarajućim za uvjete stijene na području iskopa obzirom na mjerene vrijednosti.

Dozvoljene mase po stupnju iniciranja obzirom na okolne objekte i dozvoljenu brzinu oscilacija od 15 mm/s prikazane su u tablici 5-1.

**Tablica 5-1.** Najveće dozvoljene mase eksplozivnog punjenja po stupnju iniciranja za miniranja i dozvoljenu brzinu oscilacija od 20 mm/s.

**For Maximum Peak Particle Velocity of 20.00 (mm/s).**

Distance (m)	Weight (kg)
0.000	0.000
20.00	1.399
40.00	5.594
60.00	12.59
80.00	22.38
100.00	34.96
120.0	50.35
140.0	68.53
160.0	89.51
180.0	113.3
200.0	139.9
220.0	169.2

## 6. ANALIZA I ZAKLJUČAK

Mjerenja sa svrhom određivanja seizmičkih utjecaja izvedena su prilikom osamnaest proizvodnih miniranja na kamenolomu Špica. Dozvoljena brzina oscilacija definirana je graničnom linijom br. 2, za stambene objekte (grafikon HRN DIN 4150) pri čemu su proračunate dozvoljene mase eksploziva po stupnju iniciranja za kriterij dozvoljenih brzina oscilacija od 20 mm/s.

Miniranja na kamenolomu Špica u budućnosti će se kretati u smjeru sjeverne granice eksploatacijsko polje, odnosno u smjeru kuća za stanovanje i odmor. Najbliži objekt, u tom slučaju, nalaziti će se na udaljenosti od približno 75 m od mjesta miniranja. Primjenom veličina proračuna iz tablice 5-1. može se zaključiti da je dozvoljena masa eksplozivnog punjenja oko 20 kg po stupnju iniciranja. Uspoređujući parametre sadašnjih bušotina, to je oko 20 % sadašnjih masa punjenja. Kako bi se postiglo zadovoljavanje dozvoljenih brzina oscilacija moguća je primjena razdjelnog punjenja ili smanjenja visina etaža ili primjena eksploziva koji će dati manje frekvencije brzina oscilacija.

Svakako treba provoditi mjerenje brzina oscilacija na kontrolnim mjestima u sjeveroistočnom i sjeverozapadnom smjeru eksploatacijskog polja. Na taj način, smanjenjem udaljenosti od mjesta miniranja i mjesta mjerenje ustanoviti će se pouzdanija zavisnost veličina brzina oscilacija te će se moći, u najbližim zonama, provoditi bolje podešavanje parametara miniranja uz zaštitu okolnih objekata.



## 7. LITERATURA

DOWDING, C.H. 1985. *Blast vibration monitoring and control*. Evanston, Illinois: Northwestern University.

HRVATSKI ZAVOD ZA NORME. 2013. HRN DIN 4150:2011. Vibracije u građevinama.

KUMAR, R., CHOUDHURY, D. BHARGAVA, K. 2016. *Determination of blast-induced ground vibrations equations for rocks using mechanical and geological properties*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 8 (2016) 341-349.

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

SANCHIDRIAN, J.A., SEGARRA, P., LOPEZ, L.M. 2007. *Energy components in rock blasting*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 44 (2007) 130–147.

STANKOVIĆ, S. 2011. *Određivanje ovisnosti brzina oscilacija tla o parametrima miniranja*. Doktorska disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.