

# Nepoželjni utjecaji na okoliš prilikom eksploatacije stijenske mase miniranjem u kamenolomu

---

Ivanušec, Jurica

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:359113>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-11**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

JURICA IVANUŠEC

NEPOŽELJNI UTJECAJI NA OKOLIŠ PRILIKOM EKSPLOATACIJE  
STIJENSKE MASE MINIRANJEM U KAMENOLOMU

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2022.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 14.07.2022. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 30.06.2022.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva

*12v.prof.dr.sc. Saufa Kevčić*

### Članovi povjerenstva

- 1) Doc.dr.sc. Jasmina Jurić
- 2) Prof.dr.sc. Stjepan Brelčić
- 3) Doc.dr.sc. Davor Stanković

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

NEPOŽELJNI UTJECAJI NA OKOLIŠ PRILIKOM EKSPLOATACIJE  
STIJENSKE MASE MINIRANJEM U KAMENOLOMU

KANDIDAT:

JURICA IVANUŠEC

MENTOR:

doc. dr. sc. JASMIN JUG

VARAŽDIN, 2022.

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

### NEPOŽELJNI UTJECAJI NA OKOLIŠ PRILIKOM EKSPLOATACIJE STIJENSKE MASE MINIRANJEM U KAMENOLOMU

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **doc.dr.sc. Jasmin Jug**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 30.6.2022.

JURICA IVANUŠEC  
(Ime i prezime)



\_\_\_\_\_  
(Vlastoručni potpis)

**IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ  
OBJAVLJENIM RADOVIMA**


Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

NEPOŽELJNI UTJECAJI NA OKOLIŠ PRILIKOM EKSPLOATACIJE STIJENSKE MASE  
MINIRANJEM U KAMENOLOMU

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 27.06.2022.

Doc.dr.sc. Jasmin Jug  
(Mentor)

  
\_\_\_\_\_  
(Vlastoručni potpis)

IME I PREZIME: Jurica Ivanušec

NASLOV: Nepoželjni utjecaji na okoliš prilikom eksploatacije stijenske mase miniranjem u kamenolomu

## SAŽETAK

U čvrstim i vrlo čvrstim stijenama eksploatacija uglavnom počinje bušenjem minskih bušotina i miniranjem. S druge strane, miniranje je poznato po negativnim utjecajima na okoliš. Vibracije tla, razbacivanje komada stijene i zračni udar, najznačajniji su primjeri takvih utjecaja. Kod detonacije eksplozivnog punjenja oslobađa se velika količina energije. Jedan dio raspoložive energije pretvorbom prelazi u kinetičku energiju, odnosno energiju seizmičkih valova, a manji dio u energiju zračnih valova. Takvi oblici energije štetni su i mogu izazivati oštećenja na obližnjim objektima. Kako bi se radovi bušenja i miniranja koji se provode u svrhu eksploatacije tehničko-građevnog kamena odvijali bez štetnih posljedica, potrebno je prilikom svakog miniranja izvoditi kontrolna mjerenja veličina oscilacija tla i zračnog udara. Mjerenje se provodi pomoću malih prijenosnih seizmografa čije su ulazne jedinice trokomponentni geofon i mikrofon. Mikrofon mjeri tlak zračnog udarnog vala, a trokomponentni geofon mjeri veličine oscilacija tla, odnosno pomak, brzinu, ubrzanje i frekvenciju seizmičkih potresnih valova. Kako bi nepoželjni efekti miniranja ostali unutar normom propisanih granica, potrebno je pravilno projektirati parametre miniranja poput dubine i promjera minskih bušotina, duljine čepa, intervala otpucavanja među bušotinama i sl. Kroz ovaj rad bit će prikazan postupak terenskog mjerenja i analize rezultata s praktičnom primjenom na primjeru proizvodnog miniranja na kamenolomu u Ljubešćici. Na temelju rezultata mjerenja izrađen je proračun dopuštenih količina eksploziva po stupnju paljenja, s obzirom na to da se pokazalo kako je smanjenje količine eksploziva najbolji način reduciranja vibracija tla prilikom miniranja.

KLJUČNE RIJEČI: okoliš, kamenolom, miniranje, vibracije tla, zračni udar, seizmograf, dopuštene količine eksplozivnog punjenja

NAME AND SURNAME: Jurica Ivanušec

TITLE: Adverse effects on the environment during the exploitation of rock mass by blasting in a quarry

#### ABSTRACT

In solid and very solid rocks, exploitation usually begins with the drilling of blast holes and blasting. On the other hand, blasting is known for its adverse effects on the environment. Ground vibrations, fly rock, and air blast are the most significant examples of such influences. The detonation of an explosive charge releases a large amount of energy. One part of the available energy is converted into kinetic energy, i.e. the energy of seismic waves, and a smaller part is converted into the energy of airwaves. Such forms of energy are harmful and can cause damage to nearby buildings. In order to avoid negative consequences of drilling and blasting works which are carried out for the purpose of exploiting a technical-building stone, it is necessary to perform control measurements of ground vibrations and air blast during each blasting. The measurement is performed by using small portable seismographs, whose input units are a three-component geophone and a microphone. The microphone measures the pressure of an air blast wave, and a three-component geophone measures ground vibrations, i.e. the velocity, displacement, acceleration, and frequency of seismic waves. To keep the undesirable effects of blasting within the limits prescribed by a norm, it is necessary to properly design the parameters of blasting such as the depth and diameter of boreholes, the stemming length, the firing interval between boreholes, etc. The thesis presents the procedure of field measurement and the analysis of results with their practical application on the example of production blasting at the quarry in Ljubešćica. Based on the measurement results, a calculation of the allowable quantities of explosive charge detonated per delay was made, since it became evident that reducing the amount of explosive charge is the best way to reduce ground vibrations during blasting.

KEYWORDS: environment, quarry, blasting, ground vibrations, air blast, seismograph, allowable quantities of explosive charge



## Sadržaj:

1. Uvod.....	1
2. Mehanizam drobljenja stijenske mase pri miniranju .....	2
3. Eksploatacija stijenske mase miniranjem u kamenolomu .....	9
3.1. Minersko-tehničke značajke eksploziva .....	10
3.2. Visina etaže .....	14
3.3. Izbojnica .....	15
3.4. Promjer minske bušotine.....	16
3.5. Utjecaj geološke građe stijenske mase na miniranje.....	17
3.6. Dubina probušnja .....	17
3.7. Čepljenje .....	19
3.8. Redoslijed detonacije bušotina.....	20
4. Nepoželjni utjecaji miniranja i njihova kontrola .....	22
4.1. Oštećenja zbog vibracija tla .....	23
4.1.1. Mjerenje oscilacija tla.....	25
4.1.2. Utjecaj geologije na vibracije tla .....	27
4.1.3. Reakcija ljudi na vibracije tla .....	27
4.2. Kontrola oscilacija .....	28
4.3. Kontrola razbacivanja komada stijene .....	29
4.4. Kontrola zračnog udara .....	30

5. Primjer opažanja nepoželjnih utjecaja pri miniranju u kamenolomu i analiza rezultata .....	33
5.1. Mjerenje oscilacija tla i zračnog udara.....	33
5.2. Postupak mjerenja oscilacija tla i zračnog udara .....	37
5.3. Rezultantna brzina oscilacija tla.....	41
5.4. Dopuštene brzine oscilacija tla.....	44
5.5. Intenzitet zračnog udara .....	45
5.6. Proračun dopuštenih količina eksploziva po stupnju paljenja .....	46
5.6.1. Metoda Langeforsa .....	47
5.6.2. Metoda USBM-a .....	50
5.6.3. Usporedba rezultata dopuštenih količina eksploziva .....	52
6. Zaključak .....	53
7. Literatura.....	54
8. POPIS SLIKA.....	57
9. POPIS TABLICA .....	60

## 1. Uvod

Mnogi građevinski projekti poput izgradnje prometnica, pomorskih i zračnih luka, hidroenergetskih i drugih objekata u stijenama uključuju uporabu eksploziva i miniranja. U čvrstim i vrlo čvrstim, blokovitim stijenama miniranje predstavlja jedinu primjenjivu tehnologiju otkopavanja [1]. Iskop stijenske mase u kamenolomu obično uključuje miniranje zbog jednostavnosti, brzine i ekonomičnosti u odnosu na iskop rudarskim strojevima. Primarni zahtjevi miniranja na površinskim kopovima i kamenolomima su stvaranje odminirane mase koja je fragmentirana kako bi odgovarala radu strojeva za utovar i transport. Miniranje kao postupak razaranja i drobljenja stijenske mase energijom eksploziva, sa sobom donosi mnoge nepoželjne utjecaje na okoliš i stanovništvo. Prvenstveno se misli na primjenu u urbanoj sredini ili njezinoj blizini, budući da miniranje generira vibracije tla koje uzrokuju nastanak pukotina na građevinskim konstrukcijama i u tlu, a mogu biti ugroženi i ljudski životi zbog buke i razbacivanja fragmenata odminirane stijenske mase. Na zaštićenim područjima miniranje nije dopustivo zbog stvaranja prašine, buke i vibracija. Kako bi se pravovremeno izbjegao štetan utjecaj na neposrednu blizinu kamenoloma, potrebno je prilikom svakog miniranja provoditi kontrolna instrumentalna mjerenja veličina oscilacija tla i zračnog udara. Na temelju dobivenih rezultata provodi se analiza i dolazi se do informacija o kvaliteti i pravilnosti izvedbe minerskih radova. Ako radovi nisu izvedeni na pravilan i dopušten način propisan normama i standardima, potrebno je uvesti izmjene u projekt bušenja i miniranja. Na intenzitet potresa nastalih miniranjem utječe niz činitelja kao što su: fizikalno-mehanička svojstva i geološka građa stijena kroz koje se šire seizmički valovi, količina i vrsta eksplozivnog punjenja, način i veličine etažnog miniranja, te udaljenost od mjesta miniranja. Na praktičnom primjeru opažanja miniranja u kamenolomu „Špica“ u Ljubešćici, prikazano je kako se modifikacijom veličina miniranja i/ili količine eksploziva po stupnju paljenja nepoželjne vibracije tla mogu svesti unutar dozvoljenih granica.

## 2. Mehanizam drobljenja stijenske mase pri miniranju

Miniranje je suvremeni postupak za razaranje i drobljenje stijena energijom eksploziva [2]. Ukupna raspoloživa energija dijeli se u dvije vrste energije: udarna energija i energija plinova ili potisna energija. Iniciranjem morskog polja i detonacijom eksplozivnih naboja, u bušotinama dolazi do brojnih kemijskih, dinamičkih i fizikalnih procesa [1].

Razaranje određene sredine miniranjem (slike 1 i 2) složen je fizikalno-mehanički proces i zbog toga je potrebno poznavati značajke sredine koja se minira i učinke detonacije eksplozivnog naboja [3].

Većina istraživača, više ili manje slično, analizira u miniranje stijenske mase kroz četiri faze [1]:

- 1) Odmah nakon detonacije eksploziva, drobi se zona neposredno uz bušotinu kao rezultat djelovanja udarnog vala.
- 2) Pukotine se šire od bušotine, dok se udarni val rasprostire kao sferni udarac do slobodne površine.
- 3) Nastaje vlačni val koji se odbija od slobodne površine prema bušotini.
- 4) Punjenje već otvorenih pukotina plinom te njihovo daljnje širenje, pokretanje cijele mase koja formira kamenu hrpu s bezbrojnim sudaranjima kamenih ulomaka koji se u srazovima usitnjavaju.

Detonacijom eksplozivnog naboja dolazi do ekspanzije plinova koji su pod visokim tlakom i temperaturom. Ekspanzija plinova generira veliku udarnu energiju plinova koja se sažima u prvoj, drugoj i trećoj fazi eksplozije kao posljedica visokog tlaka na detonacijskoj fronti.



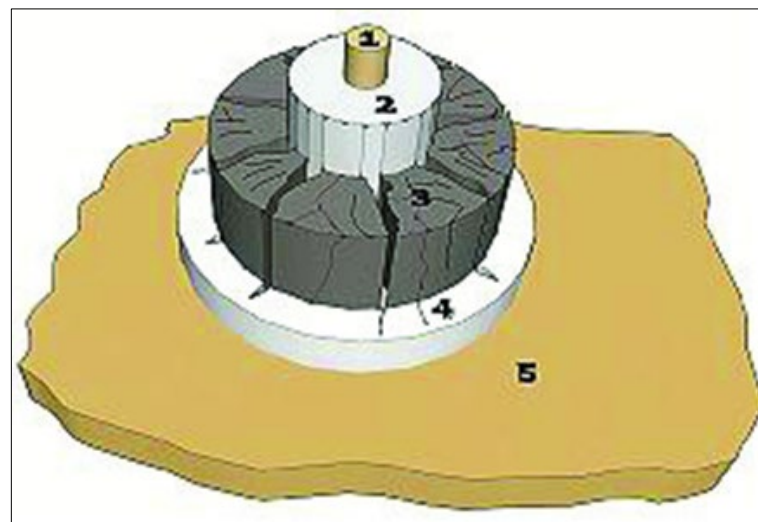
Slika 1. Izgled stijenske mase prije miniranja (kamenolom „Hruškovec“)  
(snimljeno 2022.)



Slika 2. Izgled stijenske mase nakon miniranja (kamenolom „Hruškovec“)  
(snimljeno 2022.)

Udarna energija se širi kroz eksploziv i okolni materijal sferično u svim smjerovima od mjesta iniciranja. Konačno, dolazi do pokretanja stijenske mase uslijed značajnih naprezanja koja prelaze dinamičku tlačnu čvrstoću stijene.

Karakter stupnja oštećenja i izlomljenosti stijene definira ukupno pet zona oko minske bušotine na temelju kojih je moguće razlikovati oštećenost stijenske mase koja se mijenja s radijalnom udaljenošću od minske bušotine (slika 3).



Slika 3. Područja djelovanja eksplozivnog punjenja minske bušotine: 1 – minska bušotina, 2 – područje drobljenja, 3 – frakturirano područje, 4 – malo frakturirano područje i 5 – neporemećena stijena [4]

Zone oštećenja opisane su od strane mnogih autora, a neki su odredili i radijuse udaljenosti pojedinih zona od minske bušotine. Tako većina autora radijuse udaljenosti pojedinih zona daje u odnosu na radijus minske bušotine [5, 6, 7]. Hustrulid (1999) kao parametar za odnos koristi radijus punjenja minske bušotine [8]. Neki autori su predložili izraze za izračun radijusa zone drobljenja [9, 10], dok Li Chun-rui i suradnici daju izraze po kojima se mogu izračunati veličine pojedinih zona oštećenja [11].

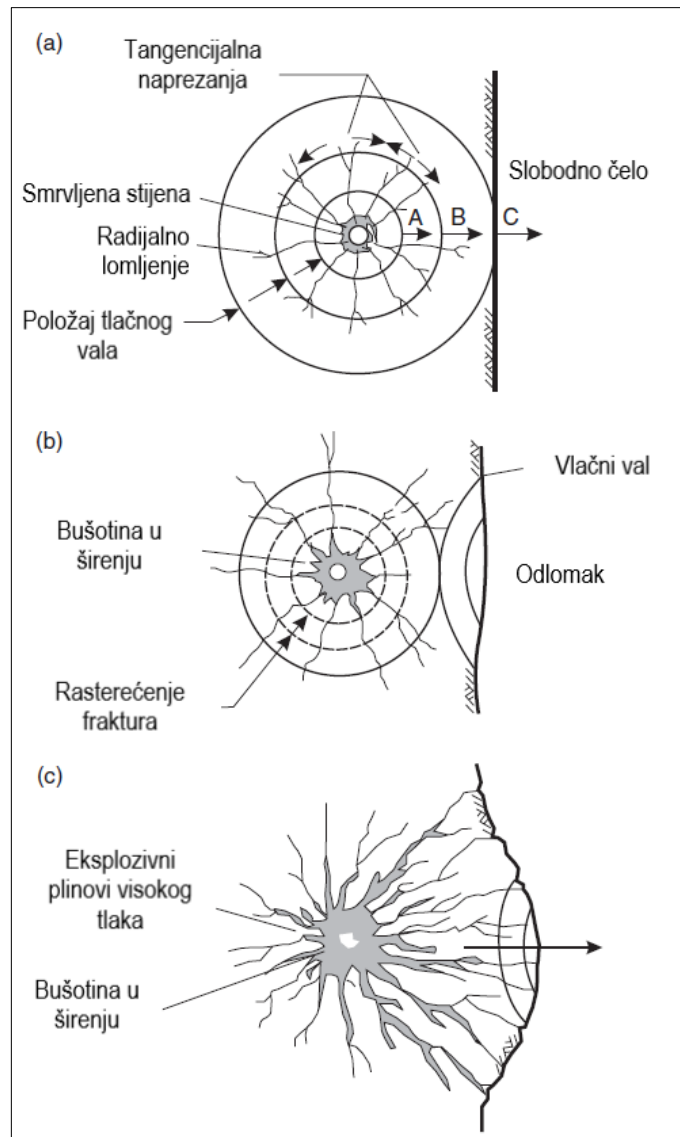
Teorije miniranja opisuju udjel pojedinih energija u procesu loma stijene, premda postoje suprotna mišljenja raznih autora. Najznačajnije teorije miniranja su [12]:

- ✚ teorija refleksije valova naprezanja,
- ✚ teorija ekspanzije plinova,
- ✚ teorija međudjelovanja širenja radijalnih pukotina i reflektiranog udarnog vala,
- ✚ teorija loma savijanjem,
- ✚ teorija valova naprezanja i ekspanzije plinova,
- ✚ kombinirana teorija koja uključuje valove naprezanja, ekspanziju plinova, pukotine i refleksiju,
- ✚ teorija jezgre ili valova naprezanja i pukotina, i
- ✚ teorija dinamičkih i statičkih tlakova.

Kao što je prethodno navedeno, danas postoje mnoge teorije koje opisuju mehanizam drobljenja stijenske mase, međutim ni jedna teorija nije u potpunosti prihvaćena s obzirom na to da svaka od njih ima svoje prednosti i nedostatke [3]. U ovom radu bit će detaljnije opisana kombinirana teorija koja uključuje valove naprezanja, ekspanziju plinova, pukotine i refleksiju.

Kada eksploziv detonira, on se u roku od nekoliko tisućinki sekunde pretvara u plin visoke temperature i visokog tlaka. Kada je detonacija ograničena u bušotini, vrlo brzom reakcijom proizvode se tlakovi koji mogu doseći  $1,82 \cdot 10^9$  Pa te potom djeluju na stijenske minske bušotine [13]. Nastala energija prenosi se u okolnu stijensku masu u obliku valova naprezanja koji putuju brzinom od 2000-6000 m/s. Kako val naprezanja ulazi u stijenu koja okružuje bušotinu, materijal na udaljenosti od jednog do dva radijusa eksplozivnog naboja (u tvrdoj stijeni) i više od dva radijusa (u mekoj stijeni), ona se drobi tlačenjem (slika 4a) [13].

Kako se fronta tlačnog vala širi, razina napreznja brzo opada ispod dinamičke tlačne čvrstoće stijene, a izvan ove usitnjene zone stijena je podvrgnuta intenzivnoj radijalnoj kompresiji koja uzrokuje razvoj tangencijalnih vlačnih napreznja. Tamo gdje ta napreznja premašuju dinamičku vlačnu čvrstoću stijene na lom, nastaju radijalni lomovi.



Slika 4. Mehanizam drobljenja stijenske mase eksplozivom: a) Tlačno napreznje stijenske mase; b) Rasterećenje stijenske mase; c) Formiranje kupole od bušotine prema slobodnoj površini (prerađeno prema [13])



Kako tlačni val prolazi kroz stijenu, koncentrične ljuske stijene podliježu radijalnom širenju što rezultira tangencijalnim lomovima zbog rasterećenja naprezanja u neposrednoj blizini bušotine. Ovi koncentrični prijelomi prate cilindrične površine, a zatim se stvaraju sve bliže i bliže slobodnom čelu.

Kada tlačni val dosegne slobodno čelo, reflektira se kao val vlačnog naprezanja. Ako je reflektirani vlačni val dovoljno jak, "ljuštenje" se odvija postupno od bilo kojeg slobodnog čela natrag prema bušotini. To uzrokuje rasterećenje stijenske mase, stvarajući proširenje prethodno formiranih radijalnih pukotina (slika 4b) [13].

Stijena je mnogo osjetljivija na vlak nego na tlak pa je reflektirani val naprezanja posebno učinkovit u lomljenju stijene. Kako je stijena rasterećena zbog radijalnog širenja i refleksije tlačnog vala, sada je omogućeno plinovima da u ekspanziji otvore pukotine nastale valom naprezanja i počnu izbacivati stijensku masu (slika 4c) [13]. Ovu fazu karakterizira formiranje kupole od bušotine prema slobodnoj površini.

Kako se djelovanje klina odvija zbog izdizanja i širenja plinova, dolazi do znatno većeg posmičnog loma jer se stijenska masa izbacuje u smjeru slobodne površine. U jako raspucanim stijenama, fragmentacija i rastresitost odminirane mase uglavnom su uzrokovani širenjem plinova.

Postignuta fragmentacija uvelike ovisi o uklještenosti eksploziva u bušotini, kontaktu eksplozivnih naboja unutar bušotina, veličini izbojnice i redoslijedu aktiviranja minskih bušotina. Odnosno, ako je ograničenje naboja čepljenjem neadekvatno, dio energije će se izgubiti iz bušotina, a loši kontakt između eksploziva i stijene rezultira lošim prijenosom energije i naprezanja na stijensku masu. Također, pretjerana duljina izbojnice rezultira zagušenjem i slabim pomicanjem stijene, dok premala duljina izbojnica rezultira rasipanjem eksplozivne energije i prekomjernim razbacivanjem odminiranih komada stijene.

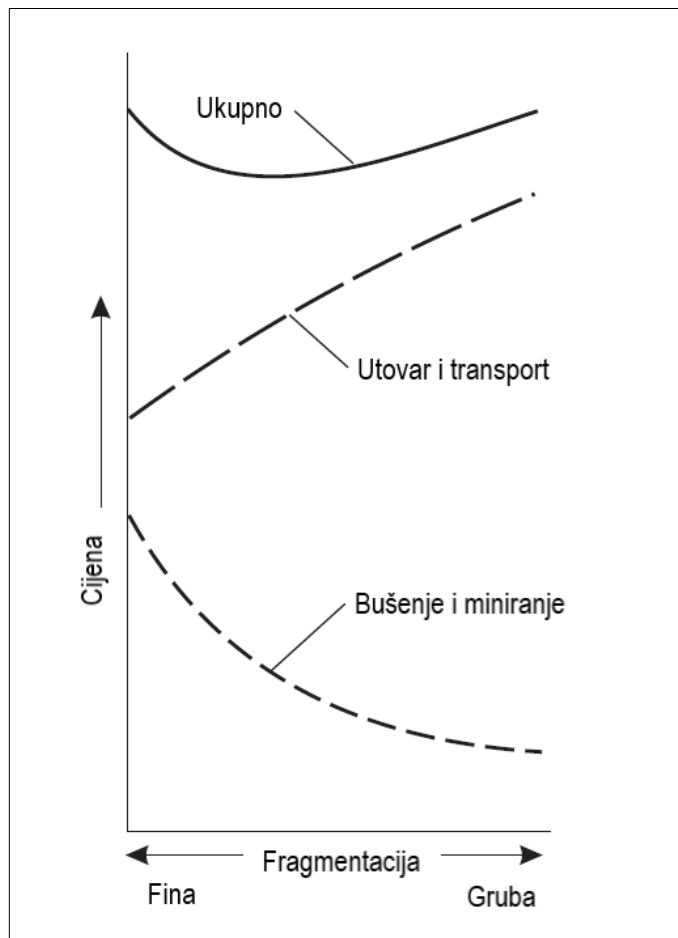
Najbolji rezultati se postižu korištenjem učinkovitih usporenja između aktiviranja pojedinačnih minskih bušotina ili redova bušotina, uz maksimalno osiguravanje i korištenje slobodnih površina [13]. To omogućuje odminiranom materijalu slobodu kretanja prema slobodnoj površini i tako se smanjuje šteta na okolnoj stijenskoj masi.

Kako bi se spriječilo oštećenje stijene u pozadini minskog polja, zona drobljenog kamena i radijalnog pucanja oko bušotina u posljednjem redu kontrolira se konturnim miniranjem koje se rijetko izvodi kod proizvodnih miniranja u kamenolomu. Obično udarni val putuje izvan granice kamenoloma kroz okolnu stijenu te stvara vibracije i unutar stijene i na površini tla. Zato kroz građevine koje se nalaze u blizini miniranja prolaze vibracije pa se mogu oštetiti uvijanjem i ljuljanjem izazvanim oscilacijama tla.

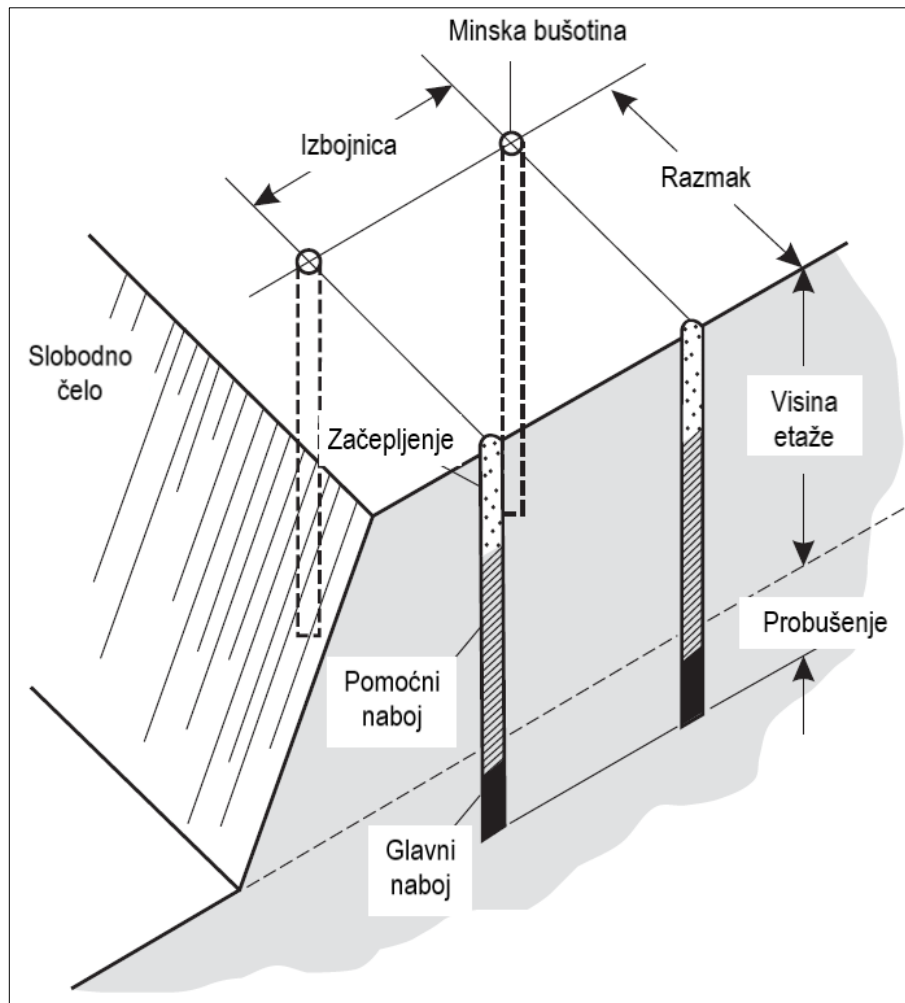
Šteta se može vrlo efikasno kontrolirati smanjenjem količine eksplozivnog naboja po stupnju paljenja. Ova tehnika vjerojatno najviše utječe na amplitudu brzine čestica tla. Svako smanjenje količine eksploziva kroz smanjenje promjera bušotina, smanjenje visine, punjenja i/ili začepljenja će smanjiti mogućnost štete.

### 3. Eksploatacija stijenske mase miniranjem u kamenolomu

Osnovna ekonomičnost eksploatacije stijene korištenjem eksploziva prikazana je na slici 5. Proizvodnja dobro fragmentiranog i rastresitog odminiranog stijenskog materijala koji nije razbacan po eksploatacijskom polju, olakšava utovar i transport (slika 5). Na taj se način postiže minimalni ukupni trošak, kako je prikazano na grafikonu. Međutim, u blizini završnih kosina, troškovi bušenja i miniranja će se povećati jer će konturne bušotine biti bliže raspoređene i pažljivo napunjene kako bi se ograničio (smanjio) prijenos štete na pozadinsku stijenu kamenoloma [13]. Suprotno tome, proizvodnja blokova stijena uključivat će korištenje bušotina s razmakom većim od najveće potrebne veličine bloka [13]. Za postizanje optimalnih rezultata miniranja u svim uvjetima, potrebno je temeljito razumijevanje veličina etažnog miniranja (slika 6) koje će biti dodatno razmatrane u poglavljima koja slijede.



Slika 5. Utjecaj fragmentacije na cijenu bušenja, miniranja, utovara i transporta (prerađeno prema [13])



Slika 6. Veličine ili parametri etažnog miniranja (prerađeno prema [13])

### 3.1. Minersko-tehničke značajke eksploziva

Snaga eksploziva je radna sposobnost koju obavlja određena količina ili volumen eksploziva. Može se izraziti u apsolutnim jedinicama ili kao omjer u odnosu na standardni eksploziv. Volumna snaga eksploziva često je povezana s jačinom ANFO eksploziva kojem je dodijeljena proizvoljna volumna snaga od 100. ANFO je izraz koji se koristi za najčešće korišteni eksploziv, sastavljen od zrnaca amonijevog nitrata (zrnca promjera 0,5 mm) i 5,5% dizelskog ulja (slika 7). [13]

Mjera jačine eksploziva je njegova brzina detonacije. Što je veća brzina, to je veći učinak razbijanja. Međutim, snaga eksploziva, gustoća i stupanj zbijenosti u bušotini također su faktori koje treba uzeti u obzir pri odabiru eksploziva za određenu namjenu. U tablici 1 navedene su brzine detonacija, gustoće i vodootpornosti različitih vrsta eksploziva.



Slika 7. Granulirani eksploziv tipa ANFO komercijalnog naziva „AMONIT-6“ [14]

Snaga eksploziva može se definirati težinskom i volumnom snagom. Relativna volumna snaga povezana je s težinskom snagom preko specifične gravitacije. Snaga eksploziva je vrijednost važna za izračunavanje potrebnog volumena/promjera bušotine da bi potom bušotina sadržavala određenu količinu eksplozivne energije. Veća volumna snaga eksploziva zahtijeva manji volumen bušotine, uz istovremeno osiguravanje dovoljne količine energije za drobljenje stijenske mase.

Osjetljivost eksploziva je karakteristika koja određuje način aktivacije naboja, minimalni promjer punjenja i sigurnost kojom se može rukovati eksplozivom. Eksplozivi visoke osjetljivosti će detonirati kada se koriste za punjenje bušotina manjeg promjera i mogu se aktivirati detonatorom relativno male snage. Kako se smanjuje osjetljivost eksploziva, potrebno je povećati promjer punjenja i energiju detonatora. [13]

Tablica 1. Minersko-tehničke značajke pojedinih vrsta eksploziva [13]

Vrsta eksploziva	Gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	Brzina detonacije [m/s]	Relativna volumna snaga (ANFO = 100)	Otpornost na vodu
Zapakirane emulzije osjetljive na detonator	1,12 - 1,2	4600 - 5200	115 - 170	Odlična
Zapakirane emulzije osjetljive na pojačane detonatore (boostere)	1,24 - 1,26	4300 - 5050	125 - 155	Odlična
Watergels (vodeni gelovi)	1,20	4785	129	Odlična
Dinamiti	1,2 - 1,42	3350 - 5600	170 - 130	Dobra do odlična
Dinamiti za kontrolirana miniranja	0,75 - 1,3	1650 - 2600	76 - 114	Dobra do loša
Boosteri	1,34 - 1,6	5600 - 7900	167 - 280	Odlična
ANFO	0,84	4000	100	NEMA
Volumne emulzije	1,25	5200 - 5500	120 - 150	Odlična

Svaka vrsta eksploziva ima skup karakteristika prikladnih za specifične primjene i uvjete kao što su promjer bušotine, prisutnost vode, potreba za kontrolom razbacivanja komada stijene i buke. Na primjer, ANFO i volumne emulzije obično se koriste za miniranja velikih razmjera na otvorenim kopovima i kamenolomima, dok se vodeni gelovi i dinamiti koriste u manjim građevinskim projektima.

Također, kao što je prikazano na slici 6, kod upotrebe ANFO eksploziva kao glavnog eksplozivnog punjenja, potrebno je koristiti snažniji eksploziv veće jačine u donjem dijelu bušotine (udarna patrona). Zadaća eksplozivnog punjenja na dnu bušotine je osigurati potpunu detonaciju ANFO eksploziva i razbiti stijenu pri dnu etaže gdje je najviše uklještena i pruža najveći otpor drobljenju. [13]

Primjera radi, u kamenolomu „Špica“, u posljednje vrijeme (2022.) najčešće se koristi:

- ✚ granulirani ANFO tip eksploziva „AMONIT-6“ (slika 7) gustoće  $0,82 \text{ g/cm}^3$ , relativne volumne snage 100 i brzine detonacije 3600 m/s,
- ✚ patronirani emulzijski eksploziv „RIOHIT ST“ (slika 8) promjera patrone 65 mm, gustoće  $1,1 \text{ g/cm}^3$ , brzine detonacije 2000 – 6000 m/s i relativne volumne snage 130, i
- ✚ patronirani plastični eksploziv „POLADYN 31 ECO“ (slika 9) promjera patrone 65 mm, gustoće  $1,4 \text{ g/cm}^3$  i brzine detonacije preko 4500 m/s.

Prema tablici 1, navedeni patronirani eksplozivi „RIOHIT ST“ i „POLADYN 31 ECO“ klasificiraju se kao „zapakirane emulzije osjetljive na detonator“.



Slika 8. Patronirani emulzijski eksploziv „RIOHIT ST“



Slika 9. Patronirani plastični eksploziv „POLADYN 31 ECO“

### 3.2. Visina etaže

Na većim građevinskim zahvatima, površinskim kopovima i kamenolomima izvode se višeetažni radovi. Propisi mogu ograničiti visinu etaže u odnosu na maksimalni doseg opreme za iskop, kako bi se smanjio rizik od oštećenja ili ozljeda u slučaju urušavanja čela. Faktori koje treba uzeti u obzir pri odabiru visine etaže su: promjer minske bušotine, veličina izbojnice, nagib bušotina i preciznost bušenja.

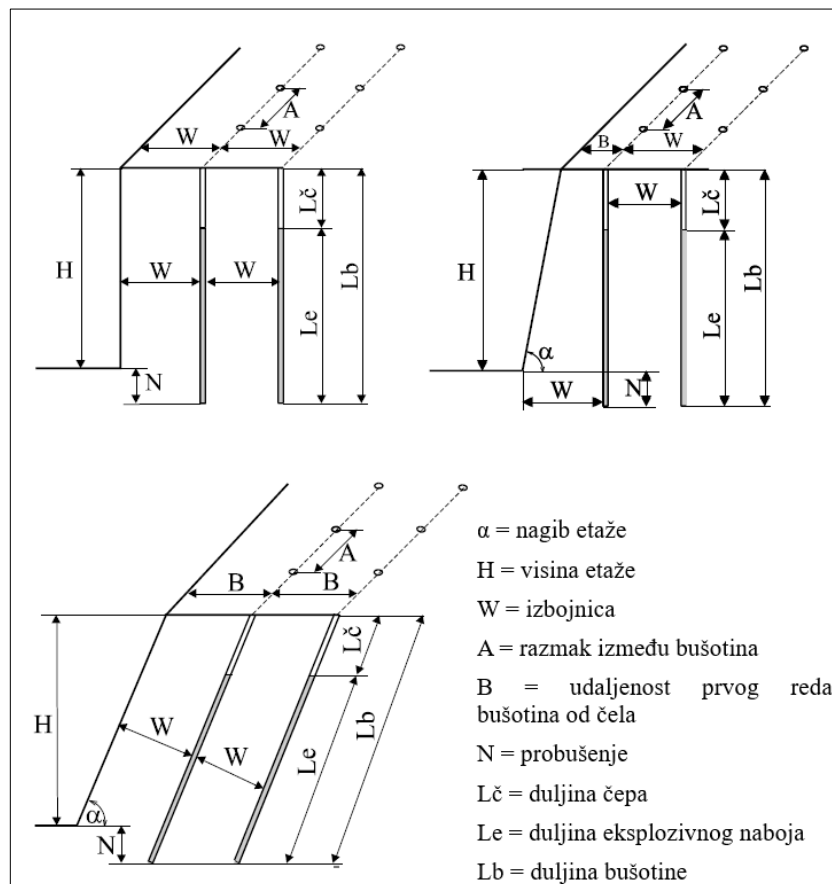
Promjer bušotine raste s visinom etaže. Za vertikalne bušotine i nagnuto čelo etaže, veličina izbojnice pri dnu bušotine prvog reda može postati prevelika kako se visina etaže povećava. U slučaju kada se na visokim etažama buše bušotine malog promjera, bušotine su najčešće izbušene pod kutom jednakim nagibu čela etaže, barem u prvom redu. Preciznost bušenja postaje zahtjevnija na višim etažama. Precizno poravnavanje bušotina potrebno je kod izvedbe završnih kosina i kontura kamenoloma te je u takvom slučaju maksimalna visina etaže obično ograničena na 8 do 10 m.



### 3.3. Izbojnica

Izbojnica predstavlja najkraću udaljenost od središta eksplozivnog naboja pri dnu minske bušotine do slobodne površine [13]. Slika 10 pobliže pokazuje veličine miniranja za različite primjere nagiba minskih bušotina i kosina, tj. lica etaže. Utjecaj izbojnice na fragmentaciju povezan je s mehanizmom loma stijene. Eksplozija je najučinkovitija kada se udarni val reflektira sa slobodnog čela tako da se stijena slomi i pomakne, kako bi se formirala dobro fragmentirana hrpa odminiranog materijala [13]. Ova učinkovitost u velikoj mjeri ovisi o optimalnoj veličini izbojnice.

Premala izbojnica će omogućiti da se radijalne pukotine prošire na slobodno čelo, što rezultira „bijegom“ eksplozivnih plinova s posljedičnim gubitkom učinkovitosti i stvaranjem problema s razbacivanjem komada stijene te zračnim udarom. Prevelika izbojnica, gdje se udarni val ne odbija od slobodne površine, ugušit će eksploziju što će rezultirati lošom fragmentacijom i općim gubitkom učinkovitosti. [13]



Slika 10. Veličine etažnog miniranja u odnosu na nagib minskih bušotina i slobodnog čela (prerađeno prema [15])

### 3.4. Promjer minske bušotine

Promjeri minskih bušotina na građevinskim projektima miniranja mogu se kretati od 40 mm za ručne bušilice do 100 mm za kompaktna bušača postrojenja na gusjenicama. Na površinskim kopovima i kamenolomima također se koriste udarno-rotacijske bušilice na hidraulični pogon, a bušotine se buše bradavičastim dlijetima. Promjeri bušotina su jednaki kao i kod građevinskih miniranja.

Na slici 11 može se vidjeti moderna hidraulička bušilica na gusjenicama s dubinskim čekićem koja se koristi u kamenolomu „Špica“ za bušenje minskih bušotina u promjeru od približno 90 mm. Persson [16] dokazuje da se troškovi bušenja i miniranja smanjuju kako se veličina bušotine povećava. To je zato što se volumen bušotine povećava s kvadratom promjera bušotine tako da se isti volumen eksploziva može ugraditi u manje bušotina. Takva ušteda na troškovima uzrokuje veći lom stijene zbog veće koncentracije eksploziva, što može rezultirati manje stabilnim kosinama i većim fragmentima stijena s kojima oprema za iskopavanje i utovar možda neće moći manipulirati.



Slika 11. Dubinska hidraulička bušilica na gusjenicama Epiroc D50 u kamenolomu „Špica“

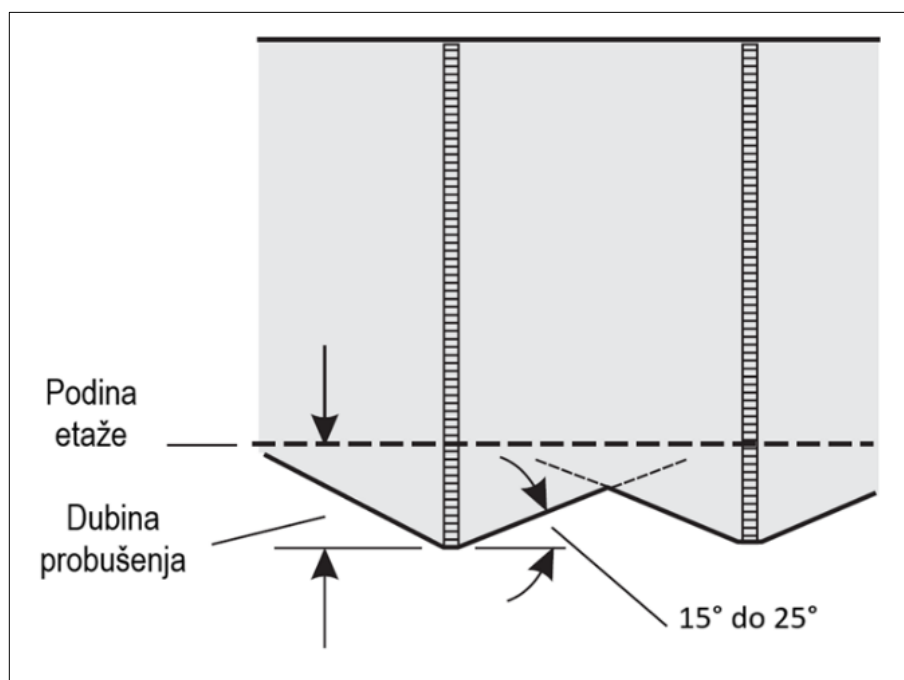
### 3.5. Utjecaj geološke građe stijenske mase na miniranje

Geološka građa i stupanj heterogenosti stijenske mase vrlo su važni u projektiranju miniranja. Odnosno, diskontinuiteti kao što su pukotine, plohe oslabljenja, rasjedi i mekani proslojci mogu prouzročiti da se energija eksploziva nekorisno rasprši, umjesto da izdrobi stijensku masu. U nekim slučajevima, diskontinuiteti mogu odrediti oblik odloma miniranjem, a utjecaj strukturne geologije često zasjenjuje utjecaj mehaničkih i fizikalnih svojstava stijene. [13]

Najbolja fragmentacija se obično postiže u slučajevima kada je čelo paralelno s dominantnim sustavom diskontinuiteta. Tlačna eksplozivna energija važna je u stijenama s velikim brojem pukotina. Plinovi nakon eksplozije ulaze u klinaste otvore i proširuju već postojeće pukotine. Stoga je ukupni stupanj fragmentacije obično kontroliran strukturnom geologijom. Na primjer, pukotine na malom razmaku i plohe oslabljenja rezultiraju povećanom fragmentacijom. Zadovoljavajući rezultati se postižu kada eksplozivni naboji daju dovoljnu energiju da odvoje stijensku masu od matične stijene i pretvore ju u rastresitu hrpu (masu) odminiranog materijala, bez razbacivanja komada stijene po eksploatacijskom polju. [13]

### 3.6. Dubina probušnja

Probušenje ili bušenje do dubine ispod donje razine etaže (slika 12), potrebno je kako bi se stijena razlomila u nožici gdje je najveće uklještenje [13]. Loša fragmentacija na ovoj razini stvorit će niz stijenskih pragova i nepravilnu podinu etaže (dno kosine), što će rezultirati visokim operativnim troškovima strojeva za utovar i transport. S druge strane, prekomjerno probušnje može rezultirati nepotrebnim bušenjem i troškovima miniranja.



Slika 12. Utjecaj probušenja na lom stijene pri dnu bušotine (prerađeno prema [13])

Nakon detonacije eksploziva, lom stijene obično ne doseže dno bušotine pa se spuštanjem baze glavnog eksplozivnog naboja u probušenje omogućuje formiranje djelovanja u obliku obrnutog stošca sa stranama nagnutim pod kutom od 15–25° prema horizontali, ovisno o čvrstoći i strukturi stijene (slika 12). [13]

Kod višerednog miniranja, lomni konusi se spajaju kako bi formirali ujednačen prijelaz od razlomljene u neporemećenu stijenu. Iskustvo je pokazalo da je dubina probušenja od 0,2 - 0,5 veličine izbojnice obično dovoljna za učinkovit iskop do nagiba kosine [13]. U slučaju formiranja završnih kosina i etaža, preporučljivo je eliminirati probušenje u zadnjim redovima kako bi se održala stabilnost etažnih ravnina.

### 3.7. Čepljenje

Korištenje čepa za popunjavanje gornjeg dijela minske bušotine iznad naboja (slika 13) zadržava eksplozivne plinove i usmjerava eksplozivnu energiju u stijensku masu. Materijal za čepljenje koji se sastoji od dobro graduiranog, čvrstog kamenog agregata učinkovitiji je od nabušenog materijala iz bušotine (sitne prašine) jer se prašina lakše izbacuje iz bušotine prilikom detonacije. Optimalna granulacija materijala za čepljenje raste s promjerom bušotine, a prosječna veličina čestica čepa trebala bi biti jednaka približno 5% od promjera minske bušotine. [13]

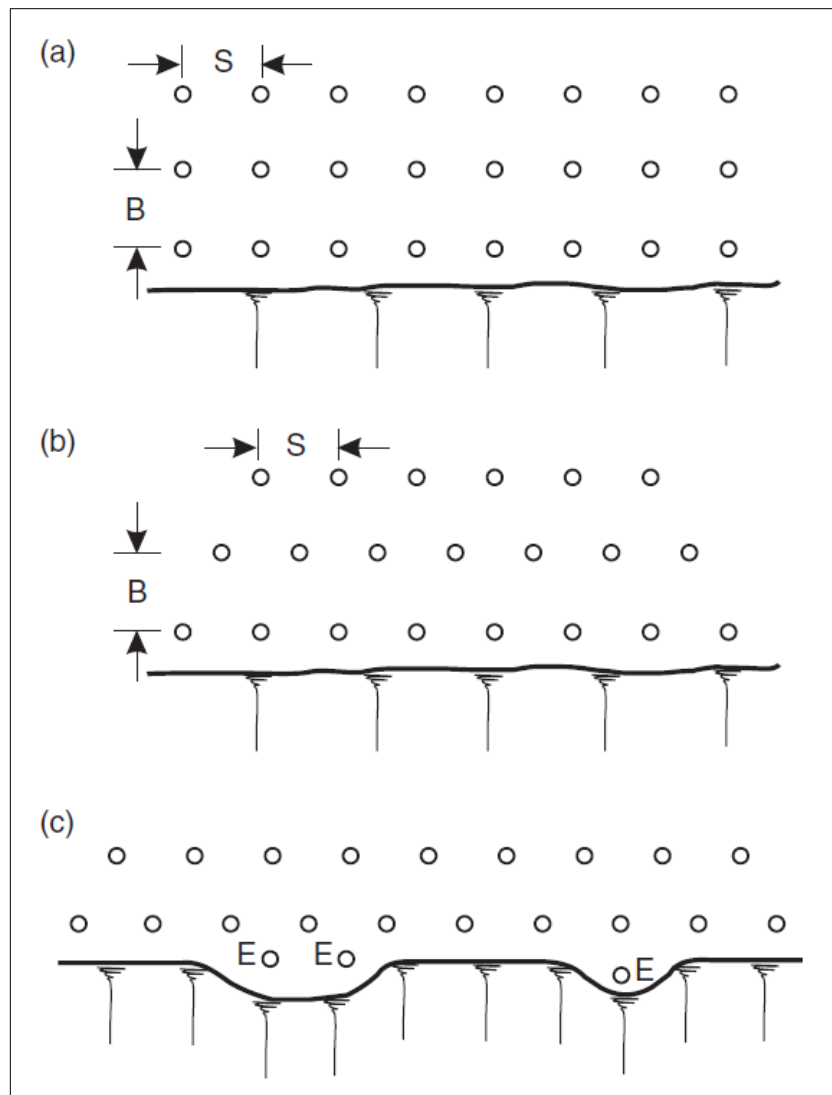
Prekratka duljina čepa omogućit će izlazak eksplozivnih plinova, stvarajući probleme s razbacivanjem komada stijena i zračnim udarom, smanjujući učinkovitost miniranja. Prevelika duljina čepa uzrokovat će lošu fragmentaciju stijene iznad stupca eksplozivnog punjenja. Uobičajena duljina čepa je oko 0,7 veličine izbojnice, što je dovoljno da spriječi prerano izbacivanje materijala čepa iz bušotine [13].



Slika 13. Čepljenje vertikalnih minskih bušotina u kamenolomu „Špica“

### 3.8. Redosljed detonacije bušotina

Prilikom proizvodnog miniranja u kamenolomu, koriste se dva osnovna rasporeda minskih bušotina, a to su kvadratni i trokutni (slika 14) [13].

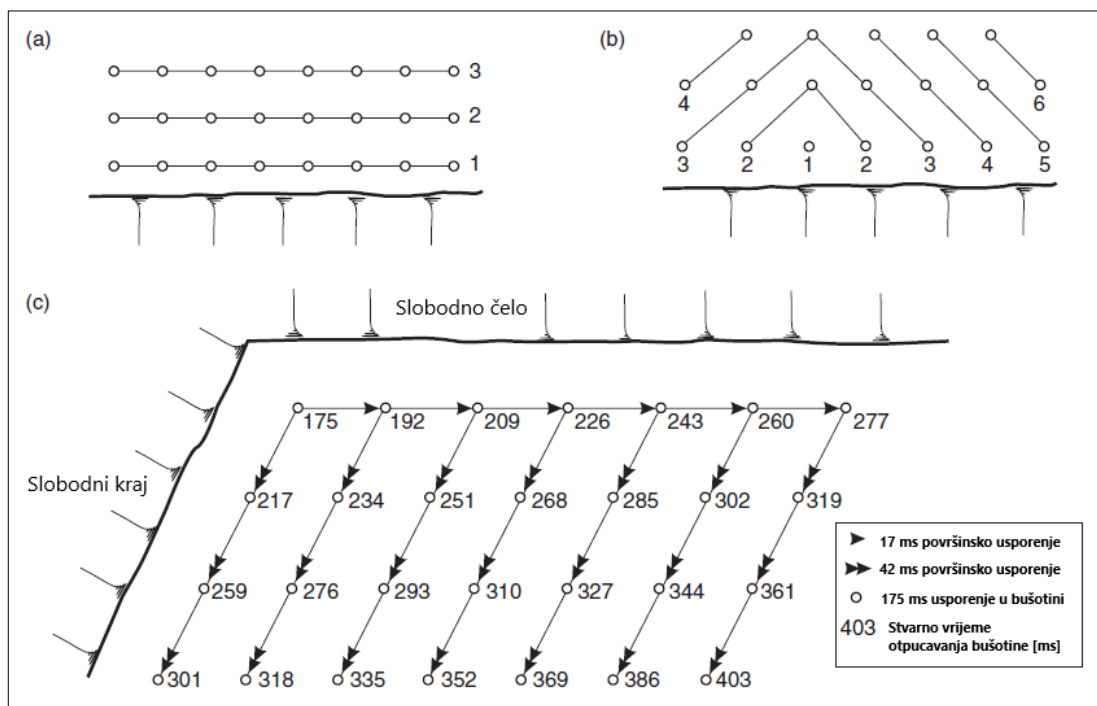


Slika 14. Raspored bušotina koji se koristi kod proizvodnih miniranja: (a) kvadratni raspored s omjerom izbojnica (B)/razmak između bušotina (S) 1:1; (b) trokutni raspored s omjerom izbojnica (B)/razmak između bušotina (S) 1:1,15; (c) pomoćne bušotine (E) za pomicanje mase u prednjem redu (prerađeno prema [13])



Minsko polje može imati preko 100 minskih bušotina koje ukupno sadrže nekoliko tisuća kilograma eksploziva. Trenutna detonacija ove količine eksploziva ne samo da bi proizvela vrlo loše fragmentiranu stijenu, već bi i oštetila stijenu u zidovima iskopa i stvorila velike oscilacije, tj. vibracije tla koje bi se prenijele do obližnjih građevina. Kako bi se izbjegla ova situacija, eksplozivni naboji se aktiviraju s vremenskim odmakom ili usporenjem kroz niz uzastopnih detonacija. Kada se prvi red odminira i odmakne od neodminirane stijenske mase, stvori se novo slobodno čelo ili slobodna površina. Zato je važno omogućiti vremenski period da se to novo čelo uspostavi prije aktivacije naboja sljedećeg reda.

Na slici 15 prikazani su primjeri redosljedna detonacije. Minske bušotine od reda do reda su paralelne sa slobodnim čelom, pri čemu se red koji je najbliži čelu detonira prvi u nizu (slika 15a). V zasjek, gdje su redovi pod kutom prema čelu, koristi se za otvaranje novog slobodnog čela te kod miniranja jako raspucale stijene kod koje vertikalne pukotine prelaze poprijeko etaže pod kutom u odnosu na čelo (slika 15b). U mnogim slučajevima rezultati miniranja mogu se poboljšati uvođenjem otpucavanja „bušotina po bušotina“ gdje se svaka bušotina u nizu inicira u jedinstveno vrijeme (slika 15c). [13]



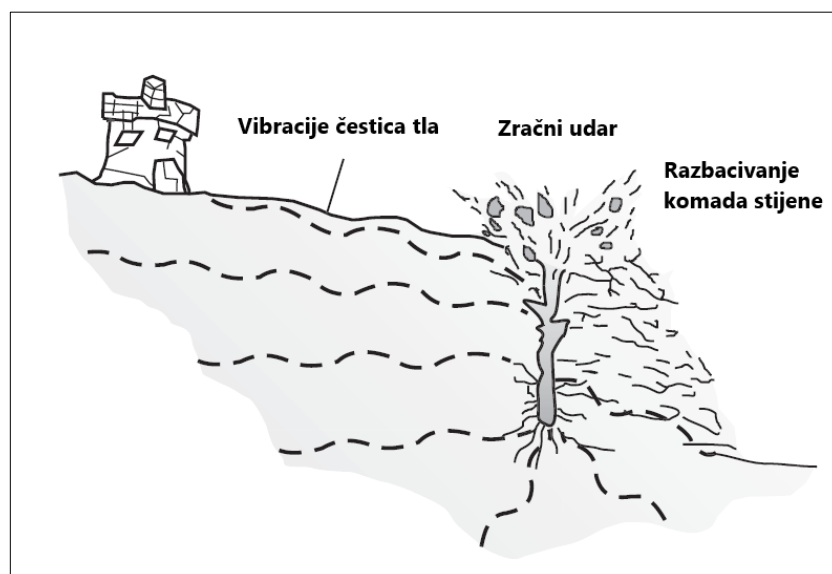
Slika 15. Redosljedni detonacije: (a) kvadratni redosljed detonacije "red po red"; (b) uglat "V" redosljed detonacije; (c) milisekundno otpucavanje minskih bušotina (preađeno prema [13])

#### 4. Nepoželjni utjecaji miniranja i njihova kontrola

Miniranja u naseljenim područjima često se moraju kontrolirati, kako bi se smanjio rizik od oštećenja građevina i uznemiravanja ljudi koji žive i rade u blizini. Miniranje može prouzročiti 3 vrste nepoželjnih utjecaja, a to su (slika 16):

- ✚ vibracije, tj. oscilacije tla, odnosno strukturna ili vizualna oštećenja koja su posljedica oscilacija uzrokovanih udarnim valom koji se širi radijalno od mjesta miniranja,
- ✚ razbacivanje komada stijene koji predstavljaju oštećenje od udara kamena izbačenog miniranjem, i
- ✚ zračni udar, tj. buka, odnosno šteta zbog nadtlaka koji nastaje u atmosferi [13].

Osnovni mehanizam koji uzrokuje štetu je višak energije udarnog vala nastalog detonacijom eksploziva, koji se širi iz neposrednog područja miniranja. Kako se udarni val širi, njegova energija se smanjuje, kako zbog energije utrošene na lomljenje i deformiranje stijene, tako i zbog toga što s vremenom zauzima sve veći volumen stijene. Na udaljenostima gdje nema dovoljno energije za razbijanje stijene, vibracije mogu biti dovoljno velike da oštete građevine.



Slika 16. Uzroci oštećenja od miniranja (prerađeno prema [13])

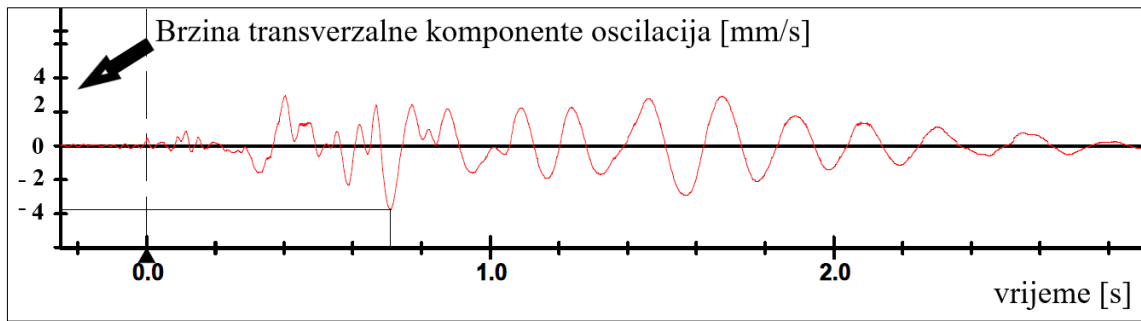


Nadalje, ako eksplozivni plinovi nisu adekvatno ograničeni (zatvoreni) izbojnicom, udarni val koji se oslobađa na čelu može generirati razbacivanje komada stijene i znatnu buku. Prilikom miniranja u naseljenom području potrebno je uzeti u obzir ne samo mogućnost štete u blizini miniranja, već i moguće uznemiravanje ljudi na većoj udaljenosti od mjesta miniranja. Uznemiravanje ljudi koji žive izvan zone potencijalne štete može dovesti do pritužbi i mogućih lažnih zahtjeva za nadoknadu šteta.

#### 4.1. Oštećenja zbog vibracija tla

Kada eksplozivno punjenje detonira u blizini slobodne površine, elastični odgovor stijene na udarni val je stvaranje dva prostorna vala i jednog površinskog vala. Brži od dva prostorna vala koji se šire unutar stijene je tlačni ili P-val, dok je sporiji posmični ili S-val. Površinski val ili R-val je sporiji od P ili S valova, a nazvan je po Rayleigh-u koji je dokazao njegovo postojanje. Što se tiče oštećenja od vibracija, R-val je najvažniji jer se širi duž površine tla, a u odnosu na P i S valove njegova amplituda opada sporije s prijednom udaljenosti. [13]

Tri najlakše mjerljiva svojstva seizmičkih valova su: pomak, brzina i ubrzanje. Brzina oscilacija tla može se najlakše povezati s oštećenjem konstrukcija i predstavlja najprihvatljiviji parametar za procjenu moguće štete. Površinski val naprezanja ili R-val ima tri komponente – longitudinalnu, transverzalnu i vertikalnu, a potrebno je izmjeriti sve tri komponente i koristiti najveću, tzv. vršnu brzinu čestica (Peak Particle Velocity, PPV) za procjenu potencijala oštećenja [13]. Na primjer, seizmogram na slici 17 prikazuje val transverzalne komponente i pripadajuću vršnu brzinu oscilacija tla koja iznosi 3,762 mm/s, zabilježena u 0,710-oj sekundi.



Slika 17. Seizmogram transverzalne komponente oscilacija tla [17]

Važno je razlikovati brzinu čestica vala naprezanja od brzine širenja vala. Kako val prolazi kroz tlo, svaka čestica stijene i tla podliježe eliptičnom gibanju, a brzina tog oscilirajućeg gibanja (moguća do 0,5 m/s) mjeri se u procjeni oštećenja od eksplozije [13]. Nasuprot tome, brzina širenja vala je u rasponu 300-6000 m/s, a to nema izravnog utjecaja na oštećenje [13]. Gibanje tla može se opisati kao sinusoidan val (slika 18) u kojem je varijacija brzine čestice ( $v$ ) s vremenom ( $t$ ) dana kao:

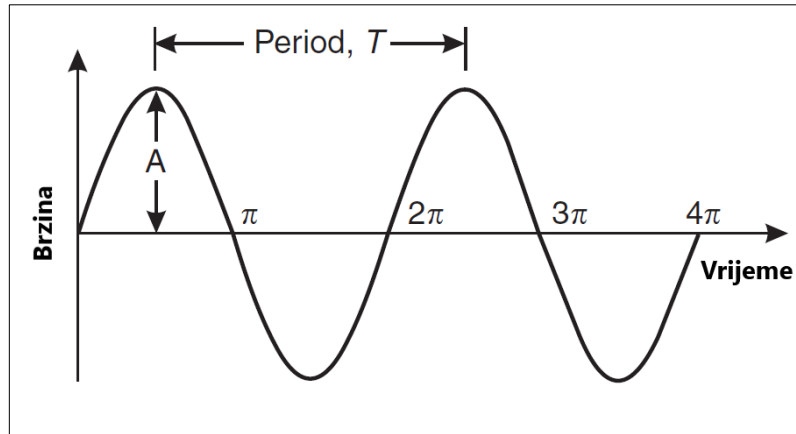
$$v = A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (\text{izraz 1})$$

gdje je  $A$  amplituda vala, a  $\omega$  kutna frekvencija [13]. Veličinu kutne frekvencije daje izraz:

$$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot \frac{1}{T} \quad (\text{izraz 2})$$

gdje je  $f$  frekvencija, a  $T$  je period (vrijeme za jedan potpuni ciklus) [13]. Valna duljina ( $L$ ) vibracije je udaljenost od vrha do vrha jednog punog ciklusa i povezana je s periodom ( $T$ ) i brzinom širenja ( $V$ ), što dokazuje sljedeći izraz:

$$L = V \cdot T \quad (\text{izraz 3})$$



Slika 18. Sinusoidno valno gibanje za tipične vibracije tla (prerađeno prema [13])

Ako je izmjerena brzina čestice ( $v$ ), tada se pomak ( $\delta$ ) može pronaći integracijom, a ubrzanje ( $a$ ) diferencijacijom na sljedeći način:

$$\delta = \frac{v}{\omega} \quad (\text{izraz 4})$$

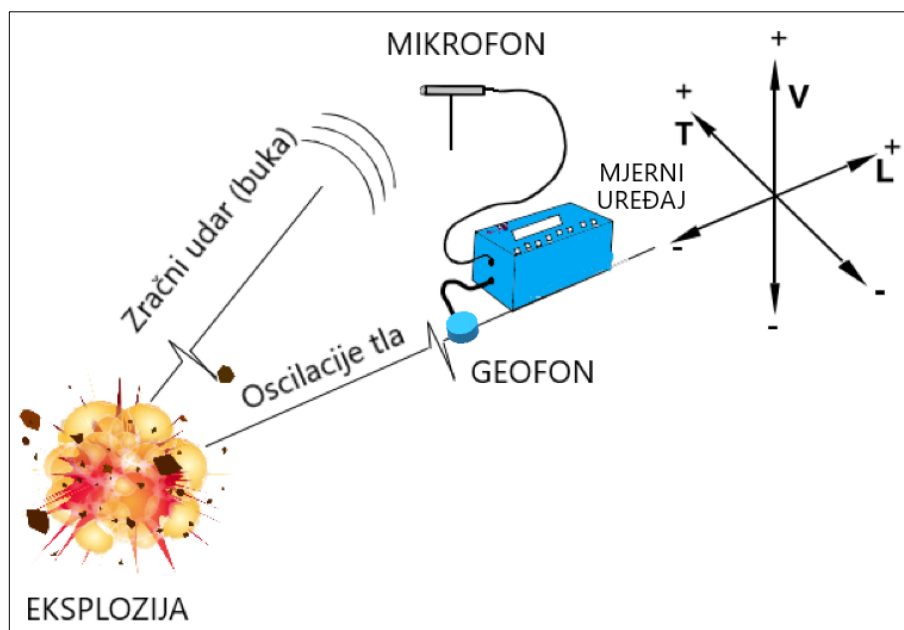
$$a = \omega \cdot v \quad (\text{izraz 5})$$

ili

$$a = \frac{\omega \cdot v}{9,81} \quad (\text{izraz 6})$$

#### 4.1.1. Mjerenje oscilacija tla

Instrumenti za mjerenje oscilacija tla nazivaju se seizmografi [2]. Kod opažanja miniranja koriste se posebno konstruirani seizmografi. Veličine koje se mjere i registriraju su pomak, brzina, ubrzanje i frekvencija u uzdužnoj, poprečnoj i okomitoj osi, te zračni udar. Seizmograf, odnosno mjerni sustav za miniranje (slika 19) sastoji se od mjernog uređaja, mikrofona i osjetila vibracija (trokomponentni geofon).



Slika 19. Shematski prikaz mjerenja zračnog udara i oscilacija tla

Rezultati se digitalno spremaju pa se podaci mogu preuzeti na računalo za pohranu i daljnju analizu. Mjerenje oscilacija tla uključuje postavljanje geofona na tlo blizu građevine od interesa ili na samoj građevini. Važno je da geofon bude pravilno postavljen na tlo ili konstrukcijski element građevine.

Kada su vertikalna ubrzanja manja od 0,2 g ( $g$  = ubrzanje slobodnog pada pri površini Zemlje), geofon se može postaviti na vodoravnu površinu bez usidrenja. Kada su maksimalna ubrzanja čestica između 0,2 g i 1,0 g, geofoni bi trebali biti potpuno ukopani u tlo ili čvrsto pričvršćeni na stijenu, asfalt ili beton prilikom opažanja [13]. Odgovarajuće metode pričvršćivanja geofona na ove površine uključuju dvostranu traku, epoksidnu smolu ili brzovezujući cement [13]. Ako su ove metode nezadovoljavajuće ili ako maksimalno ubrzanje čestica prelazi 1,0 g, tada su samo cement ili vijci prikladni za pričvršćivanje geofona na tvrdi površinu. Terećenje geofona vrećom pijeska, na primjer, nije učinkovito jer će se vreća pomicati za istu vrijednost kao i geofon. U svim slučajevima geofon treba biti horizontalan i poravnat u smjeru mjesta miniranja ili minskog polja.

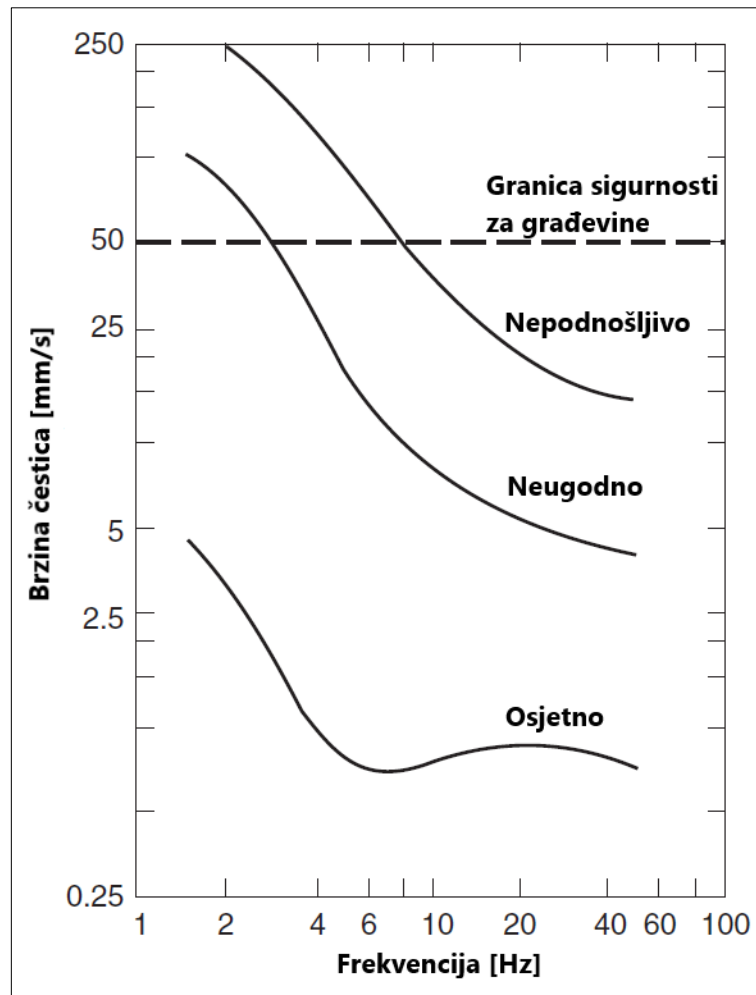
Do spomenutih podataka ubrzanja čestica tla dolazi se eksperimentalnim opažanjima, što osigurava kvalitetan odabir metode postavljanja geofona. Eksperimentalna opažanja također se provode pomoću seizmografa, odnosno mjernog sustava koji se sastoji od mjernog uređaja, mikrofona i trokomponentnog geofona.

#### 4.1.2. Utjecaj geologije na vibracije tla

Utvrđeno je da se vibracije od miniranja modificiraju (izmijene) ako je na mjestu opažanja prisutan površinski materijal (npr. sedimenti glina) iznad temeljne stijene. Općenito, vibracije mjerene na takvim površinskim materijalima imaju nižu frekvenciju i veću amplitudu od onih izmjerenih direktno na stijeni, na istoj udaljenosti od mjesta miniranja. Dakle, ako je brzina čestica približno jednaka na dva mjesta opažanja, niža frekvencija vibracija zbog prisutnosti površinskih sedimenata uzrokovat će snažniju psihofizičku reakciju, odnosno ljudi će snažnije osjetiti vibracije od miniranja. [13]

#### 4.1.3. Reakcija ljudi na vibracije tla

Ljudi su vrlo osjetljivi na vibracije i mogu osjetiti učinke miniranja i izvan zone potencijalnog oštećenja [13]. Dijagram na slici 20 prikazuje moguće ljudske reakcije na vibracije, na temelju odnosa između vršne brzine čestica i frekvencije tla. Vibracije niske frekvencije lakše se osjećaju od visokofrekventnih vibracija. Frekvencija vibracija od miniranja izmjerena direktno na stijeni obično je u rasponu od 50-200 Hz [13]. U prisutnosti već spomenutih površinskih materijala frekvencije mogu biti i manje od 10 Hz.



Slika 20. Reakcija ljudi na vibracije tla na temelju odnosa između brzine i frekvencije čestica tla (prerađeno prema [13])

#### 4.2. Kontrola oscilacija

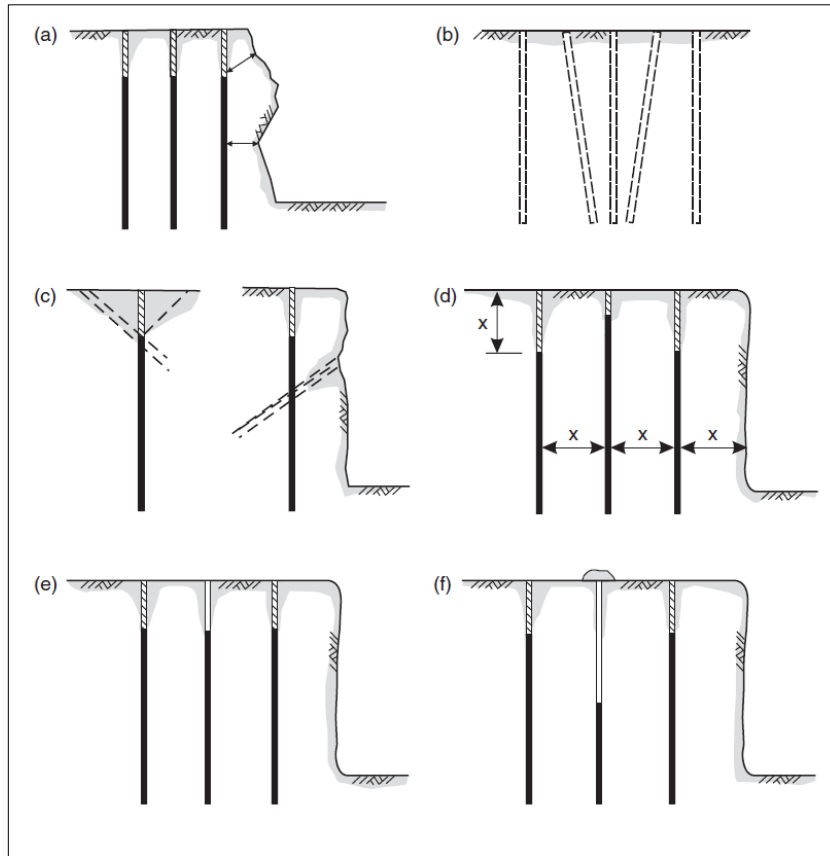
Veličina (magnituda) oscilacija tla zbog miniranja na određenom mjestu ovisi o udaljenosti od miniranja i količini eksploziva po stupnju paljenja [13]. Od faktora miniranja najvažniji su: korištenje milisekundnog usporenja i ispravan slijed detonacije tako da se svaka bušotina ili red minskih bušotina lomi prema slobodnom čelu [13]. Za kontrolu razina oscilacija na određenoj udaljenosti od miniranja, potrebno je ograničiti eksplozivno punjenje po stupnju paljenja.

Ako je količina eksploziva u jednoj bušotini veća od dopuštene, tada se moraju izbušiti ili kraće bušotine ili se može upotrijebiti razdjelno punjenje [13]. Kod razdjelnog punjenja, eksploziv se unutar bušotine odvaja materijalom za čepljenje. Svako razdjelno punjenje aktivira se zasebnim milisekundnim usporenjem.

#### 4.3. Kontrola razbacivanja komada stijene

Kada je izbojnica prednjeg reda neadekvatna ili kada je čepljenje prekratko da zadrži eksplozivne plinove, nastaje krater i stijena izbačena iz kratera može biti odbačena na znatnu udaljenost (slika 21).

Slika 21 također pokazuje da do razbacivanja komada stijene može doći zbog lošeg pozicioniranja bušilice i geoloških uvjeta koji omogućuju bijeg eksplozivnih plinova duž diskontinuiteta u stijenskoj masi [13]. U praksi je potpuna kontrola razbacivanja kamenja zahtjevna, čak i ako je miniranje projektirano s preporučenim dimenzijama čepa i izbojnice. Stoga, u područjima gdje postoji mogućnost oštećenja građevina, treba prekrivati minsko polje za suzbijanje razbacivanja komada stijene. Minska polja prekrivaju se obično gumama ili transportnim trakama koje su zajedno povezane [13]. Kada postoji mogućnost da bi pokrivka mogla biti pomaknuta eksplozivnom energijom, treba je opteretiti zemljom ili usidriti za tlo.

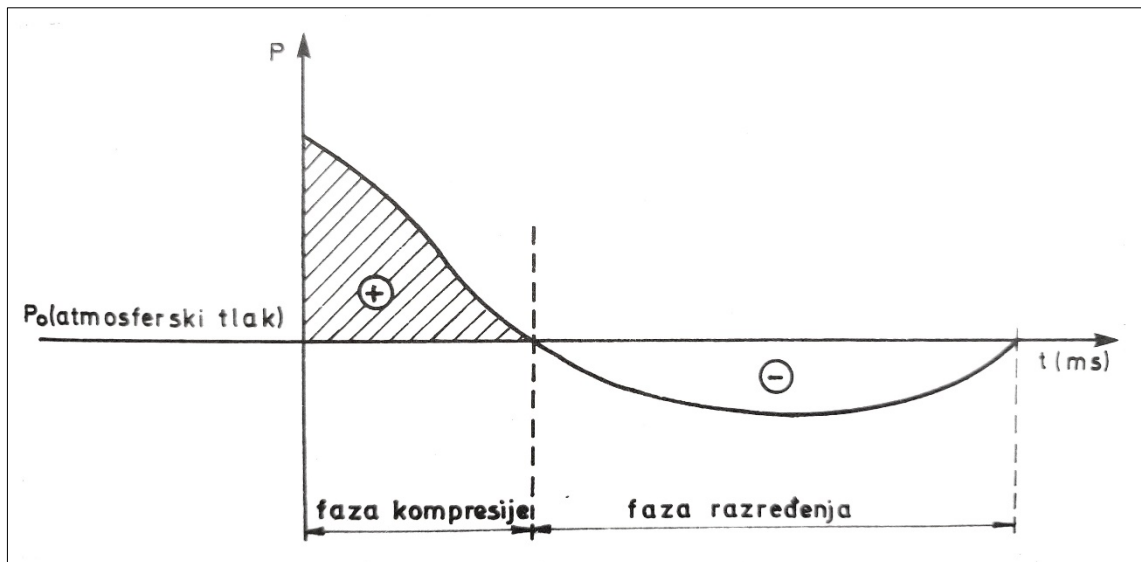


Slika 21. Uobičajeni uzroci razbacivanja komada stijene: (a) neadekvatna izbojnica prvog reda; (b) neusklađenost minskih bušotina; (c) pukotine koje odvedu plinove eksplozije do slobodne površine; (d) bušotine previše napunjene i prekratak čep; (e) minske bušotine bez izvedenog čepljenja; (f) blokirane (zarušene) bušotine, a ipak napunjene određenom količinom eksploziva (prerađeno prema [13])

#### 4.4. Kontrola zračnog udara

Pri detonaciji eksplozivnog naboja uslijed naglog povećanja tlaka plinova nastaje zračni udarni val, tj. zračni udar koji se definira kao predtlak (nadtlak) u atmosferi, odnosno tlak veći od normalnog atmosferskog tlaka na određenoj lokaciji [15]. Isti se može podijeliti na fazu kompresije (+), odnosno predtlaka i na fazu podtlaka (-), koje su prikazane na slici 22 [2]. U fazi kompresije zrak se kreće u pravcu širenja zračnog udarnog vala, a u fazi podtlaka u obrnutom pravcu [2].





Slika 22. Faze djelovanja zračnog udarnog vala [2]

Zračni udar može uzrokovati oštećenja građevina kao što je razbijanje prozora i izazvati nelagodu kod ljudi koji žive bliže izvoru detonacije eksplozivnog naboja. Čimbenici koji pridonose razvoju zračnog udara uključuju prenapunjene minske bušotine, loše čepljenje, nepokriven detonirajući štapin, izbijanje eksplozivnih plinova duž pukotina u stijeni koje se protežu do čela i korištenje neadekvatnih izbojnica koje dovode do stvaranja kratera. [13]

Na intenzitet zračnog udara utječu i atmosferske prilike tijekom miniranja. Idealni uvjeti s minimalnim učinkom zračnog udarnog vala su u slučaju kada temperatura pada s visinom, što znači da pada i brzina zvuka, te se zvučni valovi šire prema gore i time smanjuju svoju štetnu širinu (slika 23a). [3]

Ako temperatura raste s visinom, zvučni valovi se šire prema dolje te se na nekim mjestima pojavi iznenađujuće veliko djelovanje zračnog udara (slika 23b). U primjeru da se temperatura zraka mijenja, pada i raste s visinom (temperaturna inverzija), mogućnost fokusiranja udarnog vala je najveća, pa je kod takvih prilika najbolje odložiti miniranje (slika 23c). [3]

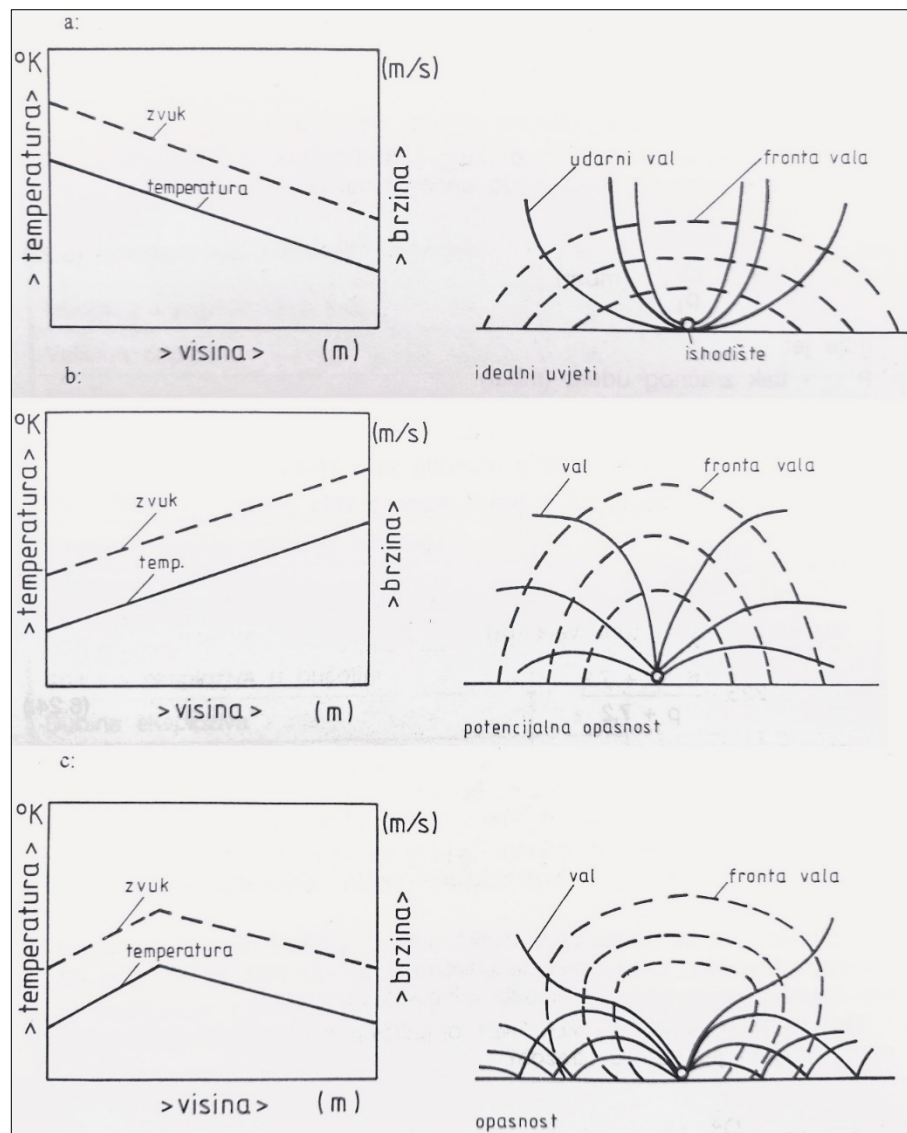
Zračni udar, odnosno buka, mjeri se u paskalima (Pa), milibarima (mbar) ili u decibelima (dB) koji predstavljaju standardnu jedinicu za jačinu buke [15]. Jedan milibar (mbar) iznosi 100 paskala (Pa), a veza između paskala (Pa) i decibela (dB) dana je izrazom:

$$dB = 20 \cdot \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad (\text{izraz 7})$$

dB = tlak u decibelima [dB]

P = tlak u paskalima [Pa]

$P_0$  = prag čujnosti =  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa



Slika 23. Uvjeti miniranja ovisni o temperaturi zraka: (a) idealni uvjeti; (b) potencijalna opasnost; (c) postoji opasnost pri miniranju [3]

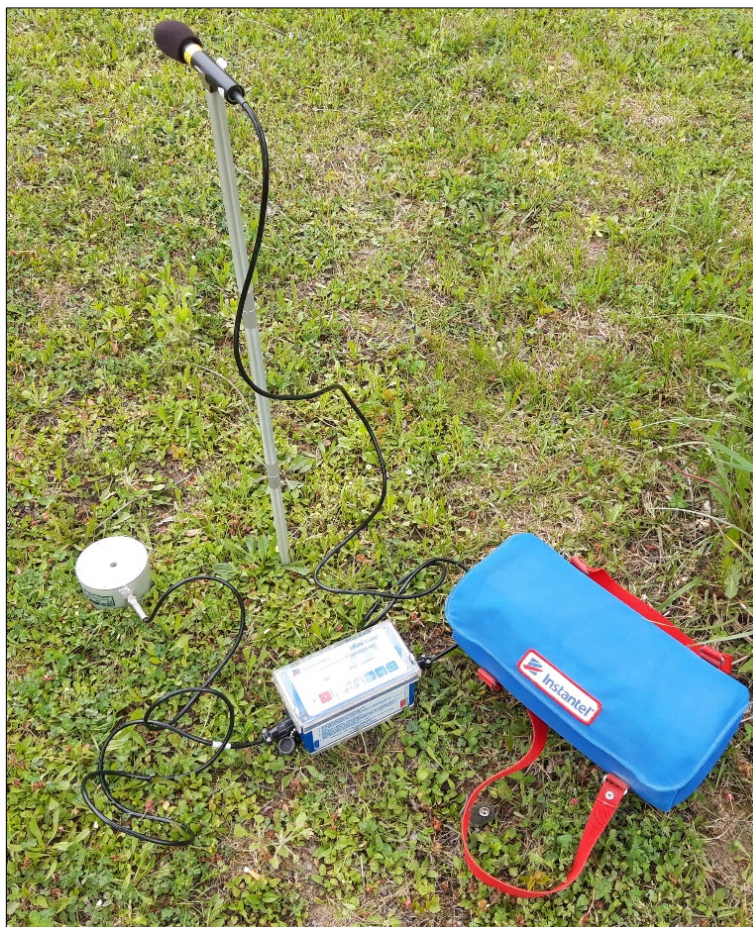
## 5. Primjer opažanja nepoželjnih utjecaja pri miniranju u kamenolomu i analiza rezultata

Za primjer opažanja nepoželjnih utjecaja tijekom miniranja korištena je Studija seizmičkih efekata miniranja na kamenolomu „Špica“ u Ljubešćici. Studija se temelji na mjerenim podacima prilikom proizvodnog miniranja 18.12.2019. godine, a mjerenje i izradu studije proveo je Geotehnički fakultet iz Varaždina. Izvedeno je terensko mjerenje seizmičkih efekata miniranja, odnosno brzine oscilacija tla i zračnog udara, tj. buke. Na temelju dobivenih rezultata izvršen je proračun dopuštenih količina eksploziva po stupnju paljenja. Navedena mjerenja i izračuni potrebni su kako bi se eksploatacija tehničko - građevnog kamena provodila bez štetnih posljedica po obližnje naselje.

### 5.1. Mjerenje oscilacija tla i zračnog udara

Mjerenja su izvedena pomoću digitalnih prijenosnih seizmografa „InstanTel Minimate Plus“ koji mjere pomak, akceleraciju, frekvenciju i brzinu oscilacija tla, te zračni udarni val. Mjerni sustav sastoji se od mjernog uređaja, osjetila (trokomponentni geofon) i mikrofona (slika 24).

Trokomponentni geofoni mogu se postaviti na tlo ili na građevinu te se samim time definira i mjesto opažanja koje obično bude uz građevine koje su najbliže izvoru eksplozije. U ovom radu korišteni su rezultati mjerenja geofona postavljenih na tlo, na ukupno četiri mjesta opažanja. Na svako mjesto opažanja postavljen je po jedan mjerni sustav, a dva mjesta opažanja bila su na istom pravcu i poblje jedan drugome u svrhu kvalitetnog određivanja koeficijenta prigušenja ( $n$ ) i koeficijenta svojstava stijene i načina miniranja ( $K$ ) [17].



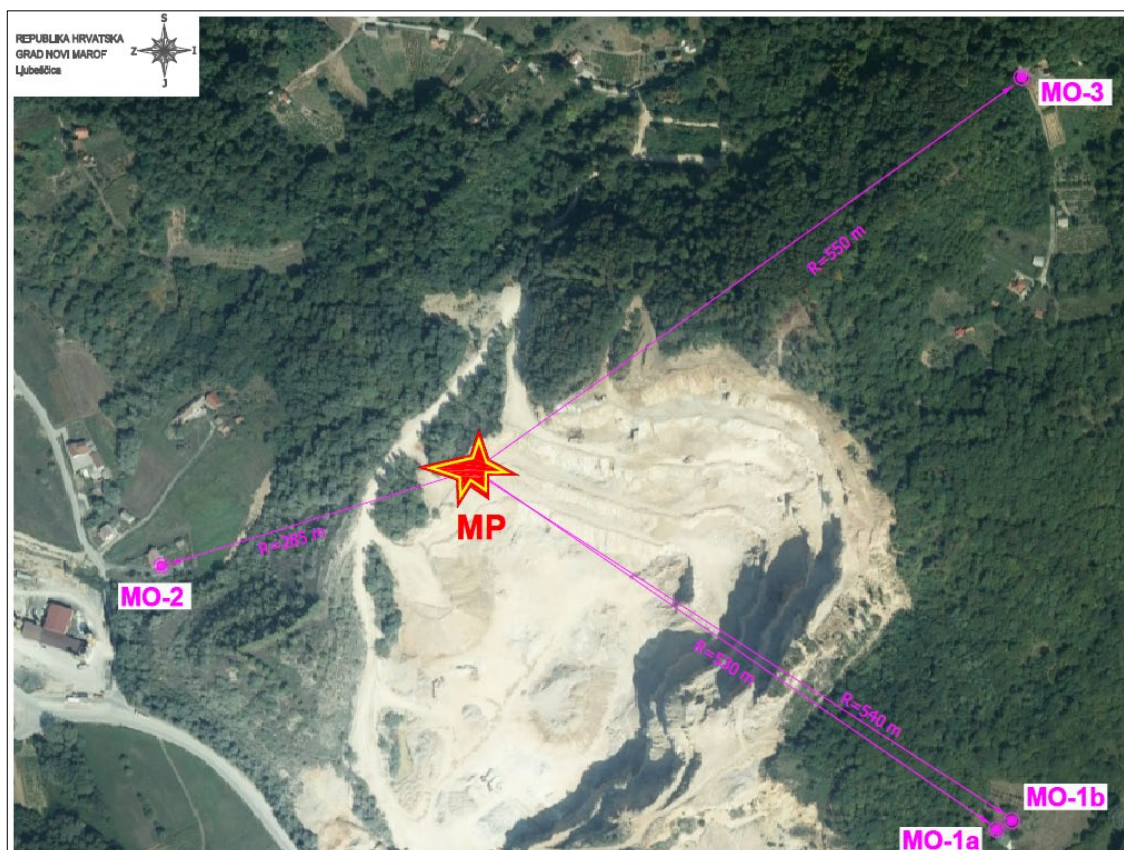
Slika 24. Primjer pravilno postavljenog trokomponentnog geofona, mikrofona i Instantel Mimate uređaja prilikom kontrolnog opažanja seizmičkih oscilacija nedaleko kamenoloma „Špica“ (snimljeno 2022. godine)

Minsko polje sadržalo je sedam vertikalnih i petnaest horizontalnih bušotina smještenih na trećoj etaži eksploatacijskog polja „Špica“ (slika 25). Kako bi se odredila udaljenost određenog mjesta opažanja od minskog polja korišten je ručni GPS uređaj i web stranica „Google Earth“ (slika 26). [17]





Slika 25. Eksploatacijsko polje „Špica“ (snimljeno 2022. god.)



Slika 26. Izmjerene udaljenosti od minskog polja (MP) do mjesta opažanja (MO) upotrebom web stranice „Google Earth“ [17]

Tablica 2. Izmjerene udaljenosti od minskog polja (MP) do mjesta opažanja (MO)

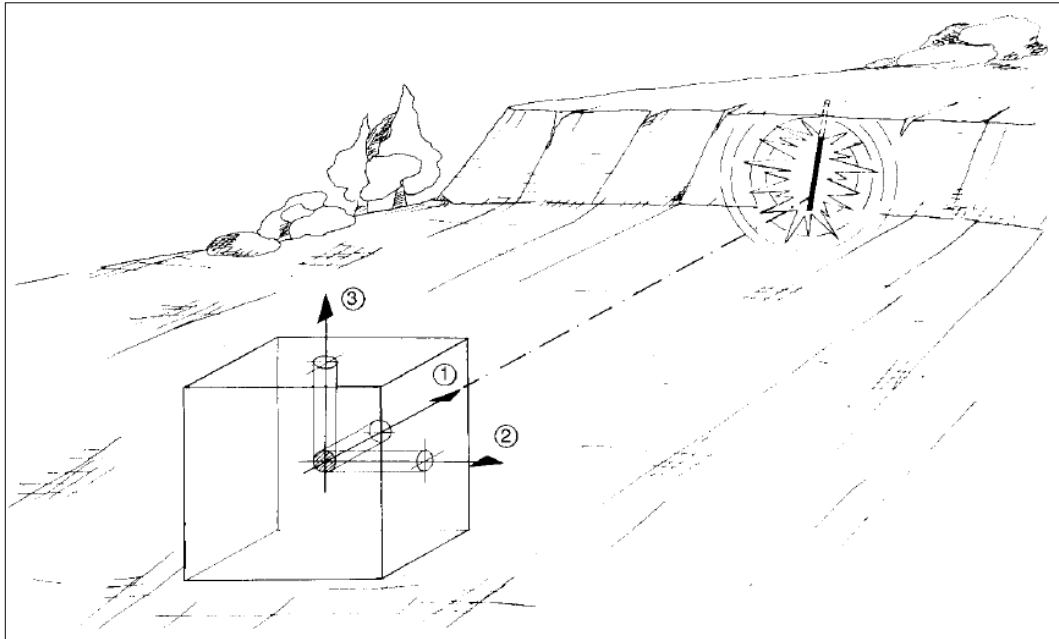
MP	R = 530 m	MO-1a
MP	R = 540 m	MO-1b
MP	R = 285 m	MO-2
MP	R = 550 m	MO-3

Trokomponentni geofon (slika 27) sadrži tri geofona, mehanički spojena u cjelinu, koji služe za registriranje brzine triju komponenata oscilacija, tj. vibracija tla (slika 28) [17]. Prvi geofon postavljen je u horizontalnu ravninu, u pravcu detonacije i registrira longitudinalnu komponentu oscilacija. Drugi geofon leži isto tako u horizontalnoj ravnini, okomito na prvi geofon i registrira transverzalnu komponentu oscilacija. Treći geofon nalazi se u vertikalnoj ravnini i registrira vertikalnu komponentu oscilacija.

Na slici 27 može se primijetiti da trokomponentni geofon stoji na šiljcima koji se lako montiraju u prilici kada se mjerenje vrši u tlu. Šiljke je potrebno utisnuti u tlo, a trokomponentni geofon ostaje na površini tla (slika 24).



Slika 27. Trokomponentni geofon

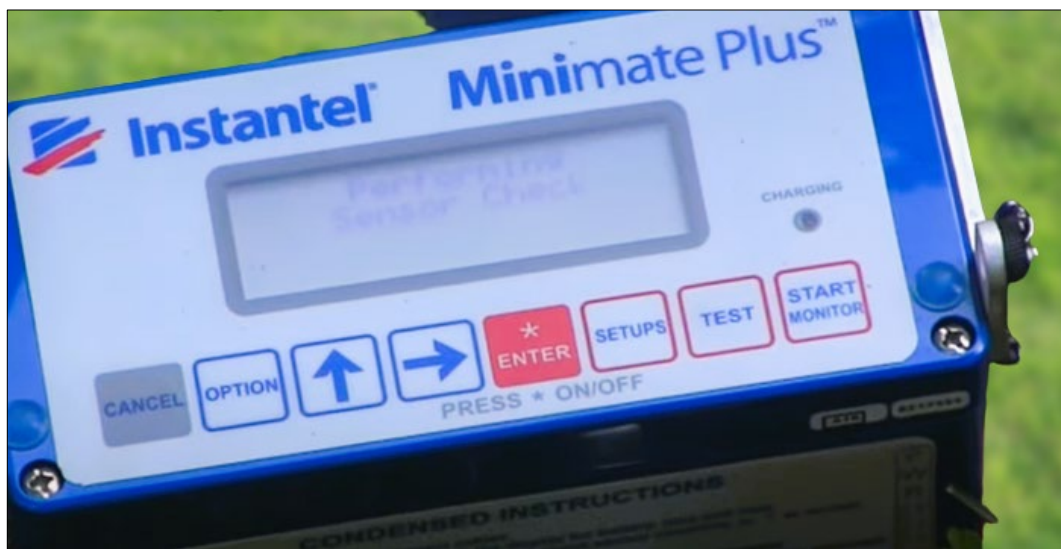


Slika 28. Shematski prikaz opažanja triju komponenta oscilacija tla: longitudinalne (1), transverzalne (2) i vertikalne (3) [15]

## 5.2. Postupak mjerenja oscilacija tla i zračnog udara

Postupak mjerenja započinje dolaskom na mjesto opažanja, barem 10 minuta prije detonacije eksplozivnog naboja. Prvo, potrebno je na mjesto opažanja iznijeti svu potrebnu opremu koja se obično nalazi u terenskoj torbi: Instantel uređaj, trokomponentni geofon, šiljci, mikrofoni, stalak mikrofona i dr. Na trokomponentni geofon zašarafuju se šiljci te se oni potpuno utiskuju u tlo, a trokomponentni geofon ostaje na površini tla i kablom se spaja na Instantel uređaj. Osim geofona, na mjerni uređaj potrebno je spojiti i mikrofoni. Stalac mikrofona lagano se utiskuje u tlo i na njega se stavlja mikrofoni. Geofon i mikrofoni potrebno je usmjeriti prema mitskom polju tako da glava mikrofona gleda prema mitskom polju, dok geofon na sebi ima oznaku (strelica) (desna strana slike 27) koju je potrebno usmjeriti prema mitskom polju.

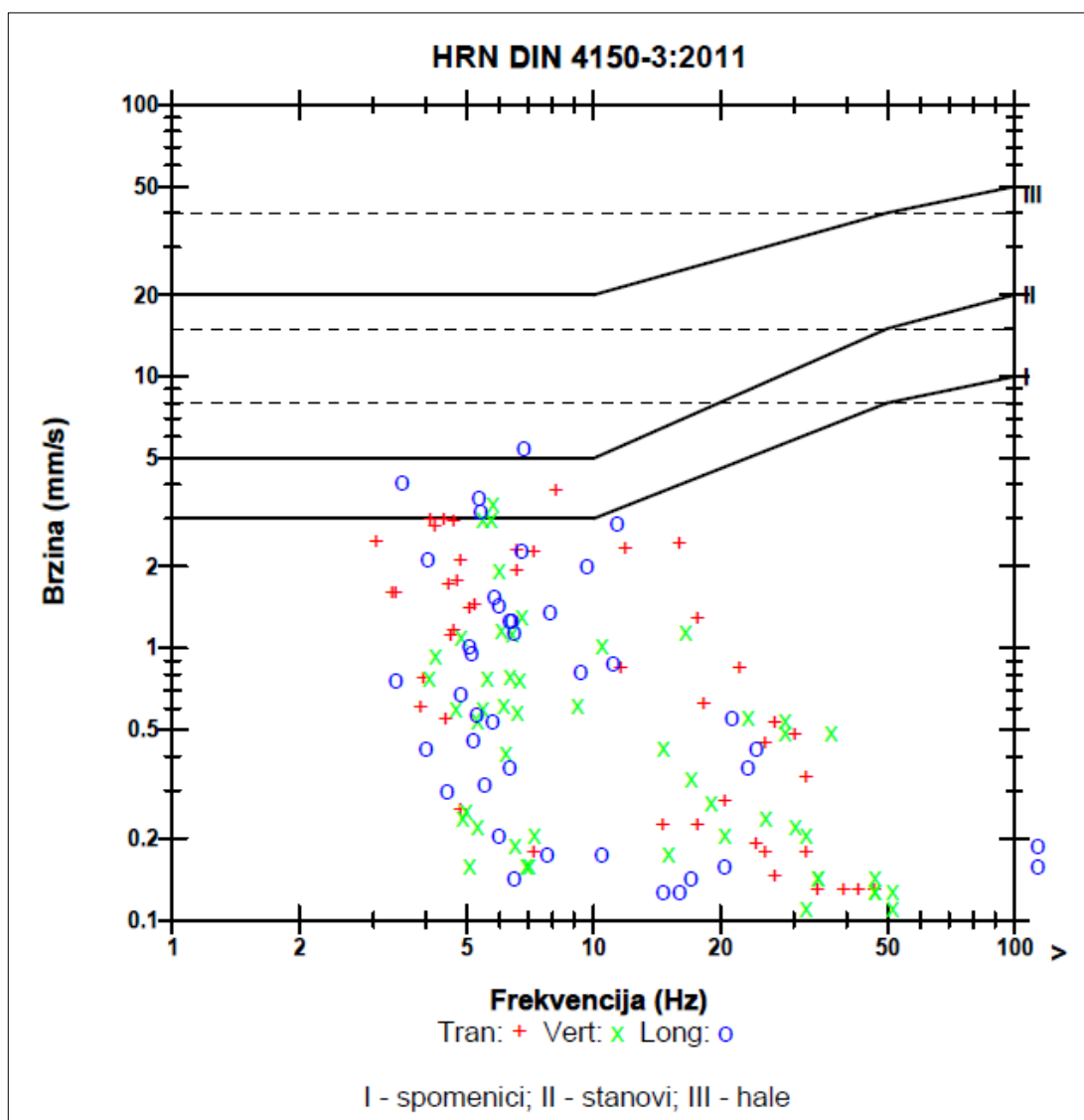
Nakon što se ispravno postave geofon i mikrofoni, potrebno je uključiti InstanTEL uređaj i provjeriti „ulazne kanale“ geofona i mikrofona, odnosno provesti provjeru senzora. Provjera senzora nam daje do znanja da li su spojni kabeli u dobrom stanju i u najboljem slučaju na monitoru će pisati da su svi kanali ispravni. Ako provjera senzora uspješno i pozitivno završi, pokreće se opažanje pritiskom na tipku „START MONITOR“ (slika 29) i uređaj prelazi u stanje opažanja, odnosno mjerenja. Nadalje, potrebno je pričekati da se provede otpucavanje minskog polja i da InstanTEL uređaj registrira veličine oscilacija tla.



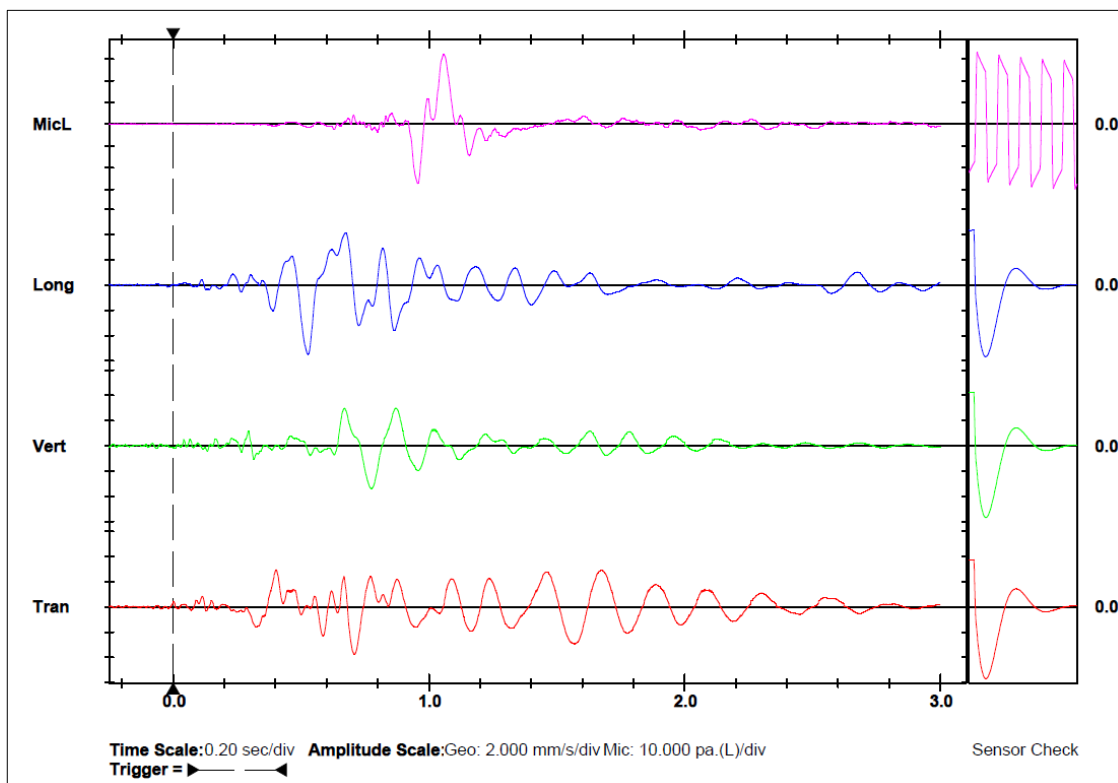
Slika 29. Mjerni uređaj InstanTEL Minimate Plus

Nakon izvršenog terenskog mjerenja, seizmograf, odnosno mjerni uređaj priključuje se kablom na računalo i programom „Blastware“ dolazi se do rezultata mjerenja (slike 30, 31 i 32). Uslijed seizmičkog poremećaja nastalog aktivacijom minskog polja, seizmograf registrira i digitalno bilježi nepravilne krivulje na seizmogramu (slika 31).





Slika 30. Brzina oscilacija tla pojedinih komponenta i pripadajuća frekvencija za MO-2 u usporedbi s dopuštenim brzinama oscilacija prema standardu HRN DIN 4150-3:2011 [17]



Slika 31. Zapis zračnog udarnog vala te seizmogrami longitudinalne, transverzalne i vertikalne komponente brzine oscilacija tla za MO-2 [17]

Na slici 32 prikazan je skup numeričkih rezultata mjerenja za mjesto opažanja MO-2, a neke od prikazanih vrijednosti parametara bit će korištene u daljnjim proračunima, u sklopu ovog rada.

InstanTEL				
<b>Date/Time</b>	Tran at 13:35:56 December 18, 2019			
<b>Trigger Source</b>	Geo: 0.300 mm/s			
<b>Range</b>	Geo: 31.75 mm/s			
<b>Record Time</b>	3.0 sec at 1024 sps			
<b>Job Number:</b>	1			
<b>Notes</b>				
Location: Ljubescica, MO-2				
Client: Kaming d.d.				
User Name: GFV				
General:				
<b>Microphone</b>	Linear Weighting			
<b>PSPL</b>	32.00 pa.(L) at 1.058 sec			
<b>ZC Freq</b>	4.1 Hz			
<b>Channel Test</b>	Passed (Freq = 20.1 Hz Amp = 548 mv )			
	<b>Tran</b>	<b>Vert</b>	<b>Long</b>	
<b>PPV</b>	3.762	3.397	5.493	mm/s
<b>ZC Freq</b>	8.1	5.8	6.8	Hz
<b>Time (Rel. to Trig)</b>	0.710	0.774	0.528	sec
<b>Peak Acceleration</b>	0.036	0.031	0.027	g
<b>Peak Displacement</b>	0.108	0.085	0.162	mm
<b>Sensor Check</b>	Passed	Passed	Passed	
<b>Frequency</b>	7.4	7.4	7.4	Hz
<b>Overswing Ratio</b>	4.0	4.0	4.3	
<b>Peak Vector Sum</b>	5.523 mm/s at 0.670 sec			

Slika 32. Numerički prikaz rezultata mjerenja za mjesto opažanja MO-2 [17]

### 5.3. Rezultantna brzina oscilacija tla

U slučaju miniranja u kamenolomima, intenzitet potresa najčešće se određuje prema skali S.V. Medvedeva [18]. Za to je potrebna rezultantna brzina oscilacija tla ( $V_R$ ) koja se računa zbrajanjem izmjerenih vršnih brzina pojedinih komponenata oscilacija (longitudinalne, transverzalne i vertikalne). Važno je napomenuti da se vršne brzine pojedinih komponenata oscilacija „uzimaju“ iz seizmograma u trenutku najvećeg poremećaja, odnosno kada amplituda longitudinalnog, transverzalnog i vertikalnog vala dosegne svoju maksimalnu vrijednost (slika 31).

Vršna brzina pojedine komponente oscilacija postiže svoju vrijednost u određenom i jedinstvenom trenutku (oznaka: Time (Rel. to Trig)) (slika 32). Vrijednosti vršnih brzina dostupne su pomoću programa „Blastware“ i označene su kraticom „PPV“ (slika 32). Slijedom toga, rezultantna brzina oscilacija tla ( $V_R$ ) određuje se prema izrazu:

$$V_R = \sqrt{V_T^2 + V_V^2 + V_L^2} \quad (\text{izraz 8})$$

$V_T$  = vršna brzina transverzalne komponente oscilacija

$V_V$  = vršna brzina vertikalne komponente oscilacija

$V_L$  = vršna brzina longitudinalne komponente oscilacija

Pomoću navedenog izraza 8, proveden je izračun rezultantne brzine oscilacija za sva četiri mjesta opažanja (tablica 3). Iz prikazanih rezultata vidljivo je da najveća vrijednost iznosi 0,552 cm/s na mjestu opažanja MO-2 koje je bilo udaljeno 285 metara od minskog polja. Takva vrijednost rezultantne brzine oscilacija pripada 3. stupnju potresa, a intenzitet nastalog umjetnog potresa mogu osjetiti osobe koje su prethodno obaviještene o miniranju (tablica 4).

Tablica 3. Vrijednost izmjerene vršne brzine pojedine komponente oscilacija i izračunata rezultantna brzina za određeno mjesto opažanja

Mjesto opažanja	PPV [mm/s]			$V_R$ [mm/s]	$V_R$ [cm/s]
	Tran	Vert	Long		
MO-1a	0,921	0,476	0,825	1,072	0,107
MO-1b	0,952	0,349	0,778	1,013	0,101
MO-2	3,762	3,397	5,493	5,523	0,552
MO-3	1,508	0,968	1,841	2,027	0,203

Tablica 4. Stupanj potresa u ovisnosti o rezultatnoj brzini oscilacija  
(skala S.V. Medvedeva) [18]

Stupanj potresa	Rezultantna brzina oscilacija [cm/s]	Karakteristika potresa
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 osobe koje su obaviještene o miniranju
4.	0.8 - 1.5	Oscilacije osjećaju mnogi ljudi i pojavljuje se zveckanje
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 lako uočljiva
7.	6.0 – 12.0	Pojavljaju se oštećenja na solidnijim zgradama; otpadaju komadi žbuke; nastaju tanke pukotine u zidovima i dimnjacima; počinje klizanje vodom zasićenog pjeskovitog tla; otpadanje nestabilnih blokova na strmim nagibima
8.	12 -24	Nastaju znatna oštećenja zgrada; pojavljaju se velike pukotine u zidovima i konstrukcijama; dimnjaci se ruše; odvaljuje se žbuka; počinje obrušavanje kosina uz rub tektonskih pukotina; u slabo vezanim stijenama nastaju trajne deformacije
9.	24 - 48	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 - 96	Nastaju velika razaranja i rušenja zgrada; pojavljaju se pukotine u čvrstim stijenama; zarušavanje rubnih dijelova u slabovezanim srednje čvrstim stijenama; zarušavanje jamskih hodnika
11. - 12.	> 96	Znatna obrušavanja kosina u čvrstim stijenama

## 5.4. Dopuštene brzine oscilacija tla

U hrvatskoj normi HRN DIN 4150-3:2011 definirane su dopuštene brzine oscilacija tla za određenu vrstu građevina (tablica 5) pa se ta norma koristi kod procjene utjecaja umjetnog potresa od miniranja na građevinu koja se nalazi na mjestu opažanja. Da bi adekvatno odredili dopuštene granične vrijednosti brzina oscilacija tla ( $v$ ) za određeno mjesto opažanja, potrebno je razmotriti izmjerene frekvencije oscilacija tla. Uvidom u izmjerene frekvencije na sva četiri mjesta opažanja (oznaka: ZC Freq), pri najvećim izmjerenim vršnim brzinama longitudinalne, transverzalne i vertikalne komponente oscilacija, zaključeno je za predmetni slučaj miniranja u Ljubešćici da su izmjerene vrijednosti dominantnih frekvencija uglavnom ispod vrijednosti 10 Hz. S obzirom na navedenu vrijednost dominantnih frekvencija i činjenicu da se eksploatacijsko polje „Špica“ nalazi nedaleko od naselja i obiteljskih kuća, za potrebe analiza iz ovog rada i daljnjih proračuna korištena je dopuštena granična vrijednost brzine oscilacija od 0,5 cm/s za 2. kategoriju građevina: stambene zgrade sa žbukanim zidovima.

Tablica 5. Dopuštene brzine oscilacija tla prema standardu HRN DIN 4150-3:2011 [19]

Frekvencija oscilacije	< 10 Hz	10 - 50 Hz	50 - 100 Hz
Kategorija građevina	Dopuštena brzina oscilacija, $v$ [cm/s]		
1. Kancelarije i tvorničke zgrade	2.0	2.0 - 4.0	4.0 - 5.0
2. Stambene zgrade sa žbukanim zidovima	0.5	0.5 - 1.5	1.5 - 2.0
3. Povijesne i druge zaštićene građevine	0.3	0.3 - 0.8	0.8 - 1.0
Za frekvencije > 100 Hz mogu se uzeti veće vrijednosti brzina oscilacija			

Naime, na temelju dobivenih rezultata i dijagrama vidljivo je da vršne brzine longitudinalne, transverzalne i vertikalne komponente oscilacija tla ne prelaze dopuštene granice standarda HRN DIN 4150, osim za mjesto opažanja MO-2 (slika 30) gdje zabilježena vršna brzina longitudinalne komponente oscilacija (5,493 mm/s) premašuje dopuštenu graničnu vrijednost prema standardu ( $v = 5 \text{ mm/s}$ ) za 0,493 mm/s (slika 32). Međutim, izvršenim pregledom stambenog objekta na MO-2 došlo se do zaključka da nije nastala nikakva šteta te da je miniranje izvedeno na pravilan način.

### 5.5. Intenzitet zračnog udara

Zračni udar, odnosno buka, izmjeren je pomoću mikrofona i registriran InstanTEL uređajem. Rezultati se mogu vidjeti za sva četiri mjesta opažanja u tablici 6. Na temelju prikazanih rezultata može se vidjeti da je najveći zračni udarni val zabilježen u mjestu opažanja MO1-a i iznosi 1,93 mbar. Intenzitet takvog udarnog vala, odnosno buke, dovodi do vibracija stakla i kuhinjskog posuđa te ne dolazi do nikakvog oštećenja. Međutim, takva buka može uznemiriti ljude ako prethodno nisu obaviješteni o miniranju (tablica 7).

Tablica 6. Maksimalne razine zračnog udara

Mjesto opažanja	Maksimalna razina zračnog udara (PSPL)		
	[Pa]	[mbar]	[dB]
MO-1a	193,00	1,93	139,69
MO-1b	9,75	0,10	113,76
MO-2	32,00	0,32	124,08
MO-3	148,30	1,48	137,40

Tablica 7. Opis štete pri određenom tlaku zračnog udara [17]

TLAK ZRAČNOG UDARNOG VALA			OPIS ŠTETE
[Pa]	[mbar]	[dB]	
$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-7}$	0,00	Prag čujnosti
14	0,14	116,90	Staklo i kuhinjsko posuđe vibrira
21	0,21	120,42	Uznemiravanje ljudi
210	2,1	140,42	Nema oštećenja
700	7	150,88	Lom slabo učvršćenog stakla
2100	21	160,42	Lom dobro učvršćenog prozorskog stakla
21000	210	180,42	Oštećenje na građevinama, pucanje bubne opne u uhu
100000	1000	193,98	Rušenje zidova od cigle, pukotine u betonu
200000	2000	200,00	Velike štete, rušenje betonskih konstrukcija, povrede unutarnjih organa kod ljudi
250000	2500	201,94	Smrtno stradavanje ljudi
400000	4000	206,02	

## 5.6. Proračun dopuštenih količina eksploziva po stupnju paljenja

Proračun dopuštenih količina eksploziva po stupnju paljenja provodi se s ciljem određivanja režima sigurnih, budućih miniranja [17]. U ovom radu, takav proračun bit će izveden na dva načina: prema izrazu Langeforsa [20] i pomoću izraza američkog ureda za rudarstvo (metoda USBM-a) [21].



Postupak proračuna temelji se na izmjerenim veličinama oscilacija tla u smjeru stambene kuće s pomoćnom zgradom, odnosno u smjeru mjesta opažanja MO-1a i MO-1b. Navedeni smjer analize i daljnjih proračuna izabran je zbog kvalitetnog određivanja koeficijenta transmisije (K), budući da se radi o dva mjerna instrumenta postavljena na istom pravcu od minskog polja. Proračun na osnovu dvije različite metode proveden je kako bi se uočile razlike u dopuštenim količinama eksploziva po stupnju paljenja, dobivene različitim izrazima i preporukama.

### 5.6.1. Metoda Langeforsa

Da bi što jednostavnije i kvalitetnije objasnili metodu Langeforsa, važno je reći da dopuštene količine eksploziva po stupnju paljenja ovise o koeficijentu svojstava stijene i načina miniranja (K), a taj koeficijent još se naziva i koeficijent transmisije (K) te se računa prema idućem izrazu:

$$K = \frac{V_R}{\left( \frac{R^{\frac{3}{4}}}{CW^{\frac{1}{2}}} \right)^{-1}} \quad (\text{izraz 9})$$

$V_R$  = resultantna brzina oscilacija tla [mm/s]

$R$  = udaljenost od minskog polja [m]

$CW$  = maksimalna količina eksploziva po stupnju paljenja [kg]

Maksimalna količina eksploziva po stupnju paljenja ( $CW$ ) uzeta je iz elaborata miniranja, u kojem stoji da je u pojedinu bušotinu stavljeno najviše 160 kg eksploziva koji miniranjem trenutno detonira [17].

Za vrijednosti udaljenosti od minskog polja (R) korišten je raspon od 200 – 710 metara. Na temelju vrijednosti rezultantne brzine oscilacija tla i radijusa, izračunati su koeficijenti transmisije (K) za oba mjesta opažanja (MO-1a i MO-1b).

Izračunata srednja vrijednost koeficijenta transmisije (K) oba mjesta opažanja iznosila je 10,03. Međutim, na stranu sigurnosti, iskustveno je usvojena vrijednost  $K = 35$ . Cilj takvog postupka je dobivanje što manjih dopuštenih količina eksploziva po stupnju paljenja.

Jednom kada se usvoji koeficijent transmisije (K), prelazi se na proračun izrazom Langeforsa koji definira dopuštene količine eksploziva po stupnju paljenja (Q):

$$Q = \frac{v^2 \cdot R^{\frac{3}{2}}}{K^2}$$

(izraz 10)

$v$  = dopuštena brzina oscilacija tla [mm/s]

$R$  = udaljenost od minskog polja [m]

$K$  = koeficijent transmisije

Tablica 8 prikazuje dobivene rezultate provedenog izračuna dopuštenih količina eksploziva po stupnju paljenja (Q).

Tablica 8. Dopuštene količine eksploziva u odnosu na udaljenosti stambenih objekata od minskog polja (izraz Langeforsa)

Udaljenost stambenog objekta od minskog polja, R [m]	Dopuštena količina eksploziva po stupnju paljenja, Q [kg]		Udaljenost stambenog objekta od minskog polja, R [m]
	Langefors		
200	57,72	201,34	460
210	62,11	207,95	470
220	66,59	214,62	480
230	71,19	221,36	490
240	75,88	228,17	500
250	80,67	235,05	510
260	85,56	242,00	520
270	90,54	249,01	530
280	95,62	256,09	540
290	100,79	263,24	550
300	106,04	270,45	560
310	111,39	277,73	570
320	116,82	285,07	580
330	122,34	292,47	590
340	127,94	299,94	600
350	133,63	307,47	610
360	139,40	315,06	620
370	145,25	322,71	630
380	151,17	330,43	640
390	157,18	338,20	650
400	163,27	346,03	660
410	169,43	353,93	670
420	175,66	361,88	680
430	181,97	369,89	690
440	188,36	377,96	700
450	194,82	386,09	710

### 5.6.2. Metoda USBM-a

Prema metodi USBM-a (američkog ureda za rudarstvo), koeficijent transmisije (K) određuje se izrazom 11:

$$K = \frac{V_{R1}}{\left(\frac{R_1}{CW^{\frac{1}{2}}}\right)^{-n}} = \frac{V_{R2}}{\left(\frac{R_2}{CW^{\frac{1}{2}}}\right)^{-n}} \quad (\text{izraz 11})$$

$V_{R1}$  = rezultatna brzina oscilacija na mjestu opažanja MO1-a [cm/s]

$V_{R2}$  = rezultatna brzina oscilacija na mjestu opažanja MO1-b [cm/s]

$R_1$  = udaljenost od minskog polja do mjesta opažanja MO-1a [m]

$R_2$  = udaljenost od minskog polja do mjesta opažanja MO-1b [m]

$CW$  = maksimalna količina eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja [kg]

$n$  = koeficijent prigušenja

Vrijednost koeficijenta prigušenja ( $n$ ) unaprijed je određena USBM metodom i iznosi 1,6. Uvrštavanjem odgovarajućih vrijednosti dobivena su dva različita koeficijenta transmisije (K), za svako mjesto opažanja po jedan. Na temelju tih vrijednosti dobivena je srednja vrijednost koeficijenta transmisije (K) koja iznosi 52,05. Ista ta vrijednost nije korištena u daljem proračunu za dopuštene količine eksploziva prema stupnju paljenja (Q), već je iskustveno usvojena vrijednost 92,86, kako bi se dobile što manje dopuštene količine eksploziva. Navedena vrijednost uvrštena je u izraz 12, a dobiveni rezultati proračuna prema metodi USBM-a mogu se vidjeti u tablici 9.

$$Q = \left( \left( \frac{v}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot R \right)^2 \quad (\text{izraz 12})$$

$Q$  = dopuštena količina eksploziva po stupnju paljenja [kg]

$v$  = dopuštena brzina oscilacija [cm/s]

K = koeficijent transmisije

n = koeficijent prigušenja

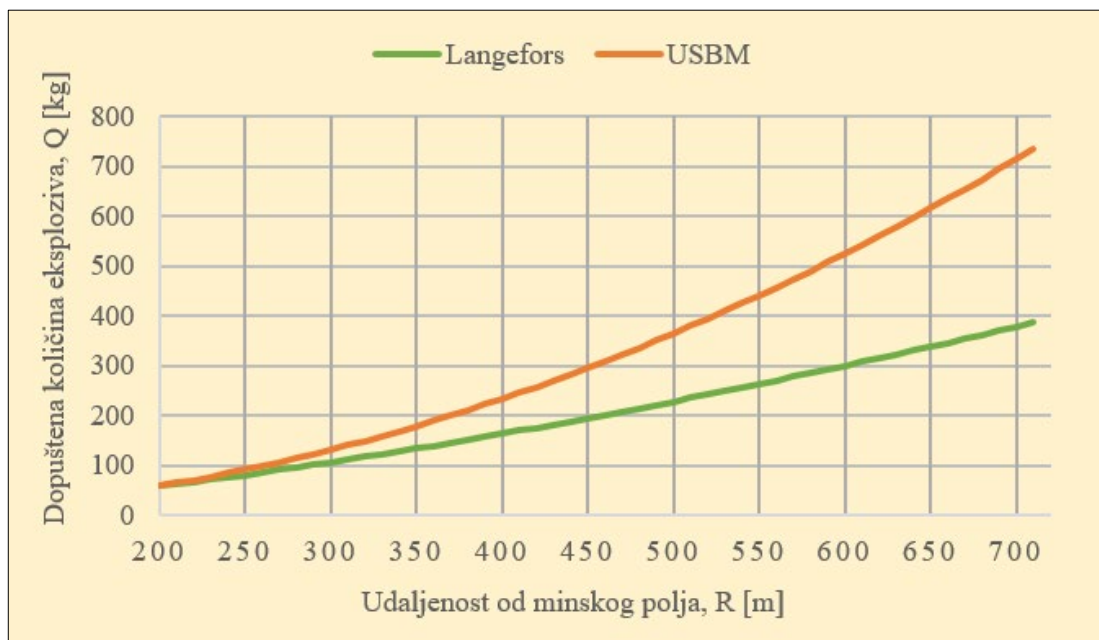
R = udaljenost od minskog polja [m]

Tablica 9. Dopuštene količine eksploziva u odnosu na udaljenosti stambenih objekata od minskog polja (izraz USBM-a)

Udaljenost stambenog objekta od minskog polja, R [m]	Dopuštena količina eksploziva po stupnju paljenja, Q [kg]		Udaljenost stambenog objekta od minskog polja, R [m]
	USBM		
200	58,34	308,63	460
210	64,32	322,20	470
220	70,59	336,05	480
230	77,16	350,20	490
240	84,01	364,64	500
250	91,16	379,37	510
260	98,60	394,40	520
270	106,33	409,71	530
280	114,35	425,32	540
290	122,67	441,22	550
300	131,27	457,41	560
310	140,17	473,89	570
320	149,36	490,66	580
330	158,84	507,73	590
340	168,61	525,08	600
350	178,67	542,73	610
360	189,03	560,67	620
370	199,68	578,91	630
380	210,62	597,43	640
390	221,85	616,24	650
400	233,37	635,35	660
410	245,19	654,75	670
420	257,29	674,44	680
430	269,69	694,42	690
440	282,38	714,70	700
450	295,36	735,26	710

### 5.6.3. Usporedba rezultata dopuštenih količina eksploziva

Pregledom dijagrama na slici 33, može se vidjeti da metoda Langeforsa daje manje vrijednosti dopuštenih količina eksploziva po stupnju paljenja u odnosu na metodu USBM-a. Zato se preporučuje određivanje dopuštenih količina eksploziva po stupnju paljenja, izračunatih prema izrazu Langeforsa, budući da on daje manje vrijednosti količina eksploziva u odnosu na metodu USBM-a. Isto tako, preporuka je za svako buduće miniranje provoditi instrumentalno opažanje oscilacija tla kako ne bi došlo do pojave štetnog utjecaja miniranja na obližnje naselje i obiteljske kuće (stambene objekte).



Slika 33. Dijagram dopuštenih količina eksploziva u ovisnosti o udaljenosti stambenih objekata od minskog polja

## 6. Zaključak

Tehnologija otkopavanja stijenske mase miniranjem jedina je primjenjiva tehnologija otkopavanja u čvrstim i vrlo čvrstim, blokovitim stijenama. Miniranje kao postupak razaranja i drobljenja stijenske mase energijom eksploziva, sa sobom donosi mnoge nepoželjne utjecaje na okoliš. Oscilacije tla, razbacivanje komada stijene i zračni udar, odnosno buka, predstavnici su najznačajnijih nepoželjnih utjecaja. Zato je prije svakog otpucavanja minskog polja u kamenolomu potrebno postaviti mjerni seizmografski sustav kod najbližih građevina u svrhu kontrolnih opažanja veličina oscilacija tla i zračnog udara.

Analizom rezultata, između ostaloga, uspoređuju se izmjerene vršne brzine oscilacija tla s dopuštenim brzinama za određenu kategoriju građevina prema usvojenom standardu ili normi. Na osnovu rezultantne brzine oscilacija određuje se intenzitet umjetno nastalog potresa. Intenzitet zračnog udara uspoređuje se s iskustvenim tablicama koje sadrže opis moguće nastale štete za svaku određenu razinu izmjerenih vrijednosti.

Provedenom analizom može se ustanoviti postojanost nepoželjnih utjecaja miniranja, kao npr. previsokog stupnja potresa. Isto tako, promatrano miniranje može uzrokovati razbacivanje komada stijene na veće udaljenosti od minskog polja i prevelike brzine oscilacija tla u odnosu na standard, a izmjereni intenzitet zračnog udara može dovesti do uznemiravanja ljudi. Ako se provedenom analizom ustanovi postojanost barem jednog spomenutog nepoželjnog utjecaja, potrebno je modificirati veličine etažnog miniranja i/ili provesti proračun dopuštenih količina eksploziva po stupnju paljenja što ujedno predstavlja i najbolji način kontrole nepoželjnih utjecaja na okoliš.

Ovim istraživanjem pokazalo se da instrumentalna opažanja uz upotrebu metode smanjivanja količine eksploziva po stupnju paljenja, rezultiraju efikasnom kontrolom nepoželjnih efekata miniranja.

## 7. Literatura

- [1] Jug, J. Model za procjenu primjenjivosti tehnologija otkopavanja u odnosu na značajke stijenske mase. Doktorski rad. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Zagreb, 2020. Dostupno na: <https://dabar.srce.hr/en/islandora/object/rgn%3A1238>. Datum pristupa: 27.06.2022.
- [2] Krsnik, J. Miniranje. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Zagreb, 1989.
- [3] Božić, B. Miniranje u rudarstvu, graditeljstvu i geotehnici. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet. Varaždin, 1998.
- [4] Dobrilović, M. i Bohanek, V. (2013). Utjecaj miniranja u cestogradnji na okolne prometnice. Dani prometnica 2013 – Mjerenja, ispitivanja i monitoring na prometnicama. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 313-347.
- [5] Ozkahraman, H. T. (2008). Breakage Mechanisms and an Encouraging Correlation Between the Bond Parameters and the Friability Value. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 153-159.
- [6] Dessureault, S. (2004). Rock excavation course notes: spring 2003. University of Arizona, Mining and geological engineering.
- [7] Bhandari, S. (1997). *Engineering Rock Blasting Operations*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- [8] Hustrulid, M.K. McCarter and D.J.A. van Zyl, eds. *Slope Stability in Surface Mining*. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgical and Exploration (SME), 59–70.
- [9] Djordjevic, N. (1999). Two-component of blast fragmentation. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast 1999*, South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, South Africa. p. 213–219.



- [10] Kanchibotla, S.S., Valery, W. and Morrell, S. (1999). Modelling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding. Proceedings of Explo'99 - A Conference on Rock Breaking. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Kalgoorlie, Australia, 137–44.
- [11] Li Chun-rui, Kang Li-jun, Qi Qing-xing, Mao De-bing, Liu Quan-ming and Xu Gang (2009). The Numerical Analysis of Borehole Blasting and Application in Coal Mine Roof Weaken. The 6th International Conference on Mining Science & Technology, Procedia Earth and Planetary Science 1, 451-459, Beijing, China.
- [12] Škrlec, V., Dobrilović, M. i Bohanek, V. (2014). THEORIES OF ROCK BREAKAGE WITH EXPLOSIVES. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 29 (1), 68-68.
- [13] WYLLIE, Duncan C., MAH, Chris. Rock slope engineering. CRC Press, 2004.
- [14] EKSPLO-PROMET d.o.o., 2022. Dostupno na: <http://eksplo-promet.hr/wp-content/uploads/2014/12/6.pdf>. Datum pristupa: 25.06.2022.
- [15] Savić, M. Miniranje na površinskim kopovima. Institut za bakar Bor, 2000. Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/407458074/Miniranje-na-povrsinskim-kopovima-pdf> Datum pristupa: 26.06.2022.
- [16] Persson, P. A. (1975) Bench drilling—an important first step in the rock fragmentation process. Atlas Copco Bench Drilling Symposium, Stockholm.
- [17] Strelec, S., Jug, J., Filipović, A. Studija seizmičkih efekata miniranja na kamenolomu „Špica“ u Ljubešćici (prilikom proizvodnog miniranja 18.12.2019.). Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet. Varaždin, 2020.
- [18] Medvedev, S.V. (1962) Engineering Seismology. Akademia Nauk Press, Moscow.
- [19] Strelec, S. Podpovršinski istražni radovi. Interna skripta. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet. Varaždin, 2011. Dostupno na: <https://dokumen.tips/download/link/geofizickaistraživanja>. Datum pristupa: 26.06.2022.

[20] Langefors, U.; Kihlstrom, B. Modern Technique of Rock Blasting. Published by John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1963

[21] Nicholls, H.R., Charles, F.J., Duvall, W.I. (1971): Blasting vibrations and their effects on structures. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Washington, D.C., p. 105.

#### WEB IZVORI:

[1] Jug, J. Model za procjenu primjenjivosti tehnologija otkopavanja u odnosu na značajke stijenske mase. Doktorski rad. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Zagreb, 2020. Dostupno na: <https://dabar.srce.hr/en/islandora/object/rgn%3A1238>. Datum pristupa: 27.06.2022.

[14] EKSPLO-PROMET d.o.o., 2022. Dostupno na: <http://eksplo-promet.hr/wp-content/uploads/2014/12/6.pdf>. Datum pristupa: 25.06.2022.

[15] Savić, M. Miniranje na površinskim kopovima. Institut za bakar Bor, 2000. Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/407458074/Miniranje-na-povrsinskim-kopovima-pdf>. Datum pristupa: 26.06.2022.

[19] Strelec, S. Podpovršinski istražni radovi. Interna skripta. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet. Varaždin, 2011. Dostupno na: <https://dokumen.tips/download/link/geofizickaistrzivanja>. Datum pristupa: 26.06.2022.

## 8. POPIS SLIKA

Slika 1. Izgled stijenske mase prije miniranja (kamenolom „Hruškovec“) (snimljeno 2022.)

Slika 2. Izgled stijenske mase nakon miniranja (kamenolom „Hruškovec“) (snimljeno 2022.)

Slika 3. Područja djelovanja eksplozivnog punjenja minske bušotine: 1 – minska bušotina, 2 – područje drobljenja, 3 – frakturirano područje, 4 – malo frakturirano područje i 5 – neporemećena stijena [4]

Slika 4. Mehanizam drobljenja stijenske mase eksplozivom: a) Tlačno naprezanje stijenske mase; b) Rasterećenje stijenske mase; c) Formiranje kupole od bušotine prema slobodnoj površini (prerađeno prema [13])

Slika 5. Utjecaj fragmentacije na cijenu bušenja, miniranja, utovara i transporta (prerađeno prema [13])

Slika 6. Veličine ili parametri etažnog miniranja (prerađeno prema [13])

Slika 7. Granulirani eksploziv tipa ANFO komercijalnog naziva „AMONIT-6“ [14]

Slika 8. Patronirani emulzijski eksploziv „RIOHIT ST“

Slika 9. Patronirani plastični eksploziv „POLADYN 31 ECO“

Slika 10. Veličine etažnog miniranja u odnosu na nagib minskih bušotina i slobodnog čela (prerađeno prema [15])

Slika 11. Dubinska hidraulička bušilica na gusjenicama Epiroc D50 u kamenolomu „Špica“

Slika 12. Utjecaj probušenja na lom stijene pri dnu bušotine (prerađeno prema [13])

Slika 13. Čepljenje vertikalnih minskih bušotina u kamenolomu „Špica“

Slika 14. Raspored bušotina koji se koristi kod proizvodnih miniranja: (a) kvadratni raspored s omjerom izbojnica (B)/razmak između bušotina (S) 1:1; (b) trokutni raspored s omjerom izbojnica (B)/razmak između bušotina (S) 1:1,15; (c) pomoćne bušotine (E) za pomicanje mase u prednjem redu (prerađeno prema [13])

Slika 15. Redosljedi detonacije: (a) kvadratni redosljed detonacije "red po red"; (b) uglat "V" redosljed detonacije; (c) milisekundno otpucavanje minskih bušotina (prerađeno prema [13])

Slika 16. Uzroci oštećenja od miniranja (prerađeno prema [13])

Slika 17. Seizmogram transverzalne komponente oscilacija tla [17]

Slika 18. Sinusoidno valno gibanje za tipične vibracije tla (prerađeno prema [13])

Slika 19. Shematski prikaz mjerenja zračnog udara i oscilacija tla

Slika 20. Reakcija ljudi na vibracije tla na temelju odnosa između brzine i frekvencije čestica tla (prerađeno prema [13])

Slika 21. Uobičajeni uzroci razbacivanja komada stijene: (a) neadekvatna izbojnica prvog reda; (b) neusklađenost minskih bušotina; (c) pukotine koje odvede plinove eksplozije do slobodne površine; (d) bušotine previše napunjene i prekratak čep; (e) minske bušotine bez izvedenog čepljenja; (f) blokirane (zarušene) bušotine, a ipak napunjene određenom količinom eksploziva (prerađeno prema [13])

Slika 22. Faze djelovanja zračnog udarnog vala [2]

Slika 23. Uvjeti miniranja ovisni o temperaturi zraka: (a) idealni uvjeti; (b) potencijalna opasnost; (c) postoji opasnost pri miniranju [3]

Slika 24. Primjer pravilno postavljenog trokomponentnog geofona, mikrofona i Instanatel Minimate uređaja prilikom kontrolnog opažanja seizmičkih oscilacija nedaleko kamenoloma „Špica“ (snimljeno 2022. godine)

Slika 25. Eksploatacijsko polje „Špica“ (snimljeno 2022. god.)

Slika 26. Izmjerene udaljenosti od minskog polja (MP) do mjesta opažanja (MO) upotrebom web stranice „Google Earth“ [17]

Slika 27. Trokomponentni geofon

Slika 28. Shematski prikaz opažanja triju komponenata oscilacija tla: longitudinalne (1), transverzalne (2) i vertikalne (3) [15]

Slika 29. Mjerni uređaj Instantel Minimate Plus

Slika 30. Brzina oscilacija tla pojedinih komponenata i pripadajuća frekvencija za MO-2 u usporedbi s dopuštenim brzinama oscilacija prema standardu HRN DIN 4150-3:2011 [17]

Slika 31. Zapis zračnog udarnog vala te seizmogrami longitudinalne, transverzalne i vertikalne komponente brzine oscilacija tla za MO-2 [17]

Slika 32. Numerički prikaz rezultata mjerenja za mjesto opažanja MO-2 [17]

Slika 33. Dijagram dopuštenih količina eksploziva u ovisnosti o udaljenosti stambenih objekata od minskog polja

## 9. POPIS TABLICA

Tablica 1. Minersko-tehničke značajke pojedinih vrsta eksploziva [13]

Tablica 2. Izmjerene udaljenosti od minskog polja (MP) do mjesta opažanja (MO)

Tablica 3. Vrijednost izmjerene vršne brzine pojedine komponente oscilacija i izračunata rezultantna brzina za određeno mjesto opažanja

Tablica 4. Stupanj potresa u ovisnosti o rezultantnoj brzini oscilacija (skala S.V. Medvedeva) [18]

Tablica 5. Dopuštene brzine oscilacija tla prema standardu HRN DIN 4150-3:2011 [19]

Tablica 6. Maksimalne razine zračnog udara

Tablica 7. Opis štete pri određenom tlaku zračnog udara [17]

Tablica 8. Dopuštene količine eksploziva u odnosu na udaljenosti stambenih objekata od minskog polja (izraz Langeforsa)

Tablica 9. Dopuštene količine eksploziva u odnosu na udaljenosti stambenih objekata od minskog polja (izraz USBM-a)