Mjerenje vibracija tla i buke prilikom miniranja u kamenolomu "Špica", Ljubešćica

Curać, Jure

Master's thesis / Diplomski rad

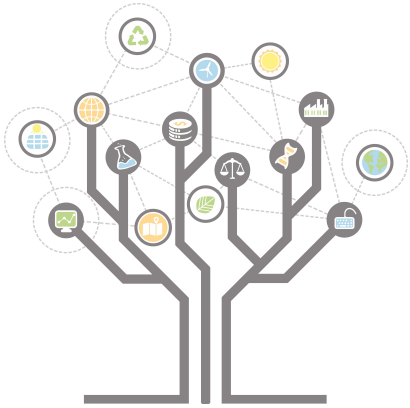
2020

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:353573

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-17**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište u Zagrebu

Geotehnički fakultet

Jure Curać

Mjerenje vibracija tla i buke prilikom miniranja u kamenolomu ″Špica″, Ljubešćica

Diplomski rad

Varaždin, 2020.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva za
16.07.2020. u _____ sati.

Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred ispitnim povjerenstvom u Varaždinu.

Varaždin, 02.07.2020.

Predsjednik ispitnog
povjerenstva:
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

Članovi povjerenstva

1) Prof. dr. sc. Stjepan Strelec _____
2) Prof. dr. sc. Josip Mesec _____
3) Doc. dr. sc. Mario Gazdek mgazdek
4) _____ _____

Sveučilište u Zagrebu

Geotehnički fakultet

Diplomski rad

Mjerenje vibracija tla i buke prilikom miniranja u kamenolomu ˝Špica˝, Ljubešćica

Kandidat: Jure Curać

Jure Curać

Mentor:

Prof. dr.sc. Stjepan Strelec

Varaždin,2020.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: JURE CURAĆ

Matični broj: 238 - 2018./2019.

Smjer: UPRAVLJANJE OKOLIŠEM

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

MJERENJE VIBRACIJA TLA I BUKE PRILIKOM MINIRANJA
U KAMENOLOMU „ŠPICA“, LJUBEŠĆICA

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Općenito o buci
3. Općenito o vibracijama
4. Štetnost buke i vibracija
5. Buka i vibracije izazvane miniranjem
6. Mjerenje vibracija i buke prilikom miniranja u kamenolomu „Špica“ u Ljubešćici
7. Zaključak

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 10.03.2020. Rok predaje: 02.07.2020.

Mentor: Predsjednik Odbora za nastavu:

Prof.dr.sc. Stjepan Strelec

REPUBLIKA HRVATSKA 1 GEOTEHNIČKI FAKULTET VARAŽDIN SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

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

Mjerenje vibracija tla i buke prilikom miniranja u kamenolomu „Špica", Ljubešćica

(naslov diplomskog rada)

Rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **prof.dr.sc Stjepan Strelec**

Izjavljujem da nijedan dio moga rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada na 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, 29.6.2020.

Jure Curać

(Ime i prezime)

Jure Curać

(Vlastoručni potpis)

IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

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

Mjerenje vibracija tla i buke prilikom miniranja u kamenolomu „Špica", Ljubešćica

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

U Varaždinu, 26.6.2020.

Prof. dr. sc. STJEPAN STRELEC

(Mentor)

(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

U ovom dipomskom radu je glavna ideja prikazati utjecaj buke i vibracija prilikom miniranja u kamenolomu „Špica“. U prvom poglavlju će se obraditi osnovne karakterisike buke. Buka je svakodnevna pojava koja izaziva neugodan osjećan, pa čak i bol. Vibracije su također blizak pojam iz svakodnevnice. Najviše ih povezujemo sa raznim strojevima. Za rad s bukom i vibracijama, nužno je imati instrumente za zaštitu od njihovih negativnih utjecaja. Prilikom utjecaja buke na čovjeka, može se značajno oštetiti osjetilo sluha. Pri dugotrajnom izlaganju vibracija, kao što je recimo rad sa štemalicom, čovjek može imati problema sa srčanim sustavom. O tome će biti riječ u četvrtom poglavlju. Za obradu zadnja dva poglavlja biti će upotrijebljeni rezultati koji su zabilježeni prilikom terenskog mjerenja seizmičkih efekta miniranja za lokaciju kamenoloma „Špica“. U predzadnjem poglavlju će se govoriti o izazivanju buke i vibracija prilikom miniranja općenito, a u zadnjem će biti obrađeno posebno za kamenolom „Špica“.

Ključne riječi: buka, vibracije, prevencija, miniranje, kamenolom

SUMMARY

The aim of this graduation thesis is to investigate the impact of noise and vibration during mining in a quarry “Špica”. The first chapter presents the fundamentals of noise. A noise is an everyday occurrence that can provoke unpleasant sensations, even pain. Vibrations are also a common experience. We relate them to various work machines. When working in an environment prone to noise and vibration, it is crucial to use protective devices, as noise can be significantly detrimental to the human sense of hearing. Similarly, long lasting exposure to vibrations, such as working with pneumatic drills can cause problems with a cardiovascular system. The second chapter explores these impacts further. The results recorded during field measurements of seismic effects of the mining in the quarry "Spica" are analyzed in the last two chapters. The remaining two chapters focus in detail on the acoustical and vibration impacts of mining in general and especially in the stone quarry “Špica”.

Key words: noise, vibration, prevention, mining, quarry

SADRŽAJ

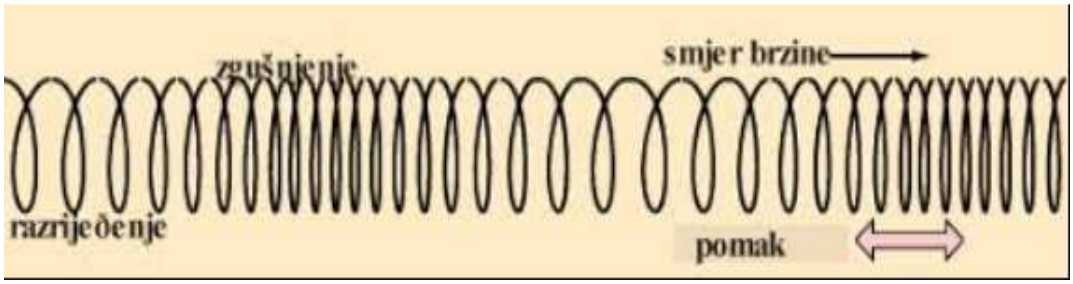
1. Uvod....1
2. Općenito o buci....2
   - 2.1. Akustične veličine koje opisuju zvučno polje....2
   - 2.2. Čisti i složeni tonovi....7
   - 2.3. Decibeli....8
   - 2.4. Vrste zvučnih izvora....10
   - 2.5. Ekvivalentna razina zvučnog tlaka....10
   - 2.6. Mjerenje buke....11
     - 2.6.1. Zvukomjer Larson Davis Model 831....12
3. Općenito o vibracijama....14
   - 3.1. Mehanički parametri....16
   - 3.2. Najjednostavniji vibracijski sustav....17
   - 3.3. Prigušene vibracije....18
   - 3.4. Prisilne vibracije....19
   - 3.5. Vrste vibracijskih signala....22
   - 3.6. Mjerenje vibracija....23
4. Štetnost buke i vibracija....25
   - 4.1. Štetnost buke....25
   - 4.2. Štenost vibracija....27
5. Buka i vibracije izazvani miniranjem....29
   - 5.1. Buka izazvana miniranjem....29
   - 5.2. Vibracije izazvane miniranjem....31
     - 5.2.1. Seizmički valovi....32
     - 5.2.2. Mjerenje brzine oscilacija....35
     - 5.2.3. Priroda oštećenja objekta izazvanih miniranjem....40
     - 5.2.4. Psihofizičke reakcije....40
     - 5.2.5. Metode i tehnike reduciranja vibracije tla....41
6. Mjerenje vibracija i buke prilikom miniranja u kamenolomu ,,Špica" u Ljubešćici....42
   - 6.1. Mjesto opažanja MO-1a....44
   - 6.2. Mjesto opažanja MO-1b....46
   - 6.3. Mjesto opažanja MO-2....48
   - 6.4. Mjesto opažanja MO-3....50
   - 6.5. Analiza rezultata s mjesta opažanja....52
7. Zaključak....53

1.Uvod

Zvuk je sastavni dio svakodnevnog života i dio čovjekovog okruženja tako da se ponekad i ne primjećuju sve njegove pojave. Pojmovi buke i zvuka su donekle slični, ali imaju ipak bitnu razliku. U današnje doba tehnološkog napretka i urbanizacije, koliko god se modernom čovjeku olakšava način života i komunikacije, ipak se javljaju mnogi neželjeni učinci. Problem buke svakako spada u te neželjene učinke i treba mu posvetiti potrebnu pažnju. Vibracije su također svakodnevna pojava. Definirane su kao mehaničke oscilacije. Učinak vibracija često imaju negativne posljedice ali također ima i pozitivnih učinaka vibracija. O tome će biti riječ o jednom od sljedećih poglavlja. Cilj ovog diplomskog rada je upoznati ljude o utjecaju i o zaštiti od buke i vibracija ako se nalaze u kamenolomu ili u blizini nekog drugog izvora. U prvim poglavljima će biti objašnjene osnove o buci i vibracijama koje je nužno upoznati da bi shvatilidaljnja poglavlja. U četvrtom poglavlju će se govoriti o štetnosti buke i vibracija, kako smanjiti negativne utjecaje. Potres u Zagrebu koji se dogodio u ožujku ove godine je primjer negativnog utjecaja vibracija koje će se također spomenuti. Peto poglavlje obuhvaća buku i vibracije izazvano miniranjem. U tom poglavlju će biti općenito objašnjeno posljedice miniranja, bilo ono u kamenolomu ili na nekom drugom mjestu. Posljednje poglavlje sadrži bit ovog rada, mjerenje buke i vibracija prilikom miniranja u kamenolomu „Špica“. Oštećenja na građevinama je teško razlikovati prema njihovoj genezi, pa se stoga ni ona nastala miniranjem ne mogu jasno odvojiti od oštećenja nastalih na neki drugi način. Stupanj udjela tako nastalih oštećenja neposredno ovisi o brzini oscilacija čestica građevine i temeljnog tla, odnosno o količini eksploziva i udaljenosti od mjesta miniranja. Za mjerenja su nam bili potrebni instrumenti sa kojima smo se upoznali prilikom kolegija Buke, vibracije i svjetlosno onečišćenje. Instrumenti su bili postavljeni na četiri točke opažanja miniranja na kojima se mjerio zvučni udarni tlak (buka) i brzina oscilacija čestica tla (vibracije).

2. Općenito o buci

Kao što je spomenuto u uvodu, u ovom poglavlju će biti objašnjenja veza i razlika zvuka i buke. Uže značenje zvuka označava sve ono što čujemo, što osjetilo zvuka primijeti. Buka se definira kao neželjen, neugodan zvuk koji ometa čovjekov rad i odmor. Buka je svaki zvuk koji prekoračuje najviše dopuštene razine utvrđene provedbenim propisom s obzirom na vrijeme i mjesto nastanka u sredini u kojoj ljudi rade i borave. Buka je najčešće nepravilan ili statistički slučajan zvuk. Zvučni valovi nastaju vibracijama bilo kakvog tijela, poput vibracija naših glasnica, gudenjem po gudalu itd. Ako spojimo jedan kraj opruge s kuglom koji harmonijski (gibanje po trigonometrijskoj funkciji sinus) oscilira po horizontalnoj osi opruge osciliranje će se manifestirati kao zgušnjavanje i razrjeđivanje opruge i njome će se širiti longitudinalni val. Zvučni val je longitudinalni val, odnosno val razrjeđivanja i zgušnjavanja medija..



Slika 1. Zgušnjavanje i razrjeđivanje longitudinalnog vala

Preuzeto s : http://www.mefos.unios.hr/~hbrkic/vukovar/6_%20zvuk.pdf , 15.5.2020.

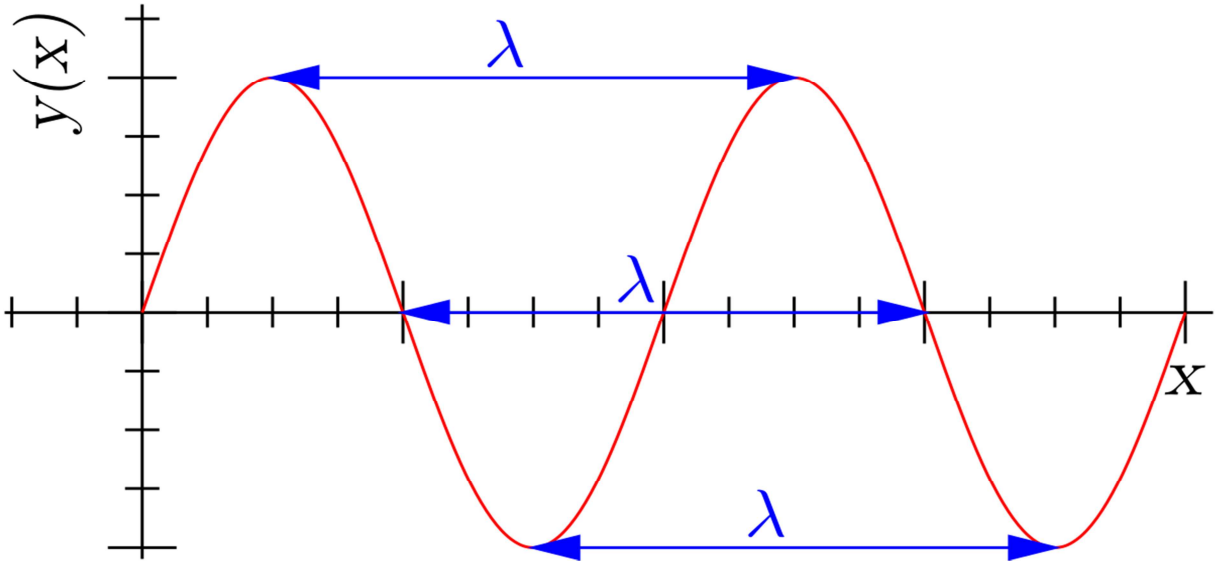
2.1. Akustične veličine koje opisuju zvučno polje

Bavljenje zvukom i bukom zahtijeva poznavanje fizikalnih veličina koje ih opisuju. One su tlak, brzina, temperatura i gustoća. Zvučni tlak se definira kao poremećaj atmosferskog tlaka, a taj poremećaj je uzrokovan zvukom. Općenito zvuk je tlačni-kompresijski-longitudinalni val koji se širi kroz supstancu (tvar, materiju) u bilo kojem njenom agregatnom stanju. Paskal (Pa) je mjerna jedinica za izražavanje tlaka, što znači da je i mjerna jedinica za atmosferski, a

i zvučni tlak. ISO (međunarodna organizacija za standardizaciju) je odabrala referentnu veličinu, odnosno referentni zvučni tlak, koji predstavlja najmanji mogući zvučni tlak kojega čovjek može primjetiti (registrirati). Vrijednost referentnog zvučnog tlaka iznosi $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Najveći tlak koje ljudsko uho može podnijeti iznosi 20 Pa, što znači da je milijun puta veći od referentnog zvučnog tlaka. Brzina širenja zvuka (c) je određena umnoškom valne duljine (λ) i frekvencije vala (f). Valna duljina je udaljenost dviju najbližih točaka vala koje titraju u istoj fazi. Mjerna jedinica je metar (m). Na slikama 2. i 3. su prikazane valne duljine na longitudinalnom i na transverzanom valu.

Slika 2. Valna duljina kod longitudinalnog vala

Preuzeto s : https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a743968a-901e-4aa4-9117-d7d5dedac0d5/html/7180_Opis_vala.html , 15.5.2020.



Slika 3. Valna duljina kod transverzalnog vala

Preuzeto s : https://hr.wikipedia.org/wiki/Valna_duljina

Frekvenciju definiramo kao broj titranja u određenoj jedinici vremena. Obično taj vremenski period je jedna sekunda. Mjerna jedinica je Hertz (Hz), odnosno jedan titraj u sekundi. Zvuk se može osjetiti u širokom frekvencijskom području, a područje čujnog zvuka u mladih ljudi nalazi se između 16 Hz i 20.000 Hz. Zvukove frekvencije manje od 16 Hz nazivamo infrazvukom a one poviše 20000 Hz nazivamo ultrazvukom. Čestice zraka na niskim frekvencijama titraju polagano i stvaraju niske tonove, a na visokim titraju brzo i stvaraju visoke tonove. Osim što je brzina širenja zvuka određena valnom duljinom i frekvencijom, ona ovisi o sredstvu u kojem se širi . Pod time se misli na elastičnost medija, gustoću medija i na temperaturu. Brzina širenja zvuka u zraku najviše ovisi o temperaturi zraka. Računa se prema jednadžbi : $c[m/s] \sim 331{,}4 + 0{,}6 \times T$. Sa svakim stupnjem opadanja ili porasta temperature tako i brzina zvuka opada ili raste za 0,6 m/s. Zvučni zid ili zvučna barijera je aerodinamička pojava kada izvor zvuka dosegne brzinu širenja (promjene) tlaka u zraku. Probijanje zvučnog zida zrakoplova prikazan je na slici 4.

Slika 4. Probijanje zvučnog zida.

Preuzeto s : https://www.scienceabc.com/eyeopeners/does-the-sound-barrier-take-any-extra-force-to-break-through.html , 17.4.2020.

Brzina zvuka će biti veća što medij kroz koji prolazi ima veću gustoću. Primjerice brzina zvuka kroz zrak temperature 20°C iznosi 343 m/s, kroz vodu je 1500 m/s a kroz željezo je 5000 m/s. Zvuk se u većini slučajeva sastoji od mnogo komponenata različitih frekvencija, no može biti i samo od jednog čistog tona. Nepoželjni ton koji izaziva nelagodu kod čovjeka naziva se bukom. Izračunavanje broja decibela je veličina koja se najčešće spominje kada je zvuk ili buka u pitanju. Za izračunavanje te veličine potrebno se upoznati sa zvučnim intenzitetom. Zvučni intenzitet je količina energije koja u jednoj sekundi prostruji kroz plohu veličine 1 m^2, okomito postavljenu na smjer širenja zvuka.

$\vec{I}(t)=p(t)\vec{v}(t)$ $I(t)=p(t)v(t)$

I je trenutni intenzitet zvučnog vala koji se širi u jednoj osi, p trenutni tlak i **v** trenutna brzina. Intenzitet je vektorska veličina jer je brzina vektorska brzina a tlak skalarna veličina.

Ako znamo koliki je zvučni tlak, možemo i izračunati intenzitet zvuka, uz pomoć poznatih komponenti medija, u ovom slučaju zraka. Pod te komponente se podrazumijeva gustoća zraka i brzina zvuka kroz zrak.

$$\mathbf{I}=\frac{P}{4\pi r^2}=\frac{p^2}{\rho c}\ [\mathrm{W}/m^2]$$

I – Intenzitet zvuka [W/m²]

P – Zvučna snaga [W]

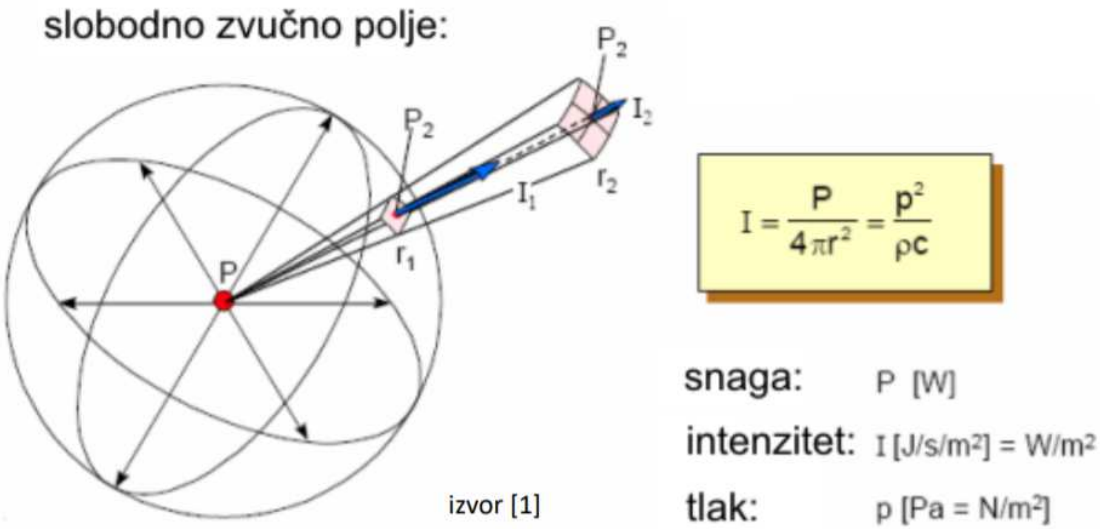
p – zvučni tlak [Pa]

r – Udaljenost od izvora zvuka [m]

ρ – Gustoća zraka [kg/m³]

c – Brzina zvuka kroz zrak [m/s]

Na slici 5. se može vidjeti da zvučni intenzitet opada obrnuto proporcionalno s udaljenošću od izvora ako je taj zvuk iz točkastog izvora i ako se širi bez prepreka.



Slika 5. Slobodno zvučno polje

Preuzeto s:

https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/GLAK07_Apsorberi_i_difuzori_2019-20.pdf

, 18.4.2020.

Mjerni istrumenti koji se obično upotrebljavaju za mjerenje zvučnog intenziteta su mikrofon, intenzitetna sonda i p-u sonda.

Slika 6. Mjerni instrumenti za mjerenje zvučnog intenziteta

Preuzeto s:

https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/GLAK07_Apsorberi_i_difuzori_2019-20.pdf

, 18.4.2020.

Pod zvučnom snagom P podrazumijeva se zvučna energija što u jednoj sekundi prostruji kroz plohu veličine S postavljenu okomito na smjer kojimse širi zvuk. Mjerna jedinica je wat (W). Dobije se umnoškom zvučnog intenziteta i površine na kojoj djeluje taj isti intenzitet.

$P = I \cdot S$ [W]

P – zvučna snaga [W]

I – zvučni intenzitet [W/m²]

S – površina na kojoj djeluje intenzitet [m²]

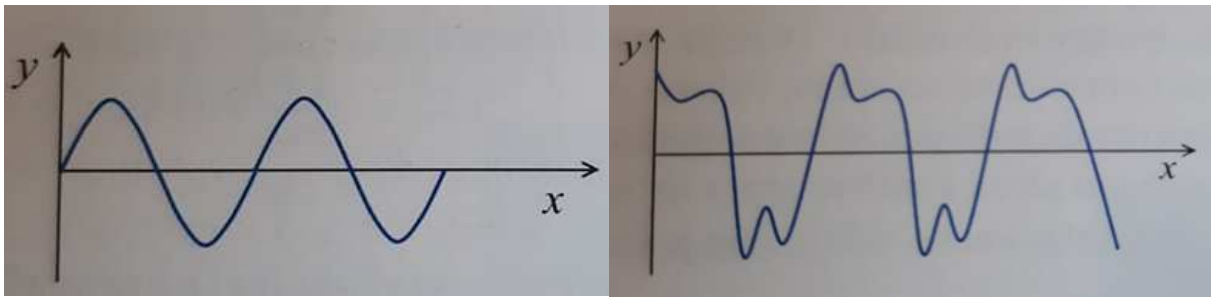
Ako se pretpostavi da se val širi u svim smjerovima (kuglasto širenje), površina na koju se raspoređuje zvučni intenzitet računa se prema formuli za oplošje kugle. Udaljenost od izvora zvuka do mjesta mjerenja označava slovo *r*.

$S = 4 \cdot r^2 \cdot \pi$ [m^2]

Zvučna snaga nekog izvora neovisna je o okolini u kojoj se taj izvor nalazi. Ove četiri veličine koje su navedene, zvučni tlak, brzina širenja zvuka, zvučni intenzitet i snaga zvuka, su definirane kao akustične veličine koje opisuju zvučno polje (p, c, I, P).

2.2 Čisti i složeni tonovi

Izvori zvuka su razni oscilacijski sustavi kao što su napete žice, štapovi, stupci zraka i membrane. Oscilacijski zvuk može emitirati zvuk oscilirajući samo jednom frekvencijom ili istodobno s više frekvencija. Zvuk kojega čini harmonijsko osciliranje jedne frekvencije i onaj koji je sastavljen od više harmonijskih osciliranja različitih frekvencija, pri čemu su pojedine frekvencije višekratnici najniže frekvencije među njima, nazivamo tonom. Ton jedne frekvencije (*f*) nazivamo čistim tonom, a onaj koji se sastoji od više frekvencija složenim tonom. Najnižu frekvenciju složenog tona (*f1*) nazivamo osnovnom frekvencijom, a ostale višim harmonijskim frekvencijama. Na slici 7. su grafički prikazi čistog tona i složenog tona.



Slika 7. Grafički prikaz čistog tona (lijevo) i složenog tona (desno)

Preuzeto s : Labor J. (2009.) Fizika 3, Alfa d.d. Zagreb, str. 28 , 25.5.2020.

Graf čistog tona je sinusoida, a graf složenog tona krivulja koju dobijemo tako da sinusoidi osnovne frekvencije dodamo sinusoide koje predočuju osciliranja višim frekvencijama. Skup frekvencija s pripadnim amplitudama od koji se sastoji nazivamo spektar tona. Ton ima i visinu i boju. Visina tona je određena osnovnom frekvencijom, a boja višim harmonijskih frekvencijama. Ako dva tona jednakih visina imaju u svom sastavu različite harmonike, oni se razlikuju po boji i prema tome različito zvuče. Tako, na primjer, ton osnovne frekvencije 440 Hz koji dolazi iz violine ne zvuči isto kao ton jednake osnovne frekvencije koji dolazi iz klavira.

2.3 Decibeli

Kao što je već spomenuto, čovjek čuje zvuk tlakova između $2 \cdot 10^{-5}$ i 20 Pa. Omjer tih tlakova iznosi 10^7 :1, odnosno omjer intenziteta (kvadrat tlakova) 10^{14} :1, što i nije baš praktično za računanje. Zbog toga se uvodi veličina decibel [dB]. Decibel je logaritmiran omjer dvaju intenziteta, tlaka ili snage. Ispred logaritma se nalazi broj 10 iz razloga što rezultat logaritma ima mjernu jedinicu bel (B), a u upotrebi je jedinica decibel (dB) zbog prikladnosti.

$$L = 10 \log \frac{tlak,\ intenzitet,\ snaga}{referentna\ vrijednost\ tlaka,\ \ int.\ ili\ snage}$$

L je razina neke veličine u decibelima, p je tlak [Pa] , I je intenzitet [W/m²] i p je snaga [W].

Broj decibela se izračunava prema sljedećoj formuli :

$n = 10 \log(\frac{I_1}{I_2})$ [dB]

Sljedeće tri formule se upotrijebljuju najčešće za računanje razina, odnosno logaritma omjera neke izmjerene i referentne fizikalne veličine. Dopuštena jedinica izvan SI je decibel [dB].

- razina zvučne snage:

$$L_W = 10 \log \frac{P}{P_0} \quad P_0 = 10^{-12} W$$

- razina zvučnog intenziteta:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad I_0 = 10^{-12} W/m^2$$

- razina zvučnog tlaka:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad p_0 = 2 \cdot 10^{-5} Pa$$

Slika 8. Formule za računanje razine decibela

Preuzeto s: https://moodle.srce.hr/2018-2019/course/view.php?id=30212 , 25.5.2020.

L_w – razina zvučne snage [dB]

L_i – razina zvučnog intenziteta [dB]

L_p – razina zvučnog tlaka [dB]

P_0 – referentna zvučna snaga [W]

P – zvučna snaga [W]

I_0 – referentni zvučni intenzitet [W/m²]

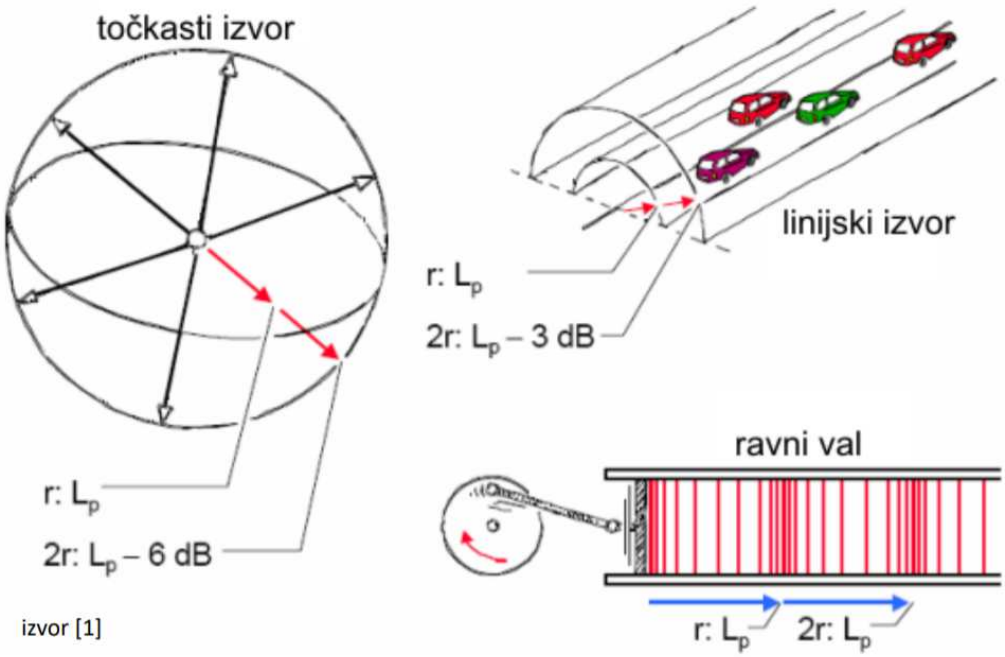
I – zvučni intenzitet [W/m²]

p_0 – referentni zvučni tlak [Pa]

p – zvučni tlak [Pa]

2.4. Vrste zvučnih izvora

Ako govorimo o zvuku, potrebno je spomenuti vrste izvora iz kojih zvukovi potiču. Postoje kuglasti (točkasti) izvor, linijski zvučni i ravni zvučni val. Njihova najveća razlika je u promjeni zvučnog tlaka s promjenom udaljenosti. Kod točkastog izvora, razlika zvučnog tlaka opada za 6dB pri dvostrukim porastom udaljenosti, kod linijskih opada za 3dB a kod ravnih zvučnih valova zvučni tlak ne opada s porastom udaljenosti.



Slika 9. Osnovni zvučni izvori

Preuzeto s:

https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/GLAK07_Apsorberi_i_difuzori_2019-20.pdf , 26.5.2020.

Lp – razina zvučnog tlaka [Pa]

2.5. Ekvivalentna razina zvučnog tlaka

Zvuk koji potječe iz izvora buke često široko varira tijekom određenog vremenskog perioda. Energijska srednja vrijednost se može izmjeriti, a to je ekvivalentna razina zvučnog tlaka

(LAeq, T). Ova vrijednost je ekvivalent kontinuiranoj razini zvuka koju bi imao mjerni zvuk kroz cijelo vrijeme mjerenja T. Ekvivalentna razina buke je najvažnija za izračunavanje vremenski promjenjive buke. To je razina one stalne buke koja bi tijekom određenoga vremena jednako djelovala na čovjeka kao promatrana promjenjiva buka. Ekvivalentna razina buke računa prema sljedećoj formuli:

$$L_{Aeq,T} = 10\lg\left[\frac{1}{T}\int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2}dt\right] = 10lg\left[\int_0^T 10^{0,1L_A(t)}dt\right] \text{ [dB]}$$

gdje je:

T- vrijeme mjerenja [s]

p_A (t) - trenutna vrijednost zvučnog tlaka vrednovanog po krivulji A [Pa]

L_A (t)-vremenska funkcija promjenjive A-razine [dB]

$p_0 = 20\mu Pa$

Ekvivalentna razina buke mjeri se zvukomjerima s integriranjem i usrednjavanjem čija su svojstva normirana. Kod određivanja ekvivalentne razine buke najčešće se primjenjuje vremensko vrednovanje "Fast". Kada se izloženost buci može podijeliti u nekoliko vremenskih intervala $\boldsymbol{t_i}$ s praktički stalnom razinom buke, ekvivalentna se razina buke određuje prema jednadžbi:

$$L_{Aeq} = 10lg\left[\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n}(t_i * 10^{0,1_{Ai}})\right] \text{ [dB]}$$

gdje je:

T=$\sum t_i$ - vrijeme izloženosti buci [s]

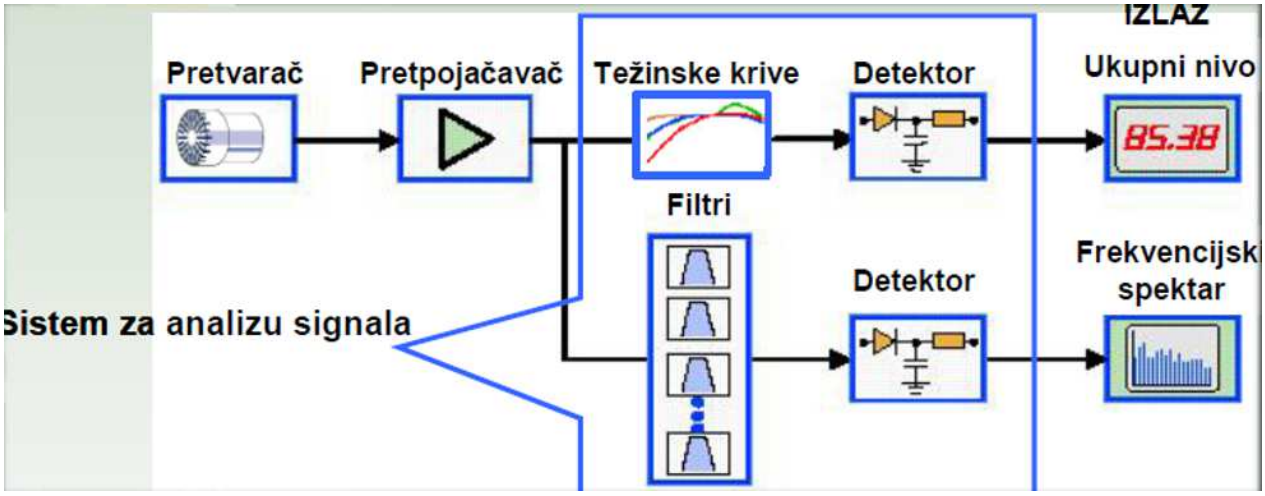
L_{Ai}- srednja A- razina buke u vremenskom intervalu $\boldsymbol{t_i}$ [dB]

n – broj vremenskih intervala

2.6. Mjerenje buke

Imamo tri osnovne karakteristike buke a to su : razina buke, frekvencijski sadržaj i vremenska ovisnost. Određuju se mjerenjem karakterističnih veličina buke u amplitudnoj i frekvencijskoj

domeni. Potpune i točne informacije mjerenja su neophodne za provedbu osnovnih procesa upravljanja bukom, ocjenu stanja razine buke i procjenu štetnog djelovanja buke na čovjeka. Imamo dvije osnovne vrste buke a to su buka koju djelimo po vremenskom toku i buka prema izgledu frekvencijskog spektra. Buku prema vremenskom toku djelimo na promjenjivu i nepromjenjivu a buku prema izgleda vibracijskog spektra na širokopojasnu buku, uskopojasnu buku i na diskretan ton (tonalna buka). Postoje tri skupine instrumenata koje služe za mjerenje buke. To su analogni , digitalni i instrumenti zasnovani na softverskim rješenjima. Zadnja dva se većinom koriste danas. Opća struktura instrumenata za mjerenje buke sadrži pretvarač, pretpojačalo, sistem za analizu signala i izlaznu komponentu. Pretvarač služi za pretvaranje zvučnih oscilacija u električni signal dok pretpojačalo služi za pojačavanje električnog signala na samom izlazu pretvarača. Sistem za analizu signala se sastoji od težinskih krivulja, filtara i detektora. Težinske krivulje usrednjuju signal u frekvencijskoj domeni. Sistem za analizu signala pretvara električni signal u gotove rezultate koje se očitavaju na izlazu.



Slika 10. Struktura instrumenta za mjerenje buke

Preuzeto s : https://moodle.srce.hr/2018-2019/course/view.php?id=30212 , 27.5.2020.

2.6.1. Zvukomjer Larson Davis Model 831

Larson Davis Model 831 je uređaj za mjerenje intenziteta buke u okolišu, na radnom mjestu, za arhitektonsku akustiku, itd. 5. je generacija Larson Davis uređaja, razvijen i napravljen za

jednostavno upravljanje. Osnovni dijelovi ovog modela su mikrofon (kondenzatorski, promjera 0,5 inča), pretpojačalo, LCD display (160x240 piksela) ,tipkovnice, raznih priključak, windscreen (zaštita mikrofona od vjetra, prašine i nečistoća) i od kućišta s baterijama. Tipkovnica je izrađena od silikona kako bi smanjila buku klikanja tipki te je osvjetljena što omogućava rad noću. Između ulaza u tijelo uređaja i pretpojačala smješten je „noise cone" koji onemogućava pojavu refleksije.. Display je zaštićen od grebanja, a kvalitetno plastično kućište sprečava ulaz prašine i prljavštine te je otporno na udarce .Velikim kućištem za baterije omogućena je jednostavna zamjena istih. Uređaj je balansiran za lako upravljanje jednom rukom, s bočne strane ima gumeni „grip" protiv sklizanja.

Slika 11: Zvukomjer Larson Davis

Preuzeto s :

https://lh3.googleusercontent.com/proxy/iBTpMzLoSHei38HgN_b_xPM4t3iMojIKJ3LWSuHrhINHua6dhTOfYx-sfVLYC91vFl2BEasnKOnY8UpO659Vkj9Q-T05GvmpWqCzYHeJj0xKjybTrue3hdFaaHUw4iytxRmQ8eT0 , 28.5.2020.

Uređaj posjeduje 6 različitih načina rada. Manual se obično koristi za šetnju oko mjesta ispitivanja. Idealno se koristi s „Measurement History (MH)" kako bi se dobio brzi pregled

prosjeka, minimalne-maksimalne vrijednosti i pohranjuje više mjerenja u jednu datoteku. „Timed stop Model 831“ radi određeno vrijeme. „Continous“ se obično koristi za dugoročno praćenje, omogućuje pohranu podataka dnevno ili čak više puta tijekom dana. U ovom načinu rada Model 831 će se automatski pokrenuti nakon napajanja, to je potrebno za slučajeve nestanka struje na udaljenim lokacijama. „Stop when stabile“ se obično koristi za procjenu izloženosti buke na radnom mjestu, zaustavlja se kada se ekvivalentna razina buke stabilizira u uskom rasponu. „Single block“ je mjerač za pokretanje i zaustavljanje kontrolira stjecanje. Multi block su 3 odvojena vremenska razdoblja od kojih jedan može prijeći vremensku granicu. Mjerenje s uređajem Larson Davis se provodi u sedam koraka.

1. Unos željenih parametara mjerenja
2. Kalibracija uređaja
3. Postavljanje zvukomjera u prostoru
4. Montiranje „windscreena”
5. Početak mjerenja
6. Mjerenje i pohrana podataka
7. Prikaz i obrada podataka u softwareu (SLM Utility G4, DNA)

3. Općenito o vibracijama

Kao što je već navedeno, vibracije su mehaničke oscilacije, odnosno varijacije amplitude u vremenu neke veličine u odnosu na dogovorenu referencu uz napomenu da se amplituda mijenja tako da je naizmjenično veća, odnosno manja od te reference. Vibracije su uglavnom imaju štetan utjecaj. Može uzrokovati trošenje mehanizama i poremećaje u radu. Srčani sustav također pati ako je čovjek dugotrajno izložen vibracijama. O štetnim učincima će se više govoriti u sljedećem poglavlju. Ipak, vibracije nisu nužno štetne. Vibracije su ponekad i korisne jer su osnova nekih mehaničkih i tehnoloških postupaka, npr. za popuštanje zaostalih naprezanja nakon lijevanja, ili opreme kao što su vibracijska sita (slika 12.), vibracijski konvejeri, strojevi za nabijanje itd. Primjenjuju se i u geološko-seizmičkim istraživanjima, pri gradnji akustičkih aparata itd. Vibracije su svakodnevna pojava budući da su rezultat

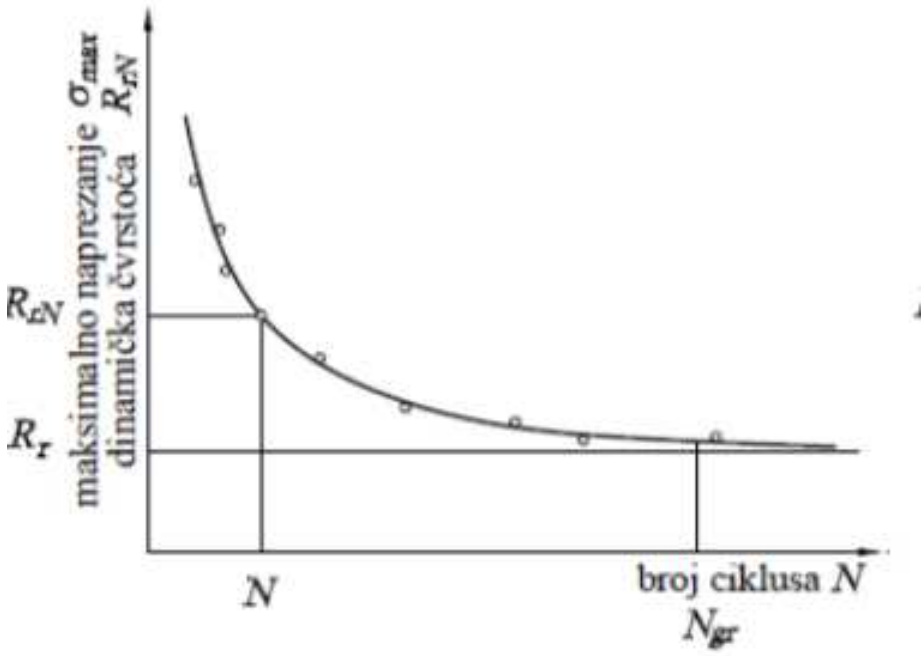
dinamičkih sila strojeva s pomičnim dijelovima čije se djelovanje širi na strukture vezane uz strojeve (primjer – vibracije u zgradi od prolaska vlaka obližnjom prugom).

Slika 12. Vibracijsko sito

Preuzeto s : http://oprema-vrbovec.hr/vibrosita/img_0324/ , 29.5.2020.

Vibracija se također definira kao oscilacija (titranje) čiji je iznos parametar koji definira gibanje sustava, dok se oscilacija definira kao promjena intenziteta neke veličine u odnosu na zadnju referentnu vrijednost, pri čemu se intenzitet naizmjenično mijenja iznad ili ispod referentne vrijednosti. Zašto se mjere vibracije? Pitanje je koje se može odgovoriti uz pomoć sljedećih 5 točaka.

1. Zbog provjere frekvencija i amplituda naprezanja kako se nebi prešla dinamička izdržljivost materijala (Wohlerova krivulja)
2. Zbog izbjegavanja pobude rezonancije određenih dijelova strojeva
3. Zbog potrebe prigušenja i izolacije izvora vibracija
4. Zbog uvođenja sustava održavanja po stanju
5. Zbog konstrukcije i verifikacije računalnih modela struktura

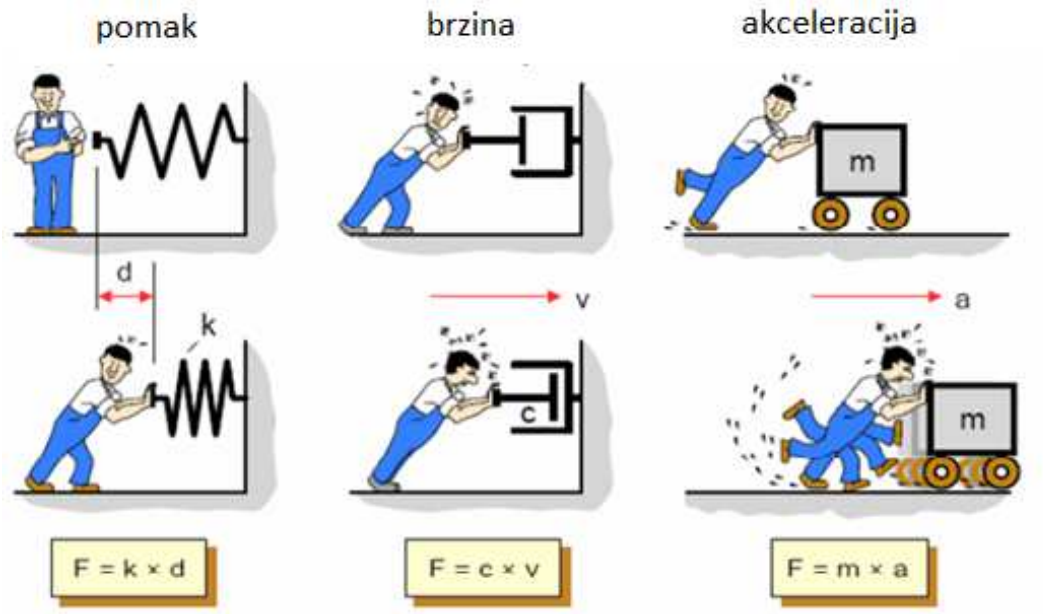


Slika 13. Wohlerova krivulja dinamiče čvrstoće

Preuzeto s : http://repozitorij.fsb.hr/1245/1/09_02_2011_Zavrsni_rad.pdf , 29.5.2020.

3.1. Mehanički parametri

Postoje tri fizičke veličine koje opisuju svaki mehanički sustav. To su inercija, krutost i prigušenje. Kod modeliranja mehaničkog sustava inerciju predstavlja masa *m*, krutost sa konstantnom opruge *k*, a prigušenje se prikazuje prigušnicom koeficijenta prigušenja *c* . Djelovanje konstantne sile F na masu *m* proizvest će kretanje mase konstantnom akceleracijom *a*. Djelovanje konstantne sile F na oprugu proizvesti će zbijanje (pomicanje) opruge za konstantnu vrijednost *d*. Djelovanje konstantne sile F na klip prigušnice proizvesti će kretanje klipa konstantnom brzinom *v*. Iz slike 11. možemo zaključiti da je elastična sila proporcijalna pomaku tijela, da je sila prigušenja proporcionalna brzini kretanja i da je sila inercije proporcionalna ubrzanju.



Slika 14. Mehanički parametri

Preuzeto s:

http://mfbl.com/upload/documents/Dokumenti/Predmeti/Buka%20i%20vibracije/Buka%20i%20vibracije%20-%20skripta.pdf , 29.5.2020.

3.2. Najjednostavniji vibracijski sustav

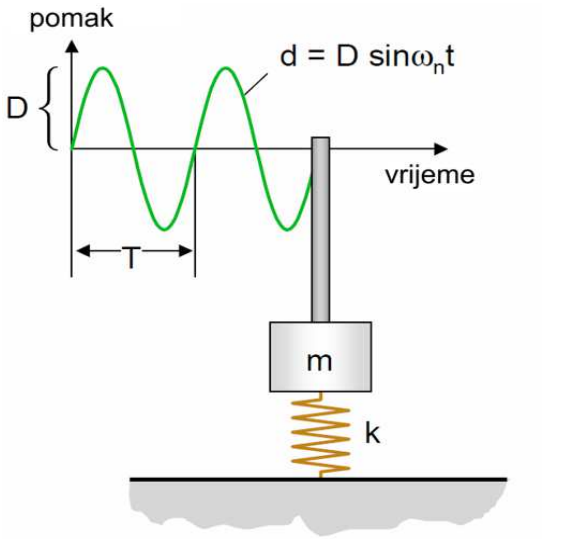
Najjednostavniji oblik vibracijskog gibanja su slobodne harmonske oscilacije predstavljeno modelom masa opruga, bez prigušenja. Kada se sustav izvede iz ravnoteže (opruga se sabije) elastična sila teži da tijelo vrati u početni položaj. Nakon toga, pod utjecajem inercije tijela (inercijske sile) tijelo nastavlja da se kreće do trenutka kada je opruga maksimalno rastegnuta i kad elastična sila počinje ponovo da djeluje, ali u suprotnom smjeru. Masa će se gibati praktično konstantnom amplitudom i akceleracijom. Sustav koji oscilira ima oblik sinusnog vala i takve vibracije nazivamo slobodnim vibracijama a frekvencija je prirodna ili vlastita frekvencija oscilacija. Vlastita frekvencija ovisi o masi i krutosti opruge.

$$f = \frac{1}{\mathrm{T}}$$

$$2\pi * \mathrm{f} = \sqrt{\frac{\mathrm{k}}{\mathrm{m}}}$$

f – frekvencija [Hz] ,T- period [s], k –konstantna (krutost) opruge [N/m] , m – masa [g]

Povećanje mase smanjuje se frekvencija i povećava se period, no amplituda ostaje ista.



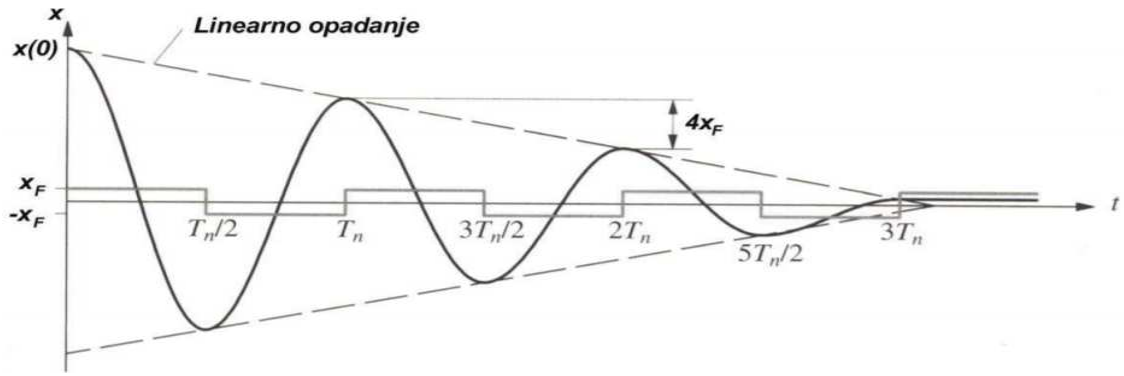
Slika 15. Prikaz najjednostavnijeg vibracijskog sustava

Preuzeto s:

http://mfbl.com/upload/documents/Dokumenti/Predmeti/Buka%20i%20vibracije/Buka%20i%20vibracije%20-%20skripta.pdf , 29.5.2020

3.3. Prigušeni sustavi

Stavljanje prigušivača koeficijenta prigušenja *c* na sustav masa-opruga imat će za rezultat smanjenu amplitudu dok je frekvencija prigušenih oscilacija gotovo jednaka prirodnoj frekvenciji (smanjuje se povećanjem prigušenja). Mehanizmi prigušenja (viskozno prigušenje, trenje, ...) uzrokuje da se vibracijska energija nepovratno gubi npr. pretvaranjem u toplinsku energiju pri trenju.

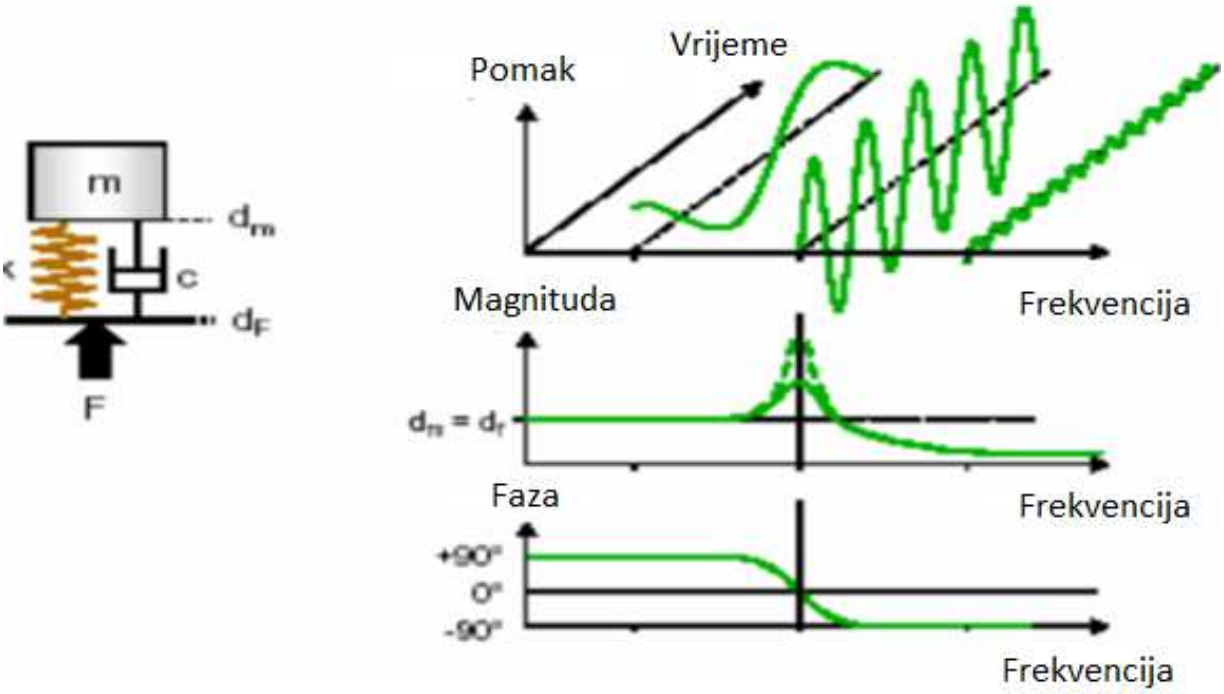


Slika 16. Graf prigušenog osciliranja

Preuzeto s : http://gfosweb.gfos.hr/portal/images/stories/studij/sveucilisni-diplomski/dinamika-konstrukcija/dinamika-predavanja004-slobodne-prigusene-vibracije.pdf

3.4. Prisilne vibracije

Prisilne vibracije nastaju primjenom vanjske sile na sustav. Sustav će slijediti tu silu, što znači da će vanjska sila i sustav imati istu frekvenciju. Frekvencija osciliranja sustava je ovisno o frekvenciji vanjske sile. Na slici 17. možemo vidjeti da može postojati razlika u fazi vanjske sile i amplitudi.



Slika 17. Razlika amplitude i faze sustava

Preuzeto s :

http://mfbl.com/upload/documents/Dokumenti/Predmeti/Buka%20i%20vibracije/Buka%20i%20vibracije%20-%20skripta.pdf , 30.5.2020.

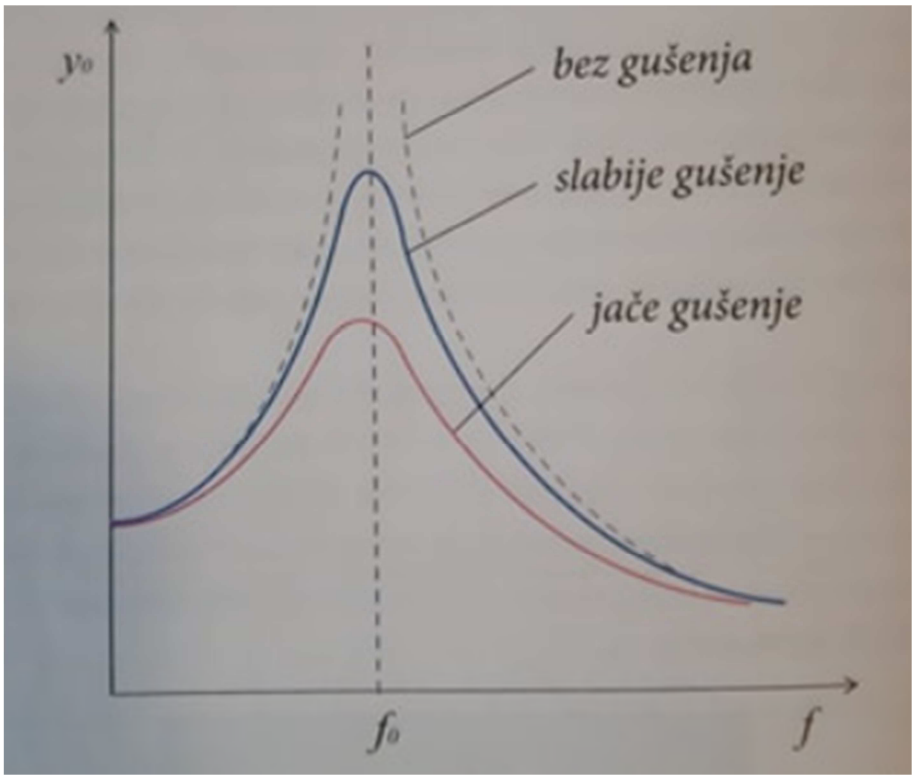
Porastom frekvencije prisilne sile amplituda vibrirajućeg sustava će također rasti i dosegnut će najveću moguću vrijednost kada se izjednače frekvencija sile i frekvencija sustava. To možemo vidjeti u sljedećem pokusu. Na slici

18. su prikazana 2 njihala ovješena o zajedničku nit. Nit je u gornjem dijelu provučena kroz letvicu, a letvica je gumenim vrpcama ovješena o nosač na stalku. Duljene niti njihala se mogu mijenjati. Povećavamo li duljinu niti jednom njihalu, drugom je istodobno smanjujemo. Ako zanjišemo jedno od njihala, tako da ga izvedemo iz ravnotežnog položaja i pustimo, možemo opaziti da počinje oscilirati i drugo njihalo. Mijenjamo li duljine niti njihala, opažamo da drugo njihalo postiže najveću amplitudu kada su duljine niti jednake. Taj pokus pokazuje da se energija osciliranja prenosi s jednog njihala na drugo. Pokazatelj prenesene energije je amplituda njihala koje prima energiju. Prijenos energije najbolji je kada su duljine njihala jednake. Tada je frekvencija njihala koje predaje energiju jednaka vlastitoj frekvenciji njihala koje prisilno oscilira. Pojavu da se energija osciliranja maksimalno prenosi sa sustava na sustav, kada su frekvencije sustava jednake, nazivamo rezonancija. Sustav koji predaje energiju nazivamo oscilator, a sustav koji prima energiju rezonator.

Slika 18. Pokus s njihalima

Preuzeto s : Labor J. (2009.) Fizika 3, Alfa d.d. Zagreb, str. 27, 30.5.2020.

Ovisnost amplitude rezonatora o frekvenciji oscilatora prikazana je na sljedećoj slici. Kada je frekvencija oscilatora jednaka vlastitoj frekvenciji, amplituda teži u beskonačnosti ako nema gušenja (isprekidane crte). Urealnim uvjetima najveća amplituda zbog gušenja ima konačnu vrijednost (pune crte). Pri jačem gušenju maksimalna amplituda rezonatora je manja(donja krivulja) nego pri slabijem (gornja krivulja). Zbog gušenja rezonancija nastupa pri frekvenciji koja je nešto niža od vlastite frekvencije rezonatora. Taj pomak je veći pri jačem gušenju. Rezonantnim prenošenjem energije prigušenje osciliranje sustava može se učiniti neprigušenim. Pri rezonanciji oscilirani sustav nadoknađuje izgubljenu mehaničku energiju primajući periodično novu iz izvora kojemu je frekvencija jednaka vlastitoj frekvenciji sustava. Zato je rezonancija ima značajnu ulogu i u znanosti i u tehnici i u mnogim praktičkim slučajevima.



Slika 19. Ovisnost amplitude rezonatora o frekvenciji oscilatora.

Preuzeto s : Labor J. (2009.) Fizika 3, Alfa d.d. Zagreb, str. 28 . 30.5.2020.

Rezonantni prijenos energije može imati i štetne posljedice. Primjerice, ako most prima energiju frekvencijom jednakom njegovoj vlastitoj frekvenciji, on oscilira sve većom amplitudom. Kada amplituda dovoljno naraste, most se može srušiti. Most može primati

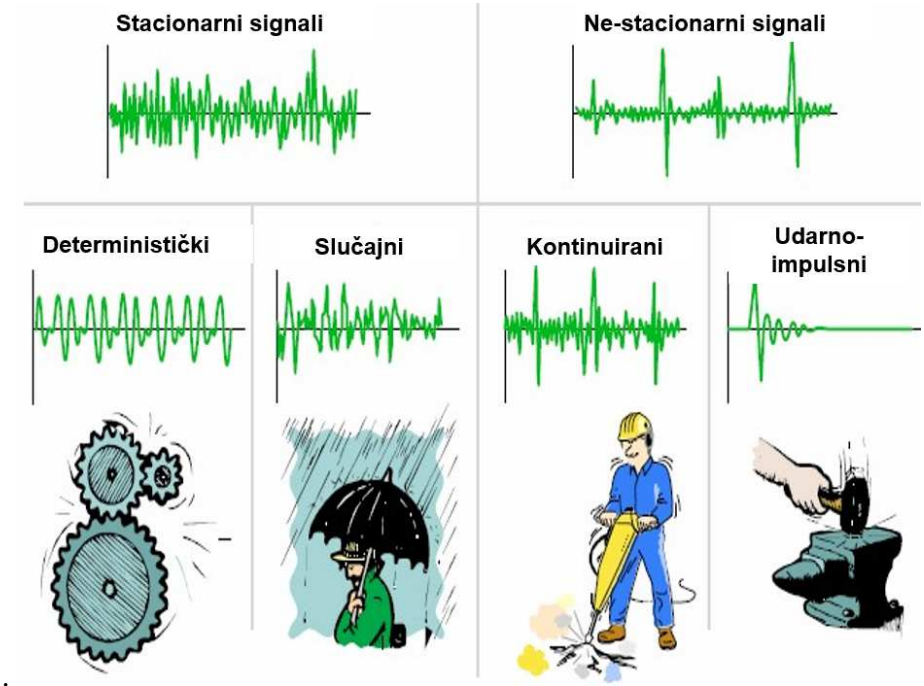
energiju od stroja vojnika koji stupaju prelazeći most, od tla koje podrhtava ili od vjetra. Poznato je da je upravo vjetar umjerene jakosti izazvao rezonantno titranje novosagrađenog mosta u mjestu Tacoma u SAD-u i nakon nekoliko sati ga srušio. Zato se pri gradnji raznih objekata i strojeva nastoji izbjeći pojava rezonancije.

Slika 20. Most Tacoma

Preuzeto s: https://sites.lsa.umich.edu/ksmoore/research/tacoma-narrows-bridge/ , 30.5.2020.

3.5. Vrste vibracijskih signala

Postoje dvije velike vrste vibracijskih signala, stacionarni i ne-stacionarni. Kod stacionarnih vibracija statističke karakteristike vibracija (npr. efektivna vrijednost pomaka) se ne mijenjaju s vremenom, dok se kod nestacionarnih mijenjaju. Stacionarne signale dijelimo na determinističke i na slučajne a ne-stacionarne na kontinuirane i na udarno-impulsne. Podjela je prikazana na slici 21.



.

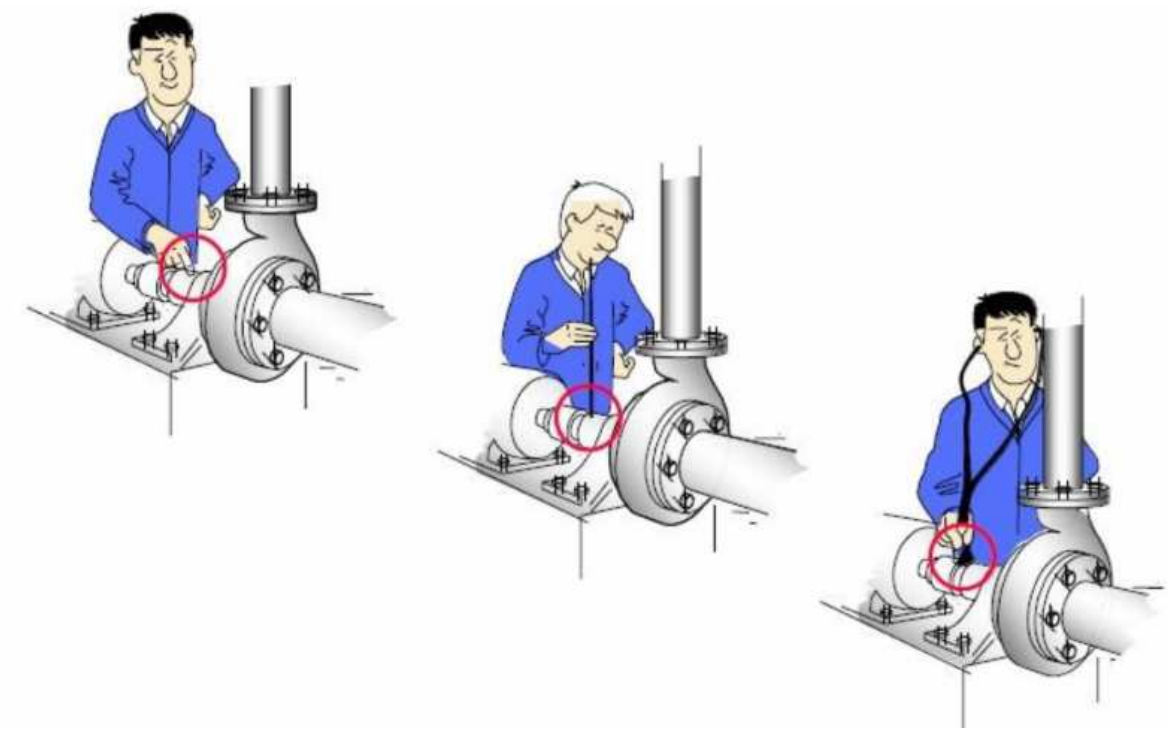
Slika 21. Podjela vibracijskih signala

Preuzeto s:

http://mf-bl.com/upload/documents/Dokumenti/Predmeti/Buka%20i%20vibracije/Buka%20i%20vibracije%20-%20skripta.pdf , 31.5.2020.

3.6. Mjerenje vibracija

U današnjici vibracije se mjere skoro posvuda gdje se pojave, odnosno na objektima sa samouzbudnom ili nekom vanjskom uzbudom. Na taj način mjere se vibracije strojeva, uređaja, vozila, aviona, zgrada, mostova itd. Višestruki je cilj takvih mjerenja. Prvenstveno treba utvrditi vibracijsku sliku objekta koji se mjeri, odnosno trebalo bi izmjeriti vibracijske parametre (pomak, brzinu i akceleraciju). Nakon toga treba utvrditi izvor vibracija objekta. Uzbuda je periodična sila koja uzrokuje vibraciju objekta, odnosno vibracijski pomak podloge uz pripadnu frekvenciju. Stoga, treba se prvo upoznati frekvenciju uzbude a nakon toga se može utvrditi izvor. Vibracije su se nekad mjerile na osnovi prethodnog iskustva što je prikazano na slici 22.



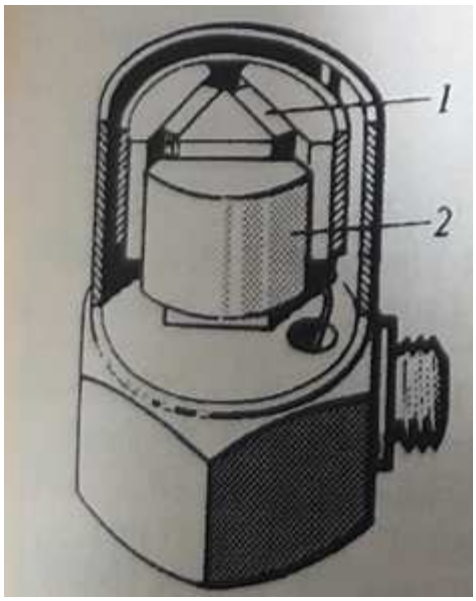
Slika 22. : Mjerenje vibracija na osnovi prethodnog iskustva

Preuzeto s: https://drive.google.com/file/d/1BDcp7NhQLPIPsbV99P1SeQKVcF-Z5n_3/view

, 31.5.2020.

Današnji elektronički sustavi za mjerenje vibracija se sastoji od: uređaja koji pretvara dinamičke mjerne veličine (pomak, brzina, akceleracija) u električni impuls (pretvornik), uređaja koji zapisuje mjerni signal i uređaja koji analizira signal koji se mjeri. Pretvornici seizmičkog tipa su pretvornici koji se najčešće upotrijebljuju. Pretvornik brzine sastoji se od mase koja se giba unutar električne zavojnice. Pošto je električni napon proporcionalan brzini gibanja mase u zavojnici, pretvornik daje brzinu vibracija. Deriviranjem te brzine dobijemo akceleraciju dok integriranjem dobijemo pomak. Sistem rada pretvornika akceleracije, odnosno akcelerometra, zasniva se na piezoelektričnom svojstvu kremenog kristala ili specijalne keramike da pod dinamičkim tlakom stvara električni naboj koji je proporcijalan akceleraciji. Piezoelektrični akcelerometri posjeduju izvrsne frekvencijske i dinamičke karakteristike te zbog toga se najčešće koriste. Također, imaju svojstvo dobre linearnosti u mjernom području vibracije. Metodoma laserskim pretvornicima se pomaci i brzine mjere u novije doba. Razvojem tehnologije mijenjali su se i uređaji za zapis mjernog signala, od mehaničkih pisača na vibrografima preko analognih pisača i magnetofona i sve do digitalnih magnetofona ili diskova elektroničkih računala. Takvi uređaji mogu istodobno opaziti signale

i s nekoliko stotina mjesta. Suvremeni uređaji za analizu signala su zapravo računala za brzu analizu.



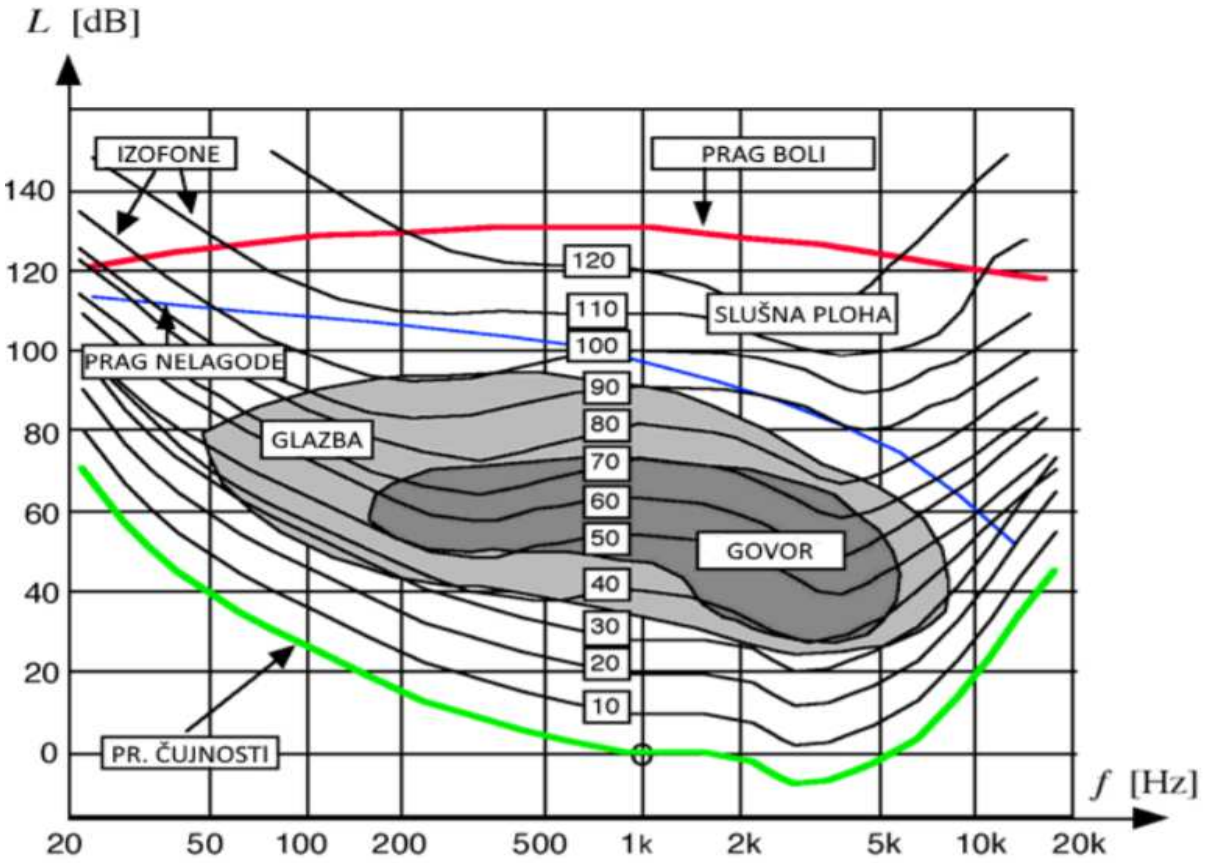
Slika 23. : Pretvarač akceleracije (akcelerometar), 1- kremeni kristal, 2- inercijska masa

Preuzeto s : Štefanović D.(1993.) : Tehnička enciklopedija, Leksikografski zavod „Miroslav Krleža“ u Zagrebu, str. 476 , 1.6.2020.

4. Štetnost buke i vibracija

4.1. Štetnost buke

Kao i kod svih onečišćenja, izloženost buci ima akumulirjući karakter, što znači da se štetni utjecaj buke uočava tek nakon duljeg vremena, a prvenstveno se manifestira kroz loše raspoloženje, umor, nesanicu, glavobolju i gubitak koncentracije, što uzrokuje smanjenu radnu sposobnost, a naposlijetku i trajno oštećenje sluha. Osjetljivost na buku ovisit će o karakteristikama buke (jakost, ritam , sadržaj), individualnim karakteristikama izloženosti osobe (stanje slušnih organa, životna dob, individualna osjetljivost na buku) te o duljini, vrsti i režimu izloženosti (položaj osobe prema izvoru buke, prisutnost ili neprisutnost buke u vrijeme odmora tijekom radnog vremena te u slobodno vrijeme).



Slika 24. Slušna ploha

Preuzeto s : https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/GLAK03_Osobine_sluha_2019-20.pdf , 2.6.2020.

Buka djeluje negativno na indokrilni i neurovegetativni sustav i te se promjene manifestiraju povećanom živčanom napetošću, a napetost uzrokuje poremećaj cirkulacije što ima za posljedicu porast krvnog tlaka i usporavanje rada probavnog sustava. Psihične smetnje su sastavni dio štetnog djelovanja buke. Može uzrokovati smanjenje koncentracije, razdražljivost, osjećaj umora i pospanost ako je buka ritmična. Zaposlenici koji rade u bučnim uvjetima mogu imati smetnju sna kao posljedicu. Najteža posljedica koju može imate buka je potpuni gubitak sluha. Postotak oštećenja ovisi o nekoliko faktora među kojima su: vremensko trajanje buke, intenzitet, frekvencija i pojedinačna osjetljivost na buku. Koliko buka može biti štetna pokazuje da postoju uređaji, koje koristi policija i vojska SAD-a za onesposobljavanje. Uređaj se zove LRAD (Long range acoustic device). Uređaj emitira visokofrekventivni zvuk od 2,5 kHz. Policija ga koristi za hvatanja kriminalaca i tjeranja prosvjednika. Može i imate intenzitet do 100 dB, dok vojska ga može upotrijebljavati s

intenzitetima od 140 dB do 160 dB. Taj uređaj, bolje rečeno oružje, koristi se u 25 dražava. Hrvatska, kao i okolne države, ga ne posjeduje.

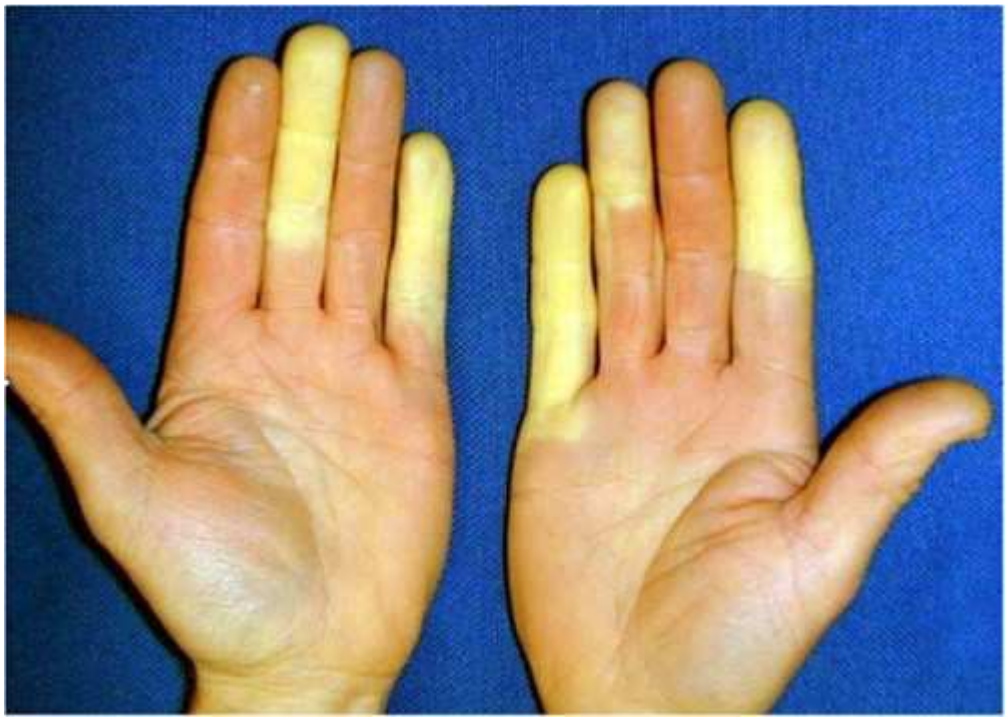
Slika 25. LRAD (long range acoustic device)

Preuzeto s : https://americansecuritytoday.com/national-guard-us-military-continue-rely-lrad-corporation-videos/lrad-500x-mmt-product-insert/ , 2.6.2020.

4.2. Štetnost vibracija

Nepoželjni efekti, odnosno štetnost koju uzrokuju vibracije mogu djelovati na strojeve, na čovjekovo zdravlje i na okoliš. Kod strojeva vibracije mogu uzrokovati mehaničku neuravnoteženost, što znači da se može dogoditi da se odlomi dio rotora. Hidraulička neuravnoteženost je također jedna od posljedica vibracija na strojeve. Može doći do pojave kavitacije. Krajnja posljedica kavitacije je ljuštenje zidova cilindra a to može dovesti do prodora rashladne tekućine u cilindar motora. Vibracije kod strojeva mogu uzrokovati razna trošenja (prstenastih raspora i ležajeva) i savijanja (osovine i kućišta). Čovjek se svakodnevno susreće s različitim utjecajima vibracija. Nameće se pitanje: kakav utjecaj na zdravlje čovjeka imaju vibracije? Da bi se odgovorilo na to pitanje prvo bi trebalo ustanoviti kakve vibracije postoje na tijelo. Postoje vibracije cijeloga tijela (WBV) i vibracije ruka-šaka (HAV). Jedan od primjera uzroka vibracije cijelog tijela je vožnja u loše održavanom automobilu. Moguće posljedice su : bol u donjem dijelu leđa, mučnina, poremećaj koštanog sustava, srčani

problemi, respiratorni problemi i poremećaji u metabolizmu. Do vibracije šaka-ruka dolazi dugotrajnim radom s alatima poput motorne pile, pneumatskih alata, freza itd. Posljedica toga može biti pojava bijelog prsta (slika 26.). Kao što i ime govori, prsti pobijele i čovjek izgubi osjetila u prstima. Vibracije šaka-ruka mogu još uzrokovati poremećaje u živčanom sustavu (sindrom karpalnog kanala), poremećaje u mišićnom sustavu pa čak i do pojave teniskog lakta.



Slika 26. : Pojava bijelog prsta

Preuzeto s : https://www.researchgate.net/figure/Hands-of-a-person-suffering-from-vibration-induced-white-finger-disease_fig1_231740259 , 2.6.2020

Vibracije koji utječu na okoliš su zapravo usko povezani s vibracijama o kojim se govorilo u ovom poglavlju. Čovjek spada u okoliš i sve što utječe na okoliš, utječe i na čovjeka. Takve vibracije možemo podijeliti u prirodno izazvane i umjetno izazvane vibracije. Prirodno izazvane vibracije najčešće povezujemo sa seizmičkim potresima. Takve vibracije uzrokuju i najveće posljedice (oštećenja i urušavanja građevina, pojava tsunamija, rasjeda itd.). Umjetno izazvanih vibracija ima jako puno ali najvažnije su izazvane prometom i izazvane umjetnim potresima (miniranjem). Promet može uzrokovati vibracije i pucanja prozora ali najčešća i najteža posljedica je poremećaj u psihofizičkom stanju čovjeka. Posljedice umjetnih potresa se, nasreću, rijetko javljaju u modernom svijetu zbog napretka tehnologije i većih kontrola. Mogu uzrokovati urušavanja, zatrpavanja rudnika, oštećanja objekata te u konačnici i ljudske žrtve.

5. Buka i vibracije izazvani miniranjem

5.1. Zračni udarni val (buka)

Zračni udrani val je bitna akustična karakteristika ako govorimo o buci izazvanoj miniranjem. Na zračni udar vala ovisi kvaliteta i kvantiteta eksploziva, udaljenost od eksplozije, oblik eksplozivnog punjenja, položaj eksplozivnog naboja, vremenski uvjeti na terenu i konfiguraciji terena. U blizini naseljenog područja trebale bi se prakticirati niže etaže, mali radijusi bušotina i nebi se trebalo minirati ako nisu povoljni vremenski uvjeti za miniranje. Razina buke može porasti za 10 do 15 dB prilikom jakog vjetra, što dokazuje da vremenski utvjeti igraju ulogu u miniranju. Kada se detonira eksplozivni naboj, dolazi do rapidnog povećanja tlaka plinova i taka nastaje zračni udarni val. Pri računanju tlaka zračnog udarnog vala potrebne su nam komponente gustoće zraka, brzine zračnog udarnog vala i gustoće zraka u valnoj fronti vala.

$$P = \rho_z \, v_{uv}^2 \, (1 - \rho_z / \rho_1)$$

P -tlak zračnog udarnog vala [mbar]

ρ_z -gustoća zraka [kg/m^3]

v_{uv} -brzina širenja zračnog udarnog vala [m/s]

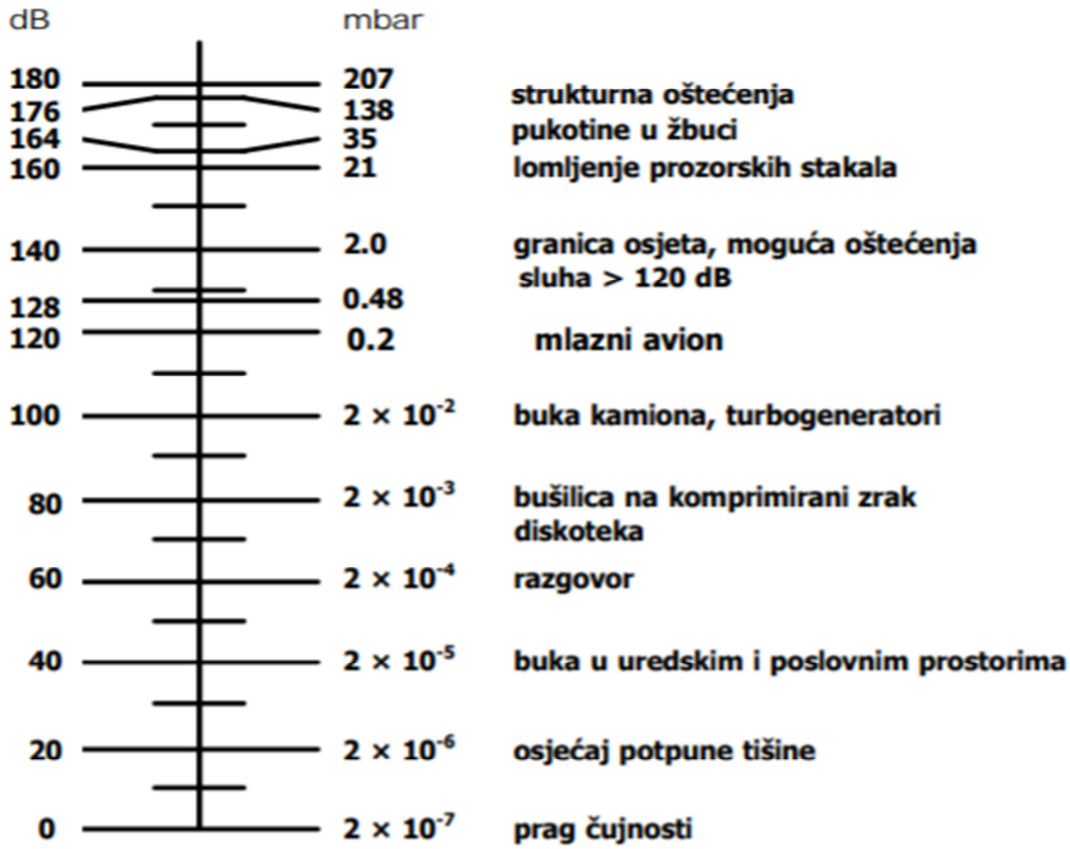
ρ_1 -gustoća zraka u fronti vala [kg/m^3].

Jedino terenskim mjerenjima je moguće dobiti tlak zračnog udarnog vala iz razloga što su komponente brzine širenja zračnog udarnog vala i gustoće zraka u fronti vala nisu poznate. Osim toga, zračni udarni tlak će se znatno smanjiti ako povećamo udaljenost minskog polja od kritične točke. U tablici 1. dane su karakteristike, odnosno kakvu štetu naprave određeni tlakovi udarnog vala.

Tablica 1. Opis šteta koju uzrokuju tlakovi udarnog vala

Preuzeto s: Strelec S. (2015.) Podpovršinski istražni radovi, Geotehnički fakultet, Varaždin, str 130 , 4.6.2020.

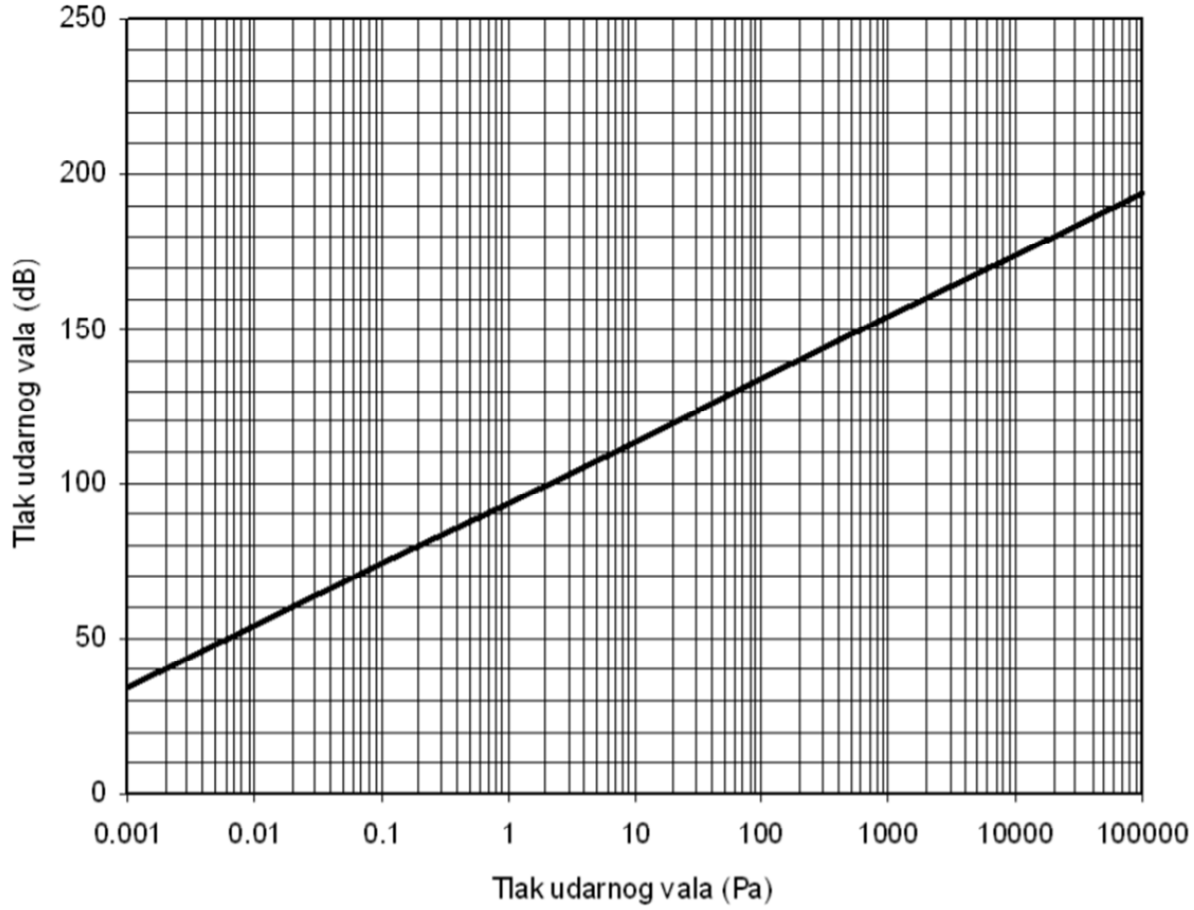
TLAK UDARNOG VALA		OPIS ŠTETE
(mbar)	(Pa)	
$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-5}$	Prag čujnosti
0.14	14	Staklo i kuhinjsko posuđe vibrira
0.21	21	Uznemirenje ljudi
2.1	210	Nema oštećenja
7	700	Lom slabo učvršćenog stakla
21	2100	Lom dobro učvršćenog prozorskog stakla
210	21000	Oštećenje na građevinama, pucanje bubnjića u uhu
1000	100000	Rušenje zidova od cigle, pukotine u betonu
2000	200000	Velike štete, rušenje betonskih konstrukcija, povrede unutarnjih organa kod ljudi
2500 4000	250000 400000	Smrtno stradavanje ljudi



Slika 27. Dijagram tipičnih zvučnih nivoa s vrijednostima u decibelima i milibarima

Preuzeto s: https://repozitorij.gfv.unizg.hr/islandora/object/gfv%3A206/datastream/PDF/view

Većina instrumenata mjeri zračni udarni tlak u paskalima tako da je na slici 28. prikazana ovisnost paskala i decibela.



Slika 28. Ovisnost paskala i decibela

Preuzeto s: Strelec S. (2015.) Podpovršinski istražni radovi, Geotehnički fakultet, Varaždin, str 131. , 4.6.2020.

5.2. Vibracije izazvane miniranjem

Kada se govori o vibracijama uzrokovane miniranjem, obično se misle sve seizmičke aktivnosti uzrokovane miniranjem. Cilj miniranja je da se stijenska masa razdrobi na što sitnije fragmente kako bi se minirani materijal mogao lakše transportirati do postrojenja za daljnju obradu. U primjeni miniranja kao tehnike za izradu podzemnih prostorija, tunelogradnji, raznim iskopima, dobivanju mineralnih sirovina i općenito u građevinarstvu i rudarstvu općenito je neodvojiva od seizmičkog djelovanja na stijenu, tlo i građevine temeljene na njima. Oštećenje na građevinama nije lako razlikovati prema njihovom uzroku jer ona mogu biti uzrok slijeganja, klizanja terena, likvefakcije i sl. Radovi miniranja trebaju se tehnički, tehnološki i organizacijski izvoditi da se prvenstveno osigura zaštita ljudi, prirode, građevina i opreme od svih oblika djelovanja eksplozije. Kao 5 najvećih opasnosti od miniranja se mogu navesti : djelovanje zračnog udarnog tlaka (buke), djelovanja seizmičkih

valova, od odbacujućih komada mineralnog materijala, djelovanja topline i od zagušljivog i otrovnog djelovanja produkata eksplozije.

Treba se posvetiti posebna pažnja određivanju količine eksploziva koja nam je potrebna jer povećanjem količine eksploziva povećava se područje koje je zahvatio seizmički poremećaj a i samo vrijeme trajanja eksplozije. Ključni faktor koji uzrokuje vibracije i njihov intenzitet prilikom miniranja je stiješljenost energije eksploziva. Ako je stiješljenost energije prevelika , može izazvati znatno veće oscilacije čestica tla, a samim time i oštećenja na objektima koji su u blizini. U suprotnom slučaju, ako je stiješljenost premala, može uzrokovati zračni udar toliko jakog intenziteta da slomi prozorska stakla, lesonitne ploče i sl. Može se zaključiti da niz faktora utiče na intenzitet potresa uzrokovanih miniranjem. Neki od njih su : fizikalno-mehanička svojstva i geološka građa stijene kroz koju se šire seizmički valovi, količina i vrsta eksploziva i vrsta eksplozivnog punjena, način i veličine miniranja te udaljenost od samog mjesta miniranja.

5.2.1. Seizmički valovi

Manji dio enerije eksplozivnog punjenja pretvorbom prelazi u kinetičku energiju- energiju seizmičkih valova. Seizmičke valove obično dijelimo na tri međusobno okomite komponente : longitudna komponenta (P-valovi), transverzalnu komponentu (S-valovi) i vertiklanu komponentu (Rayleighevi valovi). Brzina širenja longitudinalnih valova se može matematički izraziti kao ovisnost o elastičnim komponentama tla pogotovo u bazi temelja objekta kod kojeg se mjeri. Kod transverzalnih valova brzina je ovisna o elastičnim konstantama tla, a posebno o modulu posmika G.

$$v_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1-2\nu)\cdot(1+2\nu)}}$$

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

Gdje su za obe jednadžbe :

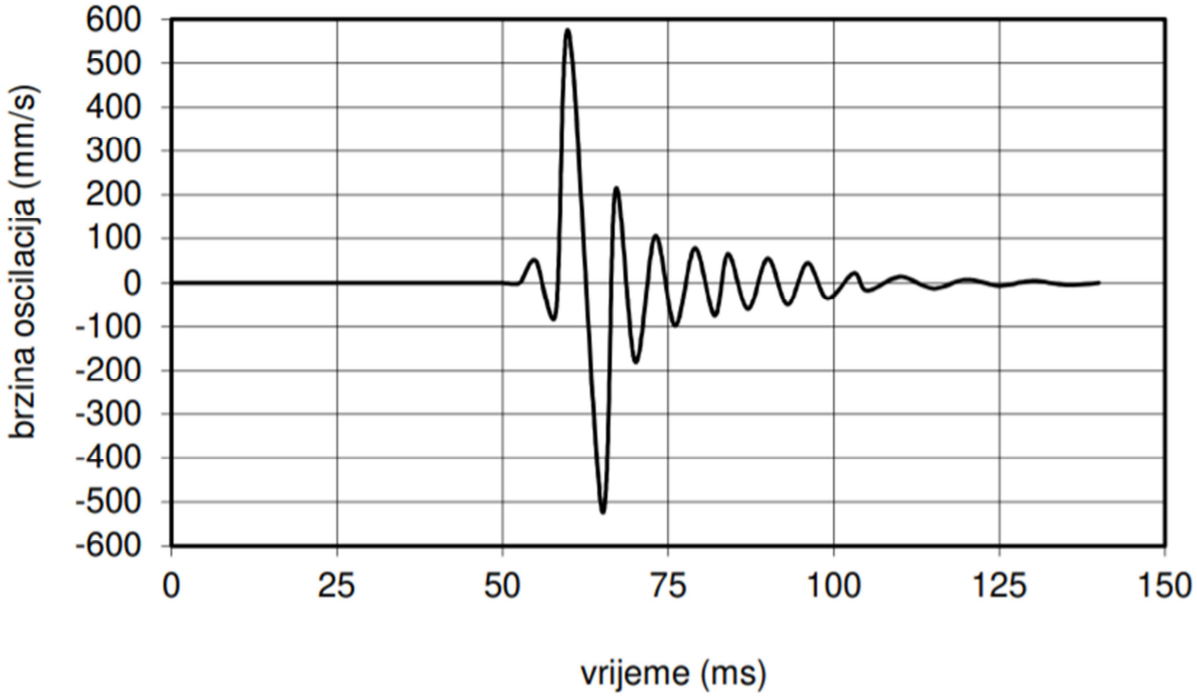
E - modul elastičnosti [MPa],

ρ - gustoća tla [kg/m3],

ν - Poisson-ov koeficijent podloge,

G - modul posmika [MPa].

Poremećaj koji se događa na samom mjestu eksplozije ima oblik jednog impulsa čija vršna amplituda i vrijeme trjanja ovisi o svojstvima medija, te o svojstvima i količini eksplozivnog punjenja. Rezultirajući val najčešće ima snaži inicijani rast, kojem slijedi serija prigušenih oscilacija (slika 29.).

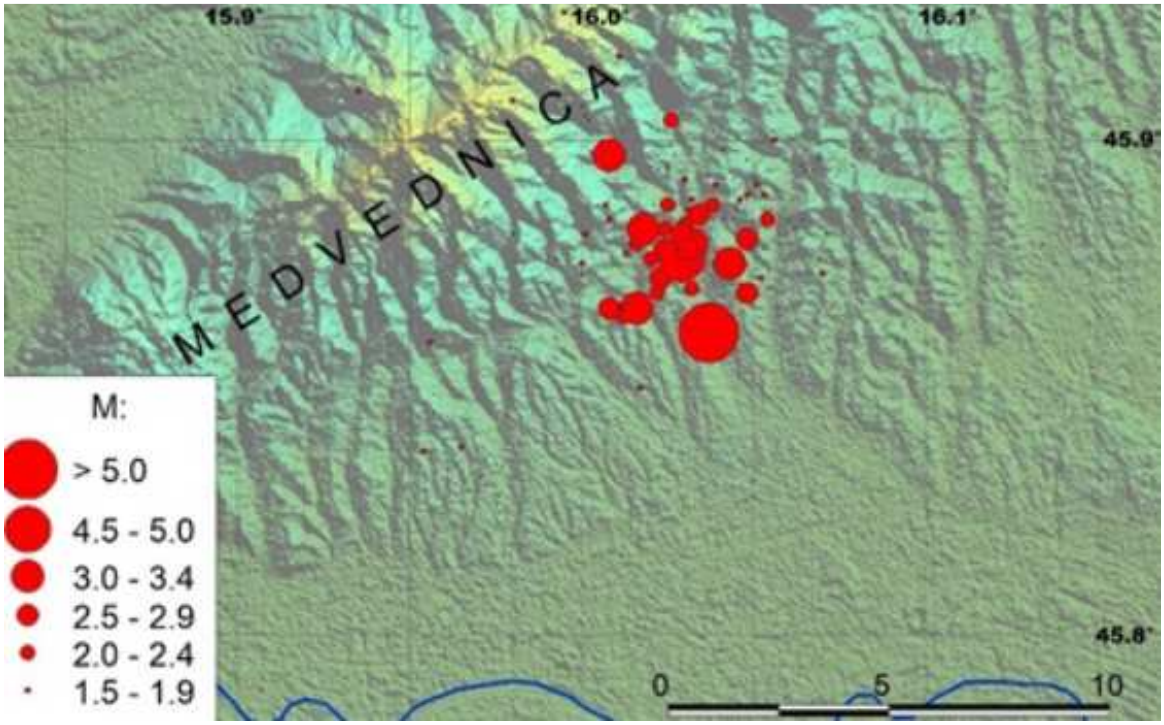


Slika 29. Zapis vibracija nastalih miniranjem

Preuzeto s: Strelec S. (2015.) Podpovršinski istražni radovi, Geotehnički fakultet, Varaždin, str 109 , 6.6.2020.

Kod miniranja, pojedine čestice medija pomiču se iz stanja mirovanja. Mogu se izmjeriti pomak, brzinu i akceleracija tih čestica. Iako su ta tri svojstva u međusobnoj vezi, nije jednostavno razdvojiti jedno od drugog jer val nije jednostavnog oblika. Zbog toga poželjno je mjeriti svojsvo koje je najjednostavnije i u uskoj je vezi s oštećenjma. Najčešće se koriste komponente izmjerenih veličina brzina oscilacija tla pomoću kojih se utvrđuje moguć utjecaj minerskih radova na okolne objekte. Općenito, kod seizmičkih utjecaja na objekte teško je primijeniti neki zakon gibanja koji bi karakterizirao u potpunosti ove događaje. Kod teorijskog modela može se kao polazni dio primijeniti pojam materijalne točke na kojoj se lakše izvode fizičke zakonitosti gibanja. Uz to se mogu koristiti i pojmovi prigušenja i

poremećajne sile, te pojmovi deterministčkih i stohastičkih oscilacija. Deterministčke oscilacije obuhvaćaju sve slučajeve kod kojih se zakon gibanja oscilatornog sustava može prikazati analitički. To znači da su za svaki trenutak t jednoznačno određene sve veličine relevantne oscilatornom gibanju. Stohastičke oscilacije su oscilacije kod kojih je teško za svaki trenutak t odrediti sve veličine oscilatornog gibanja. Brzina rasprostiranja seizmičkih valova kao i njihov domet ovise o vrsti stijene i o prigušenju koje se javlja u stijeni. Matematička obrada se zasniva na statistici i vjerojatnosti, a tipičan primjer ovih vibracija su potresi. Nedavno (22. ožujka) smo bili svjedoci najjačeg potresa u Zagrebu u posljednjih 150 godina. Utvrđeno je da je potres bio magnitude 5,5 po Richteru i intenziteta VII. Stupnja prema MCS ljestvici. Epicentar (žarište) je bio na dubini od 10km. Na temelju podataka koje je objavila Seizmološka služba, očito je da je ovaj potres nastao oslobađanjem kompresijske napetosti (naprezanja) u stijenama u jezgri Medvednice.



Slika 30. Karta epicentara potresa u zagrebačkom području u razdoblju 22.03.2020. do 26.03.2020. , 7.6.2020.

Preuzeto s : http://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/o_zagrebackom_potresu_2020

5.2.2.Brzina oscilacija tla

Oscilacija čestica tla i građevina su posljedica seizmčkih valova koje su u ovom slučaju izazvani miniranjem. Amplituda cilindričnog vala opada eksponencijalno s udaljenošću od

samog mjesta eksplozije. Kao što je rečeno, pomak, brzinu i akceleraciju čestica tla moguće je primjetiti i mjeriti, ali je potrebno izdvojiti onu kinematičku veličinu koja je u neposrednoj vezi s oštećenjima koja mogu nastati na građevinama. Za definiranje indeksa oštećenja građevine potrebno je izračunati brzinu vibracija čestica. Ta brzina vibracija čestica geomedija je funkcija tri komponente. Te komponente su količina eksplozivne mase, udaljenost od eksplozije i svojstva stijenske mase. Sljedeći izrazi su empirijski izrazi koji služe za određivanje brzine oscilacija i maksimalne količine eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja.

$$PPV = K \cdot \left(\frac{D^{3/4}}{\sqrt{CW}} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$CW = \left(\left(\frac{PPV}{K} \right) \cdot D^{3/4} \right)^{2} \quad (2)$$

$$PPV = K \cdot \left(\frac{D}{\sqrt{CW}} \right)^{-n} \quad (3)$$

$$CW = \left(\left(\sqrt[n]{\frac{PPV}{K}} \right) \cdot D \right)^{2} \quad (4)$$

PPV – brzina oscilacija [m/s]

K – koeficijent svojstva stijene i načina miniranja

D – udaljenost minskog polja od mjesta opažanja [m]

CW – količina eksplozivnog punjenja [kg]

n – koeficijent prigušenja

Izraz Langeforsa (1) je izraz koji se najčešće koristi za proračun brzine oscilacija. Izraz (2) je izveden iz prvog izraza. Služi za iračunavanje količine eksploziva. Iz njega je vidljiv linearni odnos rezultantne brzine oscilacija PPV i koeficijenta svojstva stijene i načina miniranja K. Omjer te dvije komponente ne ovisi o eksponenetu *n,* koji predstavlja koeficijent prigušenja. On nije definiran ili se može smatrati da je njegova vrijednost -1. Stoga se vrijednost koeficijenta K uzima kao srednja vrijednost, određena u različitim točkama opažanja. Udaljenost minskog polja od mjesta opažanja predstavlja oznaka D, a oznaka CW količinu eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja. Izrazi (3) i (4) su izrazi koje preporuča američki

ured za rudarstvo (USBM). U te izraze su ugrađena tri, međusobno ovisna kriterija oštećenja. To su granična brzina osciliranja čestica tla, udaljenost i dopuštena količina eksploziva. Ta metoda predstavlja proporcionalnost kvardata brzine oscilacija i energije seizmičkog vala, a opažanja pokazuju značajnu korelaciju tih dvaju veličina. Na slici 31. prikazan je proračun dopuštene količine eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja za kamenolom „Špica“. Za izmjerenu brzinu oscilacija čestice tla u mjestu opažanja (MO), poznatu udaljenost (R) od minskog polja (MP) i maksimalne količine eksploziva po stupnju paljenja (Q) izračunata je vrijednost za koeficijent transmisije (K) prema Langeforsu i USBM-u. Kada nam je poznata vrijednost K i dopuštena brzina oscilacije čestica tla možemo izračunati dopuštenu količinu eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja za različite udaljenosti od minskog polja.

LOKACIJA: Kamenolom "ŠPICA" Analiza koeficijenata transmisije u smjeru stambene kuće s pomoćnom zgradom

ULAZNI PODACI:

Eksplozivno punjenje:	Q =	160,00 kg	352,74 lb
Udaljenost MP od **MO-1a**:	R_1 =	530,00 m	1738,82 feet
Udaljenost MP od **MO-1b**:	R_2 =	540,00 m	1771,63 feet
Dominantna frekvencija:	f =	6,00 Hz	

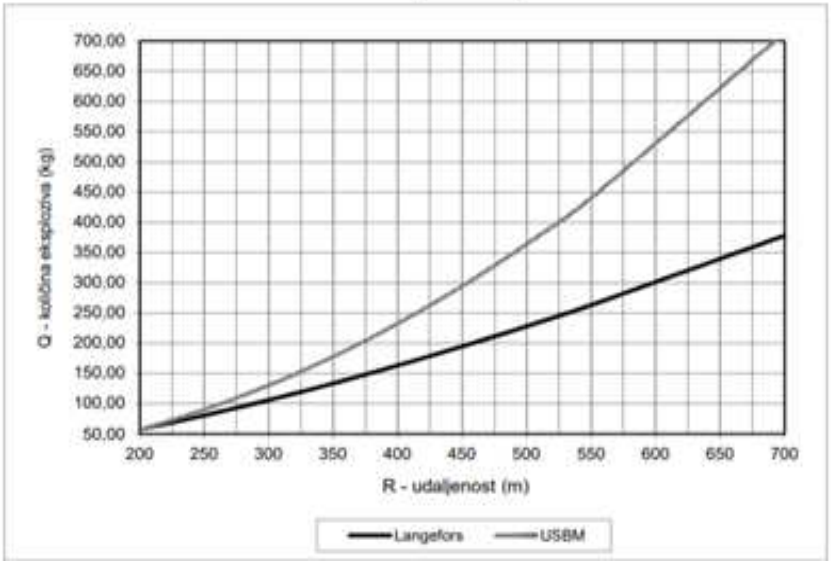
MP-minsko polje, MO-mjesto opažanja

IZLAZNI PODACI:

Maksimalna brzina oscilacije u **MO-1**:	V_1 =	0,107 cm/s	0,0421 in./s
Maksimalna brzina oscilacije u **MO-3**:	V_2 =	0,101 cm/s	0,0398 in./s

Faktori ovisni o miniranja i prigušenju:

	Langefors	USBM-1	USBM-2	USBM	
Koeficijent prigušenja, n:	-	-1,60	-1,60	-1,60	
Koef. načina miniranja, K_w (izračunat):	9,14	59,02	57,40	**130,00**	*usvojen*
Koef. miniranja, K (*usvojen*, Langefors):	**35,00**				



Slika 31. Proračun dozvoljene količine eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja za kamenolom „Špica“, 8.6.2020.

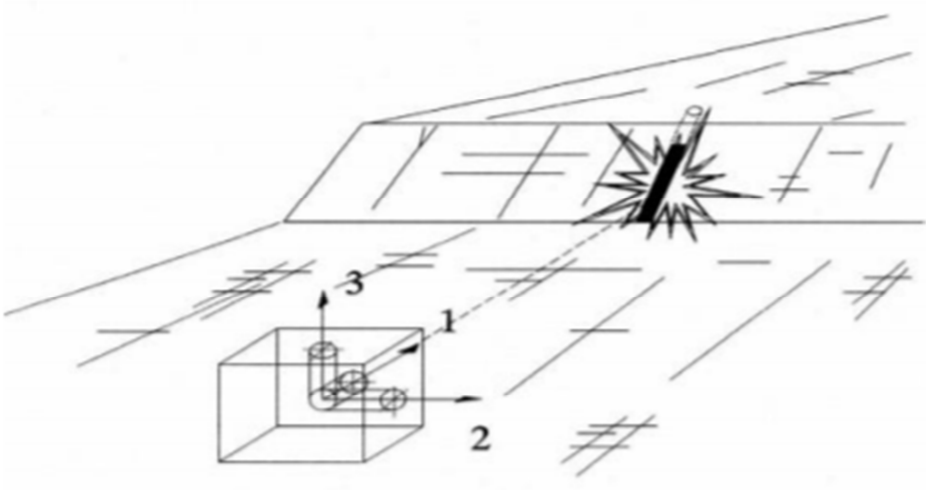
Preuzeto s: Strelec S. ; Jug J. ; Filipović A. (2020.) Studija seizmičkih efekata miniranja u kamenolomu „Špica“ u Ljubešćici, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin

Tablica 2. Podatci količine eksploziva po stupnju paljenja po različitim udaljenostima.

Preuzeto s Strelec S. ; Jug J. ; Filipović A. (2020.) Studija seizmičkih efekata miniranja u kamenolomu „Špica“ u Ljubešćici, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin , 9.6.2020.

Dopuštena brzina oscilacije **0,50 cm/s**		
Udaljenost od MP R(m)	Količ. ekspl., Q (kg)	
	Langefors	USBM
200	**57,72**	58,34
210	**62,11**	64,31
220	**66,59**	70,59
230	**71,19**	77,15
240	**75,88**	84,00
250	**80,67**	91,15
260	**85,56**	98,59
270	**90,54**	106,32
280	**95,62**	114,34
290	**100,79**	122,65
300	**106,04**	131,25
310	**111,39**	140,15
320	**116,82**	149,34
330	**122,34**	158,82
340	**127,94**	168,59
350	**133,63**	178,65
360	**139,40**	189,01
370	**145,25**	199,65
380	**151,17**	210,59
390	**157,18**	221,82
430	**181,97**	269,66
470	**207,95**	322,16
510	**235,05**	379,33
550	**263,24**	441,16
700	**377,96**	714,61

Instrumenti koj rade na principu seizmografa su konstruirani za mjerenje veličina oscilacija tla. Mogu se postaviti na bilo kojem mjestu gdje je potrebno izmjeiti nastle vibracije, prijenosni su. Brzine oscilacije tla koje nastaju uslijed miniranja mogu se mjeriti u samom tlu ili građevini, što ovisi od cilja i svrhe ispitivanja. Na mjestima na kojim mjerimo registrira se brzina oscilianja materijalne čestice. Mjerenje se obavlja trokomponentnim geofonima (slika 31.) pri čemu svaki od njih registrira brzine triju komponenta oscilacija tla.



Slika 32. : Orijentacija geofona u odnosu na točku detonacije

Preuzeto s: Strelec S.; Jug J. (2017) Planiranje sigurnih miniranja u urbanim sredinama, Društvo za geotehniku u Bosni i Hercegovinu, Sarajevo

Trokomponentni geofon sastoji se od tri geofona postavljena u tri međusobno okomite osi i mehanički su spojene u jednu cjelinu. Geofoni označeni na slici 31. brojevima 1 i 2 su postavljeni u horizontalnoj ravnini, okomito jedan na drugog, dok je geofon označen brojem 3 postavljen okomito na horizontalnu podlogu. Svaki geofon nakon detonacije registrira po jednu nepravilnu krivulju koja se dobije na snimci (seizmogramu) nastalog seizmičkog poremećaja (potresa). Iz tako dobivenih snimaka mogu se računati brzine pojedinih komponenata oscilacija. Rezultatna brzina oscilacija tla (V_R) jednaka je vektorskom zbroju brzina pojedinih komponenta oscilacija, koje se uzimaju iz seizmograma u trenutku najvećeg poremećaja. Geofon 1 služi za registriranje longitudinalne komponente, geofon 2 za registriranje transverzalne komponente a geofon 3 za registriranje vertikalne komponente.

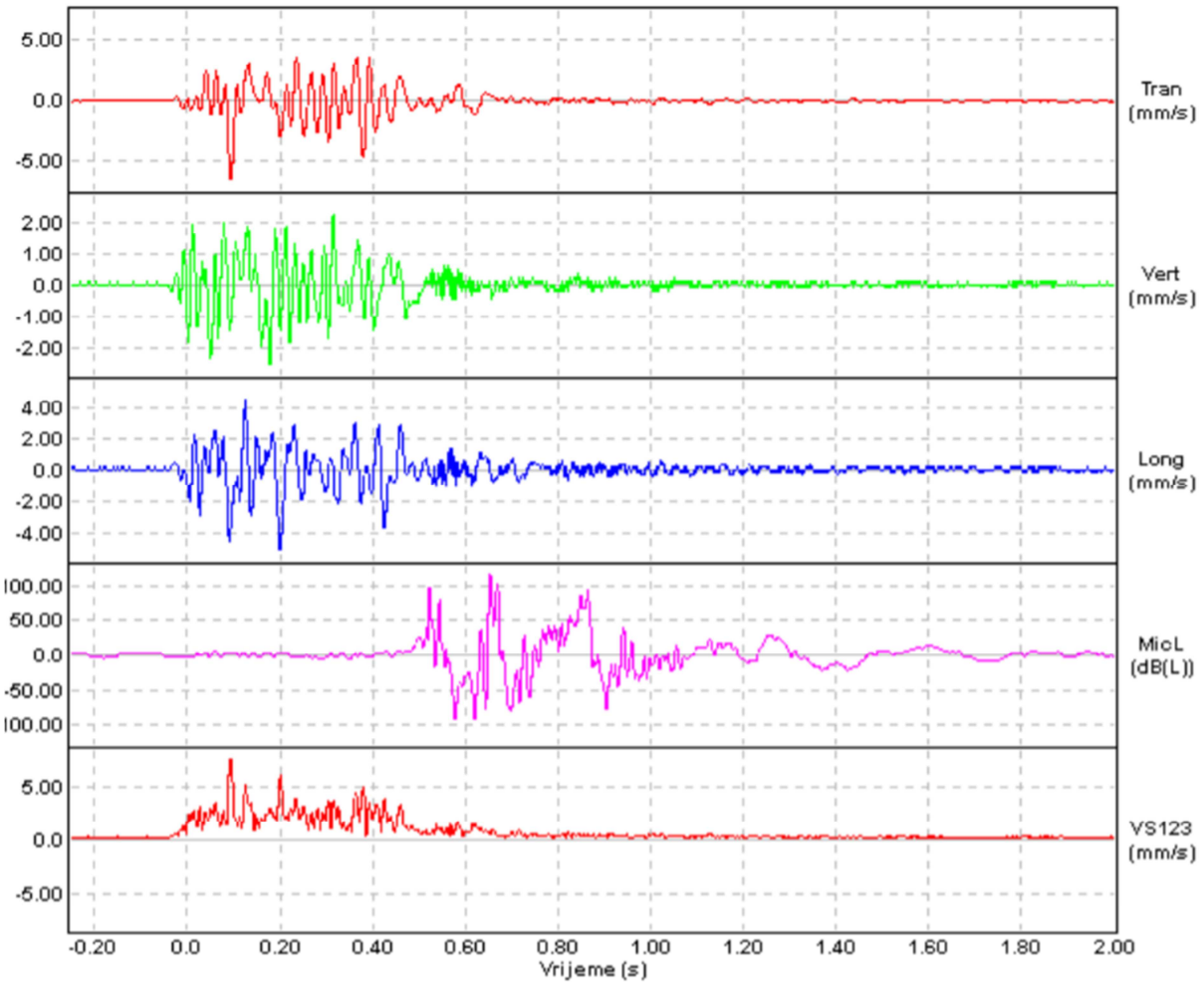
$$V_R = \sqrt{V_T^2 + V_V^2 + V_L^2}$$

V_R - rezultirajuća brzina oscilacija tla [mm/s]

V_L - brzina longitudinalne komponente oscilacija [mm/s]

V_T - brzina transverzalne komponente oscilacija [mm/s]

V_V – brzina vertikalne komponente oscilacija [mm/s]



Slika 33. : Snimka komponenata oscilacije tla, zračnog udara i rezultirajuće brzine

Preuzeto s : Strelec S. (2015.) Podpovršinski istražni radovi, Geotehnički fakultet, Varaždin, str 121. , 10.6.2020.

5.2.3.Priroda oštećenja objekta izazvanih miniranjem

Postoji korelacija između čvrstoće i oštećenja objekta unutar građevnog objekta. Stoga, monolitni betonski zid u dobrim uvjetima može izdržati više od zida koji je građen od cigle. Stupanj oštećenja nekog objekta ovisi o količini eksplozivnog punjenja i udaljenosti od mjesta miniranja. Pukotine će se pojaviti u točki koja je najbliže eksplozivnom punjenju i mogu se prostirati u svim smjerovima. Nova oštećenja će se također javiti ako postoje određena oslabljenja u zidovima koje koji su u blizini najbliže točke, poput otvora, konstrukcijskih spojeva ili stare pukotine uslijed slijeganja. To su mjesta s najvjerojatnijim mjestom oštećenja. Također zidovi koji su naknadno izgrađeni najčešće imaju pukotine duž kontaktnih spojeva koji nisu nastali uslijed miniranja. Posmična naprezanja mogu se javiti u području između temelja i gornjih djelova objekta ili između lateralnih zidova, uzdužnih zidova i podova. Kod pojedinalnih elementara kao što su dimljaci i parapeti mogu se javiti pomicanja između donjih i gornjih presjeka elementa. Oštećenja nastala djelovanjem horizontalnih sila najbolje se očituju kod objekta koji su temeljeni na stijeni ili dobro konsolidiranom tlu. Objekti izgrađeni na mekom koherentnom i vlažnom tlu najčešće imaju pojavu novih pukotina uslijed naknadnog slijeganja ili klizanja ukoliko se takav objekt nalazi na kosini. Do pojave pukotina često dolazi na padinama gdje je dio građevine koji nemaju riješenu obodnu drenažu pa uslijed vlaženja kontakta između dva materijala dolazi do klizanja padine, a time i do pojava pukotina.

5.2.4.Psihofizičke reakcije

Žalbe na zračni udar i vibracije tla većinom nastaju kao posljedica efekta uznemirivanja, straha od oštećenja i preplašenosti, a ne zbog mogućih ili stvarnih oštećenja, jer je ljudsko tijelo vrlo osjetljivo na niske vibracije i frekvencije praska. S praskom, općenito će razine preko 120 dB proizvesti strah i uznemirenost. U većini situacija osobni kontakt, uvjeravanje, i dobar program odnosa s javnošću odstranjuju te probleme, uz pretpostavku da se nisu dogodila strukturna oštećenja. Dakle, psihofizička reakcija na miniranje je općenito važnija od brojaka - stvarnih vrijednosti vibracija tla i praska. Činitelji koji utječu na ljudske reakcije na zračni udar, u određenoj su mjeri isti onima vezanim uz reakcije na vibracije tla. U oba slučaja, promatrane će osobe češće negativno reagirati ako se nalaze unutar građevina, nego kada se nalaze na otvorenom prostoru. Isto tako, te se reakcije povećavaju ukoliko se osoba

nalazi unutar vlastitog doma. Kao i kod vibracija tla, najveći se stupanj reakcije javlja kod pojave sekundarnog zvuka što ga izaziva reakcija građevine, češće nego pri izloženosti izravnom zračnom udaru. Zvukovi koji izazivaju najveće reakcije nelagode jesu zveckanje prozorskih stakala, vrata, nestabilnih objekata ili zvukovi izazvani udarcima s vanjske strane građevine ili s krova. Ovakvi zvukovi izazivaju još veću nelagodu ukoliko se jave iznenadno i neočekivano. Zabrinutost koja se javlja kod osoba izloženih zvučnom udaru je ona vezana uz potencijalna oštećenja njihovih domova, a ne njihovih tijela, a reakcije se umanjuju ukoliko nisu u vlastitim domovima. Kada zvučni udar nastupa poslije znaka upozorenja, aspekti nelagode se minimaliziraju, ali promatrane osobe bi opet mogle pogrešno zaključiti, da zvučna reakcija stambene građevine indicira neku vrstu potencijalnog oštećenja. Ovakvi se zvukovi mnogo bolje prihvaćaju u javnosti, ukoliko ljudi vide značaj ovakvih aktivnosti, bilo za njih osobno ili za cjelokupnu javnost. Vrlo velike varijacije u ljudskim reakcijama, pa čak i iste osobe u različitim socijalnim uvjetima, ilustriraju činjenicu da reakcije vrlo često imaju sociološki element, iako je i psihološki element također uključen. Ukoliko je projekt sam po sebi nepoželjan, svaka se projektna operacija može gledati kao nepoželjna, te će broj prijava oštećenja biti mnogo veći nego kod projekta koji je dobro prihvaćen ili projekta za koji se smatra da je značajan za dobrobit društva.

5.2.5.Metode i tehnike reduciranja vibracije tla

• Smanjenje količine eksploziva po otpucavanju. Ova tehnika vjerojatno najviše utječe na amplitudu brzine čestica.

• Smanjenje čepa, ali ne do stupnja povećanja zvučnog efekta i/ili odbacivanja materijala.

• Smanjenje podbušenja.

• Smanjenje dubine bušotina.

• Korištenje projekta miniranja koji stvara maksimalnu relaksaciju; to znači korištenje većeg intervala otpucavanja među bušotinama ili redova bušotina.

• Dopuštenje barem jednog slobodnog lica.

• Gdje god je moguće, napredovanje paljenja bušotina ili redova bušotina pomoću milisekundnih usporivača treba se kretati u smjeru od građevina.

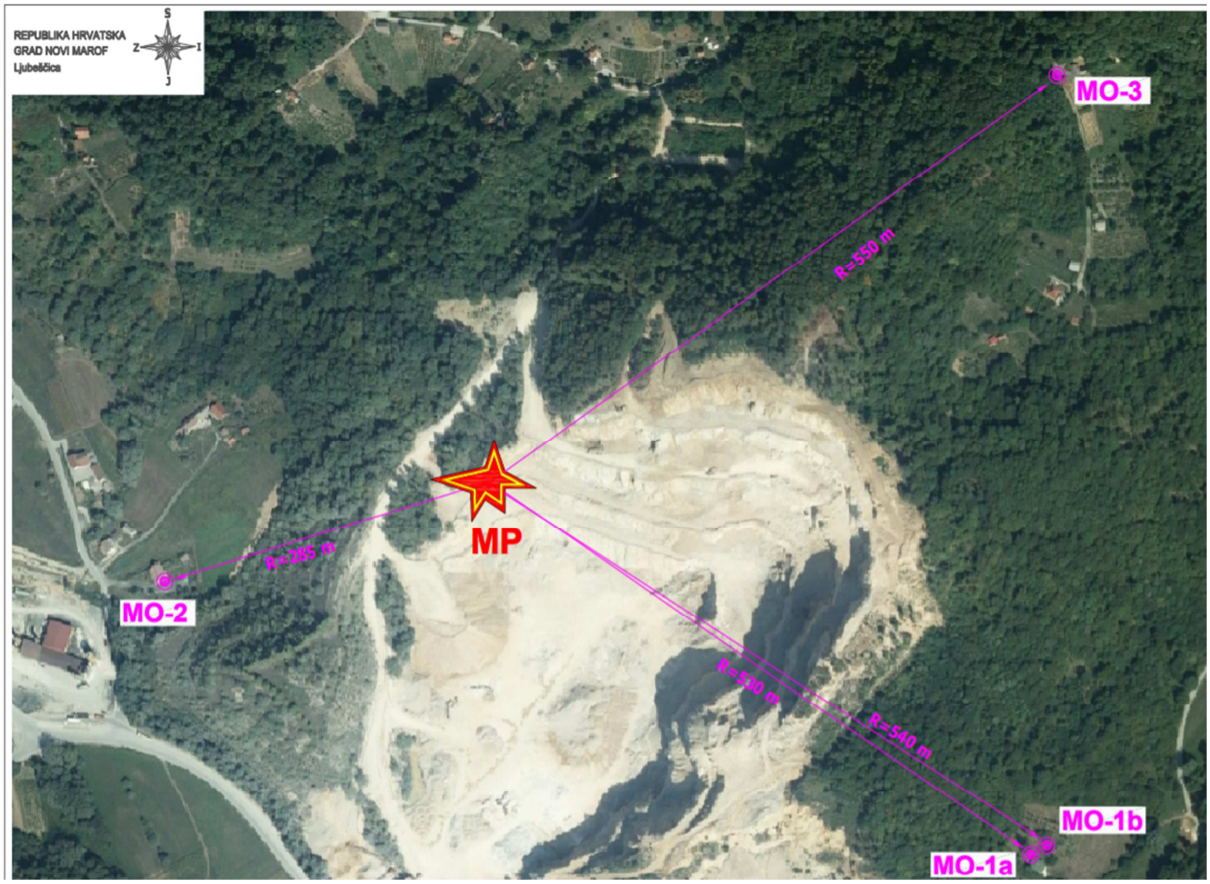
• Korištenje duljih intervala otpucavanja gdje geološki uvjeti uz način paljenja to dopuštaju.

• Ograničenje upotrebe eksploziva na dublje i čvršće dijelove masiva ako se pokrov može ukloniti drugačije.

• Gdje je moguće, držati ukupno vrijeme cjelokupnoga miniranja ispod jedne sekunde. Gdje ukupno miniranje prelazi trajanje od jedne sekunde, učestalost žalbi i time "prijavljene" štete rastu.

6. Mjerenje vibracija i buke prilikom miniranja u kamenolomu „Špica" u Ljubešćici

Provedeno je terensko mjerenje seizmičkih efekata miniranja (brzine oscilacije tla) i zračnog udarnog vala (buke) za lokaciju kamenoloma „Špica". Miniranje je izvršeno 18.12.2019. godine. Miniranje je prema elaboratu miniranja provela tvrtka Kaming d.d. Bilo je potrebno izvesti kontrolno terensko mjerenje brzine oscilacije tla kako bi se radovi bušenja i miniranja odvijali bez posljedica za potrebe eksploataciju tehničkog-građevnog kamena. Mjerenja su izvedena prilikom proizvodnog miniranja u razini III. etaže s ciljem da se odrede utjecaji seizmičkih potresa na obližnje naselje, odnosno da se odrede količine eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja kako ne bi došlo do oštećenja građevina prilikom budućih miniranja. Mjerenja intenziteta oscilacije tla (trokomponentni geofon) i zračni udar (mikrofon) izvedena su u četiri opažanja (MO-1a, MO-1b, MO-2 i MO-3), prilikom otpucavanja minskog polja (MP).



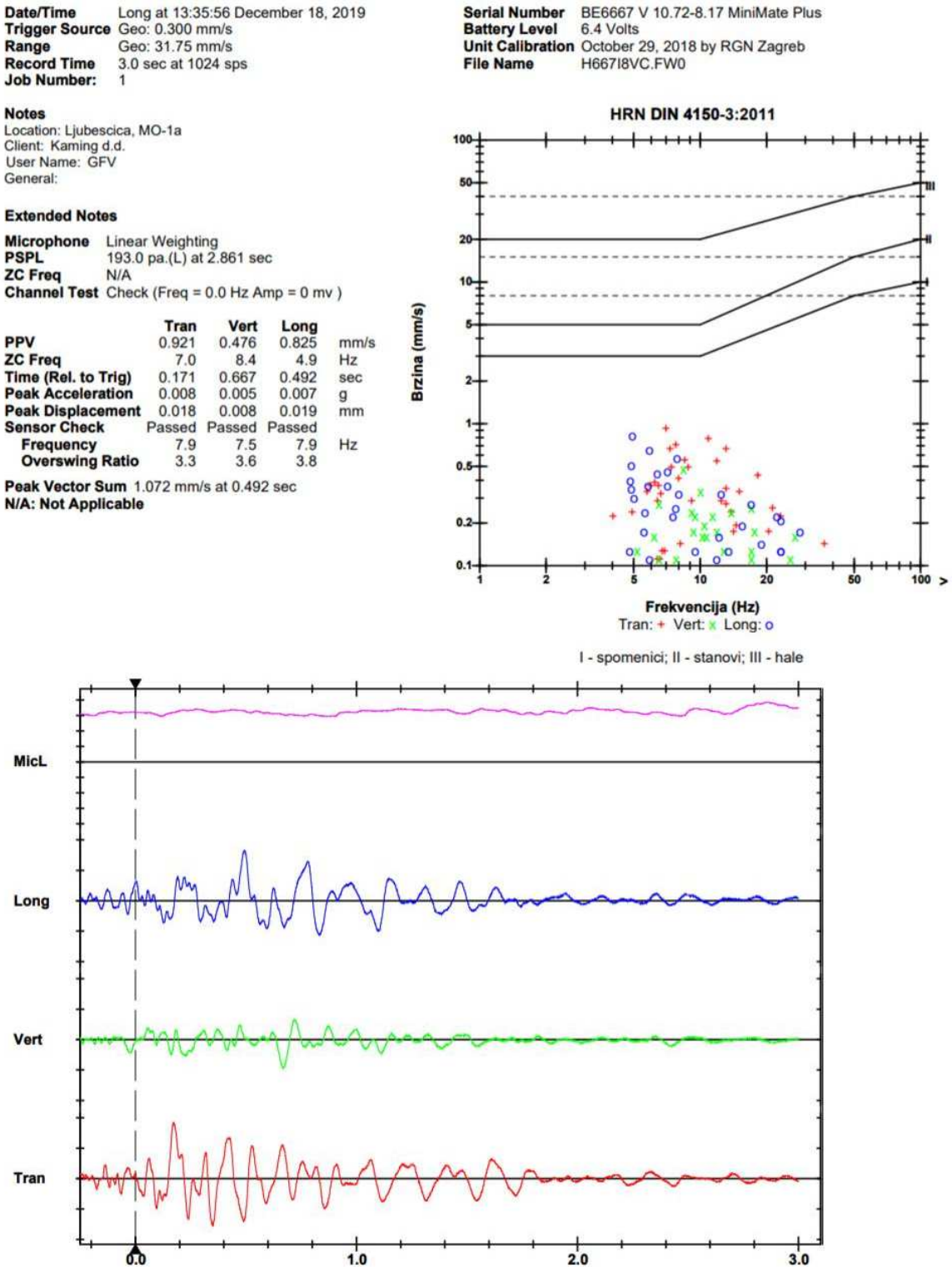
Slika 34. : Položaj mjesta opažanja i minskog polja

Preuzeto s: Strelec S. ; Jug J. ; Filipović A. (2020.) Studija seizmičkih efekata miniranja u kamenolomu „Špica“ u Ljubešćici, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin, 12.6.2020.

Prilikom proizvodnog miniranja mjerene su brzine oscilacije tla i zračni udarni val na ukupno 4 mjesta opažanja. Na mjestu opažanja MO-1 postavljena su dva mjerna instrumenta, uz stambeni objekt (MO-1a) i uz pomoćni objekt (MO-1b). Na mjestima MO-2 i na MO-3 je postavljen po jedan instrument. Udaljenost minskog polja od mjesta opažanja određena je upotrebom Google Earth-a.

6.1. Mjesto opažanja MO-1a

Na mjestu opažanja je mikrofon zabilježio tlak zračnog udarnog vala od 193 Pa. Ako preračunamo u decibele, ono iznosi 139,7 dB. Trokomponentni geofon je izmjerio vertikalnu brzinu od 0,476 mm/s, transverzalnu brzinu od 0,921 mm/s i longitidunalnu brzinu od 0,825 mm/s. Pomoću formule navedene u poglavlju 5.2.2. možemo lako izračunati rezultirajuću brzinu oscilacije tla. Rezultirajuća brzina oslilacije tla iznosi 1,325 mm/s. Na slici 34. su prikazani rezultati mjereni na mjestu opažanja MO-1a. Vremenska skala je prikazana na x-osi. U prvom grafu koji označava tlak zračnog vala, y-os označava razinu tlaka zračnog vala izražen u paskalima. Jedan razmak između crtica (interval) iznosi 50 paskala. Kod tri donja grafa y-os označava brzinu oscilacija tla. Jedan razmak između crtica iznosi 0,5 mm/s.

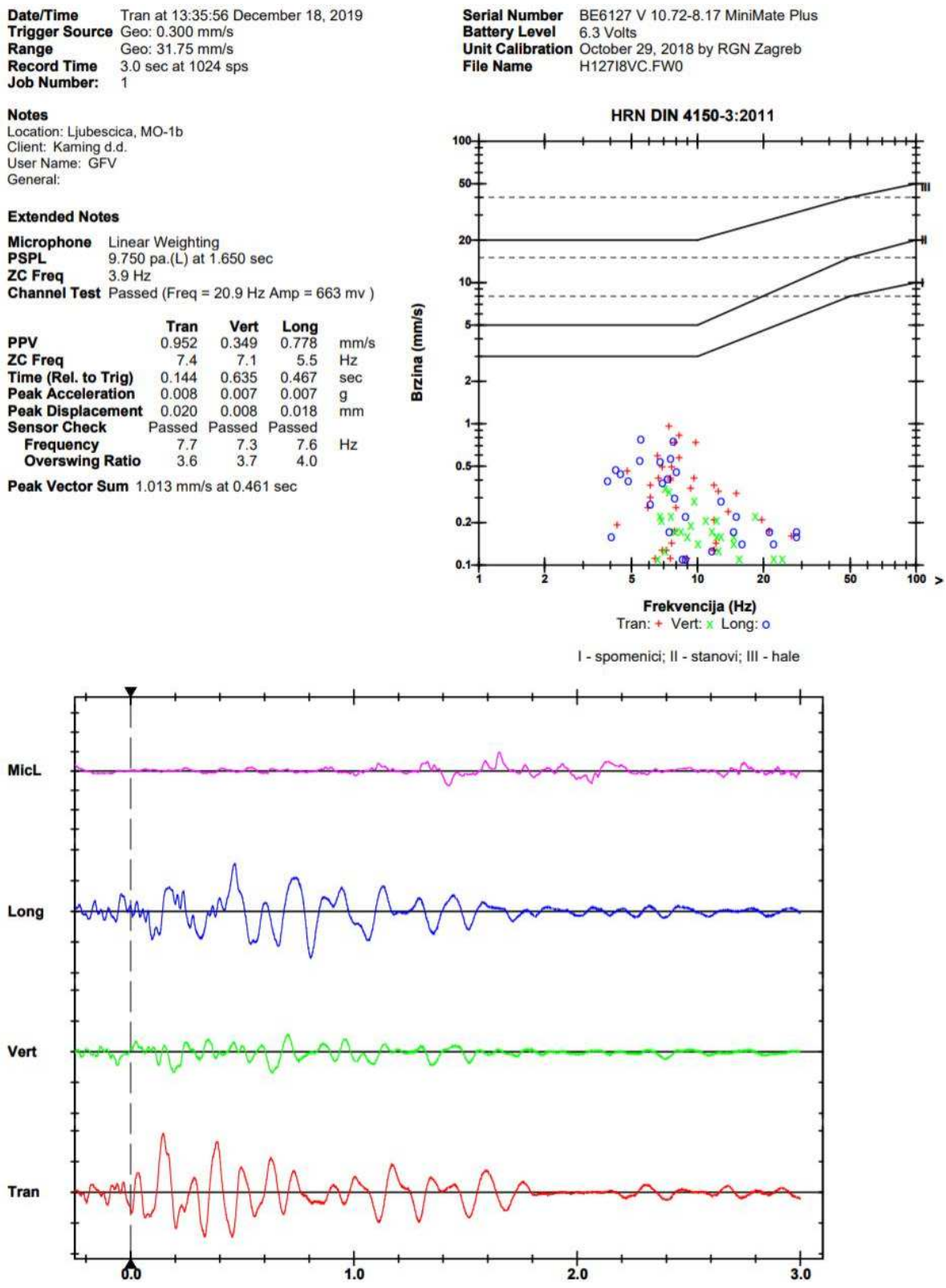


Slika 35. : Prikaz rezultata mjerenih na mjestu opažanja MO-1a

Preuzeto s: Strelec S. ; Jug J. ; Filipović A. (2020.) Studija seizmičkih efekata miniranja u kamenolomu „Špica“ u Ljubešćici, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet , Varaždin, 13.6.2020.

6.2. Mjesto opažanja MO-1b

Na mjestu opažanja MO-1b je zabilježen maksimalni tlak zračnog udarnog vala od 9750 Pa. Preračunato u decibele iznosi 173,8 dB. Trokomponentni geofon je prikazao vertikalnu brzinu od 0,349 mm/s, transverzalnu brzinu od 0,952 mm/s i longitdinalnu brzinu od 0,778 mm/s. Rezultantna brzina oscilacije tla iznosi 1,278 mm/s. Na slici 35. su prikazani rezultati mjerenja na mjestu opažanja MO-1b. Jedan interval x-osi iznosi 0,2 sekunde dok kod y-osi iznosi 10000 Pa za tlak zračnog udarnog vala i 0,5 mm/s za brzinu oscilacije tla.

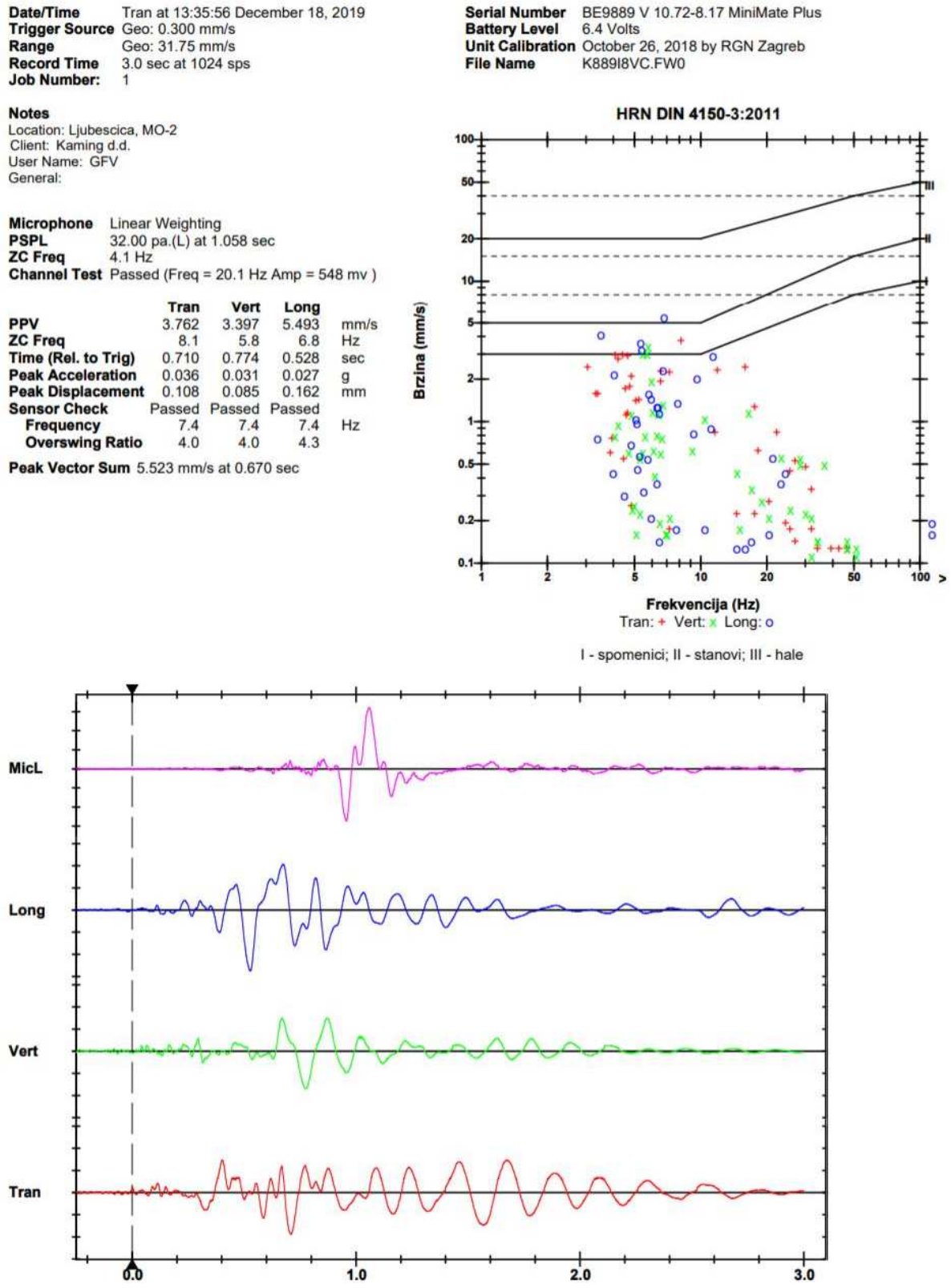


Slika 36. : Prikaz rezultata mjerenja na mjestu opažanja MO-1b

Preuzeto s: Strelec S. ; Jug J. ; Filipović A. (2020.) Studija seizmičkih efekata miniranja u kamenolomu „Špica“ u Ljubešćici, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin , 13.6.2020.

6.3. Mjesto opažanja MO-2

Na mjestu opažanja MO-2 zabilježen je maksimalni tlak zračnog udarnog vala od 32000 Pa, što je ekvivalent 184 dB. Trokomponentni geofon je prikazao vertikalnu brzinu od 3,397 mm/s, transverzalnu brzinu od 3,762 mm/s i longitudinalnu brzinu od 5,493 mm/s. Rezultatna brzina oscilacije tla iznosi 7,474 mm/s. Na slici 36. su prikazani rezultati mjerenja na mjestu opažanja MO-2. Jedan interval x-osi je 0,2 sekunde dok kod y-osi iznosi 10000 Pa za tlak zračnog udarnog vala i 2 mm/s za brzinu oscilacije tla.

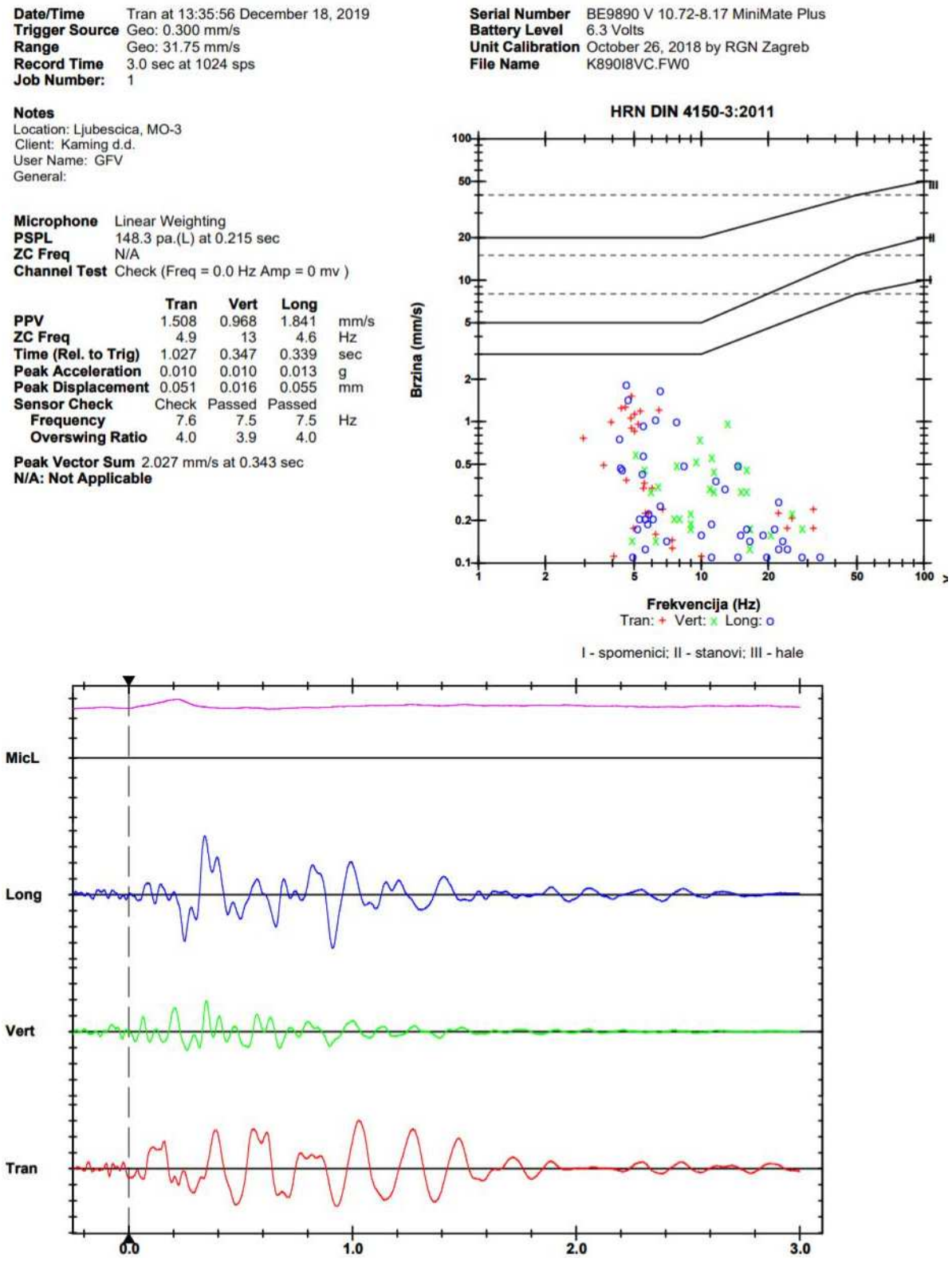


Slika 37. : Prikaz rezultata mjerenja na mjestu opažanja MO-2

Preuzeto s: Strelec S. ; Jug J. ; Filipović A. (2020.) Studija seizmičkih efekata miniranja u kamenolomu „Špica“ u Ljubešćici, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin , 13.6.2020.

6.4. Mjesto opažanja MO-3

Na mjestu opažanja MO-3 zabilježen je maksimalni tlak udarnog zračnog vala koji iznosi 148,3 Pa, što je ekvalent 137,4 dB. Trokomponentni geofon je prikazao rezultat vertikalne brzine od 0,968 mm/s, transverzalne brzine od 1,508 mm/s i longitudinalne brzine od 1,841 mm/s. Rezultantna brzina oscilacije tla iznosi 2,562 mm/s. Na slici 37. prikazani rezultati mjerenja na mjestu opažanja MO-3. Jedan interval x-osi iznosi 0,2 sekunde dok jedan interval kod y-osi iznosi 50 Pa za tlak udranog zračnog vala i 0,5 mm/s za brzinu oscilacije tla.



Slika 38. : Prikaz rezultata mjerenja na mjestu opažanja MO-3

Preuzeto s : Strelec S. ; Jug J. ; Filipović A. (2020.) Studija seizmičkih efekata miniranja u kamenolomu „Špica“ u Ljubešćici, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin, 13.6.2020.

6.5. Analiza rezultata s mjesta opažanja

Povodom miniranja 18. prosinca 2019. godine nije došlo do nikakvih oštećenja i šteta od miniranja. Prema HRN DIN 4150-3:2011 usvojena je vrijednost dopuštenih oscilacija tla za kategoriju stambene zgrade sa žbukanim zidovima 0,5 cm/s. Uz iznimku MO-2, ostale izmjerene vrijednosti oscilacija na mjestima opažanja zadovoljavaju standard dozvoljenih brzina oscilacija tla. Obzirom da nije bilo nikakve štete na stambeni objektu na lokaciji MO-2, zaključuje se da su minerski radovi pravilno izvedeni, a nastale oscilacije tla nisu bile štetne za kategoriju građevina stambene zgrade s žbukanim zidovima. Uz pridržavanje dopuštenih količina eksplozivnog punjenja, preporuka je instrumentalna opažanja seizmičkih oscilacija vršiti prilikom svakog budućeg miniranja. Zbog općenito nepovoljnog utjecaja seizmičkog efekta na stambene građevine i psihofizičke reakcije okolnog stanovništva, ukupno vrijeme trajanja detonacije ne bi trebalo biti iznad jedne sekunde. Kada ukupno vrijeme oscilacija prelazi trajanje od jedne sekunde, učestalost žalbi i time "prijavljene" štete rastu. Iz prikaza rezultata mjerenja vidljivo je da se prilikom opažanja predmetnog miniranja glavnina oscilacija čestica tla dogodila unutar jedne sekunde, što je povoljna karakteristika.

7. Zaključak

Svakim danom svjedoci smo napretku tehnologije. Bez obzira na napredak, izloženi smo opasnostima kao što su vibracije i buka u ovom slučaju. Za rad koji uključuje rad s vibracijama i bukom bitno je poznavati neke karakteristike koje su dane u ovom diplomskom radu. Također, bitno je savladati vještine zaštite na radu i upotreba zaštitnih sredstava. Zdravstveni problemi uzrokovani bukom i vibracijama najčešće dolaze do izražaja već kada je prekasno. Pod time se misli kada su već nanesene štetne posljedice za organizam. Sigurno da taj problem daje još veći značaj upoznavanja s vibracijama i bukom, pogotovo u poslovima koji su izloženi tim štetnim utjecajima. Jedan od tih poslova je miniranje u kamenolomu. Miniranje se razrađivalo u drugom dijelu ovog diplomskog rada. To je izuzetno odgovoran posao u kojem treba misliti o različitim faktorima, ne samo o vibracijama i buci. Jedan od njih je i količina eksplozivnog punjenja. Za obranu protiv štetnog djelovanja najbolje je djelovati preventivno, osnosno prije nego li se šteta dogodi. Za buku se pod time misli nošenje zaštitnih slušalica i čepića za uši, dok za vibracije se koriste antivibracijske rukavice. Što se tiče miniranja u kamenolomu „Špica“, može se zaključiti da se miniranja izvode prema zadanim i usvojenim standardima. Građevine i objekti u blizini nisu oštećeni, a i vodi se računa da amplituda vibracije i buke ne traje više od jedne sekunde. . To je bitno, jer se duljim izlaganjem intenzitetima većim od dozvoljenih mogu razviti profesionalne bolesesti, a može se izazvati i psihofizička reakcija okolnog stanovništa.

Literatura

Štefanović D.(1993.) : Tehnička enciklopedija, Leksikografski zavod „Miroslav Krleža“ u Zagrebu, str. 476

Golubović-Bugarski V. (2010.) Buka i vibracije. Skripta – izvodi predavanja. Univerzitet u Banjoj Luci. Mašinski fakultet.

Labor J. (2009.) Fizika 3, Alfa d.d. Zagreb, str. 26-28

Strelec S. ; Jug J. (2017) Planiranje sigurnih miniranja u urbanim sredinama, Društvo za geotehniku u Bosni i Hercegovinu, Sarajevo

Mlinarić M.(2015.) Mjerenje i zaštita od buke u proizvodnom prostoru na primjeru poduzeća Muraplast d.o.o. , Sveučilište Sjever, Varaždin

Zovko M. (2010.) Buka- nastanak, mjerenje, zaštita, Časopis *m* kvadrat, Široki Brijeg

Čala I. (2009.) Mjerenje vibracija tehničkih sustava, Zavod za industrijsko inženjerstvo, Zagreb

Strelec S. (2015.) Podpovršinski istražni radovi, Geotehnički fakultet, Varaždin, str 107-133

Strelec S. ; Jug J. ; Filipović A. (2020.) Studija seizmičkih efekata miniranja u kamenolomu „Špica“ u Ljubešćici, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin

Strelec S. ; Jug J. ; Stanko D.(2014.) Studija seizmičkih efekata miniranja u kampu „ Rujevica“, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin

Carr D. (2020.), Understanding the LRAD, the “Sound Cannon”, Pitchfork, Chicago

Tomljenović D. (2020.) Osvrt na potres u Zagrebu, Rudarsko geološko naftni fakultet, Zagreb

Domitrović H. (2019.) Glazbena akustika, Fakultet elektrotehnnike i računarstva, Zagreb

Poplašen D.; Kerner I. (2013.) Vibracije koje se prenose na šake i ruke, Specijalistička ordinacija medicine rada, Zagreb

Popis slika

Slika 1. Zgušnjavanje i razrjeđivanje longitudinalnog vala	Stranica 2.
Slika 2. Valna duljina kod longitudinalnog vala	Stranica 3.
Slika 3. Valna duljina kod transverzalnog vala	Stranica 3.
Slika 4. Probijanje zvučnog zida	Stranica 4.
Slika 5. Slobodno zvučno polje	Stranica 6.
Slika 6. Mjerni instrumenti za mjerenje zvučnog intenziteta	Stranica 6.
Slika 7. Grafički prikaz čistog tona i složenog tona	Stranica 8.
Slika 8. Formule za računanje decibela	Stranica 9.
Slika 9. Osnovni zvučni izvori	Stranica 10.
Slika 10. Struktura instrumenta za mjerenje buke	Stranica 12.
Slika 11. Zvukomjer Larson Davis	Stranica 13.
Slika 12. Vibracijsko sito	Stranica 15.
Slika 13. Wohlerova krivulja dinamičke	Stranica 16.

čvrstoće	
Slika 14. Mehanički parametri	Stranica 17.
Slika 15. Prikaz najjednostavnijeg vibracijskog sustava	Stranica 18.
Slika 16. Graf prigušenog osciliranja	Stranica 18.
Slika 17. Razlika amplitude i faze sustava	Stranica 19.
Slika 18. Pokus s njihalima	Stranica 20.
Slika 19. Ovisnost amplitude rezonatora o frekvenciji oscilatora	Stranica 21.
Slika 20. Most Tacoma	Stranica 22.
Slika 21. Podjela vibracijskog signala	Stranica 23.
Slika 22. Mjerenje vibrracija na osnovi prethodnog iskustva	Stranica 24.
Slika 23. Pretvarač akceleracije (akcelerometar)	Stranica 25.
Slika 24. Slušna ploha	Stranica 26.
Slika 25. LRAD (long range acoustic device)	Stranica 27.
Slika 26. Pojava bijelog prsta	Stranica 28.
Slika 27. Dijagram tipičnih zvučnih nivoa s vrijednostima u decibelima i milibarima	Stranica 30.
Slika 28. Ovisnost paskala i decibela	Stranica 31.
Slika 29. Zapis vibracija nastalih miniranjem	Stranica 33.
Slika 30. Karta epicentara potresa u	Stranica 34.

zagrebačkom području u razdoblju 22.03.2020. do 26.03.2020.	
Slika 31. Proračun dopuštene količine eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja za kamenolom „Špica“	Stranica 36.
Slika 32. Orijentacija geofona u odnosu na točku detonacije	Stranica 38.
Slika 33. Snimka komponenata oscilacije tla, zračnog udara i rezultirajuće brzine	Stranica 39.
Slika 34. Položaj mjesta opažanja i minskog polja	Stranica 43.
Slika 35. Prikaz rezultata mjerenih na mjestu opažanja MO-1a	Stranica 45.
Slika 36. Prikaz rezultata mjerenih na mjestu opažanja MO-1b	Stranica 47.
Slika 37. Prikaz rezultata mjerenih na mjestu opažanja MO-2	Stranica 49.
Slika 38. Prikaz rezultata mjerenih na mjestu opažanja MO-3	Stranica 51.

Popis tablica

Tablica 1. Opis šteta koju uzrokuju tlakovi udarnog vala	Stranica 30.
Tablica 2. Podatci količine eksploziva po stupnju paljenja po različitim udaljenostima.	Stranica 37.