

UTJECAJ SEIZMIČKIH EFEKATA MINIRANJA NA OBLIŽNJE GRADEVINE (KOMPARATIVNA ANALIZA)

Stjepan STRELEC, Ivan BATURIĆ i Branko BOŽIĆ

Geotehnički fakultet Varaždin, Hinkovićevo 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

Ključne riječi: Miniranje, Seizmički efekti, Dozvoljene brzine oscilacije

Prilikom masovnog miniranja u kamenolomu vapnenca »Špica« (Ljubešćica, Hrvatsko Zagorje) mjerene su brzine oscilacije tla na dva mjesta opažanja za više minskih polja. Izložena je komparativna analiza proračuna dozvoljene količine eksplozivnog punjenja za maksimalne i rezultantne oscilacije tla s obzirom na kriterije koji se primjenjuju u svijetu i usporedba dobivenih podataka s njima.

Uvod

Prilikom masovnih miniranja koja se izvode na kamenolomima uslijed širenja seizmičkih valova javljaju se seizmički efekti. Ako su dovoljno snažni mogu znatno oštetiti postojeće građevine u susjedstvu kamenoloma.

Građevine koje se nalaze u blizini izvora eksplozije mogu uslijed jakih oscilacija biti značajno oštećene. Iskustva tijekom višegodišnjih mjerenja pokazala su da su brzina, ubrzanje i pomak čestica kod oscilacije tla najbolji parametri za procjenu nastale štete obližnjih građevina. Ove osnovne dinamičke veličine (brzina, pomak i ubrzanje) ovisne su od vrste stijene i o prigušenju seizmičkih valova na putu njihovog širenja. Što su oscilacije u elastičnoj zoni intenzivnije to se manje energije potroši na drobljenje i odlom stijenske mase.

U Hrvatskoj nemamo tehničkih propisa o kvantitativnom kriteriju za ocjenu seizmičkog upliva na građevine pa se u domaćoj rudarskoj praksi za kritičnu brzinu oscilacije najčešće uzima 1.5 cm/s. To prema normama iz ZND (prije SSSR), koja se u praksi pokazala dobra i realna predstavlja prijelaz iz 4. u 5. stupanj potresa.

Kriteriji za ocjenu seizmičke sigurnosti

Za točnije određivanje dozvoljenih brzina oscilacije, Karlheinz Arnold (Olofsson, 1990) uzima u obzir podlogu na kojoj je temeljena građevina i vidljive štete koje nastaju pri jačim oscilacijama tla.

Prikaz dopuštenih brzina oscilacija dat je u tablici 1, a točnost navedenih vrijednosti potvrđena je mnogim mjerenjima koja su provedena zadnjih četrdeset godina. Zbog praktičnosti uobičajeno je vrijednosti brzina oscilacija u literaturi izraziti u cm/s, a ne u m/s prema međunarodnom sustavu jedinica SI (Standard International).

Key-words: Blasting, Seismic effects, Allowed oscillation velocities

The article gives a comparative analysis of allowed explosive quantities at blasting in the limestone quarry »Špica« (Ljubešćica, Hrvatsko Zagorje) executed were precise measurements after mass blasting. The measurements were performed at two observation spots, with three-component geophones and a comparative analysis, considering the criteria in the world are described.

Tablica 1 - Dozvoljene brzine oscilacije po Karlheinz Arnoldu (Olofsson, 1990)

Table 1 - Allowed oscillation velocities after Karlheinz Arnold (Olofsson, 1990)

Brzina uzdužnih valova (m/s) Wave velocity (m/s)	1000 - 1500	2000 - 3000	4500 - 6000
Opis stanja objekata nakon izazvanih oscilacija, vrijednosti brzina oscilacije dane su u cm/s	Vrsta podloge na kojoj je temeljen objekt Foundation of the building		
Result in typical housing structures, value of allowed oscillation gives in cm/s	pijesak, šljunak, glina, podzemna voda Sand, gravel, clay and ground water	morena, škriljevac, raspucali vapneni moraine, slate, soft limestone	kompaktni vapnenac, pješčenjak, granit, kvarcit Hard limestone, sandstone, granite, gneiss.
nema vidljivih pukotina no visible cracking	1.8	3.5	7.0
sitne pukotine i počinje osipanje žbuke fine cracks, falling plaster	3.0	5.5	10.0
pojavljuju se veće pukotine, oštećenja lako uočljiva notice-able cracking	4.0	8.0	15.0
otpadaju komadi žbuke, pojavljuju se veća oštećenja severe cracking	6.0	11.5	22.5

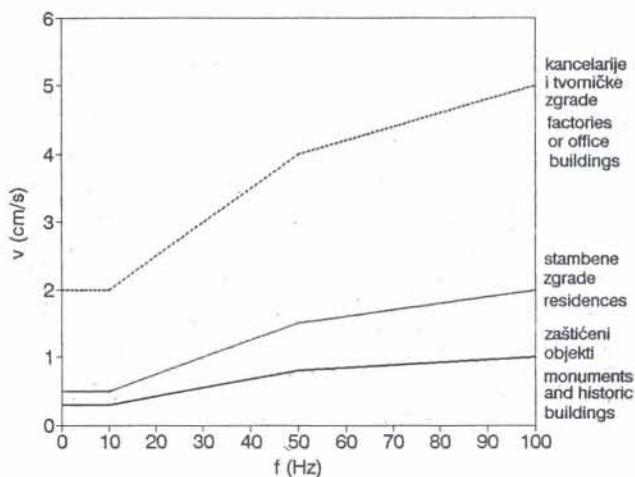
Klasifikacijom građevina po kategorijama glede granične brzine oscilacije postavljeni su stroži kriteriji u Njemačkoj. Jedan od razloga pooštrenja su stoljetni stari objekti kulturne baštine koji teže podnose istu razinu oscilacija u odnosu na dobro zidane građevine.

Kategorije građevina dopuštene brzine oscilacija obrađuje DIN 4150.

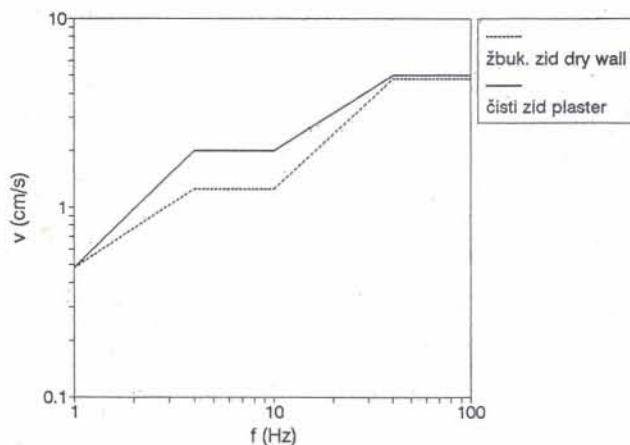
Frekvencija seizmičkog vala ovisi o karakteristikama stijene i udaljenosti od mjesta eksplozije do mjesta opažanja. U nekonsolidiranim materijalima koji su saturirani vodom, uslijed detonacije eksploziva javljaju se niske frekvencije, dok su u kompaktnim stijenama oscilacije tla viših frekvencija.

Za određivanje frekvencije oscilacije tla, zbog toga što su one nestacionarne periodičke funkcije, u praksi se uzima srednja vrijednost frekvencije promatranih pet dominantnih perioda trajanja oscilacija, koje se očitaju iz seizmograma.

Prikaz graničnih vrijednosti dozvoljenih brzina oscilacija tla po DIN 4150 dat je na sl. 1. Na sl. 2 dat je grafički prikaz graničnih brzina oscilacija tla za građevine od strane United States Bureau of Mines (U. S. Bureau of Mines, 1980), gdje su kriteriji za određivanje graničnih brzina blaži, a građevine podijeljene u dvije kategorije (žbukane i zgrade koje to nisu – čisti zid).



Sl. 1 Granične brzine oscilacije u funkciji frekvencije po DIN-u
Fig. 1 Boundary oscillation velocity in a frequency function after DIN



Sl. 2 Granične brzine oscilacije u funkciji frekvencije (U. S. A.)
Fig. 2 Boundary oscillations in a frequency function after USA (Bureau of Mines)

Mjerenje brzine oscilacije tla

Brzine oscilacija tla koje nastaju uslijed miniranja mogu se mjeriti u tlu i građevini, ovisno od cilja i namjere ispitivanja. Mjerenja se obavljaju s pokretnim seizmografima pri čemu se registriraju komponentne brzine oscilacije tla. Svaki geofon nakon detonacije na snimci seizmograma registrira po jednu krivulju. Iz tako dobivenih snimaka računa se brzina oscilacije.

Maksimalna brzina oscilacije (V_{max}) izračuna se iz maksimalnih brzina svake komponente, neovisno o vremenu, a jednaka je njihovom vektorskom zbroju:

$$V_{max} = \sqrt{V_{Tmax}^2 + V_{Vmax}^2 + V_{Lmax}^2} \quad (\text{cm/s}) \quad (1)$$

gdje su:

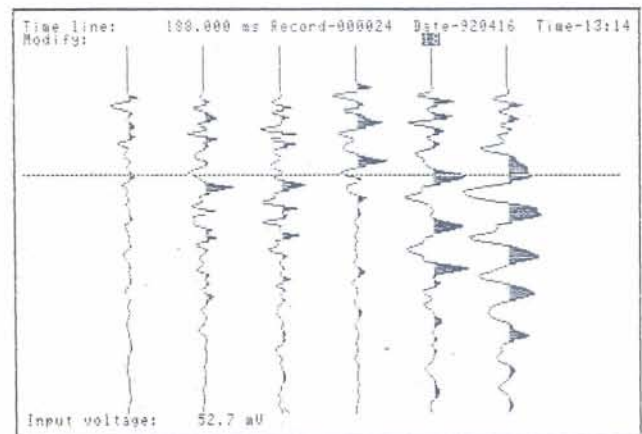
V_{Tmax} – maksimalna transverzalna komponenta brzine oscilacije

V_{Vmax} – maksimalna vertikalna komponenta brzine oscilacije

V_{Lmax} – maksimalna longitudinalna komponenta brzine oscilacije

Maksimalna brzina oscilacije (V_{max}) nije vektorska rezultanta brzina pojedinih komponenta, ali ima najveću vrijednost i služi za rutinsko određivanje rezultirajuće brzine oscilacije.

Rezultantna brzina dobije se određivanjem momenta najvećih amplituda pojedinih tragova na seizmografu i za te točke odrede se komponentne brzine, izračuna njihov vektorski zbroj, odnosno rezultantna brzina oscilacije. Na sl. 3 prva tri traga predstavljaju prvo mjesto opažanja, a ostala tri drugo. Za drugo mjesto opažanja horizontalna linija postavljena je za očitavanje najveće rezultantne brzine. U radu korištena je seizmička aparatura Terraloc tip MK-3 švedskog proizvođača ABEM.



Sl. 3 Trokomponentno registriranje brzina oscilacija na dva mjesta opažanja

Fig. 3 Three-component registration of velocity in two observation spots

Određivanje radijusa ugrožene zone pri miniranju

Intenzitet potresa zavisi od količine eksplozivnog punjenja, udaljenosti od mjesta miniranja, sastava tla i načina miniranja. Na temelju višegodišnjeg opažanja i mjerenja brzina oscilacija tla utvrđena je njihova ovisnost. Medusobnu ovisnost Sadovski je izrazio formulom (prema Krsniku, 1989):

$$V = K \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^n \quad (\text{cm/s}) \quad (2)$$

gdje su:

V – rezultantna brzina oscilacije tla

R – udaljenost mjesta opažanja od minskog polja (m)

Q – količina eksplozivnog punjenja koja detonira trenutno (kg)

K – koeficijent načina miniranja

n – koeficijent prigušenja seizmičkih valova na putu prostiranja

Izraz $\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} = \varrho$ predstavlja svedenu količinu eksploziva, dok je recipročna vrijednost ovog izraza svedena udaljenost $R_{sv} = 1/\varrho$.

Za svako miniranje poznate su količine eksplozivnog punjenja (Q) i udaljenost mjesta opažanja od minskog polja (R), a iz podataka seizmičkih mjerenja komponentnih brzina izračuna se rezultantna brzina (V_R) u mjestima opažanja po formuli:

$$V_R = \sqrt{V_T^2 + V_V^2 + V_L^2} \quad (\text{cm/s}) \quad (3)$$

V_T – transversalna komponenta brzine oscilacije

V_V – vertikalna komponenta brzine oscilacije

V_L – longitudinalna komponenta brzine oscilacije

Vrijednosti koeficijenata K i n mogu se izračunati pomoću dobivenih rezultantnih brzina oscilacija tla ako imamo njihove vrijednosti na dva mjesta opažanja, koje su izmjerene u približno istom smjeru na različitim udaljenostima od minskog polja (K r s n i k, 1989).

Za proračun dozvoljene količine eksplozivnog punjenja napisan je program na PC računalu u paketu Quattro Pro. Program, na temelju izmjerenih rezultantnih brzina na dva mjesta opažanja, njihovih udaljenosti od minskog polja i dozvoljene granične brzine oscilacije, izračunava dopuštene količine eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja na određenim udaljenostima od minskog polja i crta Q-R dijagram (Q-dozvoljena količina eksplozivnog punjenja, R-udaljenost od minskog polja).

Određivanje dopuštene količine eksplozivnog punjenja

Na kamenolomu Špica vapnenac se dobiva miniranjem s dubokim minskim bušotinama. Prilikom otpucavanja minskih bušotina izmjerene su brzine oscilacije tla kod najbližih stambenih zgrada u mjestu Ljubešćica.

Minsko polje sastojalo se od 5 minskih bušotina raspoređenih u jednom redu. Dužine (l) i eksplozivna punjenja minskih bušotina (Q) prikazane su u tablici 2.

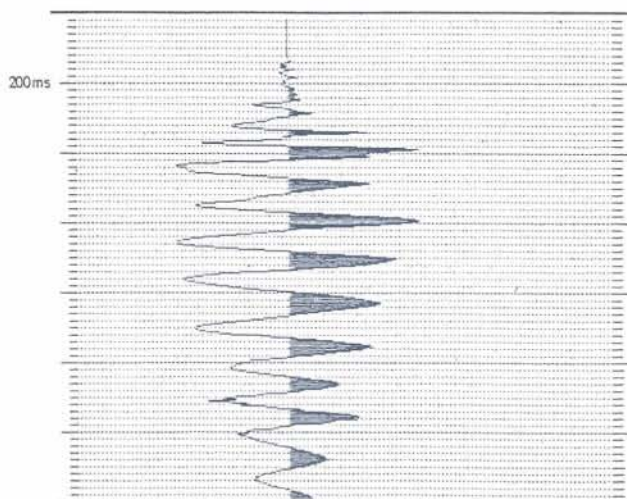
Tablica 2 - Eksplozivno punjenje po stupnju paljenja

Table 2 - Explosive filling as per ignition level

Minska Bušotina Blasting bore	l (m)	Q (kg)	Stupanj paljenja Ignition level	Eksplozivno punjenje po stupnju paljenja (kg) Explosive filling per ignition level
1	29.2	106	I	106
2	29.6	120	II	240
3	29.6	120		
4	30.2	129	III	258
5	30.2	129		
Ukupno: Total:	148.8	604		604

Na temelju rezultata mjerenja određen je intenzitet potresa izazvan miniranjem i izveden proračun dozvoljenih količina eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja za određene udaljenosti stambenih zgrada od mjesta miniranja. Koristeći pri tome granične oscilacije tla s obzirom na kriterije u svijetu (DIN, USA, ZND i SWEDEN).

Analizom seizmograma trenutnih eksperimentalnih miniranja dobivene horizontalne geofonske komponente imaju veće amplitude, odnosno brzine osciliranja, u odnosu na vertikalne interval usporenja 50 ms, odnosno prosječno trajanje vremena jedne periode 100 ms (sl. 4), te je kao optimalni interval usporenja izabran za čitav kamenolom milisekundni uspориvač od 50 ms (Strelec, 1992).



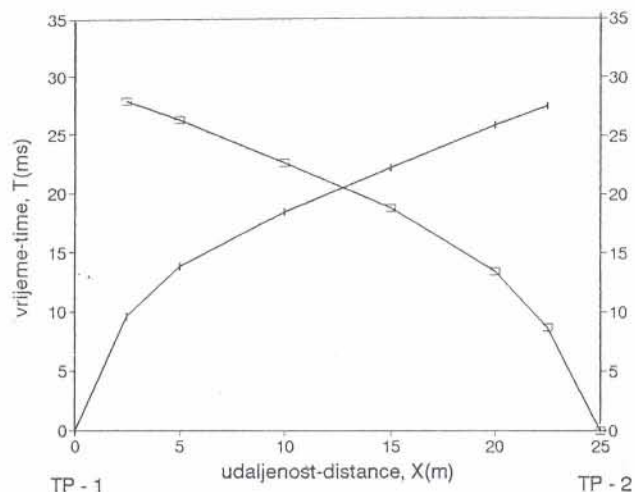
Sl. 4 Primjer registrirane oscilacije za određivanje frekvencije
Fig. 4 Recorded oscillation for frequency determination

Za određivanje granične vrijednosti oscilacije prema DIN i USA normama bilo je potrebno odrediti frekvenciju osciliranja čestica neposredno uz promatranu građevinu kako bi se iz sl. 1 (DIN), odnosno iz sl. 2 (USA) mogle odrediti dozvoljene brzine. Izmjerena prosječna frekvencija oscilacije tla iznosi ≈ 10 Hz (sl. 4). Za DIN normu dobivena je granična brzina za stambene zgrade 0.5 cm/s, a za USA normu (žbukani zid) granična brzina oscilacije tla 1.2 cm/s.

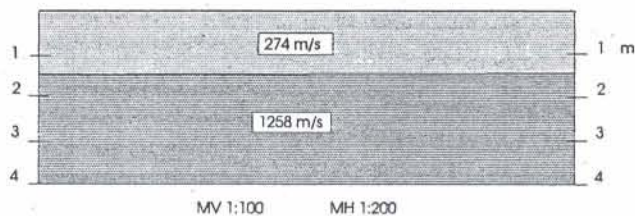
Za određivanje granične vrijednosti brzina oscilacije tla po Karlheinz Arnoldu (SWE) bilo je potrebno uzeti u obzir podlogu na kojoj je temeljen objekt, odnosno izmjeriti brzinu širenja longitudinalnih valova da bi se mogle odrediti granične brzine oscilacije (tablica 1). Za mjerenja brzina oscilacije tla korišten je ABEM-ov instrument. Dijagram dromokrona prikazan je na sl. 5, a srednje brzine širenja P-valova i debljine pojedinih slojeva na sl. 6.

Pošto je objekt temeljen na dubini 1.5 m iz tablice 1 uzeta je vrijednost granične brzine oscilacije tla 1.8 cm/s. Ovu vrijednost je u slučaju starijih zgrada uobičajeno smanjiti za 20%, što u ovom slučaju nije uzeto u obzir.

Na temelju izračunatih maksimalnih brzina oscilacije tla (l) proračunate su dozvoljene količine eksploziva po stupnju paljenja za određene udaljenosti



Sl. 5 Dijagram dromokrona
Fig. 5 Dromocrone diagram



Sl. 6 Dubinski seizmički presjek neposredno uz promatrani objekt
Fig. 6 Depth seismic section immediately by the observed housing structures

Tablica 3 - Q = f(R) za V_{max}

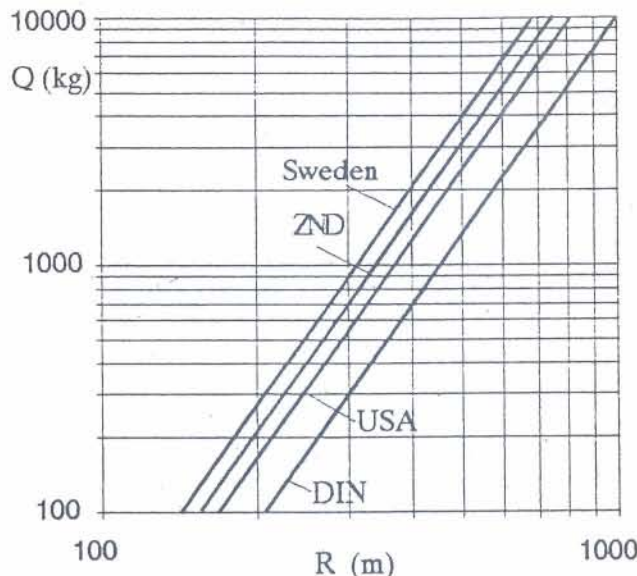
Table 3 - Q = f(R) for V_{max}

Norme	DIN	USA	ZND	SWE	Norme	DIN	USA	ZND	SWE
V cm/s	0.5	1.2	1.5	1.8	V cm/s	0.5	1.2	1.5	1.8
R (m)	EKSPLOZIV - Q (kg)				R (m)	EKSPLOZIV - Q (kg)			
200	82	173	209	244	330	366	776	939	1098
210	94	200	242	283	340	401	848	1027	1201
220	109	230	278	325	350	437	925	1120	1310
230	124	263	318	372	360	476	1007	1219	1425
240	141	298	361	422	370	517	1093	1324	1547
250	159	337	408	477	380	560	1184	1434	1676
260	179	379	459	537	390	605	1280	1550	1812
270	201	425	514	601	400	653	1381	1672	1955
280	224	474	574	671	410	703	1488	1801	2105
290	249	526	637	745	420	755	1599	1936	2263
300	275	583	706	825	430	811	1716	2078	2429
310	304	643	779	910	440	869	1839	2226	2602
320	334	707	856	1001	450	929	1967	2381	2784
					460	993	2101	2544	2974

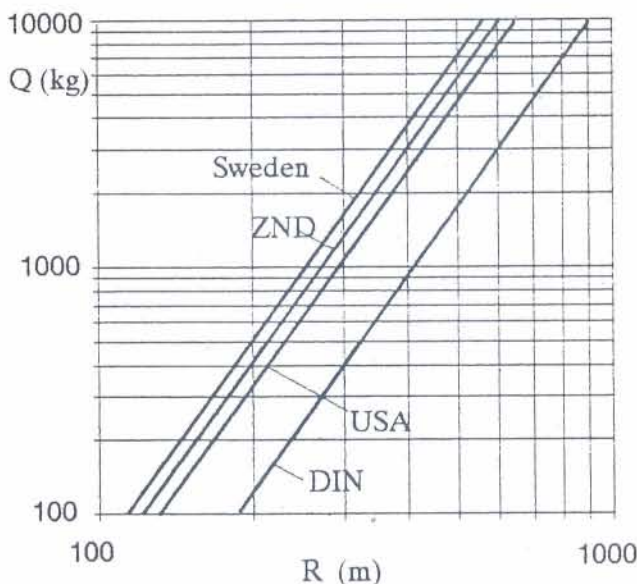
stambenih zgrada i graničnih brzina oscilacija tla po navedenim kriterijima što je prikazano u tablici 3 i sl. 7.

Na sl. 8 dat je proračun dozvoljene količine eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja za rezultantnu brzinu oscilacije (3).

Na kamenolomu vapnenca »Špica« izvedena su eksperimentalna trenutna miniranja s pet minskih polja za određivanje dozvoljene količine eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja radi usporedbe s



Sl. 7 Eksplozivno punjenje za V_{max}
Fig. 7 Explosive filling for V_{max}



Sl. 8 Eksplozivno punjenje za V_R
Fig. 8 Explosive filling for V_R

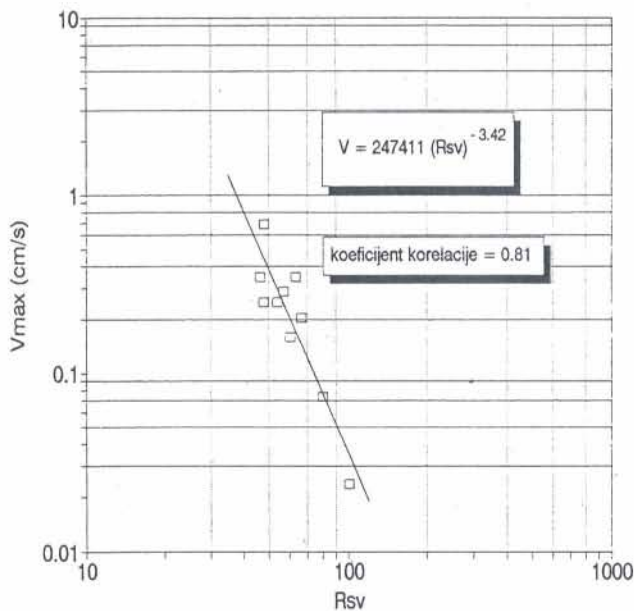
podacima koji su dobiveni pomoću dvije jednadžbe (K r s n i k, 1989).

Seizmički efekti miniranja registrirani su na dva mjesta opažanja, a rezultati mjerenja prikazani su u tablici 4. Za interpretaciju podataka korištene su maksimalne brzine oscilacija za sve komponente. Mjereni podaci prikazani su na sl. 9, prilagođeni su funkciji oblika $Y = aX^b$ a poslužili su za dobivanje vrijednosti koeficijenta načina miniranja K i koeficijenta prigušenja n, potrebnih za proračun dozvoljene količine eksploziva.

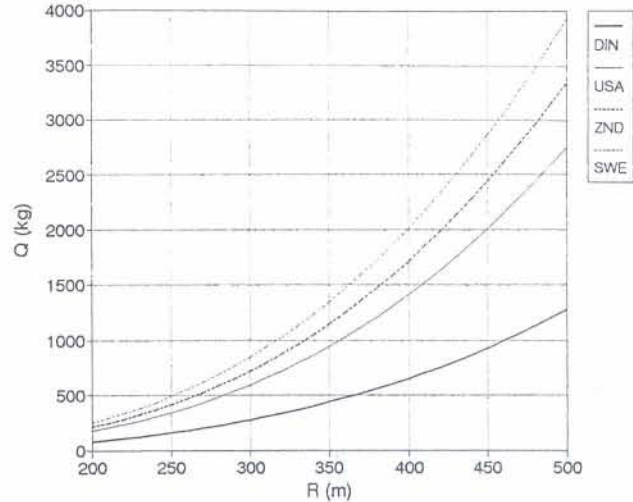
Izračunati podaci za dozvoljenu količinu eksploziva (Q) u funkciji udaljenosti (R) za navedene norme (DIN, USA, ZND, SWE) prikazani su na sl. 10. Navedeni podaci razlikuju se od rezultata, koji su dobiveni na osnovu dvije jednadžbe (K r s n i k, 1989) (tablica 3 i sl. 6) za manje od 5%.

Tablica 4 - Mjerene brzine oscilacije tla (eksperimentalna trenutna miniranja)
Table 4 - Measuring oscillation velocity of soil (eksperimental instant blasting)

Mjesto osmatranja Place of observation (MO)	Količina eksploziva Explosive filling Q (kg)	Udaljenost od MP Distance from ignition place R (m)	Svedena udaljenost Relative distance Rsv	Brzina oscilacije Velocity oscillation Vmax (cm/s)
1		292	56.78	0.289
2	136	341	66.31	0.206
1		297	46.30	0.348
2	264	345	53.78	0.253
1		309	47.72	0.252
2	271.5	389	60.07	0.159
1		314	79.99	0.073
2	60.5	395	100.62	0.024
1		244	47.92	0.688
2	132	322	63.24	0.346



Sl. 9 Prikaz vrijednosti eksperimentalnih trenutnih miniranja
Fig. 9 Presentation of values for experimental instant blasting



Sl. 10 Grafički prikaz dozvoljene količine eksploziva, $Q = f(R)$
Fig. 10 Graftic presentation of allowed explosive quantity, $Q = f(R)$

Zaključak

Kod određivanja dopuštene količine eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja korišteni su kriteriji DIN-a, U. S. Bureau of Mines, ZND i švedski. Analizom dobivenih rezultata iz provedene komparativne analize dobiveni su najstroži kriteriji s obzirom na graničnu brzinu oscilacije tla po DIN normama. Proračun dopuštene količine eksplozivnog punjenja za navedene norme raden je za moguću maksimalnu brzinu oscilacije tla i stvarnu rezultatnu brzinu. Uzimanje stvarne rezultatne brzine oscilacija tla u proračun omogućava upotrebu veće količine eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja, što daje veću količinu odminiranog materijala, osigurava ekonomičnost i uštedu prilikom masovnih miniranja i ujedno povećava vremenski interval do slijedećeg masovnog miniranja.

Primljeno: 5. II. 1993.

Prihvaćeno: 27. V. 1993.

LITERATURA

- Deutsche Normen (1983): Erschittern im Bauwesen-Einwirkungen auf bauliche Anlagen - DIN 4150
- Krsnik, J. (1989): Miniranje. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 178 pp., Zagreb
- Olofsson, S. O. (1990): Applied explosives technology for construction and mining. Nora Boktryckeri AB Sweden: 200-215
- Strelec, S. (1992): Određivanje minerskih značajki stijenskog masiva geofizičkim metodama. Magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu
- U. S. Bureau of Mines (1980): Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting (RI 8507)

Influence of Seismic Blasting Effect on Neighbouring Structures (A Comparative Analysis)

S. Strelec, I. Baturić and B. Božić

The above mentioned comparative analysis of allowed quantities calculations for explosive fillings as per ignition level shows that DIN standard has the most severe criteria. The largest allowed quantities of explosive filling are given by Swedish standards. In according with these criteria longitudinal waves spreading velocity is measured near a structure and, on the basis of the obtained velocity, allowed oscillation velocity is taken from Table 1. Value of longitudinal velocity is taken for the layer of structure foundation. In order to determine allowed ground oscillation velocities, DIN standards and Bureau of Mines U. S. A. use a frequency of oscillation wave measured by the observed structure.

One of the reason for the allowed ground oscillation velocities values as per DIN and Bureau of Mines U. S. A. being lower is most probably the fact that foundation layer of the observed

structure. The last one most probably having a higher oscillation frequency since refraction seismics ascertained that there is a layer of considerably higher longitudinal velocity at the depth of 1.5 m.

By taking the maximal ground oscillation velocity for the estimate of seismic blasting effect, a safety factor is increased, as it is always higher than the actual resultant oscillation velocity. It is of a great importance to use precise instruments for accurate reading of particular component oscillation velocity. Thus, the allowed explosive quantity estimate may consider an actual oscillation velocity estimate, because a larger quantity of blasted material is provided for, then for the economical purposes and saving at mass blasting, which also extends a time period between two mass blasting.