

# Udarni val u vodi i njegov utjecaj na okoliš

---

Gvozden, Alen

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:221694>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-13**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

**UDARNI VAL U VODI I NJEGOV UTJECJ NA OKOLIŠ**

Diplomski rad

Alen Gvozden

R-167

Zagreb, 2018.

## UDARNI VAL U VODI I NJEGOV UTJECJ NA OKOLIŠ

ALEN GVOZDEN

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

### Sažetak

Udarni val kod podvodnog miniranja može imati negativne posljedice na životinje, osobito ribe i morske sisavce. Važno je poznavati teorijske principe širenja i prigušenja udarnog vala pod vodom, kako bi se parametri miniranja mogli prilagoditi specifičnim uvjetima pojedinog miniranja. U radu prikazani su rezultati mjerenja tlaka udarnog vala prilikom upotrebe eksploziva u morskom dnu, te sagledani u okviru teorijskih postavki i smjernica za upotrebu zatvorenih eksplozivnih punjenja minskih bušotina u blizini životinja i njihovih staništa.

Ključne riječi: udarni val, podvodno miniranje, seizmički utjecaji

Diplomski rad sadrži: 42 stranica, 8 tablica, 24 slika i 32 reference.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Vinko Škrlec, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Vinko Škrlec, docent RGNF

Dr. sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF

Dr. sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

## SHOCK WAVE AND HIS EFFECTS ON THE ENVIROMENT

ALEN GVOZDEN

Thesis completed At: University of Zagreb  
Faculty od Mining, Geology and Petrolium Engineering  
Department of Mining Engineering and Geotechnics  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Summary

The shock wave as the result of underwater blasting operations can have negative impacts on animals, primarily fish and sea mammals. Understanding the principles of underwater shock wave propagation and decay is important for the adjustment of blasting parameters to the specific conditions of each such operation. Measurements of shock wave pressure were obtained from underwater blasting projects where confined explosive was used. In this thesis the results of these pressure measurements are analyzed and compared to theoretical principles and guidelines for the use of such explosive charges.

Key words: shock wave, underwater blasting, seismic activity

Thesis contains: 42 pages, 8 tables, 24 pictures i 32 references.

Original in: Croatian

Thesis archived at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petrolium Engineering  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD, Vinko Škrlec, Assistant Professor

Reviewers: PhD, Vinko Škrlec, Assistant Professor  
PhD, Mario Dobrilović, Associate Professor  
PhD, Vječislav Bohanek, Assistant Professor

## SADRŽAJ

Popis slika.....	II
Popis tablica .....	IV
Popis korištenih oznaka i odgovarajućih jedinica .....	V
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. PODVODNO MINIRANJE .....</b>	<b>2</b>
2.1. Proračun parametara za podvodno miniranje .....	4
2.2. Eksplozivna sredstva za podvodno miniranje .....	6
<b>3. PODVODNA EKSPLOZIJA .....</b>	<b>7</b>
3.1. Udarni val .....	8
3.2. Mjehur plinova .....	13
<b>4. ŠTETNI UTJECAJI PODVODNOG MINIRANJA.....</b>	<b>15</b>
4.1. Seizmički utjecaji miniranja .....	16
4.2. Utjecaj na životinje.....	18
4.3. Utjecaj na ljude.....	19
4.4. Metode za smanjenje prevelikog tlacnog udarnog vala pri povodnim miniranjima	20
<b>5. MJERENJE SEIZMIČKIH UTJECAJA PODVODNOG MINIRANJA U PROJEKTU "REKONSTRUKCIJA SJEVERNE LUKE" .....</b>	<b>21</b>
5.1. Tehnički opis miniranja.....	24
5.2. Uređaji za mjerenje seizmičkih utjecaja .....	28
5.3. Rezultati mjerenja seizmičkih utjecaja podvodnih miniranja .....	31
<b>6. REGRESIJSKA ANALIZA .....</b>	<b>37</b>
<b>7. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>41</b>
<b>8. LITERATURA .....</b>	<b>42</b>

## Popis slika

Slika 2-1. – Bušenje minskih bušotina (Miningandconstruction.com) .....	3
Slika 2-2. – Utovar minirane mase (Zadarski List,2018.) .....	3
Slika 2-3. – Poprečni presjek podvodnog iskopa (Dobrilović, 2011.) .....	5
Slika 3-1. – Podvodna eksplozija promatrana s površine (Loomis, 2016.) .....	7
Slika 3-2. – Četiri komponente vala koja se pojavljuju u podvodnim eksplozijama izvedenim u plitkim vodama (Smith, 2016.) .....	9
Slika 3-3. – Graf tlak-vrijeme za pojedinu komponentu vala (Keevin, Hemen, 1997.)....	10
Slika 3-4. - Distribucija tlaka oko naboja od 136 kg trinitrotoluola (TNT) u tri trenutka nakon detonacije (Cole, 1948).....	11
Slika 3-5. - Prikaz tlaka obzirom na vrijeme na udaljenosti od 15 m od 126 kg TNT-a (Cole, 1948).....	12
Slika 3-6. - Kretanje i oscilacije plinskog mjehura vremenu (Smith, 2016.) .....	13
Slika 5.1. - Prikaz lokacije na prostoru lučkog područja Vranjičko-Solinskog bazena (Dobrilović,2018.) .....	21
Slika 5-2. – Situacijska karta a ucrtanim minskim poljima i mjernim mjestima za prva tri probna minska polja (Dobrilović,2018.).....	22
Slika 5-3. - Situacijska karta a ucrtanim minskim poljima i mjernim mjestima za ostala probna minska polja (Dobrilović, 2018.).....	23
Slika 5.4. – Presjek minske bušotine i konstrukcija punjenja za MP1 (Dobrilović, 2018.)	25
Slika 5.5. - Presjek minske bušotine i konstrukcija punjenja za MP2 (Dobrilović, 2018.)	26
Slika 5.6. - Presjek minske bušotine i konstrukcija punjenja za MP3 (Dobrilović, 2018.)	26
Slika 5-7. – Eksplozivno punjenje za minsku bušotinu – Riogel Troner (Maxam, 2018.)	27
Slika 5-8. – Neelektrični Dual sustav 25/500 (Žepačkić, 2014.).....	27
Slika 5-9. – Prikaz načina rada geofona .....	30
Slika 6-1. – Karakteristična krivulja prigušenja obzirom na svedneu udaljenost za područje I (Dobrilović, 2018).....	37
Slika 6-2. – Karakteristična krivulja prigušenja obzirom na svedenu udaljenost za područje II (Dobrilović, 2018). .....	38
Slika 6-3. – Karakteristična krivulja prigušenja za sve mjerne točke (Dobrilović, 2018). .	38
Slika 6-4. - Regresijska krivulja komponenata brzina oscilacija za područje I (Dobrilović, 2018).....	39

Slika 6-5. - Regresijska krivulja komponenta brzina oscilacija za područje II (Dobrilović, 2018).....	39
Slika 6-6. – Skupna regresijska krivulja kompenata brzina oscilacija (Dobrilović, 2018). .....	40

## Popis tablica

Tablica 5-1. – Tehnički podaci minskog polja .....	24
Tablica 5.2. – Generalne značajke mjernih instrumenata.....	28
Tablica 5.3. – Generalne značajke za mjerne instrumente Instantel BlastMate Series III i Instantel MiniMate Plus .....	29
Tablica 5-4. – Udaljenosti mjernih mjesta od minskog polja i rezultati mjerenja.....	31
Tablica 5-5. – Rezultati mjerenja tlaka udarnoga vala 22.11.2017. ....	32
Tablica 5-6. – Rezultati miniranja izvedenog 16.05.2018.....	34
Tablica 5-7. – Rezultati mjerenja miniranja izvedenog 30.05.2018.....	35
Tablica 5-8. – Rezultati mjerenja miniranja izvedenog 21.08.2018.....	35



## Popis korištenih oznaka i odgovarajućih jedinica

Oznaka	Jedinica	Značenje
$W$	m	izbojnica
$S_b$	$m^2$	površina odloma po minskoj bušotini
$q$	$kg/m^3$	specifična potrošnja eksploziva
$Q_m$	$kg/m$	koncentracija eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini
$\gamma_e$	$kg/m^3$	gustoća vodoplastičnih eksploziva
$Q_b$	kg	masa eksplozivnog punjenja
$V$	$m^3$	volumen odloma minske bušotine
$H$	m	visina etaže
$q_{vv}$	$kg/m^3$	specifična potrošnja eksploziva za vertikalne bušotine
$q_{vn}$	$kg/m^3$	specifična potrošnja eksploziva za nagnute bušotine
$H_v$	m	visina stupca vode iznad projektirane razine
$H_n$	m	visina nanosnog pokrivača
$H_s$	m	visina etaže u čvrstoj stijeni
$h_p$	m	probušenje
$P$	kPa	tlak
$P_m$	kPa	maksimalni tlak udarnog vala

$v$	cm/s	maksimalna brzina oscilacija
$V_r$	cm/s	rezultantna brzina oscilacija
$s$	cm	maksimalni pomak
$a$	cm/s <sup>2</sup>	maksimalno ubrzanje
$f$	Hz	frekvencija oscilacija
$A$	cm	amplituda
$T$	s	period
$r$	m/kg <sup>1/3</sup>	svedena udaljenost
$R$	m	udaljenost mjesta mjerenja od naboja
$P_w$	kPa	tlak u vodi
$E$	V	napon
$B$	T	magnetska indukcija
$L$	m	duljina vodiča

## 1. UVOD

Zbog potrebe za sanacijom obalnih zidova na vezovima broj 2 i 3 s lučkim konstruktivnim iskopima u lučkom području Vranjičko-Solinskog bazena izvedena su podmorska miniranja i provedena mjerenja seizmičkih utjecaja miniranja na okolne objekte.

Zbog blizine okolnih objekata i mogućih štetnih seizmičkih utjecaja miniranja na okolne objekte pri svakom miniranju mjereni su seizmički utjecaji miniranja na okolne objekte.

Probna miniranja i mjerenja oscilacija tla provedena su 22.11.2017. na tri minska polja i na 9 mjesta je mjerena brzina oscilacija tla, te na dva mjesta je mjereno tlak udarnoga vala u vodi. Prilikom ostalih probnih miniranja, mjerena brzina oscilacija čestica tla provodila su se na dva mjerna mjesta. Miniranje je izvodilo poduzeće Pomgrad inženjering d.o.o. iz Splita.

U radu su razmotreni teorijski principi širenja tlačnog udarnog vala i plinskog mjehura, kao posljedica upotrebe eksploziva u vodi. Prikazana je i analizirana sistematizacija mjerenja brzine oscilacija čestica tla i tlaka udarnoga vala u vodi prilikom podmorskog miniranja izvedenog od strane poduzeća Pomgrad inženjering d.o.o.

## 2. PODVODNO MINIRANJE

Miniranje je postupak koji se koristi za dobivanje rude i izvođenja raznih geotehničkih radova i često je nezamjenjiv bilo kojom drugom vrstom radova (mehanicijom). Djelovanje detoniranog eksplozivnog naboja u minskoj bušotini uzrokuje naprezanja koja dovode do frakturiranja i drobljenja stijene. U užem smislu miniranje obuhvaća postupak izvedbe bušotina u stijeni koje se pune određenom vrstom eksploziva čije iniciranje i djelovanje razara stijenu i pretvara ju u sipki materijal pogodan za daljnu obradu ili transport.

Podvodna miniranja spadaju u metode specijalnih miniranja jer se bušenje minskih bušotina izvodi uglavnom u posebnim uvjetima ispod površine vode. Minske bušotine mogu u plitkoj vodi bušiti ronionci s pneumatskim bušaćim čekićima manjeg promjera. Na većim dubinama ili kod velikih valova bušenje se, zbog otežanih uvjeta izvodi sa usidrenih plovećih platformi (Krsnik, 1989). Na slici 2-1. prikazano je bušenje minske bušotine s platforme.

Pod vodom se, zbog slabe vidljivosti, pri bušenju poduzimaju dodatne mjere kako bi se ronionci lakše orijentirali, i to pomoću nategnutih užeta po liniji minskih bušotina. Osim toga se, kako bi se olakšao rad ronioncima, koriste jednostavne sheme više-rednog miniranja s kvadratnom mrežom minskih bušotina. Pravilnost rasporeda bušotina i točnost bušenja provjeravaju stručni ronionci, (Krsnik, 1989).

Punjenje minskih bušotina izvode specijalizirani ronionci, obučeni za rukovanje eksplozivnim sredstvima (Župan, 2012). Punjenje se može izvesti i sa površine, tako da se bušenje izvodi kroz cijev koja, nakon što je bušenje završeno, ostaje dok se kruna izvlači. Kroz cijev se onda izvodi punjenje bušotina (Rončević, 2005).

Troškovi minersko-bušaćkih radova direktno ovise o broju i promjeru minskih bušotina. Zbog toga treba planirati odlom i granulaciju minirane mase postići sa što manjim brojem minskih bušotina (Rončević, 2005).

Za utovar minirane mase kod podvodnih miniranja najpogodniji su bageri grabilice, čiji kapacitet u velikoj mjeri ovisi o granulaciji miniranog materijala (Župan, 2012). Utovar materijala prikazan je na slici 2-2.



Slika 2-1. – Bušenje minskih bušotina (Miningandconstruction.com)



Slika 2-2. – Utovar minirane mase (Zadarski List,2018.)

## 2.1. Proračun parametara za podvodno miniranje

Pri podvodnom miniranju minske bušotine su raspoređene po kvadratnoj mreži, te je linija najmanjeg otpora ( $W$ ) jednaka razmaku minskih bušotina (Krsnik, 1989).

Linija najmanjeg otpora, odnosno razmak bušotina računa se iz odnosa (Krsnik, 1989):

$$W = a = \sqrt{S_b} \text{ (m)} \quad (2-1.)$$

$$S_b = s \cdot W = \frac{Q_m}{q} \text{ (m}^2\text{)} \quad (2-2.)$$

gdje je:  $S_b$  - površina odloma po minskoj bušotini,

$q$  - specifična potrošnja eksploziva za podvodna miniranja,  $\text{kg/m}^3$ .

$Q_m$ , koncentracija eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini (Krsnik, 1989)

$$Q_m = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot \gamma_e \text{ (kg/m)} \quad (2-3.)$$

gdje je:  $\gamma_e$  - gustoća  $\text{kg/m}^3$ .

Eksplozivno punjenje minskih bušotina ovisi o dubini vode, debljini nanosa i visini etaže te se računa po formuli (Krsnik, 1989):

$$Q_b = q \cdot V \text{ (kg)} \quad (2-4.)$$

$$V = a \cdot W \cdot H \text{ (m}^3\text{)} \quad (2-5.)$$

gdje je:  $V$  - volumen odloma minske bušotine,  $\text{m}^3$

$H$  - visina etaže, m

Specifična potrošnja za podvodna miniranja računa se po formulama Gustafssona (Krsnik, 1989):

- za vertikalne minske bušotine:

$$q_{vv} = 1,0 + 0,01 \cdot H_v + 0,02 \cdot H_n + 0,03 \cdot H_s \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2-6.)$$

- za nagnute minske bušotine:

$$q_{vn} = 0,9 + 0,01 \cdot H_v + 0,02 \cdot H_n + 0,03 \cdot H_s \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2-7.)$$

gdje je:  $H_v$  - visina stupca vode iznad projektirane razine, m,

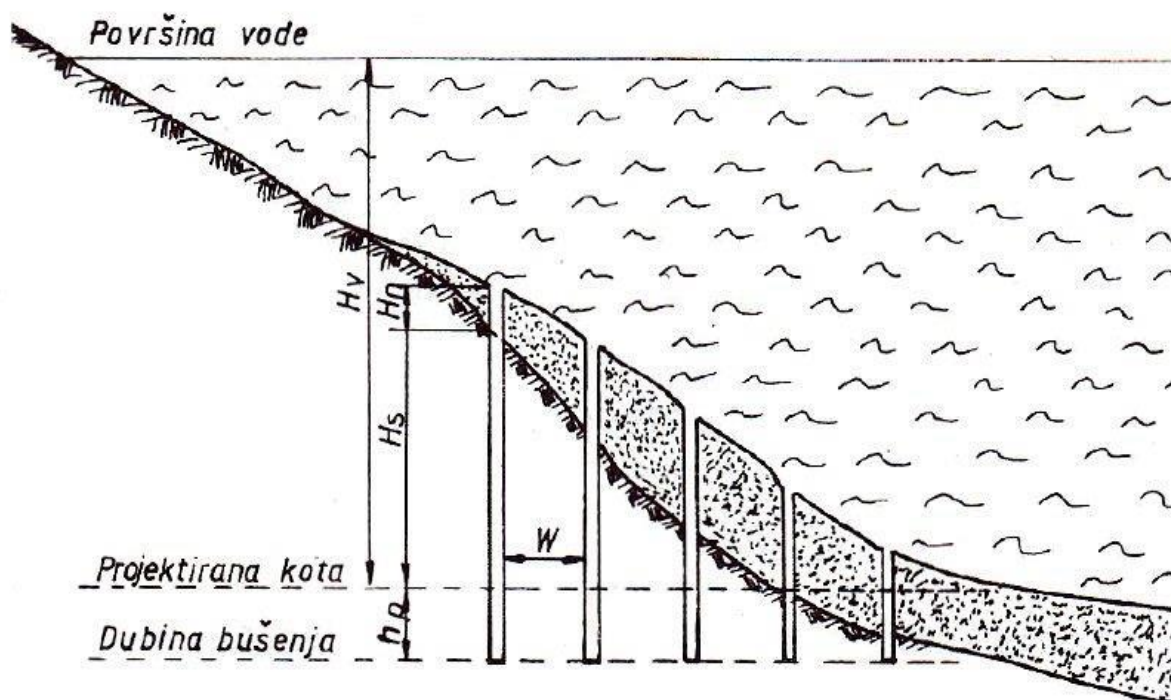
$H_n$  - visina nanosnog pokrivača, m,

$H_s$  - visina etaže u čvrstoj stijeni, m.

Minske bušotine se buše dublje od projektirane razine iskopa, a veličina probušenja treba biti (Krsnik, 1989):

$$h_p = (0,6 - 1,0) \cdot W \text{ (m)} \quad (2-8.)$$

Pojedine visine se utvrđuju na osnovi poprečnog presjeka podvodnog iskopa koji je prikazan na slici 2-3.



Slika 2-3. – Poprečni presjek podvodnog iskopa (Krsnik, 1989)

## 2.2. Eksplozivna sredstva za podvodno miniranje

Kvaliteta i vodootpornost eksploziva vrlo je važna kod podvodnih miniranja. Za miniranje pod vodom koriste se eksplozivi koji kroz određeno vrijeme stajanja pod vodom ne gube svoje karakteristike i eksplozivna svojstva. Osim toga ne smiju biti jako osjetljivi radi prijenosa detonacije s jednog naboja na drugi. Za podvodna miniranja pogodni su plastični i vodoplastični eksplozivi (Župan, 2012).

U kemijskom sastavu plastičnih eksploziva osnovna komponenta je želatinozna smjesa nitroglicerina i dinitroglicerina s nitrocelulozom. Uz to, ovi eksplozivi sadrže amonijev, kalijev i natrijev nitrat te manje količine organskih i neorganskih tvari. Plastični eksplozivi su najjači rudarski eksplozivi velike gustoće i brizantnosti. Primjenjuju se za miniranje najčvršćih, čvrstih i žilavih stijena te za miniranje u rudnicima željeznih ruda i u tunelogradnji. Zbog njihove otpornosti na vodu mogu se upotrebljavati u vlažnim morskim bušotinama i za podvodna miniranja (Ester, 2005).

Osnovne komponente u sastavu vodoplastičnih eksploziva su amonijev nitrat i malodimni barut s dodatkom nitroaromatskih senzibilizatora, vode i plastifikatora. Dodavanjem vode i pogodnih plastifikatora eksplozivi imaju kašasto-plastičnu konzistenciju te se odlikuju velikom gustoćom i visokom vodootpornošću. Vodoplastični eksplozivi su u odnosu na druge eksplozive manje osjetljivi na udar i trenje, te je rad s njima sigurniji. Osim toga nisu osjetljivi na vlagu i vodu, a mogu se upotrebljavati na niskim temperaturama do  $-20^{\circ}\text{C}$  (Krsnik, 1989).



### 3 . PODVODNA EKSPLOZIJA

Postoje tri osnovne faze podvodne eksplozije, a to su: detonacija, formiranje udarnog vala i širenje ekspandirajućih plinova u vodi. Ovisno o uvjetima u kojima se odvija eksplozija kao što je dubina na kojoj se odvija eksplozija i čvrstoća morskog dna, podvodna eksplozija na površini može izgledati kao što je prikazano na slici 3-1.

Podvodna eksplozija je egzotermna kemijska reakcija koja se širi nakon iniciranja, može generirati temperature od 3000° C i pritisak jednak 50 000 atmosferskih (Loomis, 2016).



Slika 3-1. – Podvodna eksplozija promatrana s površine (Loomis, 2016.)

Utjecaj eksplozije na plovne objekte i faunu uglavnom proučavan u obliku otvorenih eksplozivnih naboja u vodi. Iako to su to drugačiji uvjeti od onih prilikom upotrebe eksploziva u svrhu drobljenja i sitnjenja stijenske mase, promatranje eksplozije takvog naboja i događaja koji slijede eksploziju, daje dobar uvid u fizikalne procese povezane s nanošenjem štete plovnim objektima i fauni (Žepačkić, 2014).

### 3.1. Udarni val

Prilikom podvodnih miniranja nastaje tlačni udarni val u vodi. Visoki tlak u fronti tlačnog udarnog vala može predstavljati opasnost za plovne i druge objekte u blizini mjesta miniranja, ali također i za faunu. Početni visoki tlak u tlačnom udarnom valu naglo se smanjuje povećanjem udaljenosti. Na osnovi vrijednosti tlaka računaju se radijusi ugrožene zone za ljude i objekte u vodi (Krsnik, 1989).

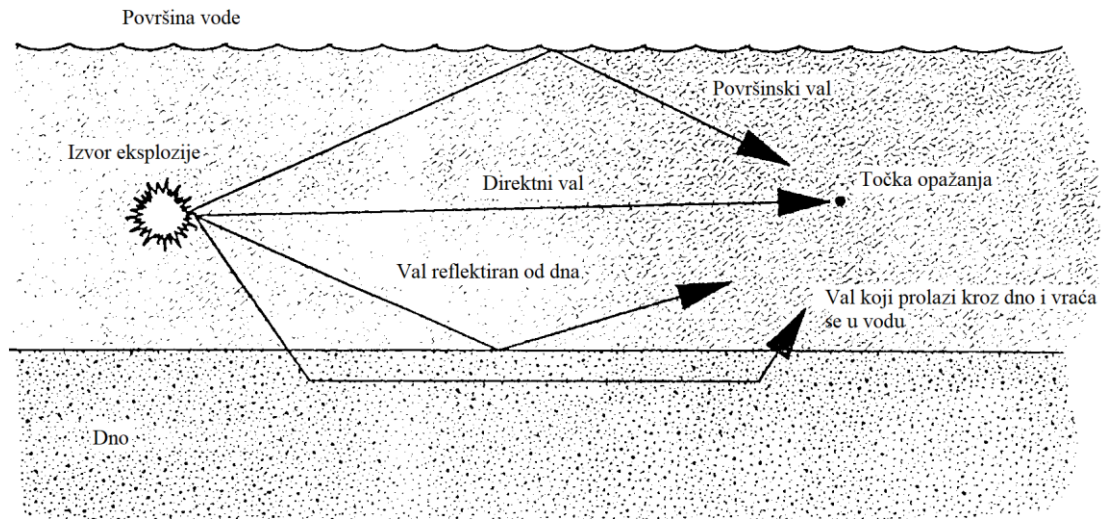
Usljed detonacije gotovo trenutno se povećava tlak na vrlo visoku vrijednost. Plin vrlo visoke gustoće počinje se širiti te mu tlak pada. Prirast tlaka je vrlo brz, a nakon toga eksponencijalno pada. Ovako iniciran poremećaj se prenosi na okolnu vodu i širi radijalno u obliku tlačnog udarnog vala, koji je proporcionalan masi naboja a obrnuto proporcionalan udaljenosti od mjesta detonacije (Cole, 1948).

Udarna energija kao posljedica visokog tlaka na detonacijskoj fronti širi se kroz eksploziv i okolni materijal sferično u svim smjerovima od mjesta iniciranja (Krsnik, 1989).

Za proučavanje širenja udarnog vala dovoljna su teorijska načela za nisko amplitudni val. U neposrednoj eksplozivnog naboja međutim, ta teorija ne vrijedi, zbog vrlo visokih tlakova. Na takvoj udaljenosti val se širi slično kao u zraku, tj. fronta vala je vrlo oštra. Širina udarne fronte, udaljenost na kojoj tlak raste od svoje normalne vrijednosti do maksimalne, iznosi svega nekoliko milijuntih dijelova centimetra. Taj porast tlaka u udarnoj fronti mjeri se u mikro sekundama ( $\mu\text{s}$ ). Prolazak vala konačne amplitude uključuje rasipanje topline kondukcijom, i unutarnjim trenjem odnosno viskoznošću. Obje pojave najizraženije su u neposrednoj blizini naboja i utječu na brzo smanjenje tlaka udarnog vala. Energija utrošena u obliku topline, u ranoj fazi širenja udarnog vala iznosi oko 25 % ukupne energije eksplozije (Fox, 1947).

Udarni val koji je nastao detonacijom eksploziva se kreće brzinom većom od 1500 m/s i stvara tlak veći od 200 MPa (2 000 bar) (Cole, 1948).

U plićim vodama se širenje udarnoga vala može interpretirati u četiri oblika: direktni val, površinski val (koji dođe do površine vode i dio se reflektira nazad), val koji se reflektira od dna i val koji prolazi kroz dno i nakon nekog vremena se vraća nazad u vodu, što je shematski prikazano na slici 3-2.



Slika 3-2. – Četiri komponente vala koja se pojavljuju u podvodnim eksplozijama izvedenim u plitkim vodama (Smith, 2016.)

Tlak udarnog vala  $P$  u funkciji vremena izražava se kao (Cole, 1948):

$$p = p_m \cdot e^{-t/\theta} \quad (3-1.)$$

gdje je:  $p_m$  - maksimalni tlak,

$\theta$  - vremenska konstanta eksponencijalnog prigušenja.

Vremenska konstanta  $\theta$  je početni interval vremena na kojem se krivulja prigušenja u dijagramu tlak/vrijeme, može aproksimirati pravcem nagiba  $1/\theta$ . Nakon tog vremena prigušenje je sporije, tj. nije linearno.

Impuls udarnog vala je vrlo bitna veličina koja može biti ključna odrednica za negativni utjecaj udarnog vala. Veličina impulsa određena je površinom ispod krivulje tlaka u dijagramu tlaka u vremenu, a dana je izrazom (Cole, 1948):

$$I(t) = \int_0^t P(t) dt \quad (3-2.)$$

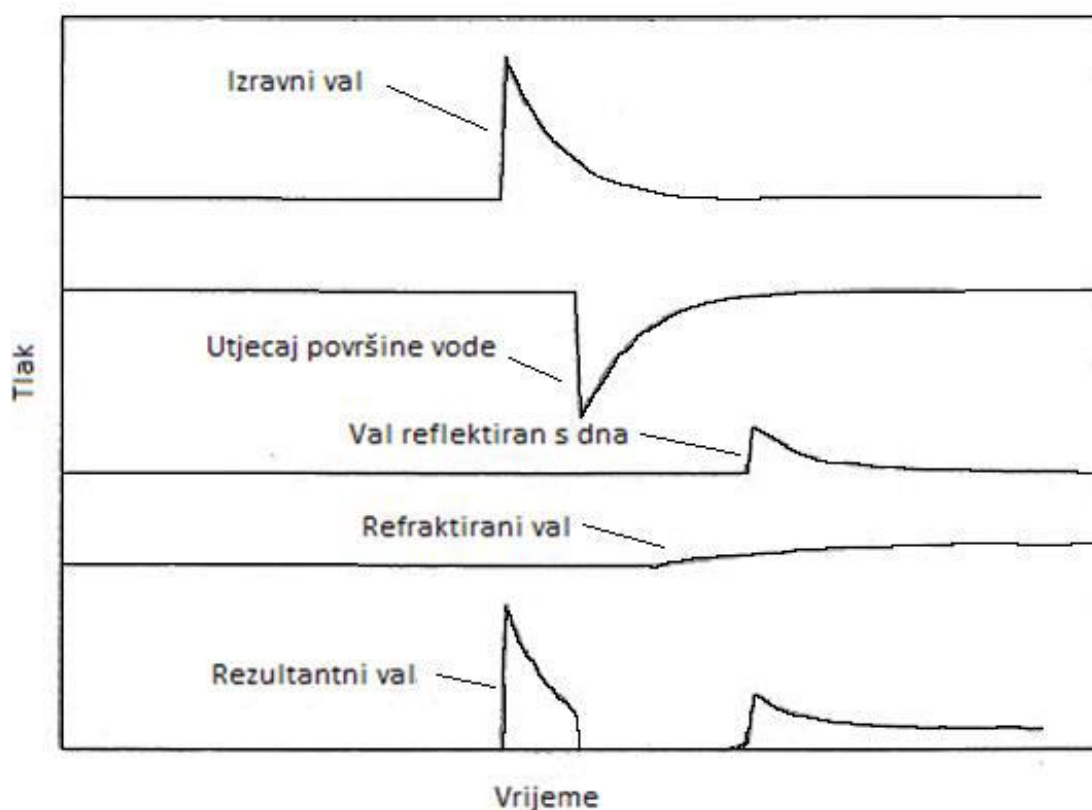
Gornja granica integrala određuje se prema dogovoru, najčešće kao višekratnik vremenske konstante.

Za tlačni udarni val nastao od različitih masa eksplozivnog naboja može se primijeniti eksperimentalno potvrđeno načelo sličnosti. Ako se masa eksplozivnog naboja pomnoži faktorom  $k$ , tlak udarnog vala ostat će nepromijenjen ukoliko se udaljenost od naboja i vrijeme nakon detonacije također pomnože istim faktorom.

Ovo načelo vrijedi uz uvjet da na sustav ne djeluju vanjske sile. Unatoč tome što gravitacija ima utjecaj na udarni val, može zanemariti u odnosu na unutarnje sile uključene u njegovo stvaranje i širenje (Cole, 1948).

Na rezultatni iznos tlačnog udarnog vala mogu, osim izravnog, utjecati i odbijeni (reflektirani), te refraktirani val. Refleksija vala s granice voda-zrak je negativnog karaktera, te val kasni u odnosu na izravni val, zbog veće prijeđene udaljenosti. Refleksija s morskog dna pozitivna je, odnosno istog karaktera kao izravni val (slika 3-3.). Osim refleksije, dno refraktira dio energije te je na određenoj kritičnoj udaljenosti vraća vodi. Zbog toga rezultatna krivulja tlak/vrijeme može izgledati vrlo složeno ovisno o blizini slobodnih ili krutih površina (Keevin i Hempen 1997).

Učinak komponenti valova se može vidjeti na grafu tlak-vrijeme na slici 3-3.

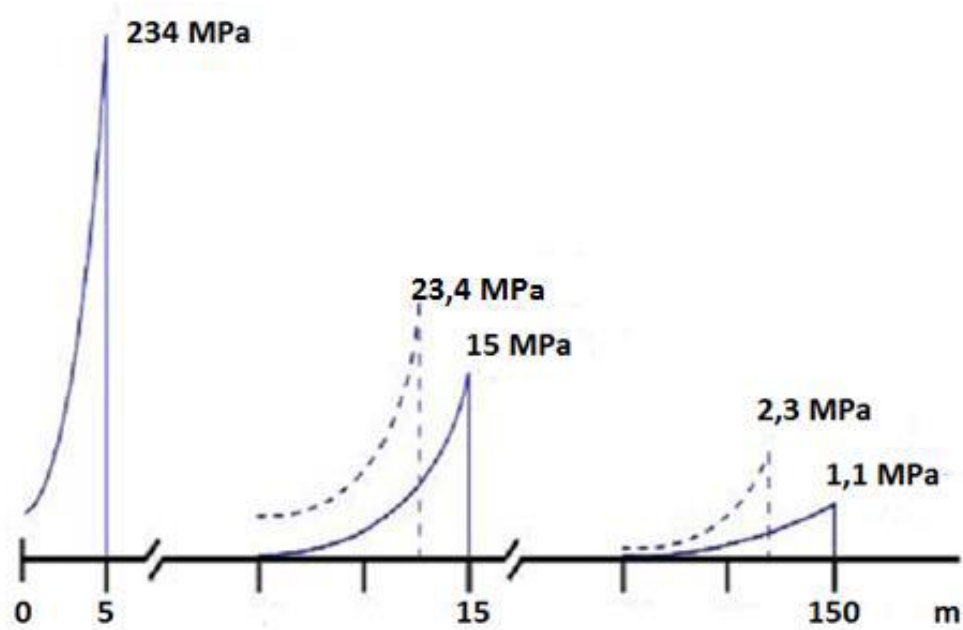


Slika 3-3. – Graf tlak-vrijeme za pojedinu komponentu vala (Keevin i Hempen, 1997.)

Zbog vrlo visokog tlaka nakon detonacije eksploziva ne može se pretpostaviti da je brzina širenja vala neovisna o njegovu iznosu. Udarni val ima sljedeće karakteristike (Cole, 1948):

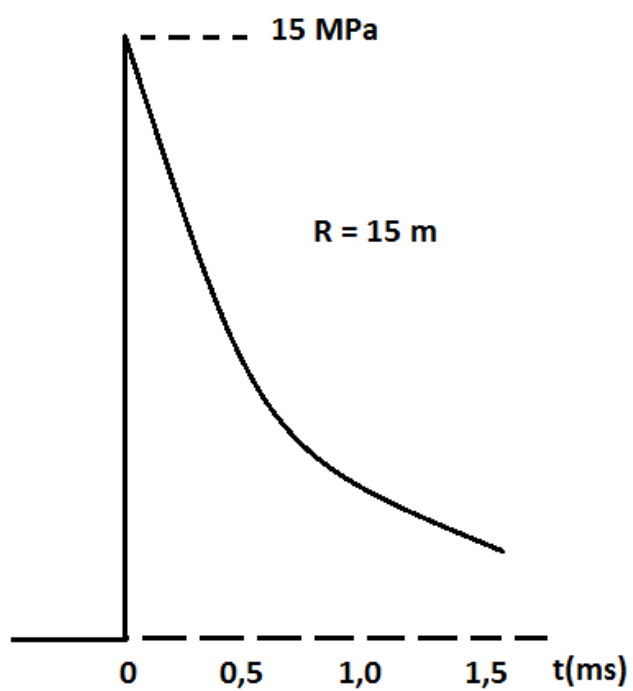
- brzina vala u blizini naboja nekoliko je puta veća od akustične valne brzine, no vrlo brzo pada na tu vrijednost širenjem od mjesta detonacije,
- iznos tlaka sfernog vala s udaljenošću pada brže nego što bi padao za nisko amplitudni akustični val (linearno s udaljenošću, slika 3-4.), no počinje se tako ponašati na većoj udaljenosti,
- profil vala širi se s udaljavanjem od detonacije, a to širenje je najizraženije u blizini naboja (slika 3-4.).

Crtni profili tlačnih valova na slici 3-4. odnose se na vrijednosti koje bi postojale kada bi se val širio kao zvučni.



Slika 3-4. - Distribucija tlaka oko naboja od 136 kg trinitrotoluola (TNT) u tri trenutka nakon detonacije (Cole, 1948)

Slika 3-5. prikazuje promjenu tlaka u vremenu, nakon naglog porasta tlaka on eksponencijalno pada.

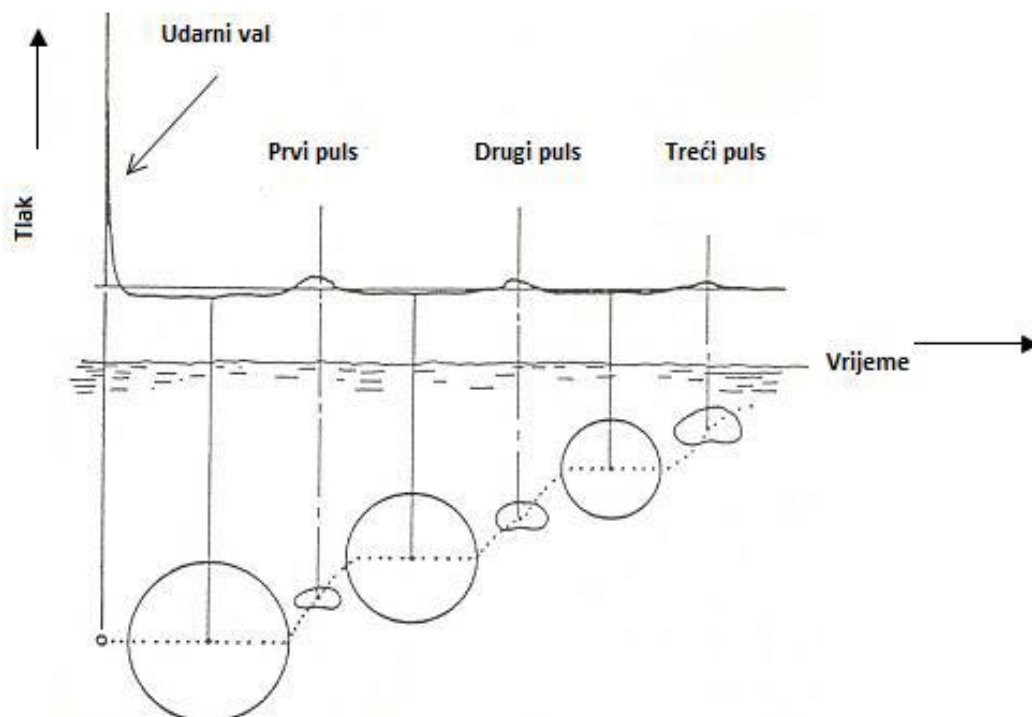


Slika 3-5. - Prikaz tlaka obzirom na vrijeme na udaljenosti od 15 m od 126 kg TNT-a (Cole, 1948).

### 3.2. Mjehur plinova

Nakon prolaska primarnog udarnog vala tlak je znatno smanjen no još uvijek veći od hidrostatičkog. Stvara se sfera, odnosno mjehur plinova kojemu se radijus vrlo brzo povećava. Kako napreduje ekspanzija, tlak u mjehuru pada no kretanje se nastavlja uslijed inercije vode koje se kreće prema van. Nakon nekog vremena tlak pada na ravnotežnu vrijednost zbroja atmosferskog i hidrostatičkog, te počinje obrnuto kretanje. Mjehur se smanjuje sve dok do izražaja ne dođe stlačivost plinske smjese, koja uzrokuje ponovo širenje. Dakle, može se promatrati oscililajući sustav. U pojedinim slučajevima opažen je broj od čak desetak oscilacija. Svaka oscilacija, zbog gubitka energije, manja je od prethodne. (Cole, 1948.) Na slici 3-6. prikazano je kretanje plinskog mjehura.

Osim toga na kretanje mjehura plinova utječe uzgon, te blizina slobodnih ili krutih površina. Mjehur će se konačno zbog djelovanja uzgona, odnosno gravitacije, podići do površine vode. Slobodne površine (površina vode) imaju učinak odbijanja u odnosu na mjehur a krute površine (morsko dno) ga privlače. Zbog toga se princip sličnosti analogan onome kod udarnog vala ovdje ne može primijeniti. (Cole, 1948.)



Slika 3-6. - Kretanje i oscilacije plinskog mjehura vremenu (Smith, 2016.)

Maksimalni tlak prvog pulsa mjehura iznosi tek deset do dvadeset posto tlaka udarnog vala, no trajanje ovog fenomena je mnogo dulje, pa površina ispod krivulja tlak/vrijeme (impuls) može imati slične vrijednosti. (Cole, 1948.)

Većina energije podvodne eksplozije oslobađa se u obliku tlačnog udarnog vala, oko 53 %, dok ostatak energije uzrokuje pulsacije plinskog mjehura. Od energije udarnog vala 20 % se izgubi tijekom početne faze širenja, na udaljenosti od 25 promjera eksplozivnog naboja (Rao i Vijayakumar, 2012).



#### 4. ŠTETNI UTJECAJI PODVODNOG MINIRANJA

Prilikom korištenja eksplozivnih sredstava u rudarske ili građevinske svrhe, dolazi do oslobađanja energije. Velik dio te energije se utroši na razaranje same stijene, dok se manji dio pretvara u kinetičku energiju seizmičkih i zračnih valova, i energiju udarnog vala u vodi. Navedeni valovi šire se radijalno od mjesta detonacije i mogu štetno djelovati na objekte koji se nalaze u blizini. Ljudi mogu osjetiti djelovanje ovih valova a da oni sami ne predstavljaju opasnost za konstrukcije građevina. Štete nastale iz drugih izvora često se, zbog povećane pažnje ljudi, pripisuju miniranju. Izvori oštećenja građevina mogu biti (Župan, 2012.):

- slijeganje terena,
- nejednaka nosivost temelja te
- vlačna naprezanja nastala uslijed nejednolikog opterećenja, ili različitih vrsta materijala.

Za utvrđivanje pravih uzroka oštećenja građevinskih objekata treba ih komisijski detaljno pregledati i snimiti prije i poslije miniranja. U blizini građevinskih objekata treba primjenjivati miniranja kojima se ostvaruje projektirani odlom stijene uz potpunu sigurnost ugroženih objekata. Prilikom takvih miniranja dobro je voditi konstantni monitoring seizmičkih efekata miniranja (Župan, 2012).

#### 4.1. Seizmički utjecaji miniranja

Dio slobodne energije eksplozivnog punjenja koji se nije potrošio na razaranje stijene pretvara se u kinetičku energiju različitih tipova elastičnih valova koji se međusobno razlikuju u brzini širenja, intenzitetu i obliku deformacije (Krsnik, 1989).

Prolazak tih valova izaziva oscilacije čestica tla. Pojava oscilacija tla je nepoželjna kad se minira u urbanim sredinama, odnosno u blizini objekata, jer može doći do oštećenja istih (Krsnik, 1989).

Kod miniranja morskog dna, elastični valovi mogu utjecati negativno na riblja jaja ukoliko se ona nalaze u blizini (Keevin i Hempen, 1997).

Na brzinu širenja seizmičkih valova i njihov domet najviše utječu vrsta tla odnosno stijene kroz koju se val širi i prigušenja na tom putu.

Prigušenje ovisi o (Krsnik, 1989):

- frekvenciji seizmičkih valova,
- sastavu i strukturi stijene,
- poroznosti i raspucanosti stijene,
- zasićenosti stijene vodom,
- o temperaturi stijene,
- rasipanju i disipaciji energije.

Intenzitet oscilacija može se izraziti raznim veličinama kao što su (Krsnik, 1989):

- maksimalna brzina oscilacija

$$v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot A \quad (4-1.)$$

- maksimalni pomak

$$s = A \cdot \sin 2\pi \cdot T \quad (4-2.)$$

- maksimalno ubrzanje

$$a = 4\pi^2 \cdot f \cdot A \quad (4-3.)$$

gdje je:  $f$  - frekvencija oscilacija, Hz,

$A$  - maksimalna amplituda, cm,

$T$  - trajanje titraja, s.

Mjerenje seizmičkog utjecaja miniranja na građevinske objekte provodi se na osnovi izmjerenih veličina pomaka, brzina i ubrzanja oscilacija čestica tla. Seizmografi se postavljaju na mjestima gdje želimo izmjeriti intenzitet potresa, obično u neposrednoj blizini građevina, te u samim građevinama, njihovim temeljima i katovima, jer se vibracije u vodoravnom smjeru povećavaju linearno s visinom zgrade. (Krsnik, 1989.)

U praksi se intenzitet potresa ocjenjuje na temelju najveće resultantne brzine čestica tla. Resultanta brzina predstavlja vektorski zbroj sve tri komponentne (međusobno okomite), brzine oscilacija tla: transverzalna –  $v_t$ , longitudinalna –  $v_l$  i vertikalna –  $v_v$  (Župan, 2012).

$$v_r = \sqrt{v_t^2 + v_v^2 + v_l^2} \quad (4-4.)$$

Veličina deformacija u građevinama ovisi o intenzitetu oscilacija koji je definiran veličinom amplitude, frekvencijom i valnom duljinom (Župan, 2012).

Frekvencija oscilacija čestica tla je vrlo važna veličina koja određuje njihovo djelovanje na objekt, jer su kod konstante amplitude oscilacije objekata to veće što je veća frekvencija. Frekvencije seizmičkih valova kreću se od 5 Hz pa do 100 Hz. Istraživanja su pokazala da frekvencija oscilacija ovisi o nizu čimbenika kao što su svojstva stijene ili tla, maksimalna masa eksploziva po stupnju paljenja, i udaljenost od mjesta miniranja. Osim toga oscilacije čestica tla su znatno manje u čvrstim i homogenim stijenama, dok su u slabim stijenama intenzivnije (Župan, 2012).

## 4.2. Utjecaj na životinje

Tlačni udari koje uzrokuje djelovanje eksploziva može imati smrtonosne posljedice za ribu, riblja jaja i morske sisavce. Kod riba je najosjetljiviji na tlačni udar riblji plivaći mjehur, koji joj omogućuje održavanje neutralnog uzgona. Visoki tlak udarnog vala uzrokuje puknuće plivaćeg mjehura i krvarenje opne inkubirajućih ribljih jaja. Istraživanjima je utvrđeno da manje ribe mogu pretrpjeti puno veće tlakove od većih (Župan, 2012).

Istraživanja utjecaja podvodne eksplozije na ribe, pokazala su da vrste koje nemaju plivaći mjehur nisu osjetljive na udarni val. Istraživanja su provedena spuštanjem kaveza s poznatim brojem riba, na određenoj udaljenosti od eksplozije. Osim toga i oblik tijela ribe ima utjecaja na njezinu osjetljivost na tlak udarnog vala. Ribe s cilindričnim tijelom otpornije su od riba s lateralno stisnutim tijelom. Životinjske vrste koje nemaju organe ispunjene plinom, općenito su vrlo otporne na udarni val (Lewis, 1996).

Broj riba stradalih uslijed udarnog vala ovisi o njihovom broju u smrtonosnoj zoni u vrijeme detonacije. Zbog toga se u istraživanjima smrtnosti riba uslijed udarnog vala javljaju velike varijacije broja stradalih riba. Njihova prisutnost u određenom području jako će ovisiti o njihovim lokalnim kretanjima (Lewis, 1996).

Prema istraživanjima Hubbsa i Rechnitzera (1952), prag smrtonosnog tlaka udarnog vala za ribu, varira od 276 do 483 kPa, za eksploziv visoke brzine detonacije. Eksplozije crnog baruta, puno manje brzine eksplozije, proizvele su tlakove od 855 do 1103 kPa ne uzrokujući pritom pomor ribe u kavezu. Zaključeno je da smrtnost životinja direktno ovisi o brzini detonacije korištenog eksploziva. Za današnje komercijalne eksplozive brzina detonacije varira od 1650 do 7650 m/s (Keevin i Hempen, 1997).

Sprječavanje negativnih utjecaja na ribu i životinje u moru postiže se taktikama zastrašivanja, koje se koriste prije miniranja. Njih se može podijeliti na one u kojima se koristi eksploziv i one koje ga ne koriste. Učinkovitijima su se pokazale neeksplozivne tehnike zastrašivanja. Ako se riba straši eksplozivom, onda se koriste manji naboji, ne više od jedne minute prije miniranja (Župan, 2012).

### 4.3. Utjecaj na ljude

Utjecaj izloženosti ljudi podvodnom tlačnom udarnom valu ovisi o razini izloženosti i može se podijeliti u tri kategorije:

- primarne ili fizičke ozljede koje ugrožavaju život, uključuju teške fizičke ozljede pa čak i smrt,
- sekundarne ili fizičke ozljede koje ne ugrožavaju život, najčešće oštećenja sluha,
- tercijarne ozljede nastale zbog različitih ponašanja; npr. ako se ronilac preplaši i ispljune disaljku i sl.

U blizini izvora visoki tlak djeluje na ronioca u vodi, te će primarne, sekundarne i tercijarne ozljede zahvatiti ronioca ako je preblizu. Posljedice se smanjuju s udaljenosti od mjesta eksplozije i ako je udaljenost dovoljno velika pojavit će se samo sekundarne posljedice. Na još većim udaljenostima neće biti fizičkih ozljeda direktno povezanih sa tlačnim udarnim valom, ali se mogu povezati tercijarne ozljede povezane uz ponašanje.

Kao rezultat svega, oko izvora postoje najmanje tri koncentricne zone u kojima se smanjuje efekt, te vanjska zona kako bi roniocima i plivačima bila pružena prikladna mjera zaštite.

#### **4.4. Metode za smanjenje prevelikog tlacnog udarnog vala pri povodnim miniranjima**

Štetno djelovanje eksploziva smanjuje se smanjenjem tlaka udarnog vala. To se može ostvariti (Krsnik, 1989):

- otpucavanjem eksplozivnog naboja u bušotini,
- čepljenjem minske bušotine,
- milisekundnim otpucavanjem minskih bušotina te
- zračnom zavjesom oko minskog polja.

Zračna zavjesa je metoda smanjenja tlaka udarnog vala koja se temelji na utiskivanju stlačenog zraka kroz perforirane cijevi postavljene na dnu mora, oko minskog polja. Stlačeni zrak izlazi kroz otvore tih cijevi i diže se u obliku zračnih mjehurića prema površini vode. Mjehurićima se stvara zračna zavjesa oko minskog polja, te se time smanjuje napetost vode i povećava se njena sposobnost da se komprimira. Međudjelovanje zračne zavjese i okolne vode najviše djeluje na udarni val, lomeći ga i smanjujući mu intenzitet. Dio energije udarnog vala prenosi se na mjehure zraka uzrokujući time njihovo vibriranje i usporenje udarnog vala. Nakon što napusti zavjesu udarni val ima povećanu amplitudu i duži period trajanja. Ovako se tlak udarnog vala može smanjiti za 80 % do 90 %. Međutim, navedeno smanjenje ovisi jako o valnoj duljini, te je metoda manje učinkovita na nižim frekvencijama (Župan, 2012).

Druga metoda smanjenja tlaka udarnog vala jest prekrivanje mjesta miniranja velikim količinama razdrobljenog stijenskog materijala (npr. od ranijih miniranja), koje služe kao prekrivač za eksploziv. Time se postiže smanjenje razbacivanja miniranog materijala i prigušenje energije vala od prevelikog tlaka plinova nastalih detonacijom. Ova je metoda dobra ako su materijali za pokrivanje brzo i lako dostupni (Župan, 2012).

Korištenje razdjelnog punjenja, također može smanjiti tlak udarnog vala. Dva ili tri naboja u istoj bušotini odvojena su neeksplozivnim materijalom. Donji naboj ima veće kašnjenje od gornjeg i na taj način se smanjuje masa eksploziva po stupnju paljenja. Korištenje usporenja prilikom miniranja općenito, smatra se dobrom metodom za smanjenje negativnog utjecaja na životinje, jer se udarni val time dijeli na niz manjih valova. Čepljenje minskih bušotina, metoda uobičajena u minerskoj praksi za zadržavanje energije produkata eksplozije, smanjit će energiju udarnog vala u vodi (Keevin i Hempen, 1997).

## 5. MJERENJE SEIZMIČKIH UTJECAJA PODVODNOG MINIRANJA U PROJEKTU "REKONSTRUKCIJA SJEVERNE LUKE"

Iskop za produbljenje dna u sjevernoj luci Split, prostoru lučkog područja Vranjičko-Solinskog bazena na pozicijama veza br.2, veza br.3 i veza br.5 planira se sanacija oštećenja na postojećim obalnim zidovima te produbljenje akvatorija s iskopom morskog dna do kote -11.0 mn.m.

Geotehnički istražni radovi izvedeni su s ciljem utvrđivanja sastava i geološko - geomehaničkih značajki terena, dubine pojave matične stijene na akvatoriju, te dubine i načina temeljenja obalnog zida. Na temelju dobivenih saznanja date su smjernice za način iskopa i oblikovanja kosina zasjeka kod produbljenja morskog dna, te prijedlog mjera sanacije obalnog zida s veličinom dopuštenih kontaktnih pritisaka ispod temelja, način pripreme temeljnog tla itd.

Teren na predmetnoj lokaciji izgrađuju klastične flišne naslage srednjeg do gornjeg eocena (E2,3) - matična stijena koja je prekrivena slojem pokrivke koju čine naslage degradiranog – rastrošenog fliša (Qel) i kvartarne aluvijalne (marinske) naslage (Qal) (IGH, 2016).



Slika 5.1. - Prikaz lokacije na prostoru lučkog područja Vranjičko-Solinskog bazena (Dobrilović, 2018.)

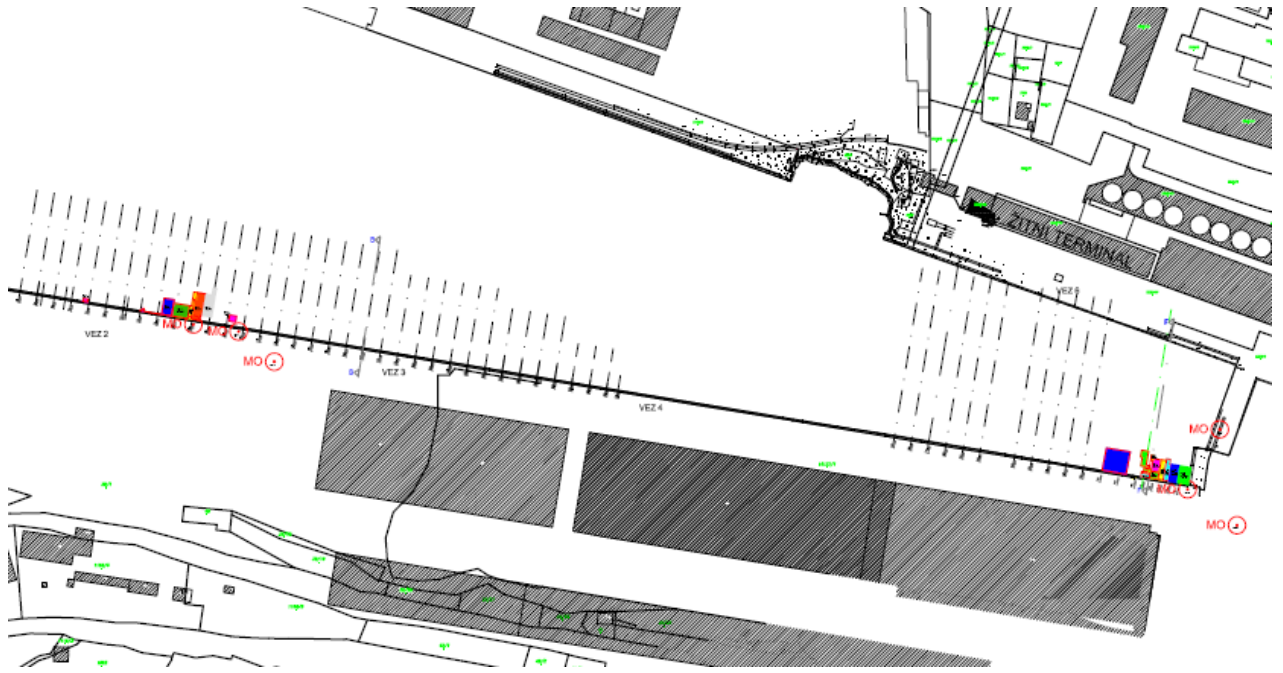
Prema narudžbi poduzeća Pomgrad inženjering d.o.o., Split, obavljena su mjerenja seizmičkih utjecaja miniranja pri podmorskom miniranju za sanaciju obalnih zidova na vezu br. 2 i vezu br. 3 sa lučkim konstruktivnim iskopima u lučkom području Vranjičko-Solinskog bazena, a u svrhu određivanja intenziteta seizmičkog utjecaja miniranja prema izmjerenim brzinama oscilacija u skladu s zahtjevima norme HRN DIN 4150, 1-3:2011.

Situacijske karte s ucrtanim minskim poljima i mjernim mjestima prikazane su na slikama 5-2. i 5-3.



Slika 5-2. – Situacijska karta a ucrtanim minskim poljima i mjernim mjestima za prva tri probna minska polja (Dobrilović, 2018.)





Slika 5-3. - Situacijska karta a ucrtanim minskim poljima i mjernim mjestima za ostala probna minska polja (Dobrilović, 2018.)

Probna miniranja, odnosno mjerenja brzina oscilacija provedena su 22.11.2017. na tri minska polja i 9 mjesta mjerenja brzina oscilacija i na dva mjerna mjesta tlaka udarnog vala u vodi, što se može vidjeti na slikama 5-2. i 5-3.

Prilikom ostalih probnih miniranja, mjerenja brzina oscilacija provodila su se na dva mjerna mjesta.

## 5.1. Tehnički opis miniranja

Zbirni tehnički podaci minskih polja dani su tablicom 5-1.

Tablica 5-1. – Tehnički podaci minskog polja

Broj minskih bušotina	10 - 99
Duljina minskih bušotina	1,2 m – 2,67 m
Promjer minskih bušotina	89 (42) mm
Nagib minskih bušotina	90°
Izbojnica	0,7 m – 1,2 m
Razmak	0,7 m – 1,2 m
Najveća masa eksplozivnog punjenja po stupnju iniciranja	0,5 kg – 2,083 kg
Inicijalni sustav	Neelektrični sustav iniciranja 25/500 ms
Specifična potrošnja eksploziva	0,57 kg/m <sup>3</sup> – 1,56 kg/m <sup>3</sup>

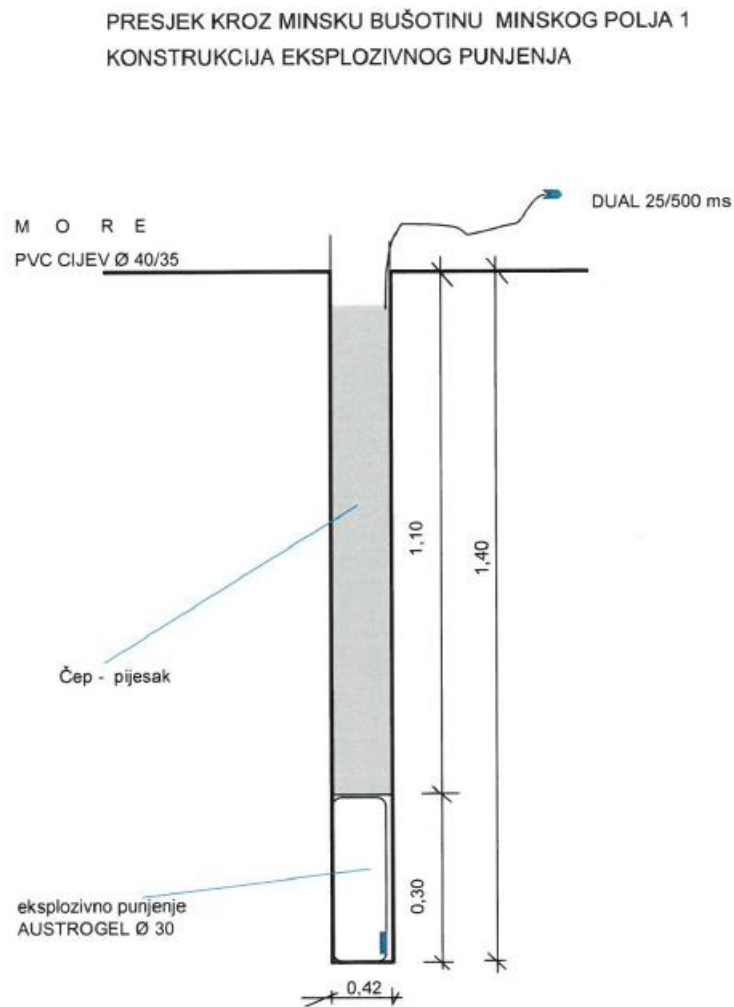
Najveća masa eksplozivnog punjenja po stupnju iniciranja iznosila je po pojedinom minskom polju od 0,5 kg do 2,083 kg.

Odabrani eksploziv za miniranje pri podvodnim miniranjima mora imati slijedeće minersko tehničke karakteristike: gustoću  $\rho$  (kg/dm<sup>3</sup>) znatno veću od 1, veliku vodootpornost, plastičnu konzistenciju, relativno dobru osjetljivost-mogućnost iniciranja s neelektričnim sustavom, veliku energiju eksplozije-najmanje 5 MJ/kg.

Odabrani su eksplozivi Riogel troner HE i Austrogel P koji zadovoljava sve spomenute minerske i sigurnosne uvjete. Miniranje će se izvesti eksplozivom Riogel troner, u patronama promjera 60 mm i Austrogelom P u patronama promjera 50 mm i 30 mm.

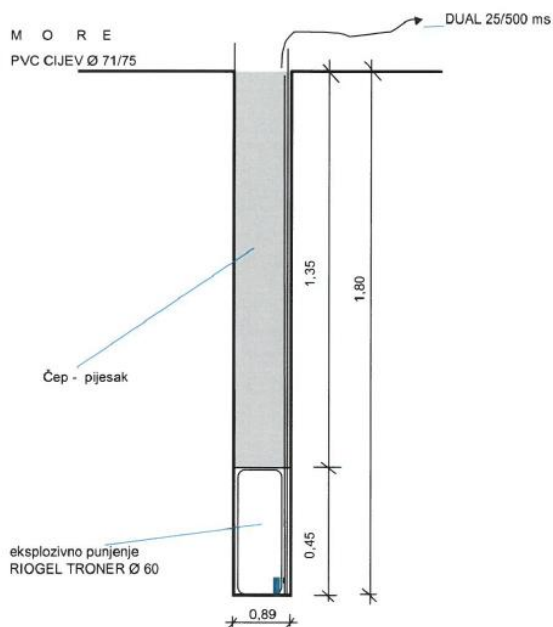
Povezivanje će se izvesti neelektričnim sustavom za iniciranje, koji se sastoji od detonatora s usporenjem iniciranja od 500 ms i konektora (spojnice) s usporenjem od 25 ms. Iniciranje pojedinog minskog polja odnosno mreže neelektričnog sustava izvesti će trenutnim električnim detonatorima (Dobrilović, 2018).

Na slikama 5-4., 5-5. i 5-6. su prikazani presjeci kroz minske bušotine i konstrukcije eksplozivnog punjenja za svako minsko polje na prvom probnom miniranju izvedenom 22.11.2017.



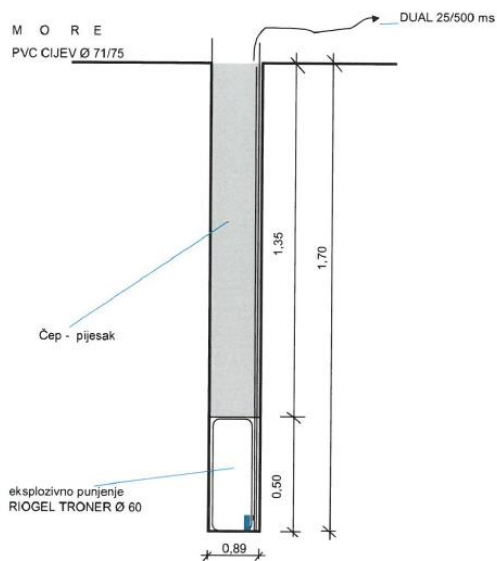
Slika 5.4. – Presjek minske bušotine i konstrukcija punjenja za MP1 (Dobrilović, 2018.)

PRESJEK KROZ MINSKU BUŠOTINU MINSKOG POLJA 2  
KONSTRUKCIJA EKSPLOZIVNOG PUNJENJA

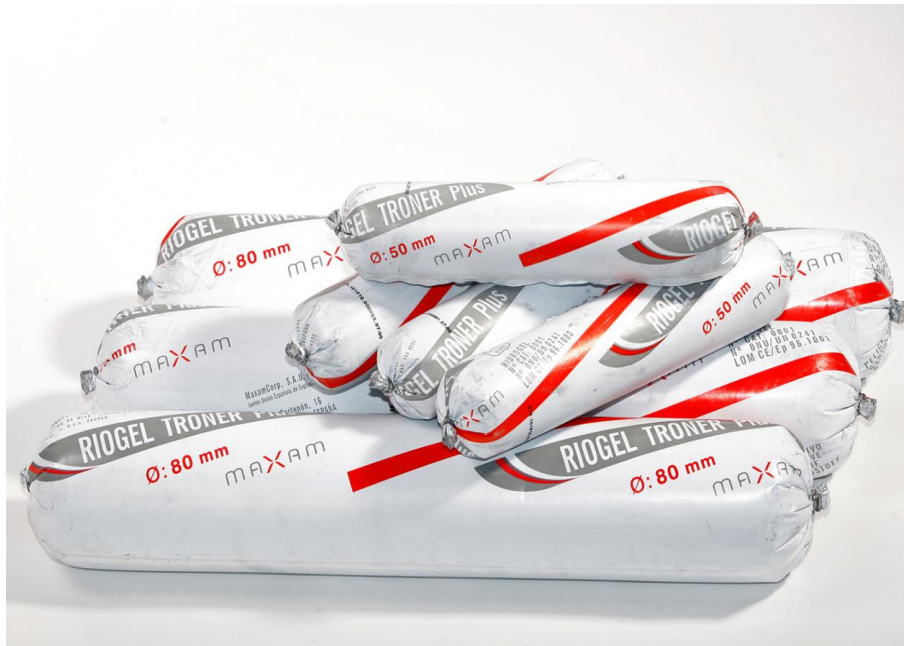


Slika 5.5. - Presjek minske bušotine i konstrukcija punjenja za MP2 (Dobrilović, 2018.)

PRESJEK KROZ MINSKU BUŠOTINU MINSKOG POLJA 3  
KONSTRUKCIJA EKSPLOZIVNOG PUNJENJA



Slika 5.6. - Presjek minske bušotine i konstrukcija punjenja za MP3 (Dobrilović, 2018.)



Slika 5-7. – Eksplozivno punjenje za minsku bušotinu – Riogel Troner (Maxam, 2018)

Trenutni električni detonatori korišteni su za iniciranje cijelog minskog polja, a za pojedine bušotine korišteni su neelektrični Dual sustav s usporenjem konektora od 25 ms da bi se osiguralo vremensko odvojeno otpucavanje svake minske bušotine, dok su usporenja detonatora (u bušotini) od 500 ms. Dual sustav prikazan ja na slici 5-8.



Slika 5-8. – Neelektrični Dual sustav 25/500 (Žepačkić, 2014.)

## 5.2. Uređaji za mjerenje seizmičkih utjecaja

Prilikom miniranja nastale oscilacije tla izmjerene su prijenosnim seizmografima tipa: Instantel BlastMate II DS-467, Instantel BlastMate Series III, Instantel MiniMate, Instantel MiniMate Plus, Instantel Series Pro IV i Instantel MicroMate. Pored mjerenja seizmičkih utjecaja miniranja mjerio se i tlak udarnog vala u vodi. Tlak udarnog vala u vodi mjerio se pomoću hidrofona.

Postavljeno je dva do devet mjernih mjesta s geofonima za mjerenje brzine oscilacija, na dostupnim dijelovima okolnih objekata.

Generalne tehničke karakteristike pojedinih tipova namjenskih seizmografa proizvođača Instantel Inc. su prikazane u tablicama 5-2. i 5-3.:

Tablica 5.2. – Generalne značajke mjernih instrumenata

Četvorokanalni	
Seizmički kanali x 3	1024-16.384 uzoraka/s/kanal
Max. range	254 mm/s
Min. resolucija	0.0159 mm/s
Pomak	0.00023-3.5 cm
Obrada podataka	programski paket Instantel BlastWare III
Standarni geofon Instantel Model 714A0301-trokomponentni	
Max. range	254 mm/s
Min. resolucija	0.0159 mm/s
Osjetljivost	0.006344 V/mm/s
Akceleracija i pomak	proračun korištenjem postojeće krivulje
Frekvencija	2 – 300 Hz

Tablica 5.3. – Generalne značajke za mjerne instrumente InstanTel BlastMate Series III i InstanTel MiniMate Plus

InstanTel BlastMate Series III i InstanTel MiniMate Plus	
Četvorokanalni	
Seizmički kanali x 3	1024-16.384 uzoraka/s/kanal
Max. range	254 mm/s
Min. resolucija	0.0159 mm/s
Akceleracija i pomak	proračun korištenjem postojeće krivulje
Obrada podataka	programski paket InstanTel BlastWare III
Standarni geofon InstanTel Model 714A0301-trokomponentni	
Max. range	254 mm/s
Min. resolucija	0.0159 mm/s
Osjetljivost	0.006344 V/mm/s
Akceleracija i pomak	proračun korištenjem postojeće krivulje
Frekvencija	2 – 300 Hz

Geofoni su trokomponentne izvedbe, čime je omogućeno istovremeno mjerenje brzina oscilacija unutar tri prostorne, međusobno okomite osi. Prema tome razlikuju se i tri komponente mjerenih brzina oscilacija:

- longitudinalna ili radijalna
- transverzalna
- vertikalna komponenta

Geofon radi na principu elektromagnetske indukcije. Gibanjem zavojnice u magnetskom polju u zavojnici se inducira električni potencijal koji je proporcionalan magnetskoj indukciji, brzini gibanja zavojnice i duljini vodiča zavojnice zahvaćene silnicama magnetskog polja, prema formuli:

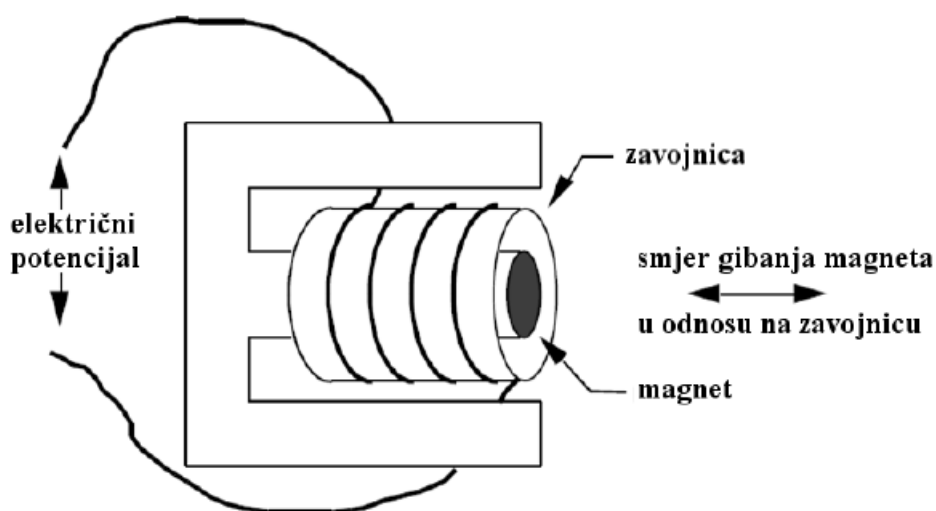
$$E = B \times l \times v \quad (5-1.)$$

gdje je: E – napon (V)

B – magnetska indukcija (T)

l – duljina vodiča (m)

Promjenom brzine gibanja zavojnice mijenja se i veličina induciranog napona i ona je proporcionalna brzini oscilacija. Prikaz načina rada geofona je vidljiv na slici 5-9.



Slika 5-9. – Prikaz načina rada geofona

Inducirani napon u vremenu se dovodi mjernom uređaju (seizmografu), a signal se dalje digitalizira i obrađuje, te u konačnici daje promjenu brzine oscilacija u vremenu, u formatu zapisa trenutno zabilježenih velicina u određenim vremenskim intervalima. Gustoća mjerenih podataka ovisi o mogućnosti procesora uređaja i može se izbornikom prilagođavati potrebnoj rezoluciji mjerenja (InstanTel, 2001).



### 5.3. Rezultati mjerenja seizmičkih utjecaja podvodnih miniranja

U tablici 5.4. dane su horizontalne udaljenosti mjernih mjesta od minskog polja i mjerene komponente odnosno rezultante brzina oscilacija za svih 11 probnih miniranja koja su izvedena u rasponu od 22.11.2017. do 01.02.2018.

Tablica 5-4. – Udaljenosti mjernih mjesta od minskog polja i rezultati mjerenja

Mjerno mjesto	Instrument	Ser. broj	Udaljenost [m]	Tran [mm/s]	Vert [mm/s]	Long [mm/s]	PVS [mm/s]
MP1-1 MO - 1	BlastMate III	BA 7958	34,7	2,794	5,715	3,937	<b>6,138</b>
MP1-1 MO - 2	MiniMate Plus	BE 10234	120,6	1,397	0,635	0,508	<b>1,423</b>
MP1-1 MO - 3	BlastMate III	BA 6380	114,5	2,540	0,762	2,667	<b>3,513</b>
MP1-2 MO - 1	BlastMate III	BA 7958	34,7	2,794	5,461	3,048	<b>5,911</b>
MP1-2 MO - 2	MiniMate Plus	BE 10234	120,6	3,302	3,175	1,905	<b>3,456</b>
MP1-2 MO - 3	BlastMate III	BA 6380	114,5	9,017	7,239	3,810	<b>9,767</b>
MP1-2 MO - 4	INST Pro 4	MP 13021	216,0	0,497	0,394	1,017	<b>1,092</b>
MP2-1 MO - 1	BlastMate III	BA 7958	51,4	3,429	5,969	4,191	<b>6,420</b>
MP2-1 MO - 2	MiniMate Plus	BE 10234	37,0	1,397	0,508	0,508	<b>1,412</b>
MP2-1 MO - 3	BlastMate III	BA 6380	34,5	2,159	1,016	2,413	<b>3,116</b>
MP2-2 MO - 1	BlastMate III	BA 7958	51,4	2,413	7,493	3,429	<b>7,708</b>
MP2-2 MO - 2	MiniMate Plus	BE 10234	37,0	6,604	3,175	1,905	<b>6,706</b>
MP2-2 MO - 3	BlastMate III	BA 6380	34,5	10,790	7,112	7,239	<b>12,990</b>
MP2-2 MO - 4	INST Pro 4	MP 13021	204,6	0,765	0,552	1,324	<b>1,405</b>
MP3-1 MO - 6	MiniMate	5938	11,0	15,240	33,530	19,300	<b>33,610</b>
MP3-1 MO - 7	MiniMate Blaster	BE 13570	39,9	4,445	5,207	5,207	<b>5,882</b>
MP3-1 MO - 8	MiniMate Plus	BE 12945	44,6	3,429	3,175	4,191	<b>4,726</b>
MP3-1 MO - 9	BlastMate II	1280	71,7	2,032	1,905	2,540	<b>2,699</b>
MP3-1 MO - 10	MiniMate Plus	BE 10234	106,2	1,178	1,397	1,778	<b>2,278</b>
MP3-1 MO - 11	INST Pro 4	MP 13021	112,4	2,696	1,876	2,885	<b>3,370</b>
MP4-1 MO - 2	MiniMate Blaster	BE 13570	30	6,096	9,525	5,461	<b>10,320</b>
MP5-1 MO - 1	MiniMate Blaster	BE 13570	18	24,510	22,350	12,450	<b>31,440</b>

MP5-1 MO – 2	MiniMate	5938	53	5,969	8,128	5,398	<b>8,969</b>
MP6-1 MO – 1	MiniMate	5938	15	24,380	49,780	18,800	<b>50,120</b>
MP6-1 MO – 2	MiniMate Blaster	BE 13570	50	3,937	7,112	6,350	<b>7,351</b>
MP7-1 MO – 1	MiniMate	5938	23	8,890	4,636	3,874	<b>9,271</b>
MP7-1 MO – 2	MiniMate Blaster	BE 13570	58	2,032	2,159	1,651	<b>2,469</b>
MP8-1 MO – 1	MiniMate	5938	28	13,970	11,940	7,874	<b>18,590</b>
MP8-1 MO – 2	MiniMate Blaster	BE 13570	54	6,350	4,826	4,572	<b>6,869</b>
MP9-1 MO – 1	MiniMate	5938	23	12,450	14,990	5,969	<b>16,920</b>
MP9-1 MO – 2	MiniMate Blaster	BE 13570	49	5,842	5,461	3,683	<b>6,275</b>
MP10-1 MO – 1	MiniMate	5938	12	17,730	42,670	10,670	<b>42,890</b>
MP10-1 MO – 2	MiniMate Blaster	BE 13570	33	1,651	1,397	2,286	<b>2,913</b>
MP11-1 MO – 1	MiniMate	5938	33	12,700	13,720	5,969	<b>13,720</b>
MP11-1 MO – 2	MiniMate Blaster	BE 13570	46	5,715	4,953	4,318	<b>7,172</b>
MP12-1 MO – 1	MiniMate	5938	15,79	16,000	15,240	9,144	<b>16,940</b>
MP12-1 MO – 2	MiniMate Blaster	BE 13570	42,02	5,969	7,493	2,921	<b>7,785</b>
MP13-1 MO – 2	MiniMate Blaster	BE 13570	30,86	4,699	4,572	3,429	<b>5,926</b>
MP14-1 MO - 1	MiniMate	5938	7,52	17,780	22,100	21,590	<b>29,780</b>
MP14-1 MO - 2	MiniMate Blaster	BE 13570	27,07	10,540	13,330	6,096	<b>14,120</b>
MP15-1 MO - 1	MiniMate Blaster	BE 13570	40,27	9,271	3,937	3,302	<b>9,820</b>
MP15-1 MO - 2	MiniMate	5938	52,23	2,667	2,794	2,286	<b>2,905</b>

U narednoj tablici 5-5. prikazani su rezultati mjerenja tlaka udarnoga vala u vodi koji je mjeran 22.11.2017. prilikom probnog miniranja u zoni iskopa I.

Tablica 5-5. – Rezultati mjerenja tlaka udarnoga vala 22.11.2017.

Mjerno mjesto	Instrument	Ser. broj	Udaljenost [m]	Tran [mm/s]	Vert [mm/s]	Long [mm/s]	Pvs [mm/s]	Tlak u vodi [kPa]
<b>MP1 (14:00:32)</b>								
MO - 1	BlastMate III	BA 7958	34,7	2,794	5,715	3,937	<b>6,138</b>	<b>30,59</b>
MO - 2	MiniMate Plus	BE 10234	120,6	1,397	0,635	0,508	<b>1,423</b>	<b>0,329</b>
<b>MP1 (14:03:00)</b>								
MO - 1	BlastMate III	BA 7958	34,7	2,794	5,461	3,048	<b>5,911</b>	<b>14,52</b>

MO - 2	MiniMate Plus	BE 10234	120,6	3,302	3,175	1,905	<b>3,456</b>	<b>0,329</b>
<b>MP2 (14:38:35)</b>								
MO - 1	BlastMate III	BA 7958	51,4	3,429	5,969	4,191	<b>6,420</b>	<b>28,34</b>
MO - 2	MiniMate Plus	BE 10234	37,0	1,397	0,508	0,508	<b>1,412</b>	<b>0,329</b>
<b>MP2 (14:40:37)</b>								
MO - 1	BlastMate III	BA 7958	51,4	2,413	7,493	3,429	<b>7,708</b>	<b>9,505</b>
MO - 2	MiniMate Plus	BE 10234	37,0	6,604	3,175	1,905	<b>6,706</b>	<b>0,329</b>

Prema kriterijima utvrđenim od istraživača Richmonda, Gaspina i O'Keeffe-a za nezaštićenog plivača koji pliva na vodi do dubine 0.3 m vrijede slijedeće vrijednosti tlaka udarnog vala u vodi koji ne uzrokuju nikakve povrede i sl., dakle vrijednosti ispod njih smatraju se sigurnim:

1. Impuls udarnog vala zajedno s reflektiranim valom jednak ili manji od 14 Pas

ili

2. Vršni tlak jednak ili manji od 690 kPa

Navedene vrijednosti tlaka vrijede za dubinu ronioca 0.3 m. Povećanjem dubine plivanja (ronjenja) nezaštićenog ronioca povećava se sigurna udaljenost, npr., ako je ronioc na dubini od 7 m ispod površine onda se faktor povećava 4 puta ( $4 \times 690 = 2760$  kPa); ako je ronioc na dubini od 22 m ispod površine onda se faktor za njegovu sigurnost povećava 7 puta.

U naredne tri tablice (5-6., 5-7. i 5-8.) su prikazani rezultati mjerenja brzine oscilacija i tlaka udarnoga vala na miniranjima izvedenim 16.05.2018., 30.05.2018. i 21.08.2018.

Kod miniranja izvedenog 16.05.2018. korišteno je 2 kg eksploziva na oba minska polja, na miniranju odrađenom 30.05.2018. je ukupna potrošnja eksploziva za oba minska polja 2,1 kg, dok kod miniranja izvedenom 21.08.2018. ukupno utrošeno 2,5 kg eksploziva.

Tablica 5-6. – Rezultati miniranja izvedenog 16.05.2018.

<b>MP1</b>							
<b>Mjerno mjesto</b>	<b>Instrument</b>	<b>Ser. broj</b>	<b>Udaljenost [m]</b>	<b>Tran [mm/s]</b>	<b>Vert [mm/s]</b>	<b>Long [mm/s]</b>	<b>Pvs [mm/s]</b>
MO - 1	MiniMate Plus	BE 10774	<b>2,7</b>	52,320	120,500	29,840	<b>120,700</b>
MO - 2	MiniMate Plus	BE 12944 HF	<b>7,6</b>	*			
	MiniMate Blaster	BE 13570		11,050	51,430	13,840	<b>51,450</b>
MO - 3	BlastMate II	1280	<b>31</b>	2,540	10,920	8,890	<b>11,530</b>
MO - 4	BlastMate III	BA 6380 HF	<b>28,9</b>	202,6 kPa			
	BlastMate III	BA 6380		*	*	*	*
MO - 5	BlastMate III	BA 7958	<b>40,6</b>	4,572	8,128	9,525	<b>9,970</b>
MO - 6	MiniMate Plus	BE 12945 HF	<b>49,2</b>	*			
	MiniMate Plus	BE 9169		5,842	10,160	5,334	<b>11,360</b>
MO - 7	INST Pro 4	MP 13021	<b>56,9</b>	8,646	5,651	6,558	<b>10,770</b>
MO - 8	Micromate DIN	UM 6978	<b>63,6</b>	5,304	8,851	6,542	<b>10,660</b>
<b>MP2</b>							
<b>Mjerno mjesto</b>	<b>Instrument</b>	<b>Ser. broj</b>	<b>Udaljenost [m]</b>	<b>Tran [mm/s]</b>	<b>Vert [mm/s]</b>	<b>Long [mm/s]</b>	<b>Pvs [mm/s]</b>
MO - 1	MiniMate Plus	BE 10774	<b>61,6</b>	8,001	8,255	7,493	<b>10,000</b>
MO - 2	MiniMate Plus	BE 12944 HF	<b>47,2</b>	*			
	MiniMate Blaster	BE 13570		7,493	12,920	6,350	<b>13,650</b>
MO - 3	BlastMate II	1280	<b>53,4</b>	3,556	7,747	5,334	<b>7,969</b>
MO - 4	BlastMate III	BA 6380 HF	<b>25,7</b>	131,9 kPa			
	BlastMate III	BA 6380		*	*	*	*
MO - 5	BlastMate III	BA 7958	<b>38,4</b>	6,223	13,210	12,190	<b>15,220</b>
MO - 6	MiniMate Plus	BE 12945 HF	5,8	*			
	MiniMate Plus	BE 9169		13,970	50,670	19,940	<b>52,320</b>
MO - 7	INST Pro 4	MP 13021	<b>29,1</b>	4,296	11,390	16,760	<b>17,060</b>
MO - 8	Micromate DIN	UM 6978	<b>2,8</b>	23,130	99,580	48,540	<b>104,200</b>

Tablica 5-7. – Rezultati mjerenja miniranja izvedenog 30.05.2018.

30.05.2018. MP1 (17:50)							
Mjerno mjesto	Instrument	Ser. broj	Udaljenost [m]	Tran [mm/s]	Vert [mm/s]	Long [mm/s]	Pvs [mm/s]
MO - 1	MiniMate Plus	BE 13570	9,0	11,810	84,200	45,970	<b>84,550</b>
MO - 2	Micromate DIN	UM 6978	14,8	25,080	33,190	14,950	<b>33,350</b>
	MiniMate Plus	BE 12945 HF					
MO - 3	MiniMate Plus	BE 9169	21,3	7,366	20,950	9,398	<b>21,240</b>
	MiniMate Plus	BE 12944 HF					
MO - 4	BlastMate III	BA 6380	27,7	5,334	10,790	14,350	<b>14,400</b>
	BlastMate III	BA 7958 HF					
MO - 5	INST Pro 4	MP 13021	37,6	6,873	13,190	13,970	<b>14,870</b>
MO - 6	BlastMate II	1280	35,9	6,223	7,620	13,970	<b>14,680</b>
MO - 7	MiniMate Plus	BE 10774	188,3	< 1,51	< 1,51	< 1,51	< 1,51
Osjetljivost je bila na 0,508 mm/s pa se je stalno uključivao dok nije dignuta na 1,51 mm/s. <b>Nije se uključio.</b>							
30.05.2018. MP2 (18:05)							
Mjerno mjesto	Instrument	Ser. broj	Udaljenost [m]	Tran [mm/s]	Vert [mm/s]	Long [mm/s]	Pvs [mm/s]
MO - 2	MiniMate Plus	BE 12945 HF		<b>54,42 kPa</b>			
MO - 3	MiniMate Plus	BE 12944 HF		<b>271,00 kPa</b>			
MO - 4	MiniMate Plus	BE 9169		3,810	10,160	14,350	<b>15,010</b>
	BlastMate III	BA 7958 HF		<b>Nije se uključio</b>			

Tablica 5-8. – Rezultati mjerenja miniranja izvedenog 21.08.2018.

MP1							
Mjerno mjesto	Instrument	Ser. broj	Udaljenost [m]	Tran [mm/s]	Vert [mm/s]	Long [mm/s]	Pvs [mm/s]
MO - 1	MiniMate Plus	BE 10234 HF	<b>17,8</b>	<b>331,5</b>			
	BlastMate III	BA 6380	<b>18,4</b>	18,540	27,430	11,680	<b>27,660</b>
MO - 2	MiniMate Plus	BE 10774 HF	<b>20,3</b>	<b>335,4</b>			
	MiniMate	5938	<b>20,9</b>	13,720	21,080	16,260	<b>21,370</b>
MO - 3	BlastMate III	BA 7958 HF	<b>26,9</b>	<b>215,3 kPa</b>			
	BlastMate II	1280	<b>27,3</b>	10,030	16,890	9,779	<b>17,300</b>
MO - 4	INST Pro 4	MP 13021	<b>45</b>	7,283	7,165	11,370	<b>12,880</b>
MO - 5	Micromate DIN	UM 6978	<b>46,1</b>	8,772	8,914	12,360	<b>14,840</b>
MO - 6	MiniMate Plus	BE 9169	<b>49,4</b>	9,906	6,731	14,860	<b>16,070</b>
MP2							
Mjerno mjesto	Instrument	Ser. broj	Udaljenost [m]	Tran [mm/s]	Vert [mm/s]	Long [mm/s]	Pvs [mm/s]
MO - 1	MiniMate Plus	BE 10234 HF	<b>34,3</b>	<b>330,0</b>			
	BlastMate III	BA 6380	<b>34,8</b>	7,747	17,020	8,001	<b>17,470</b>

MO - 2	MiniMate Plus	BE 10774 HF	<b>43,3</b>	<b>305,7 kPa</b>			
	MiniMate	5938	<b>43,5</b>	6,350	10,670	7,366	<b>12,450</b>
MO - 3	BlastMate III	BA 7958 HF	<b>52,9</b>	<b>132,5 kPa</b>			
	BlastMate II	1280	<b>53,2</b>	5,969	8,001	7,493	<b>9,604</b>
MO - 4	INST Pro 4	MP 13021	<b>53,9</b>	-	-	-	-
MO - 5	Micromate DIN	UM 6978	<b>59,9</b>	8,481	8,205	10,620	<b>12,000</b>
MO - 6	MiniMate Plus	BE 9169	<b>67,1</b>	10,290	5,080	9,652	<b>11,670</b>

Maksimalna izračunata brzina oscilacija je sigurno veća od stvarne maksimalne brzine u bilo kojem trenutku potresa i služi za brzo i rutinsko određivanje rezultirajućih vrijednosti brzina oscilacije (Krsnik, 1989).

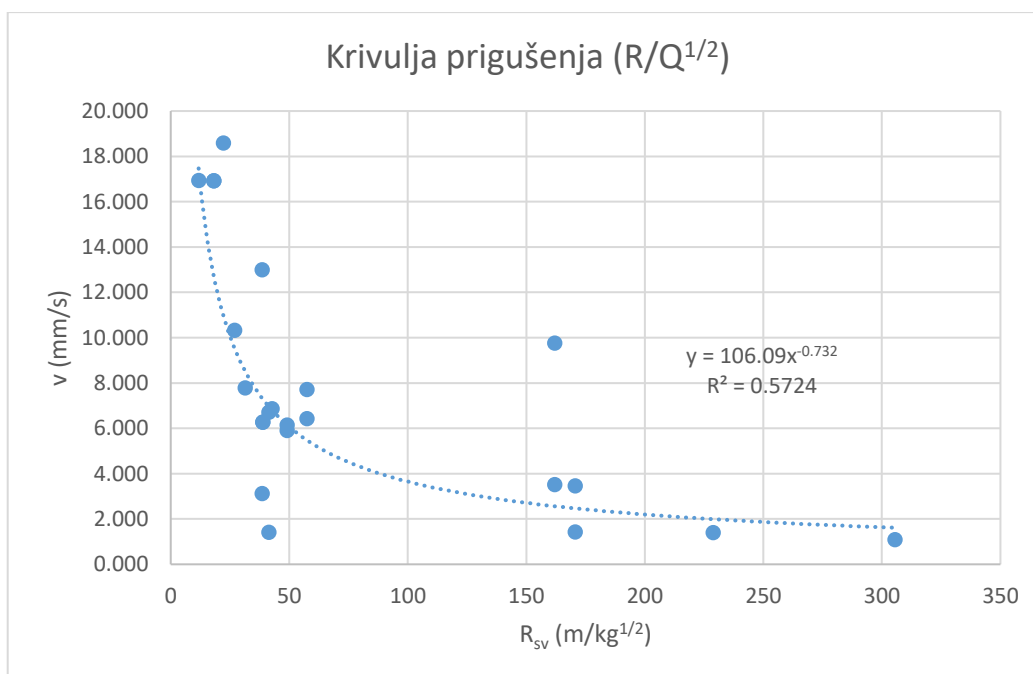
## 6. REGRESIJSKA ANALIZA

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

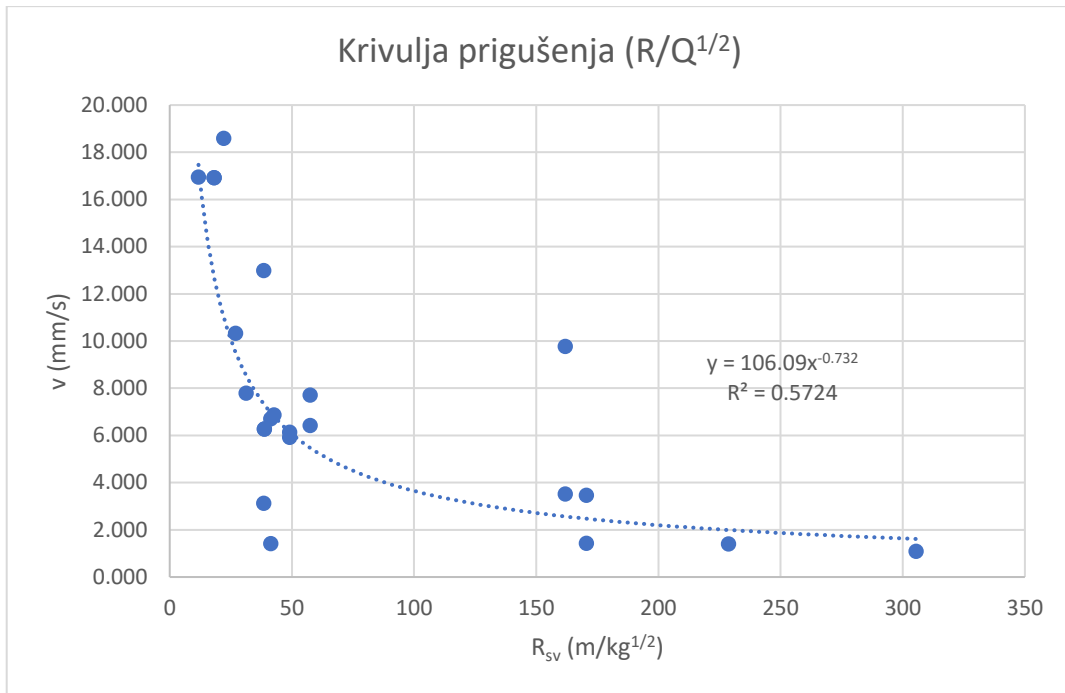
Primjenom obrade podataka mjerenih brzina oscilacija metodom regresijske analize, određene su krivulje regresije dijagrama rasprostiranja te stupanj povezanosti brzina oscilacija i svedene udaljenosti te je određen stupanj povezanosti za podmorska miniranja za sanaciju obalnih zidova na vezu br. 2 i vezu br. 3 sa lučkim konstruktivnim iskopima u lučkom području Vranjičko-Solinskog bazena.

Mjerenjem brzina oscilacija na mjernim mjestima određene su krivulje prigušenja brzina oscilacija za pojedina područja iskopa, područje I i područje II (Dobrilović, 2018).

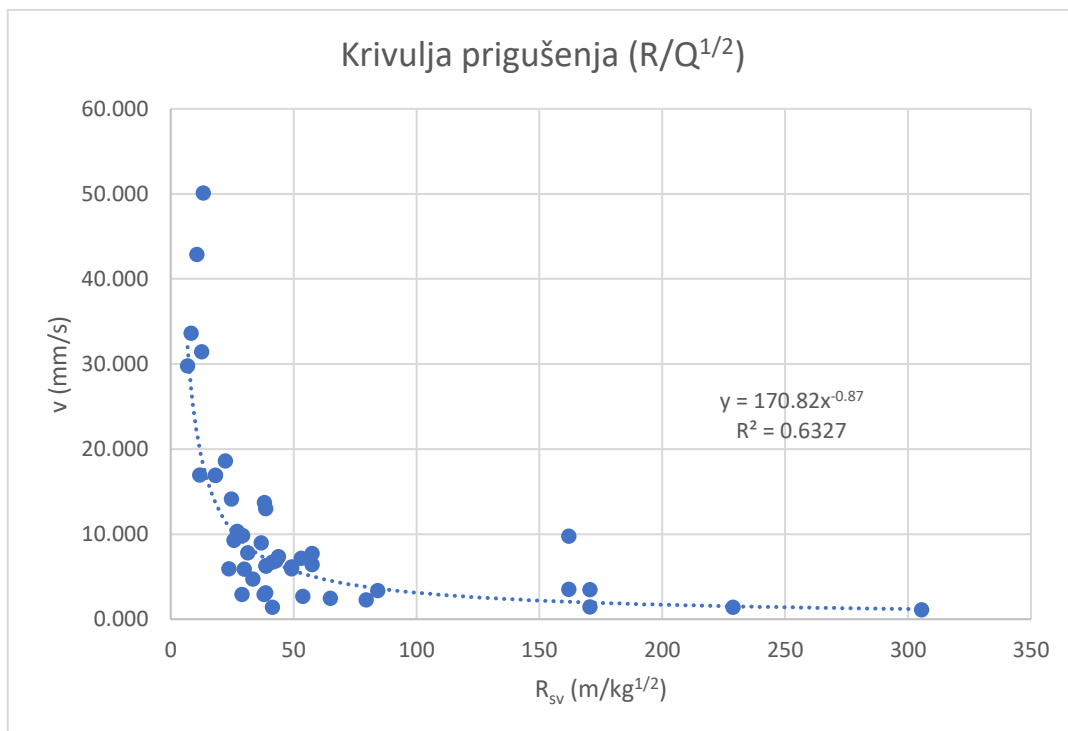
Krivulja prigušenja obzirom na svedenu udaljenost za područje I prikazana je na grafikonu 6-1., krivulja prigušenja obzirom na svedenu udaljenost za područje II prikazana je grafikonom 6-2., a zajednička krivulja prigušenja za sve mjerne točke obzirom na svedenu udaljenost dana je grafikonom 6-3.



Slika 6-1. – Karakteristična krivulja prigušenja obzirom na svedenu udaljenost za područje I (Dobrilović, 2018).



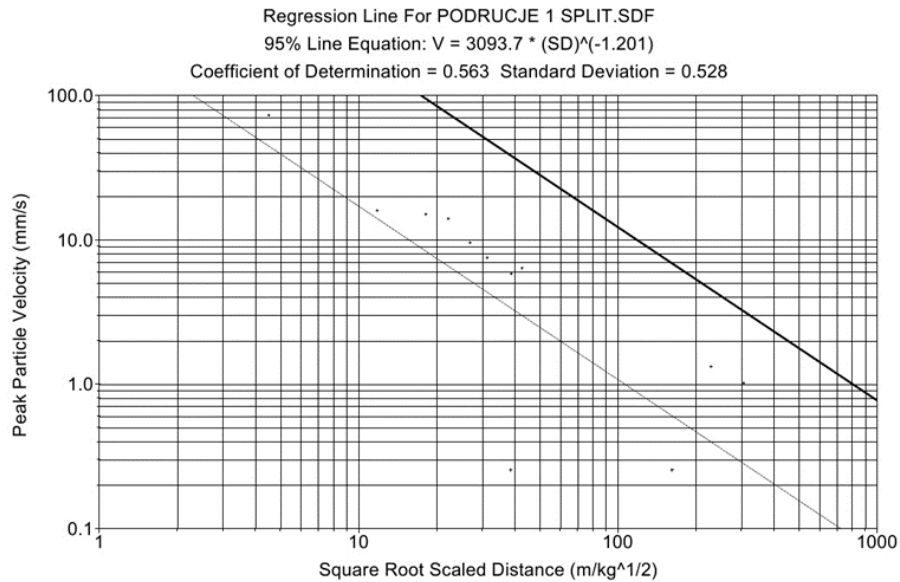
Slika 6-2. – Karakteristična krivulja prigušenja obzirom na svedenu udaljenost za područje II (Dobrilović, 2018).



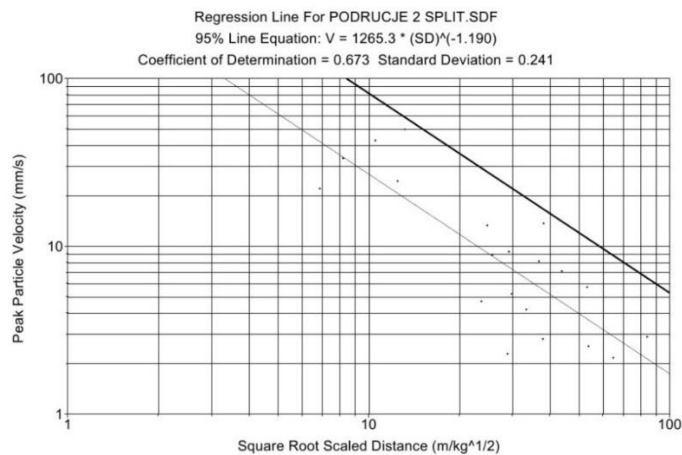
Slika 6-3. – Karakteristična krivulja prigušenja za sve mjerne točke (Dobrilović, 2018).



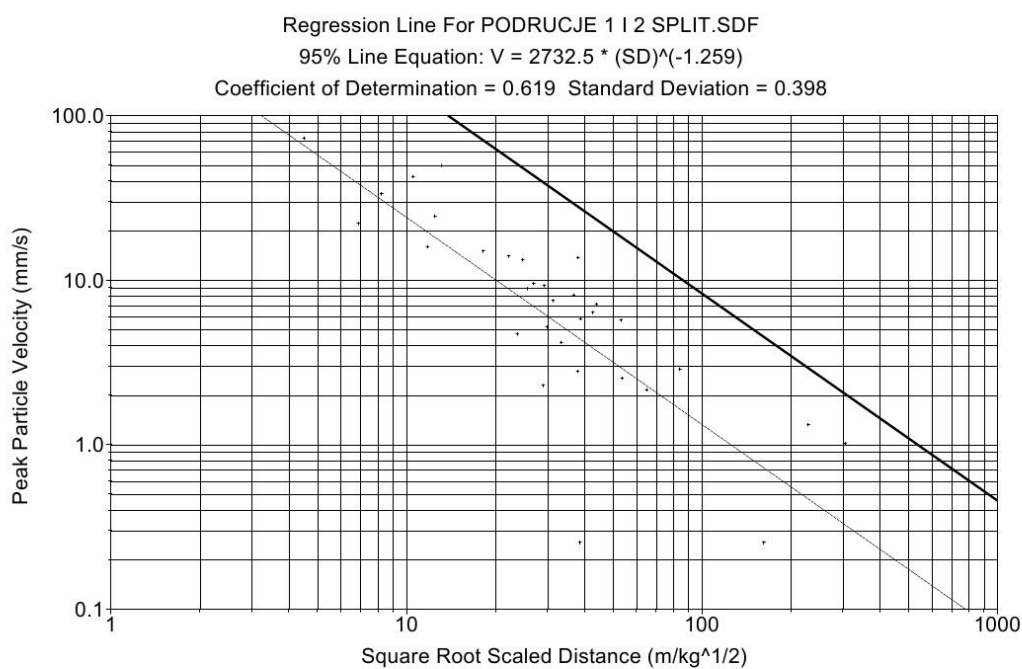
Prema dijagramu rasprostiranja podataka mjerenja prilikom probnih miniranja u logaritamskom prikazu ovisnosti brzina oscilacija o svedenoj udaljenosti matematički je određen granični pravac ispod kojeg ulazi 95% mjerenih rezultata, za područje I (slika 6-4.), područje II (slika 6-5.) i za skupne podatke (slika 6-6.)



Slika 6-4. - Regresijska krivulja komponenta brzina oscilacija za područje I (Dobrilović, 2018).



Slika 6-5. - Regresijska krivulja komponenta brzina oscilacija za područje II (Dobrilović, 2018).



Slika 6-6. – Skupna regresijska krivulja kompenata brzina oscilacija (Dobrilović, 2018).

Prema rezultatima mjerenja seizmičkih utjecaja miniranja iskazanih mjerenim brzinama oscilacija, dane su najveće dozvoljene mase eksplozivnog punjenja po stupnju iniciranja za miniranja i dozvoljenu brzinu oscilacija od 30 i 60 mm/s.

## 7. ZAKLJUČAK

Miniranja pri podmorskom miniranju za sanaciju obalnih zidova na vezu br. 2 i vezu br. 3 sa lučkim konstruktivnim iskopima u lučkom području Vranjičko-Solinskog bazena, izvedena su od 22.11.2017. do 01.02.2018.

Smjernicama norme HRN DIN 4150-3:2011, ustanovljene su dozvoljene brzine oscilacija za pojedine tipove objekata. Obzirom na tip građevina u okolini, za industrijske objekte se primjenjuje kriterij koji obzirom na frekvencije oscilacija prema zapisima mjerenja, iznosi od 20-40 mm/s te se usvaja za slučaj frekvencije komponentne brzine oscilacije od 30 Hz u iznosu od 30 mm/s. Pri određivanju dopuštenog utjecaja miniranja na obalni zid koji se nalazi u neposrednoj blizini te na skladišne i industrijske objekte primijeniti će se zahtjev norme HRN DIN 4150 za industrijske građevine. U slučaju građevina, odnosno masivnih objekata kao što su potporni zidovi, upornjaci i masivni temelji norma HRN DIN 4150-3:2011 u točki 5.1. dozvoljava povećanje vrijednosti najvećih dozvoljenih brzina oscilacija dva puta, te se usvaja 60 mm/s.

Mjerenja su osim za korekciju parametara miniranja poslužila i kao osiguranje za eventualne buduće tužbe, za naknadu materijalne štete uzrokovane miniranjem.

## 8. LITERATURA

1. KRSNIK, J., 1989. Miniranje; Zagreb: Rudarsko-geološko- naftni fakultet.
2. RONČEVIĆ, N., 2005.; Utjecaji podvodnog miniranja prilikom produbljivanja liburnske obale u Zadru, Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
3. ŽUPAN, J., 2012. Seizmički utjecaji miniranja prilikom iskopa miniranjem kanala usisnog cjevovoda hotela Marijan. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
4. INSTANTEL, 2001. BlastMate III Operator Manual. Ottawa: InstanTEL.
5. ESTER, Z., 2005. Miniranje I: Eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
6. LOOMIS, J., 2016. Impact of underwater explosions on concrete bridge foundations, Monterey, California: Naval Postgraduate School.
7. ŽEPAČKIĆ, I., 2014. Tlačni udarni val kod podvodnog miniranja. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
8. COLE, R. H., 1948. Underwater explosions. Princeton: Princeton University Press.
9. FOX, E.N., 1947. A review of underwater explosion phenomena. In: Underwater explosion research: Volume 1 – The shock wave. Cambridge: Cambridge University, 1950. str. 1-83.
10. KEEVIN, T. M., HEMPEN, G. L., 1997. The environmental effects of underwater explosions with methods to mitigate impacts. St. Louis: Corps of engineers.
11. RAO, S. K., VIJAYAKUMAR, R., 2012. Underwater Explosion and Effect on Structures. International Journal of Innovative Research and Development. 1(10), str. 207-234.
12. LEWIS, J. A., 1996. Effects of underwater explosions on life in the sea (*No. DSTO-GD-0080*). Canberra: Defence science and technology organisation.
13. SMITH, P. R., 2016. Underwater explosion energy dissipation near waterborne infrastructure. Master Thesis. Lexington, Kentucky: University of Kentucky.
14. DOBRILLOVIĆ, M., 2018. Elaborat mjerenja seizmičkih utjecaja miniranja na projektu Rekonstrukcija Sjeverne Luke. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
15. INSTITUT IGH d.d, 2016. Geotehnički elaborat, Geotehnički istražni radovi, Lučko područje Vranjičko–Solinskog bazena, sanacija obalnih zidova na vezu br.2, br.3 i br.5 sa lučkim konstruktivnim iskopima. Split: Odjel za geotehniku.