

Utjecaj podvodnih miniranja utvrđica na okolinu

Gelo, Valentino

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:169:416596>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-23**



Repository / Repozitorij:

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



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

UTJECAJ PODVODNIH MINIRANJA UTVRDICA NA OKOLINU

Diplomski rad

Valentino Gelo

R-4187

Zagreb, 2023.god.



KLASA: 602-01/23-01/71
URBROJ: 251-70-11-23-2
U Zagrebu, 03.07.2023.

Valentino Gelo, student

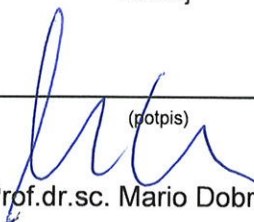
RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/71, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 45077 priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

UTJECAJ PODVODNIH MINIRANJA UTVRDICA NA OKOLINU

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


Voditelj



(potpis)
Prof.dr.sc. Mario Dobrilović

(titula, ime i prezime)

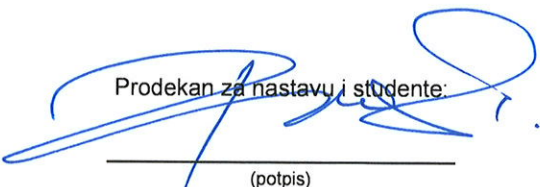
Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:



(potpis)
Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)
Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

UTJECAJ PODVODNIH MINIRANJA UTVRDICA NA OKOLINU

Valentino Gelo

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

Sažetak

Miniranje je suvremeni postupak za razaranje i drobljenje stijena, materijala i objekata energijom eksploziva. Djelovanje detoniranog eksplozivnog naboja u minskoj bušotini uzrokuje naprezanja koja dovode do frakturiranja i drobljenja stijene. Prilikom radova na objektima prihvatnog terminala za ukapljeni plin na otoku Krku potrebno je bilo ukloniti elemente starog pristana, odnosno četiri podvodne utvrdice. U tu svrhu proveden je program opsežnih mjerenja utjecaja miniranja na okolinu, u vidu praćenja djelovanja tlačnog udarnog vala u vodi te mjerenja nastalih brzina oscilacija na pilotima. U radu su opisana, kako projektna rješenja parametara miniranja, tako i program mjerenja u svrhu zaštite okoline te analiza dobivenih rezultata mjerenja.

Ključne riječi: podvodno miniranje, utvrdice, seizmički utjecaj, udarni val

Završni rad sadrži: 67 stranice, 32 tablice, 29 slika, 0 priloga, i 16 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Dr.sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr.sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF
Dr.sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF
Dr.sc. Vječislav Bohanek, izvanredni profesor RGNF

THE IMPACT OF UNDERWATER BLASTING OF FORTRESSES ON THE ENVIRONMENT

Valentino Gelo

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

Abstract

Blasting is a modern technique for destroying and crushing rocks, materials and objects with the energy of explosives. The action of a detonated explosive charge in a mine bore causes stresses that lead to fracturing and crushing of the rock. During the works on the facilities of the reception terminal for liquefied gas on the island of Krk, it was necessary to remove elements of the old wharf, i.e. four underwater fortifications. For this purpose, a program of extensive measurements of the impact of blasting on the environment was carried out, in the form of monitoring the action of the pressure shock wave in the water and measuring the resulting velocities of oscillations on the piles. The thesis describes both the project solutions for the blasting parameters, as well as the measurement program for the purpose of environmental protection and the analysis of the obtained measurement results.

Keywords: underwater blasting, fortresses, seismic impact, shock wave

Thesis contains: 67 pages, 32 tables, 29 figures, 0 appendixes, 16 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: Full Professor Mario Dobrilović, PhD

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

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PODVODNA MINIRANJA	2
2.1. Metode podvodnog miniranja	3
2.1.1. Podvodno miniranje koje obavljaju ronoci.....	3
2.1.2. Podvodno miniranje sa usidrenih platformi.....	4
2.2. Proračun parametara podvodnog miniranja	6
2.3. Eksplozivna sredstva za podvodno miniranje	7
3. PODVODNI UDARNI VAL	9
3.1. Tlačni udarni val u vodi	9
3.2. Mjehur plinova	12
4. ŠTETNI UTJECAJI PODVODNOG MINIRANJA	14
4.1. Utjecaj na životinje	14
4.2. Utjecaj na ljude	15
5. SEIZMIČKI UTJECAJ MINIRANJA	16
5.1. Vibracije	16
5.2. Procjena vibracijskih parametara	20
5.3. Djelovanje vibracija na objekte	24
5.4. Seizmički utjecaj miniranja pod vodom	29
6. TEHNIČKI OPIS MINERSKIH RADOVA	31
6.1. Opći podaci o projektu	31
6.2. Tehnologija izvođenja radova na miniranju	33
6.3. Probna miniranja pojedinih utvrdica	34
6.3.1. Miniranje utvrdice S4	34
6.3.2. Miniranje utvrdica S5 i S4	38
6.3.3. Miniranje utvrdice S6	47
6.3.4. Miniranje utvrdice S7	53
7. MJERENJE SEIZMIČKIH UTJECAJA MINIRANJA TE TLAKA PODVODNOG UDARNOG VALA	60
7.1. Mjerenja prilikom miniranja utvrdice S4 18.05.2020.	60
7.2. Mjerenja prilikom miniranja utvrdice S5 i ostataka utvrdice S4 09.06.2020. ..	62
7.3. Mjerenja prilikom miniranja utvrdice S6 12.06.2020.	63
7.4. Mjerenja prilikom miniranja utvrdice S7 18.06.2020.	64

8. ANALIZA I ZAKLJUČAK.....	66
9. LITERATURA	67

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Podvodno miniranje u Sjevernoj luci Split (Dobrilović, 2019.).....	2
Slika 2-2. Bager s grabilicom za utovar odminiranog materijala (Dobrilović, 2019.).....	3
Slika 2-3. Stručni ronilac obavlja bušenje (Falch, 2018.)	4
Slika 2-4. Redosljed načela OD metode (Olofsson, 1990.).....	5
Slika 2-5. Poprečni presjek podvodnog iskopa (Ester, 1989.)	7
Slika 3-1. Maksimalni tlak u tlačnom udarnom valu u vodi na razmaku $R = r \cdot Q^{1/3}$ za slobodno obješeni eksplozivni naboj u vodi (Krsnik, 1989.).....	10
Slika 3-2. Komponente rezultatnog vala (Keeven i Hempen, 1997.).....	11
Slika 3-3. Kretanje i oscilacije plinskog mjehura (Smith, 2016.).....	12
Slika 5-1. Shematski prikaz rasprostiranja valova i titranja čestica (Šumanovac, 2007.)...	18
Slika 5-2. Dijagram za određivanje vrijednosti eksponenta n (Šumanovac, 2007.).....	23
Slika 5-3. Krivulje graničnih vrijednosti za brzine vibracija v_i kod građevina (Šumanovac, 2007).....	27
Slika 6-1. Prikaz položaja utvrđica S4, S5, S6 i S7.....	32
Slika 6-2. Situacijska karta miniranja utvrđice S4 (Buljan, 2020.).....	35
Slika 6-3. Shema povezivanja i redosljed otpucavanja minskih bušotina (Buljan, 2020.)	36
Slika 6-4. Presjek kroz minsku bušotinu B11 utvrđice S4 i konstrukcija eksplozivnog punjenja (Buljan, 2020.)	36
Slika 6-5. Situacija minskih bušotina polja 1 na utvrđici S5 (Buljan, 2020.)	40
Slika 6-6. Shema spajanja i redosljed usporavanja minskih bušotina polja 1 na utvrđici S5 (Buljan, 2020.).....	41
Slika 6-7. Situacija minskog polja 2 utvrđice S4 (Buljan, 2020.)	45
Slika 6-8. Shema povezivanja i redosljed otpucavanja minskih bušotina – utvrđica S4 (Buljan, 2020.).....	46
Slika 6-9. Presjek kroz minsku bušotinu B11 – zid 4 utvrđice S4 i konstrukcija eksplozivnog punjenja (Buljan, 2020.)	46
Slika 6-10. Situacija minskih bušotina polja 1 na utvrđici S6 (Buljan, 2020.)	49
Slika 6-11. Shema spajanja i redosljed usporavanja minskih bušotina na minskom polju 1 utvrđice S6 (Buljan, 2020.).....	50
Slika 6-12. Situacija minskih bušotina na minskom polju 1 utvrđice S7 (Buljan, 2020.)...	55
Slika 6-13. Shema spajanja i usporavanja minskih bušotina polja 1 na utvrđici S7 (Buljan, 2020.).....	56

Slika 6-14. Shema spajanja i usporavanja minskih bušotina na gredi AB (Buljan, 2020.).	57
Slika 7-1. Položaj mjesta mjerenja i raspored mjernih točaka prilikom miniranja utvrđice S4 (Buljan, 2020.).....	61
Slika 7-2. Položaj mjesta mjerenja i raspored mjernih točaka prilikom miniranja utvrđice S5 i ostataka S4 (Buljan, 2020.)	62
Slika 7-3. Položaj mjesta miniranja i raspored mjernih točaka prilikom miniranja utvrđice S6 (Buljan, 2020.).....	63
Slika 7-4. Položaj mjesta miniranja i raspored mjernih točaka prilikom miniranja utvrđice S7 (Buljan, 2020.).....	64
Slika 7-5. Karakterističan zapis mjerenja brzina oscilacija na pilotima (Dobrilović, 2020.)	65

POPIS TABLICA

Tablica 5-1. Vrijednosti graničnih linija za brzine vibracija v_i kod građevina.....	26
Tablica 5-2. Vrijednosti graničnih linija za brzine vibracije v_i kod cjevovoda	28
Tablica 6-1. Volumeni utvrđica za razgradnju	31
Tablica 6-2. Parametri bušenja na utvrđici S4.....	34
Tablica 6-3. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – zid 1 utvrđice S4	37
Tablica 6-4. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – zid 2 utvrđice S4	37
Tablica 6-5. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – zid 3 utvrđice S4	38
Tablica 6-6. Parametri bušenja utvrđice S5 na minskom polju 1	39
Tablica 6-7. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 utvrđice S5 – istočni zid od Cresa...	42
Tablica 6-8. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 utvrđice S5 – zapadni zid do Omišlja	42
Tablica 6-9. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 utvrđice S5 – južni zid.....	43
Tablica 6-10. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 utvrđice S5 – srednji zid	43
Tablica 6-11. Parametri bušenja utvrđice S4 na minskom polju 2.....	44
Tablica 6-12. Utrošak eksploziva na minskom polju utvrđice S4 na zidovima	47
Tablica 6-13. Parametri bušenja utvrđice S6 na minskom polju 1	48
Tablica 6-14. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – istočni zid utvrđice prema Cresu	51
Tablica 6-15. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – zapadni zid utvrđice prema Omišlju	51
Tablica 6-16. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – poprečni južni zid utvrđice	52
Tablica 6-17. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – poprečni srednji zid utvrđice	52
Tablica 6-18. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – poprečni obalni zid utvrđice	52
Tablica 6-19. Utrošak eksploziva na minskom polju 2 – A.B. greda.....	53
Tablica 6-20. Parametri bušenja utvrđice S7 na minskom polju 1	54
Tablica 6-21. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – istočni zid utvrđice S7	57
Tablica 6-22. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – zapadni zid utvrđice S7.....	58
Tablica 6-23. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 - južni poprečni zid utvrđice S7....	58
Tablica 6-24. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – poprečni srednji zid utvrđice S7	58
Tablica 6-25. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – poprečni obalni zid utvrđice S7.	59
Tablica 7-1. Rezultati mjerenja prilikom miniranja utvrđice S4.....	61
Tablica 7-2. Rezultati mjerenja prilikom miniranja utvrđice S5 i ostataka utvrđice S4	63
Tablica 7-3. Rezultati mjerenja prilikom miniranja utvrđice S6.....	64

Tablica 7-4. Rezultati mjerenja prilikom miniranja utvrdice S7 65

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
L	m	duljina
ρ	kg/m ³	gustoća
W	m	linija najmanjeg otpora
A	m ²	površina
a	m	razmak između minskih bušotina
v	m/s	brzina
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
Q_b	kg	masa punjenja po minskoj bušotini
V	m ³	volumen odloma
H	m	visina etaže
H_v	m	visina stupca vode iznad projektirane razine
H_n	m	visina nanosnog pokrivača
H_s	m	visina etaže u čvrstoj stijeni
T	°C	temperatura
P_{max}	bar	maksimalni tlak u tlačnom udarnom valu
γ_e	kg/m ³	gustoća eksploziva
λ	m	valna duljina
c	m/s	brzina rasprostiranja širenja vala
f	Hz	frekvencija vala
U	mm	maksimalni pomak
t	s	vrijeme
a	mm/s ⁻²	akcelereacija čestice
v_{pvs}	mm/s	rezultantna brzina oscilacije
L	m	masa eksploziva po stupnju paljenja
R	m	udaljenost od mjesta miniranja
F	N	sila
n	-	eksponent mase eksplozivnog punjenja
a	-	koeficijent slabljenja

A	cm	amplituda (vršna vrijednost)
k		konstanta
R	m	udaljenost mjesta opažanja od minskog polja
ρ	$\text{kg}^{1/3}/\text{m}$	svedena masa eksplozivnog punjenja
k	-	koeficijent
b	-	koeficijent
m	-	koeficijent

1. UVOD

Prilikom radova na objektima prihvatnog terminala za ukapljeni naftni plin na otoku Krku potrebno je ukloniti elemente starog pristana, odnosno četiri podvodne utvrdice. Utvrdice su izgrađene iz vijenca koji se sastoji od pilota i betonske ispune. Između vijenca nalazi se kamena ispuna. Budući da radovi mehaničkog uklanjanja hidrauličkim bagerima s čekićem nisu imali dovoljan učinak, bilo je potrebno primijeniti tehniku bušenja i miniranja. Poseban problem za izvođenje radova na rušenju utvrdica miniranjem predstavljala je potreba zaštite već izgrađenih pilota novih utvrdica pristana za koje je projektant dao ograničenja djelujuće horizontalne sile na pilote obzirom na dinamičke vibracije pilota koje nastaju miniranjem starih utvrdica u neposrednoj blizini. U tu svrhu proveden je program opsežnih mjerenja utjecaja miniranja na okolinu, u vidu praćenja djelovanja tlačnog udarnog vala u vodi te mjerenja nastalih brzina oscilacija na pilotima. U radu su opisana, kako projektna rješenja parametara opreznih miniranja, tako i program mjerenja u svrhu zaštite okoline te analiza dobivenih rezultata mjerenja.

2. PODVODNA MINIRANJA

Miniranje je suvremeni postupak za razaranje i drobljenje stijena, materijala i objekata energijom eksploziva. Djelovanje detoniranog eksplozivnog naboja u minskoj bušotini uzrokuje naprezanja koja dovode do frakturiranja i drobljenja stijene. S povećanjem udaljenosti od otpucane minske bušotine mijenja se oštećenost stijenske mase. (Krsnik, 1989.)

Podvodno miniranje se ubraja u metode specijalnih miniranja, jer se bušačko-minerski radovi izvode u posebnim uvjetima ispod površine vode. Podvodno miniranje je proces koji zahtijeva veću pažnju i temeljitije planiranje od sličnih procesa koji se obavljaju iznad površine vode. Bušenje i punjenje minskih bušotina postaju kompliciraniji te je potrebno uzeti u obzir određene čimbenike da bi ti procesi bili izvedeni na ispravan način. Prema Olofssonu (1990.) čimbenici koje je potrebno uzeti u obzir su:

- Posebne metode rada i oprema za bušenje
- Različite metode punjenja minskih bušotina
- Korištenje eksploziva s dobrim podvodnim svojstvima
- Korištenje sigurnog i pouzdanog sustava za iniciranje
- Kontroliranje udarnog vala korištenjem prikladnih uređaja

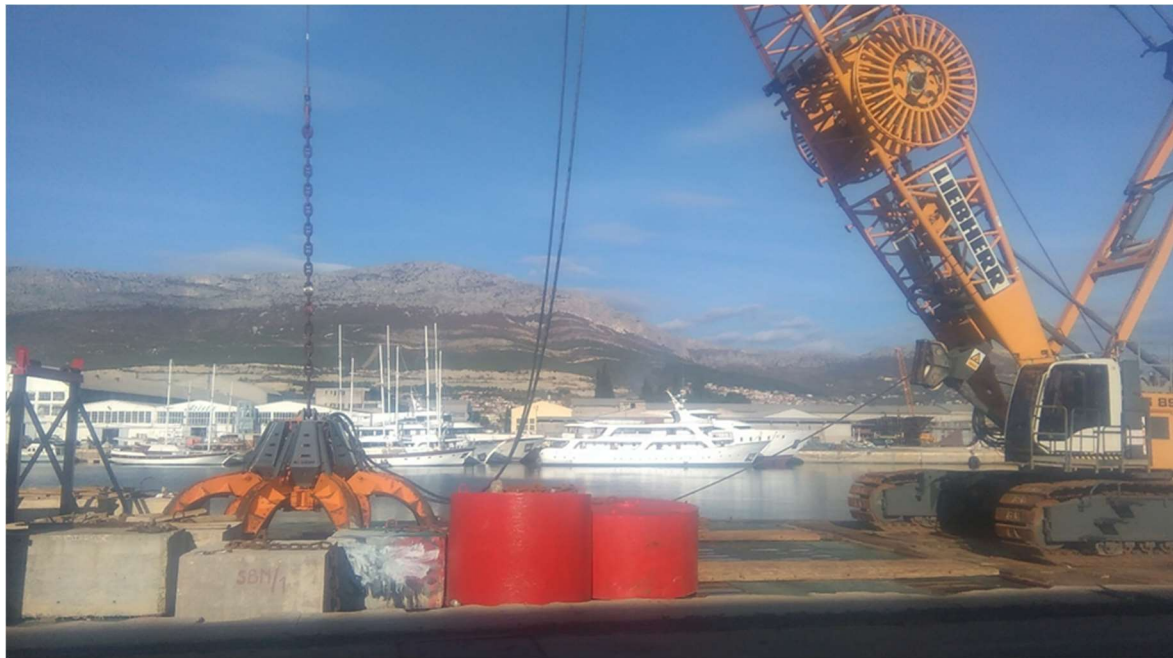
Na slici 2-1. prikazana je snimka djelovanja podmorskog miniranja na površinu.



Slika 2-1. Podvodno miniranje u Sjevernoj luci Split (Dobrilović, 2019.)

Za utovar odminirane stijenske mase najpogodniji su bageri grabilice čiji kapacitet jako ovisi o njevoj granulaciji (Slika 2-2.). Troškovi bušačko-minerskih radova direktno ovisе o

broju i promjeru minskih bušotina. Prema tome, planirani odlom i granulaciju minirane mase treba postići sa što manjim brojem minskih bušotina da bi cijeli proces bio ekonomski isplativ. Iz tog se razloga pristupa proračunu parametara podvodnog miniranja. (Krsnik,1989.)



Slika 2-2. Bager s grabilicom za utovar odminiranog materijala (Dobrilović, 2019.)

2.1. Metode podvodnog miniranja

Podvodno miniranje može se izvesti na više različitih načina, ovisno o uvjetima koji prevladavaju na terenu. U plitkoj vodi minske bušotine mogu bušiti stručni ronionci s pneumatskim bušačim čekićima manjeg promjera, dok je na većim dubinama i kod pojave velikih valova bušenje otežano, te se izvodi sa usidrenih plovećih platformi maona koje mogu biti različitih izvedbi. (Krsnik, 1989.)

2.1.1. Podvodno miniranje koje obavljaju ronionci

Podvodno miniranje koje obavljaju stručni ronionci (slika 2-3.) najprikladnije je za ograničene uvjete ili tamo gdje su postavljeni veliki zahtjevi u pogledu praćenja teorijske konačne konture stijene. Bušenje se obično izvodi sa splavi pomoću ručnih (ograničene dubine vode ili stijene) ili fiksnih bušilica. S obzirom da je vidno polje pod vodom u većini slučajeva jako slabo, ronioncima su potrebna pomagala da se orijentiraju (Gustaffson, 1982.). Orijentiraju se pomoću nategnutih čeličnih užeta po liniji rasporeda minskih bušotina, a rad ronilaca također se olakšava primjenom jednostavnih shema višerednog miniranja s kvadratnom mrežom minskih bušotina te također kontroliraju pravilnost rasporeda minskih bušotina i točnost bušenja. Ukoliko je podvodni teren pokriven slojem mulja pijeska ili gline, izbušene minske

bušotine potrebno je zaštititi plastičnim cijevima čiji krajevi vire iznad ušća minske bušotine 0,3-0,5 m te ih pritom štite od zamuljavanja i olakšavaju njihovo punjenje (Krsnik, 1989.).



Slika 2-3. Stručni ronilac obavlja bušenje (Falch, 2018.)

2.1.2. Podvodno miniranje sa usidrenih platformi

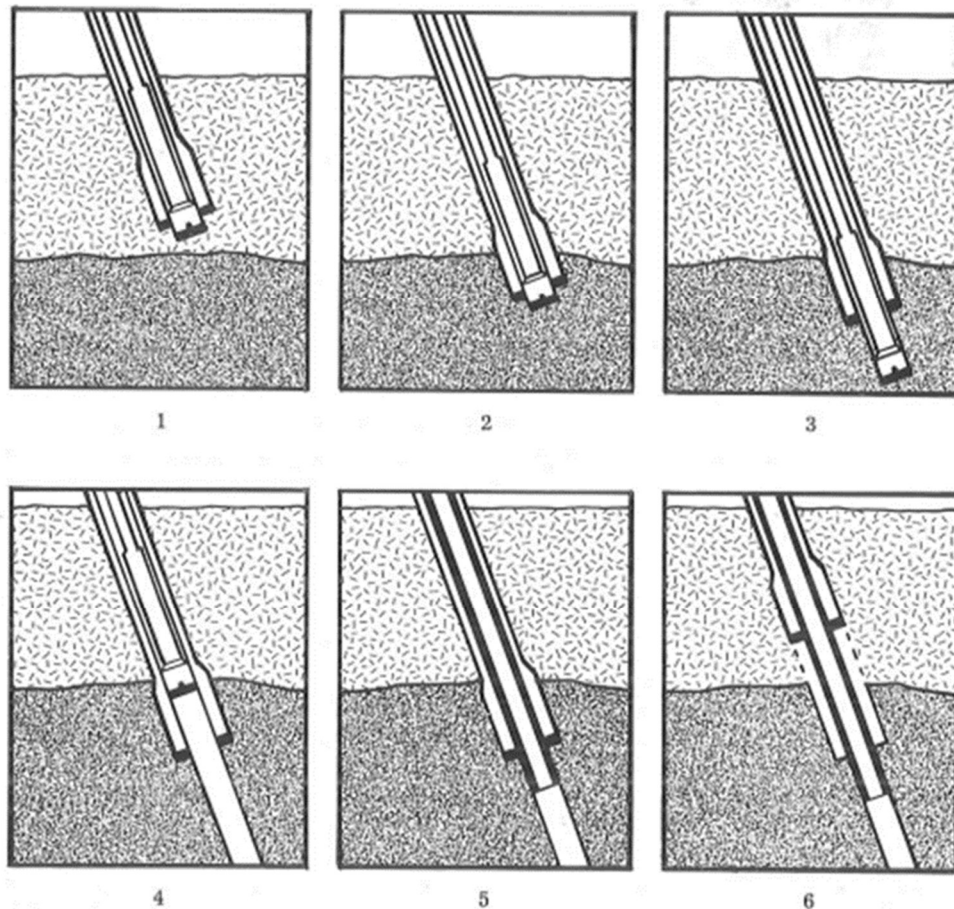
Za bušenje i miniranje stijena ovom metodom potrebna je posebna oprema. Obično se plutajuća platforma poduprijeta iznad vode s nogama koje se po potrebi mogu produžiti do dna, koristi za procese bušenja i miniranja. Platforma je najčešće opremljena s nekoliko udarnih ili rotacijskih strojeva koje se mogu pomicati na tračnicama u sva četiri smjera radi veće fleksibilnosti. (Olofsson, 1990.)

Tamo gdje sipke naslage prekrivaju stijensku masu koriste se sljedeće metode:

- OD metoda (eng. „*Overburden drilling*” - bušenje otkrivke)
- bušenje Kelly šipkom (eng. „*Kelly bar method*”)
- punjenje kroz bušaću šipku

Kod tzv. OD metode bušenje se izvodi pomoću specijalizirane opreme, gdje promjer bušotine može varirati između 51 i 102 mm, no ponekad se buše i bušotine većeg promjera. Za bušenje kroz nanos koriste se vanjska i unutarnja bušaća šipka zajedno. Nakon ulaska u čvrstu stijenu buši se s unutarnjom šipkom manjeg promjera. Nakon završetka bušenja, kroz vanjsku cijev se izvlači unutarnja šipka te se dio u nanosu zacjevljuje plastičnim cijevima a na kraju se izvlači vanjska šipka. Punjenje se uglavnom vrši pomoću pneumatskih punjača patrona, čime

se postiže dobro nabijanje eksploziva. Svaka bušotina sadrži najmanje dva detonatora koji su povezani u različite serije kako bi se osigurala maksimalna pouzdanost iniciranja. (Olofsson 1990.)



Slika 2-4. Redosljed načela OD metode (Olofsson, 1990.)

Na slici 2-4. je prikazan redosljed načela za OD metodu bušenja i miniranja gdje je:

- 1) Cijev za predbušenje (vanjska) i unutarnja šipka prodiru kroz sloj nanosa
- 2) Cijev za predbušenje prodire nekoliko decimetara u stijenu
- 3) Probušena bušotina s unutarnjom šipkom
- 4) Produženi spoj povučen prema gore
- 5) Zacjevljivanje
- 6) Cijev za predbušenje (vanjska) je izvučena i punjenje se može obaviti kroz plastičnu cijev

Ova metoda se još zove i Lindö metoda, jer je nastala na radovima miniranja na kanalu Lindö u blizini Norrköpinga u Švedskoj 1960-ih godina. Na mjestu gdje je kanal trebao biti izgrađen nije bilo samo kamenja nego i debelog sloja gline. Umjesto da se buldozerom

otkopavala glina i tako došlo do stijenske mase, bušenje je izvršeno kroz glinu i stijenu uz pomoć već spomenute posebno dizajnirane opreme. (Gustafsson 1982.)

Kod „Kelly bar“ metode, u dijelu gdje jalovina prekriva stijenu, čelična cijev s utezima prvo se spušta s platforme. Promjer cijevi je nešto veći od promjera svrdla i služi kao vodič pri bušenju. Kako bušenje napreduje, cijev tone kroz jalovinu na površinu same stijene i zatim djeluje kao crijevo za punjenje rupe kada je bušenje dovršeno. (Olofsson, 1990.)

Metoda punjenja kroz bušaću šipku je dosta slična „Kelly bar“ metodi, gdje se potporna noga spušta s platforme na jalovinu, koja služi kao vodič pri bušenju. Kada je bušenje završeno, svrdlo se zamjenjuje prstenastim nastavkom i spušta u rupu, a punjenje bušotine se zatim vrši kroz bušaću šipku. Kako se proces punjenja odvija, tako se bušaća šipka podiže. (Olofsson, 1990.)

2.2. Proračun parametara podvodnog miniranja

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

Prema Krsniku (1989.) linija najmanjeg otpora, odnosno razmak minskih bušotina računa se iz odnosa:

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

te je:

$$S_b = a \cdot W = \frac{Q_m}{q} \quad (2-2)$$

gdje su: S_b – površina odloma po minskoj bušotini (m^2),

q – specifična potrošnja eksploziva za podvodna miniranja (kg/m^3)

Q_m – koncentracija eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini (kg/m)

$$Q_m = \frac{d_2 \cdot \pi}{4} \cdot \gamma_e \quad (2-3)$$

Gdje je: γ_e - 1500 kg/m^3 - gustoća, primjerice želatinoznih eksploziva

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

$$Q_b = q \cdot V \quad (2-4)$$

$$V = a \cdot W \cdot H \quad (2-5)$$

Gdje su: Q_b – masa punjenja po minskoj bušotini (kg)

V – volumen odloma minske bušotine (m^3)

H – visina etaže (m)

Specifična potrošnja eksploziva za podvodna miniranja računa se po formulama Gustafssona:

Za vertikalne minske bušotine :

$$q_v = 1,0 + 0,01H_v + 0,02H_n + 0,03H_s \left(\frac{kg}{m^3}\right) \quad (2-6)$$

Za nagnute minske bušotine:

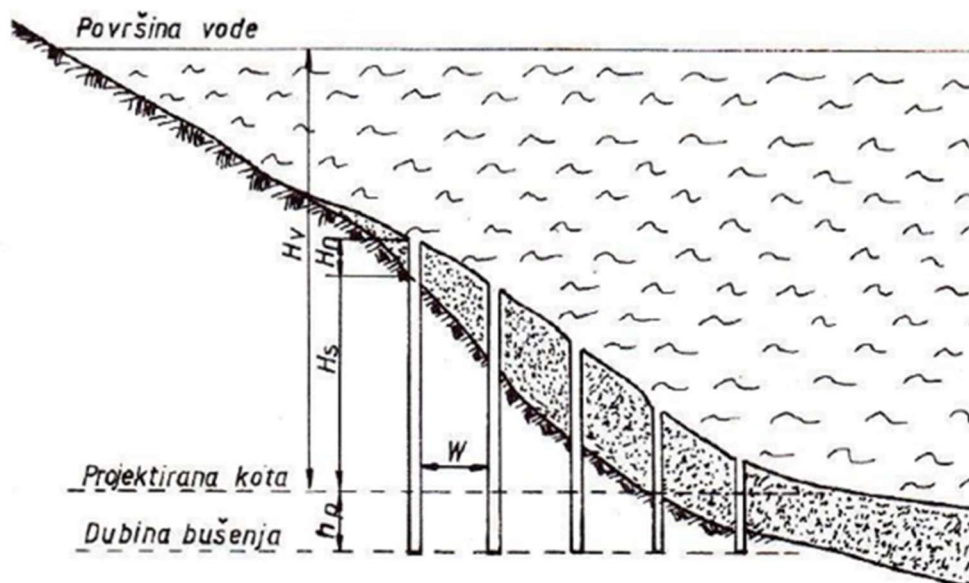
$$q_k = 0,9 + 0,01H_v + 0,02H_n + 0,03H_s \left(\frac{kg}{m^3}\right) \quad (2-7)$$

Gdje su: H_v – visina stupca vode iznad projektirane razine (m)

H_n – visina nanosnog pokrivača (m)

H_s – visina etaže u čvrstoj stijeni (m)

Pojedine visine se utvrđuju na osnovi poprečnog presjeka podvodnog iskopa koji je prikazan na slici 2-5.



Slika 2-5. Poprečni presjek podvodnog iskopa (Ester, 1989.)

2.3. Eksplozivna sredstva za podvodno miniranje

U izrađene bušotine na morskom dnu eksploziv postavljaju ronionci koji su posebno obučeni za rad s eksplozivnim sredstvima (Glasović, 2014.). Uspješnost podvodnog miniranja u velikoj

mjeri ovisi o kvaliteti i vodootpornosti eksplozivnih sredstava. Za miniranje pod vodom koriste se eksplozivi koji kroz određeno vrijeme stajanja u vodi (1-3 tjedna) ne gube svoja eksplozivna svojstva. Osim toga, ti eksplozivi ne smiju biti jako osjetljivi radi prijenosa detonacije od jednog eksplozivnog naboja na drugi. Navedena tražena svojstva posjeduju plastični odnosno želatinozni i vodoplastični eksplozivi.

U kemijskom sastavu plastičnih eksploziva je želatinozna smjesa nitroglicerina dinitriglikolom s nitrocelulozom. Pored toga, plastični 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 upotrebljavaju se u vlažnim manskim bušotinama i za podvodna miniranja (Ester, 2005.).

Vodoplastični eksplozivi, u svijetu poznati pod nazivom „slurry” eksplozivi, su rudarski eksplozivi čije su osnovne komponente u sastavu amonijski nitrat i nitroceluloza 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 odnosi na druge eksplozive manje osjetljiviji na udar i trenje, te je rad s njima sigurniji. Osim toga nisu osjetljivi na vlagu i vodu, a mogu se upotrebljavati i na temperaturama do -20°C . Eksploziv se može napuniti u bušotinu pomoću pneumatskih uređaja, što rezultira vrlo dobrom koncentracijom punjenja. (Krsnik, 1989.).

3. PODVODNI UDARNI VAL

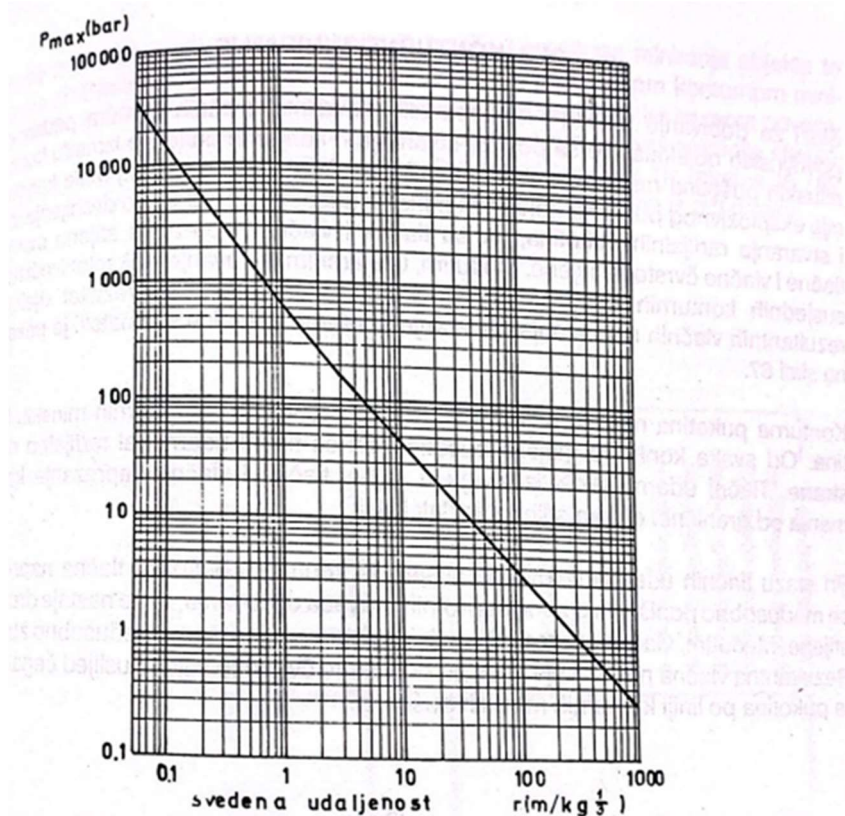
Pod samim pojmom detonacije podrazumijevamo vrlo brzu kemijsku reakciju kod koje eksplozivna materija prelazi iz čvrstog agregatnog stanja u plinovito, pri čemu se oslobađa potencijalna energija eksploziva koja se najvećim dijelom koristi za razaranje stijene, a manjim dijelom se pretvara u kinetičku energiju seizmičkih i zvučnih valova koji se radijalno šire na sve strane. (Krsnik, 1989.)

Radi se o egzotermnoj kemijskoj reakciji pri kojoj se oslobađa topline i plinovi, te zbog velike brzine reakcije i visoke temperature u ograničenom mitskom prostoru, dolazi do naglog povećanja tlaka plinova. Zbog toga na stjenkama mitskog prostora nastaje tlačni udarni val koji izaziva u stijeni vlačna i tlačna naprezanja i na taj način dolazi do elastičnih i trajnih deformacija.

Utjecaj eksplozije na plovne objekte i faunu uglavnom proučavan u obliku otvorenih eksplozivnih naboja u vodi. Iako 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. Tlačni udarni val u vodi

Kao što sam već spomenuo u uvodu poglavlja, tlačni udarni val nastaje prilikom podvodnih miniranja i on sam kao takav predstavlja veliku opasnost za plovne i druge objekte u blizini mjesta miniranja, a za faunu može biti i smrtonosan. Početni visoki tlak u tlačnom udarnom valu naglo se smanjuje s povećanjem udaljenosti. Međusobna veza maksimalnog tlaka u tlačnom udarnom valu (p_{max}) i svedene udaljenosti (r) za sferični eksplozivni naboj slobodno obješen u vodi prikazano je na slici 3-1. Na osnovi dozvoljenih vrijednosti tlaka računaju se radijusi ugrožene zone za ljude i objekte u vodi. (Krsnik, 1989.)



Slika 3-1. Maksimalni tlak u tlačnom udarnom valu u vodi na razmaku $R = r \cdot Q^{1/3}$ za slobodno obješeni eksplozivni naboj u vodi (Krsnik, 1989.)

Pouzdanost iniciranja u vodi važna je za uspješnost miniranja. Za iniciranje se mogu koristiti detonirajući štapini s izoliranim krajevima, električni detonatori koji mogu izdržati hidrostatički tlak te neelektrični detonatori i konektori. Mogu se koristiti i dva detonatora po bušotini što povećava pouzdanost.

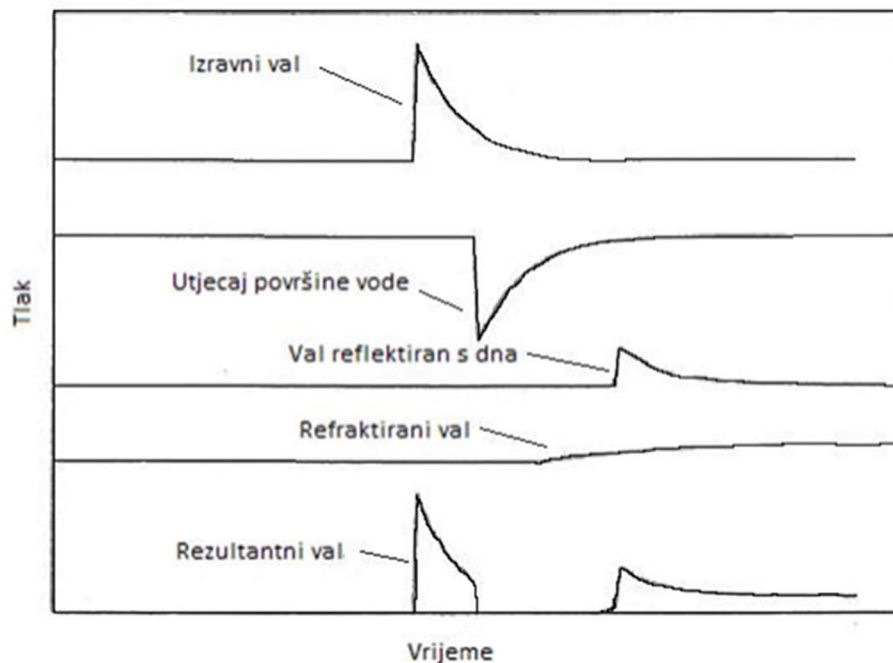
Uslijed detonacije gotovo trenutno se povećava tlak na vrlo visoku vrijednost, gdje se plin vrlo velike gustoće počinje širiti a sami tlak mu pada. Prirast tlaka je veoma brz, nakon čega eksponencijalno pada. Ovako iniciran poremećaj se prenosi na okolnu vodu i širi radijalno u obliku tlačnog udarnog vala, koji je proporcionalan masi naboja a obrnuto proporcionalan udaljenosti od mjesta detonacije (Cole, 1948.). Prirast tlaka u udarnoj fronti mjeri se u mikro sekundama (μs), a prolazak vala konačne amplitude uključuje rasipanje topline kondukcijom, i unutarnjim trenjem odnosno viskoznošću. Obje su pojave najizraženije su u neposrednoj blizini naboja i utječu na brzo smanjenje tlaka udarnog vala. Utrošena energija koja je 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 (2000 bar) (Cole, 1948.).

Snižanjem tlaka u tlačnom udarnom valu u vodi smanjuje se njegovo štetno djelovanje na okružujuću sredinu. To se može ostvariti:

- Smanjenjem eksplozivnog naboja u minskoj bušotini
- Začepljivanjem minske bušotine pijeskom
- Milisekundnim otpucavanjem minskih bušotina
- Zračnom zavjesom oko minskog polja

Zračna zavjesa se stvara pomoću komprimiranog zraka koji se cjevovodom dovodi do probušenih plastičnih ili željeznih cijevi koje su učvršćene na dnu oko podvodnog minskog polja. Komprimirani zrak izlazi kroz otvore tih cijevi i u obliku zračnih mjehurića se diže prema površini vode. Zračni mjehurići stvaraju zračnu zavjesu oko minskog polja koja smanjuje maksimalni tlak u vodenom udarnom valu. (Krsnik, 1989.)

Na rezultatni iznos tlačnog udarnog vala mogu, osim izavnog, utjecati i odbijeni (reflektirani), te refraktirani val (Slika 3-2.). Refleksija vala s granice voda-zrak je negativnog karaktera, te val kasni u odnosu na izravni val, zbog udaljenosti koju je prošao. Refleksija s morskog dna pozitivna je, odnosno istog karaktera kao izravni val. Osim refleksije, dno refraktira dio energije te je na određenoj kritičnoj udaljenosti vraća vodi. Iz toga razloga, rezultatna krivulja tlak/vrijeme može izgledati složeno ovisno o blizini slobodnih ili krutih površina (Keevin i Hепен 1997.).

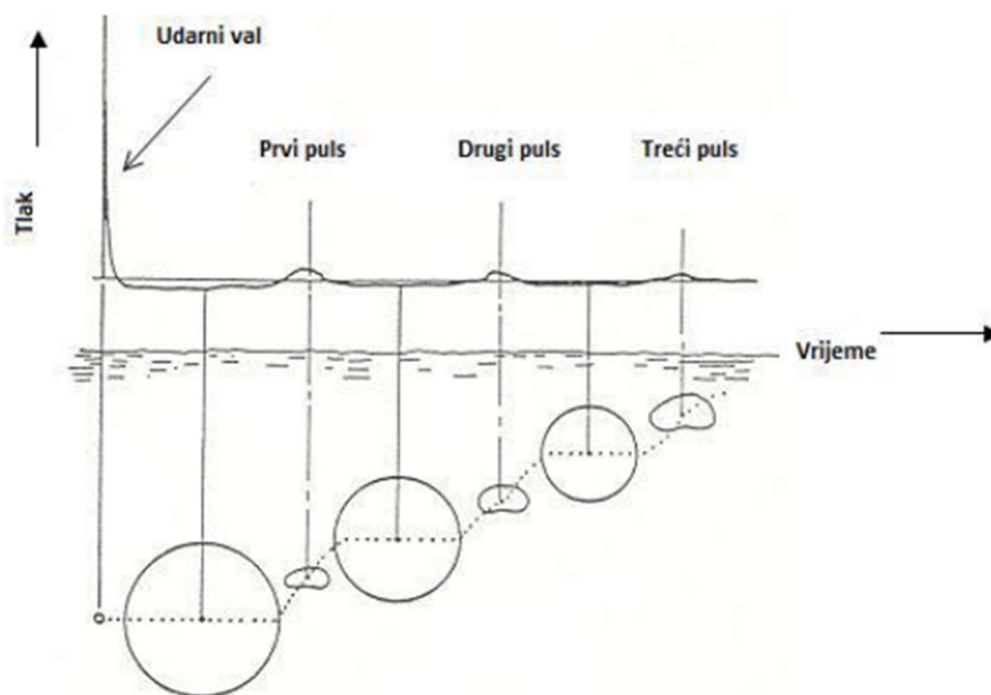


Slika 3-2. Komponente rezultatnog vala (Keeven i Hепен, 1997.)

3.2. Mjehur plinova

Nakon prolaska primarnog udarnog vala tlak je znatno smanjen ali i dalje je veći od hidrostatičkog. Dolazi do stvaranja sfere, odnosno mjehura plinova kojem se radijus vrlo brzo povećava. Kako napreduje ekspanzija, tlak u mjehuru pada no kretanje se nastavlja uslijed inercije vode koja 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 do stlačivosti plinske smjese, koja uzrokuje ponovo širenje, dakle promatra se oscilirajući sustav. U pojedinim slučajevima opažen je broj od čak desetak oscilacija, a svaka oscilacija zbog gubitka energije, manje je od prethodne (Žepačkić, 2014.).

Na kretanje mjehura plinova, koje je prikazano na slici 3-3. utječu uzgon i blizina slobodnih ili krutih površina. Mjehur će 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. Maksimalni tlak prvog pulsa mjehura iznosi tek 10-20% tlaka udarnog vala, no samo trajanje je mnogo dulje, pa površina ispod krivulja tlak/vrijeme (impuls) može imati slične vrijednosti (Cole, 1948).



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

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 svakog miniranja najveći dio oslobođene energije eksplozivnog punjenja potroši se na razaranje i drobljenje stijene. Međutim, manji ali ipak primjetni dio te energije se pretvara u kinetičku energiju seizmičkih i zračnih valova koji se od mjesta miniranja šire radijalno. Jedan dio te energije se potroši za odbacivanje komada minirane mase na određenu udaljenost od mjesta miniranja. Navedene pojave su nepoželjne kada se minira u blizini stambenih zgrada ili drugih građevinskih objekata jer mogu izazvati oštećenja na njima (Krsnik, 1989.).

Djelovanje seizmičkih i zračnih udarnih valova najčešće se procjenjuje, jer čovjek može osjetiti i takve oscilacije koje ne predstavljaju opasnost za konstrukcije građevinskih objekata. Ponekad se štete na građevinskim objektima pripisuju djelovanju miniranja iako su nastale uslijed drugih drugih uzoraka kao što su:

- Slijeganje terena
- Nejednaka nosivost temeljnog tla,
- Vlačna naprezanja koja nastaju uslijed nejednolikog opterećenja, različitih vrsta materijala, temperaturnih razlika i dr.

Za utvrđivanje pravih uzroka oštećenja građevinskih objekata treba ih komisijski detaljno pregledati i snimiti prije i poslije miniranja. U blizini građevinskih objekata treba primjenjivati tzv. oprezna miniranja kojima se ostvaruje projektirani odlom stijene uz potpunu sigurnost ugroženih objekata. Međutim, ako nema opasnosti za ljude, može biti ekonomski opravdano izazvati manja oštećenja koja se mogu sanirati uz manje troškove nego što bi bili povećani troškovi opreznog miniranja (Krsnik, 1989.).

Što se tiče podvodnih miniranja, kod njih je specifično da se udarni val kao što sam već ranije spomenuo, širi kroz vodu. Nakon prvog udara slijedi širenje plinskog mjehura koji može imati štetne posljedice na životinje u moru, ali i na ronioce i kupače koji se zateknu na području utjecaja navedenih pojava (Žepačkić, 2014.).

4.1. Utjecaj na životinje

Tlačni udar koji stvara podvodna eksplozija može imati smrtonosne posljedice na ribu, riblja jajašca i morske sisavce. Utvrđeno je da su ribe posebno osjetljive na učinke podvodnih eksplozija za razliku od drugih organizama (Lewis, 1996.). Najosjetljivi organ kod riba na tlačni udar je plivaći mjehur, koji joj omogućuje održavanje neutralnog uzgona. Visoki tlak udarnog vala uzrokuje puknuće plivaćeg mjehura i krvarenje opna inkubirajućih ribljih jaja.

Ribe koje nemaju plivaći mjehur nisu osjetljive na udarni val. Raznim istraživanjima je dokazano da manje ribe mogu pretrpjeti puno veće tlakove od većih (Župan, 2012.).

Prag smrtonosnog tlaka udarnog vala za ribu varira od 276 do 483 kPa, za eksploziv visoke brzine detonacije. Eksplozije crnog baruta, puno manje brzine detonacije, proizvode tlakove od 855 do 1103 kPa ne uzrokujući pritom pomor ribe u kavezu. To je dovelo do zaključka da smrtnost životinja direktno ovisi o brzini detonacije korištenog eksploziva, a dokazano je da za današnje komercijalne eksplozive brzina detonacije varira od 1650 do 7650 m/s (Keevin i Hempen, 1997.).

Dobar način da se spriječi broj uginulih riba jesu taktike za zastrašivanje, koje se obično koriste prije miniranja. Danas se upotrebljavaju tehnike za zastrašivanje u kojima se koristi eksploziv kao i one u kojima se ne koristi. Neeksplozivne tehnike zastrašivanja pokazale su se učinkovitijima od eksplozivnih. Eksplozivne tehnike koriste detonacije malog naboja i sama detonacija se ne vrši duže od jedne minute prije upotrebe eksploziva. Ovaj način daje životinjama na neki način priliku da se „spase“, odnosno napuste zonu miniranja prije glavne detonacije. Naravno, daleko su prihvaćenije metode koje ne koriste eksploziv, a one proizvode kontinuiranu buku pomoću naprava stavljenih u vodu, čime se osigurava da se životinje ne vrate u to područje prije eksplozije (Župan, 2012.).

4.2. 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 (teške tjelesne ozljede, smrt)
- Sekundarne ili fizičke ozljede koje ne ugrožavaju život (lakše tjelesne ozljede 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 samo ako je preblizu. Posljedice se smanjuju sa porastom udaljenosti od izvora eksplozije ako je udaljenost dovoljna velika pojaviti će se samo sekundarne posljedice. Naravno, na još većim udaljenostima neće biti fizičkih ozljeda direktno povezanih sa tlačnim udarnim valom, ali se mogu povezati tercijarne ozljede povezane uz ponašanje (Gvozden, 2018.).

5. SEIZMIČKI UTJECAJ MINIRANJA

Miniranje, kako je već spomenuto, predstavlja još uvijek jednu od najčešće primjenjivanih i najekonomičnijih metoda pridobivanja čvrstih mineralnih sirovina, odnosno iskopa čvrstih stijenskih masa. Usprkos velikoj zastupljenosti i prednostima koje pruža, miniranje ima i nekoliko nedostataka. Naime, miniranjem se u kratkom vremenu oslobađa velika količina energije (ovisno o punjenju minske bušotine tj. intervalu iniciranja) koja se, kako se smatra, većim dijelom iskoristi za razaranje i drobljenje stijenske mase, a manjim na negativno ili moguće štetno djelovanje. Osim negativnog djelovanja u vidu nekontroliranog odbacivanja odminiranog materijala, kao štetno djelovanje najznačajnije je stvaranje seizmičkih potresnih valova, zračnog udarnog vala te nastanak određene količine štetnih plinova te prašine. Iako su takva djelovanja prilikom miniranja neminovna, njihov se utjecaj mora ograničiti, odnosno svesti na najmanje mogući kako zbog utjecaja na okolinu tako i zbog utjecaja na ljude i objekte.

Razvojem tehnologije miniranja neminovno se javila potreba i za razvojem metoda mjerenja učinaka, djelovanja i utjecaja miniranja prilikom iskopa stijenske mase kako kod rudarskih tako i geotehničkih inženjerskih zahvata. U tom smislu provedena su različita istraživanja na temelju kojih su donesene određene smjernice, preporuke i propisi s ciljem praćenja i kontroliranja štetnog djelovanja, odnosno nesmetanog odvijanja rudarskih i geotehničkih radova bez većih štetnih posljedica na čovjeka i njegovu okolinu. Od njih su najpoznatije opće prihvaćene smjernice Međunarodnog društva za mehaniku stijena (International Society for Rock Mechanics, ISRM) koje su dane u obliku preporučene metode (Suggested Method, SM) za praćenje vibracija nastalih miniranjima (ISRM, 1992.) te prihvaćene serije hrvatskih normi HRN DIN 4150, koje zapravo predstavljaju preuzetu seriju njemačkih normi DIN 4150 (HZN, 2011). Tu seriju normi čine: HRN DIN 4150-1 Vibracije u građevinama – 1. dio: Procjena vibracijskih parametara; HRN DIN 4150-2 Vibracije u građevinama – 2. dio: Djelovanje na ljude u građevinama i HRN DIN 4150-3 Vibracije u građevinama – 3. dio: Djelovanje na konstrukcije. U upotrebi su i druge nacionalne norme u pojedinim državama Europe dok Amerika i Kanada te primjerice Indija, Rusija i Kina primjenjuju vlastite norme.

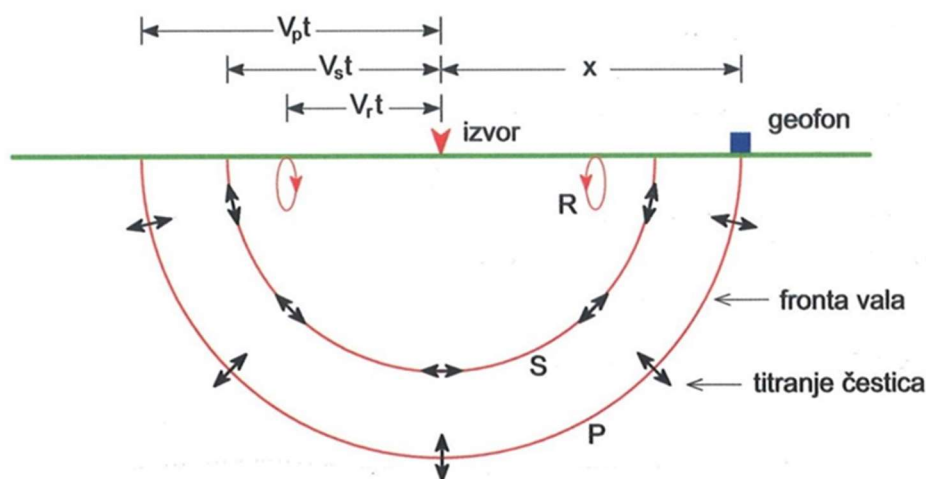
S obzirom na seizmički utjecaj, smjernice i norme najčešće u razmatranje uzimaju dvije veličine potresnog vala: brzinu vibracija (oscilacija) materijalnih točaka i njihovu frekvenciju, odnosno frekvenciju vala te treću veličinu koja se odnosi na vrstu građevine. Pri tome je usvojeno što su frekvencije niže da su i dozvoljene brzine oscilacija niže i obrnuto što proizlazi iz ukupnog pomaka čestice odnosno uzrokovanog naprezanja i deformacije. (Hrženjak, 2018.)

5.1. Vibracije

U pojednostavljenom načinu prikazivanja, pomaci točaka stijene, na mjestu mjerenja koji nastaju uslijed vibracija (oscilacija) izazvanih miniranjem, mogu se opisati s tri međusobno okomite komponente: longitudinalna (L), transverzalna (T) i vertikalna (V) komponenta pomaka. Longitudinalna i transverzalna komponenta nalaze se u horizontalnoj ravnini u kojoj kod longitudinalne komponente čestice titraju u smjeru napredovanja ili propagiranja vala, dok kod transverzalne komponente čestice titraju okomito na smjer napredovanja vala (ISRM, 1992). Kod vertikalne komponente čestice titraju u vertikalnoj ravnini okomito na smjer napredovanja vala. Razlog ovakvog pojednostavljenja leži u činjenici da postoje velike varijacije vršnih pomaka svake komponente, što za posljedicu ima teškoću u određivanju najutjecajnije komponente u pojedinom slučaju. Horizontalni pomaci određuju horizontalnu pobudu zidova i nadgađa u zgradama dok vertikalna komponenta određuje vertikalnu pobudu podova. Vršna vrijednost ukupnog pomaka, a na taj način i deformacije materijala u određenoj točki, predstavlja maksimalan sumarni vektor od ove tri komponente koji se najčešće pojavljuje kada i je vršna vrijednost jedne komponente najveća od njih tri unutar događaja. Taj maksimalan sumarni vektor ne predstavlja pseudo-maksimalni sumarni vektor koji bi se dobio jednostavnim zbrajanjem maksimalnih vrijednosti svake komponente koje su se zapravo dogodile u različitim trenucima vibracije. Pseudo-maksimalni sumarni vektor može biti i do 40% veće vrijednosti od vrijednosti pravog maksimalnog sumarnog vektora, koji je uobičajeno 5-10% veći od najveće vršne vrijednosti pojedinačne komponente (ISRM, 1992).

Miniranje, promatra li se kao kratak impuls relativno velike energije prenesene na okolinu, predstavlja jednostavan, gotovo idealan izvor valova, prilikom kojeg se formiraju dva glavna tipa valova: prostorni (engl. body waves) i površinski (engl. surface wave) valovi. Prostorni valovi se pojavljuju kao: primarni (P) ili longitudinalni val, kod kojeg čestice titraju u smjeru rasprostiranja vala, što uzrokuje promjenu volumena u materijalu (stezanje i rastezanje) i sekundarni (S) ili transverzalni val, kod kojeg čestice titraju okomito na smjer rasprostiranja vala te dolazi do promjene oblika (smicanje), a ne volumena. Površinski ili Rayleighijev val (R) predstavlja zapravo kombinaciju longitudinalnih i transverzalnih valova, prilikom čega čestice kod titranja izvode gibanja po elipsi kod koje je velika os okomita na površinu i smjer rasprostiranja, a mala os u smjeru rasprostiranja tog vala. Shematski prikaz rasprostiranja valova i titranja čestica prikazana je na slici 5-1. Iako je ovakav princip propagiranja valova vrlo jednostavan, rezultat njihovog rasprostiranja kroz stijensku masu Zemlje može biti izuzetno složen do gotovo neodrediv zbog više karakterističnih činjenica. U prvom redu to se odnosi na činjenicu da su brzine rasprostiranja ovih valova vrlo različite, a onda da se radi i o nehomogenim sredinama s obzirom na različite vrijednosti gustoća materijala, koje za

posljedicu imaju promjene brzina rasprostiranja valova te postojanje strukturnih ploha koje predstavljaju granice na kojima se odvijaju posebne pojave u smislu rasprostiranja valova. (Hrženjak, 2018.)



Slika 5-1. Shematski prikaz rasprostiranja valova i titranja čestica (Šumanovac, 2007.)

Za prostorne valove vrijedi da oni kuglasto napreduju, dok se površinski rasprostiru površinom Zemlje te površinom strukturnih ploha unutar masiva. Prilikom takvog rasprostiranja valova vrijedi i tako zvani Huygensov princip. Prema Huygensu principu svaka točka na fronti vala postaje izvor novog vala. Svaka čestica na fronti vala se pomiče iz ravnotežnog položaja na sličan način te se na taj način izazivaju promjene elastičnih sila u odnosu na okolne čestice te i one počinju titrati. Budući da titra cijeli niz čestica na fronti vala, može se razmatrati niz kuglastih valova čije ovojnice, u smjeru titranja vala, određuju novi položaj valne fronte. Osim Huygensovog principa, temeljem kojeg se objašnjava samostalno rasprostiranje valova u masivu, vrijedi i Hookev zakon. Prilikom rasprostiranja valova dolazi do promjene volumena i oblika čestica materijala, odnosno dolazi do pojave deformacija i naprezanja unutar materijala. S obzirom na princip deformiranja materijala prilikom prolaska valova, primarni ili longitudinalni valovi se još nazivaju i kompresijskim jer oni uzrokuju tlačna i vlačna naprezanja (stezanje i rastezanje materijala), dok se sekundarni ili transverzalni valovi još nazivaju i posmičnim valovima jer oni uzrokuju posmična naprezanja (smicanje materijala). Kada se govori o seizmičkim valovima izazvanih miniranjem, obično se promatra

elastično područje naprezanja i deformacija za koje vrijedi Hookeov zakon, odnosno područje naprezanja za koje vrijedi da su deformacije materijala proporcionalne naprezanju unutar materijala i obratno. Međutim, to je samo djelomično istinito, odnosno vrijedi samo za manje vrijednosti naprezanja. Za veće vrijednosti naprezanja prelazi se elastična granica te dolazi do pojave plastičnog ili krtoeg sloma materijala. Prilikom miniranja, samo u užem području oko izvora vala (eksplozije, odnosno minske bušotine i polja), vrijednosti naprezanja su jako velike, u kojem deformacije prelaze elastičnu granicu. Već na malim udaljenostima od minskoga polja ulazi se u područje elastičnih granica za koje se može reći da vrijedi Hookeov zakon. To znači da prilikom promatranja strukturnog odaziva nekog objekta maksimalno mjereni pomak neke točke nije trajan već prolazan zbog čega se promatrana točka objekta vraća u prvobitni položaj. Drugim riječima rečeno, osnovni cilj ili imperativ je da se prilikom miniranja energija valova smanji na intenzitet koji uzrokuje samo pojavu elastičnih naprezanja i deformacija materijala objekata, kako bi se izbjegle pojave trajnih deformacija i pomaka točaka što bi za posljedicu imalo trajno oštećenje ili u najgorem slučaju rušenje objekata. (Hrženjak, 2018.)

Vibracije nastale miniranjem, neovisno o vrsti vala, mogu se aproksimirati sinusoidnom funkcijom čije vrijednosti variraju u vremenu t ili udaljenosti x (ISRM, 1992). Osciliranje točke na mjestu mjerenja čija je brzina i kriterij za ocjenu mogućnosti nastanka oštećenja građevine, jeste aproksimacija na točki koja oscilira oko ravnotežnog položaja. Prilikom predstavljanja vala aproksimacijskim funkcijama za val je moguće definirati slijedeće veličine: valnu duljinu (λ), brzinu rasprostiranja (širenja) vala (c) i frekvenciju vala (f). Valna duljina predstavlja udaljenost između dvaju susjednih brjegov (stezanja) ili dviju susjednih dolina (rastezanja). Frekvencija je definirana brojem titraja u sekundi ili brojem ciklusa koji prođu kroz točku za vrijeme od jedne sekunde, odnosno vrijedi da je $f=1/T$ (Hz) gdje T predstavlja jedan ciklus ili period (vrijeme između dvaju uzastopnih brjegov ili dviju dolina).

Za promatranje deformacija na mjestu oscilacija nastalih djelovanjem prolaska valnog poremećaja primjenjuje se ona na fiksnom mjestu s vremenskom promjenom.

Najbolje razumijevanje aproksimacije vala sinusoidnom funkcijom dobiva se preko jednadžba za pomake točaka u slučaju kada postoji jedna dominantna frekvencija (ISRM, 1992.):

$$u = U \cdot \sin(2\pi ft) \text{ (mm)} \quad (5-1)$$

Gdje su: U – maksimalni pomak (mm),
 f – frekvencija (Hz),
 t – vrijeme (s).

Na temelju ove jednadžbe proizlazi da je maksimalni pomak neke čestice $u_{max} = U$. Maksimalna brzina čestica v prilikom titranja dobije se iz izraza:

$$v = \dot{u}_{max} = 2\pi f u_{max} = U \cdot 2\pi f \left(\frac{mm}{s}\right) \quad (5-2)$$

Kod ove brzine potrebno je napomenuti da se radi o maksimalnoj brzini pojedine čestice prilikom njenog titranja, odnosno vibracija (oscilacija), a ne o maksimalnoj brzini širenja vala (c) što predstavlja čest slučaj zamjene pojmova. Maksimalno ubrzanje ili akceleraciju dobijemo izrazom:

$$a = \ddot{u}_{max} = 2\pi f \dot{u}_{max} = U \cdot 4\pi^2 f^2 \left(\frac{mm}{s^2}\right) \quad (5-3)$$

Kako se najčešće ubrzanje neke materijalne točke na zemlji izražava preko jedinice gravitacijskog ubrzanja zemljine sile teže g ($g=9,814 \text{ mm/s}^2$) onda se akceleracija čestice prilikom njenog titranja izražava kao $a/9814$ (g). S obzirom da su pomak, brzina i ubrzanje kinematski povezane veličine, poznavanjem jedne od veličina mogu se integriranjem, odnosno deriviranjem, dobiti druge dvije veličine. (Hrženjak, 2018.)

Prihvativši frekvencijski utemeljeni kriterij za utvrđivanje dozvoljenih intenziteta vibracija, određivanje dominantne ili glavne frekvencije oscilacija postala je važna zadaća u analizi. Dominantna frekvencija može se u najjednostavnijem slučaju procijeniti na temelju vizualnog pregleda seizmograma ili kod složenih seizmograma računanjem primjenjujući Fourierovu frekvencijsku analizu (engl. fourier frequency spectra). Točnost vizualne procjene uvelike ovisi o kompleksnosti seizmograma. Najjednostavniji slučaj za određivanje dominantne frekvencije je seizmogram sa jednim prevladavajućem signalom. U tom slučaju dominantna frekvencija predstavlja inverznu vrijednost od trajanja periode vršnog signala.

Na temelju mnogobrojnih rezultata istraživanja utvrđeno je da se niže frekvencije javljaju prilikom miniranja u ugljenokopima i kamenolomima dok se nešto više frekvencije javljaju kod građevinskih zahvata. Što su frekvencije pobuđivanja strukture nekog objekta niže (5-20 Hz) to je odaziv objekta veći zbog čega može doći do višestrukih povećanja amplituda vibracija. To je naročito izraženo kod većih i viših građevina. Pri nižim frekvencijama vibracije nastale miniranjem mogu se poklopiti sa prirodnim frekvencijama samih objekata, pri čemu objekti mogu jače oscilirati nego li okolna stjenska masa U slučaju viših frekvencija (iznad 20 Hz) puno se manje seizmičke energije prenosi na objekt. (Hrženjak, 2018.)

5.2. Procjena vibracijskih parametara

S obzirom da primjenom tehnologije miniranja neminovno dolazi do induciranja seizmičkih potresnih valova, koji uzrokuju vibracije na određenom području oko mjesta miniranja,

postavlja se pitanje utvrđivanja matematičkog modela i procjene vibracijskih parametara na tom području, kako bi se primjenom tog modela mogle dobiti očekivane vrijednosti vibracija, odnosno smanjiti očekivane vibracije na dozvoljene vrijednosti podešavanjem parametara miniranja. Mjereći vrijednosti nastalih vibracija na mjestima opažanja, koja su različito udaljena od mjesta miniranja, jasno se uočilo da intenzitet vibracija gotovo isključivo ovisi o količini eksploziva te udaljenosti od mjesta miniranja. Temeljem toga, Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM, 1992) predložilo je regresijsku analizu za procjenu brzina vibracija (oscilacija) izazvanih miniranjem na jednostavnom matematičkom modelu koji je dan izrazom:

$$v_{pvs} = a \cdot D^b = a \cdot \left(\frac{R}{Q^n}\right)^b \left(\frac{mm}{s}\right) \quad (5-4)$$

Gdje su: v_{pvs} – rezultantna brzina oscilacija na mjestu opažanja (mm/s),
 D – svedena udaljenost (m/kgⁿ),
 a, b – veličine koje se utvrđuju regresijskom analizom,
 Q – maksimalna masa eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja (kg),
 n – eksponent mase eksplozivnog punjenja koji se utvrđuje empirijski.

Ovako pojednostavljen matematički model za procjenu brzina oscilacija u određenim uvjetima može dobro aproksimirati stvarno stanje, odnosno da intenzitet potresnih vibracija isključivo ovisi o količini eksploziva i udaljenosti od mjesta miniranja. Pritom se rasap podataka oko središnje linije trenda regresijske krivulje pripisuje svim konstruktivnim i geološkim utjecajima. Za vrijednost eksponenta n u praksi se najčešće uzima 1/2 ili 1/3, a prema danim smjernicama (ISRM, 1992) eksponent n se može i izračunati iterativnim postupkom tako da se regresijskom analizom dobije najbolja korelacija podataka. Prikazani model prema tome predstavlja osnovni matematički model za procjenu brzina oscilacija izazvanih miniranjima pri iskopima u čvrstim stijenskim masama.

Procjeni vibracijskih parametara norma HRN DIN 4150-1 (2011) pristupa općenitije, odnosno promatra širenje vibracija kroz masiv neovisno o kojoj se vrsti i karakteru izvora vibracija radi. Ona obrađuje glavne vrste izvora vibracija u industriji kao što su vibracije nastale miniranjem, graditeljstvu, prometu te vibracije nastale od strojeva u industrijskim pogonima. Na vibracijske parametre koji se određuju utječe niz čimbenika kao što je vrsta i karakter izvora vibracija, svojstva masiva kroz koji se vibracije šire, stanje objekata na koje se vibracije prenose te svojstva temeljnog tla na kojima su objekti izgrađeni. Prema tome, s obzirom na postojanje više vrsta valova, a ovisno o vrsti i karakteru izvora vibracija te prirodi prijenosa energije, valovi će prouzročiti i različite učinke na mjestu opažanja.

U procjeni vibracijskih parametara, bez obzira o kojoj se vrsti i karakteru izvora vibracija radi, norma HRN DIN 4150-1 (2011) definira takozvanu referentnu udaljenost od centra izvora R_1 , koja se nalazi u neposrednom području samog izvora vibracija u kojem se odvijaju složene interakcije te područje slobodnog širenja valova (engl. free wave propagation region) udaljeno od izvora vibracija. Za sve izvore vibracija koji mogu biti idealizirani kao točkasti ili linijski, referentna udaljenost definirana je izrazom:

$$R_1 = \frac{a}{2} + \lambda_R \text{ (m)} \quad (5-5)$$

Gdje su: a – dimenzija izvora u smjeru širenja vibracija (m),

λ_R – valna duljina površinskog vala.

Intenzitet vibracija koji se prenosi kroz masiv opada s povećanjem udaljenosti od izvora, pretežito kao funkcija geometrijskog prigušivanja i materijalnog prigušivanja. Na određenoj udaljenosti od izvora vibracija ($R > R_1$) smanjivanje amplitude brzine vibracija može se aproksimirati izrazom:

$$v = v_1 \left(\frac{R}{R_1}\right)^{-n} \cdot \exp[-a(R - R_1)] \left(\frac{mm}{s}\right) \quad (5-6)$$

Gdje su: v – brzina vibracija na udaljenosti R (mm/s),

v_1 – brzina vibracija na referentnoj udaljenosti R_1 (mm/s),

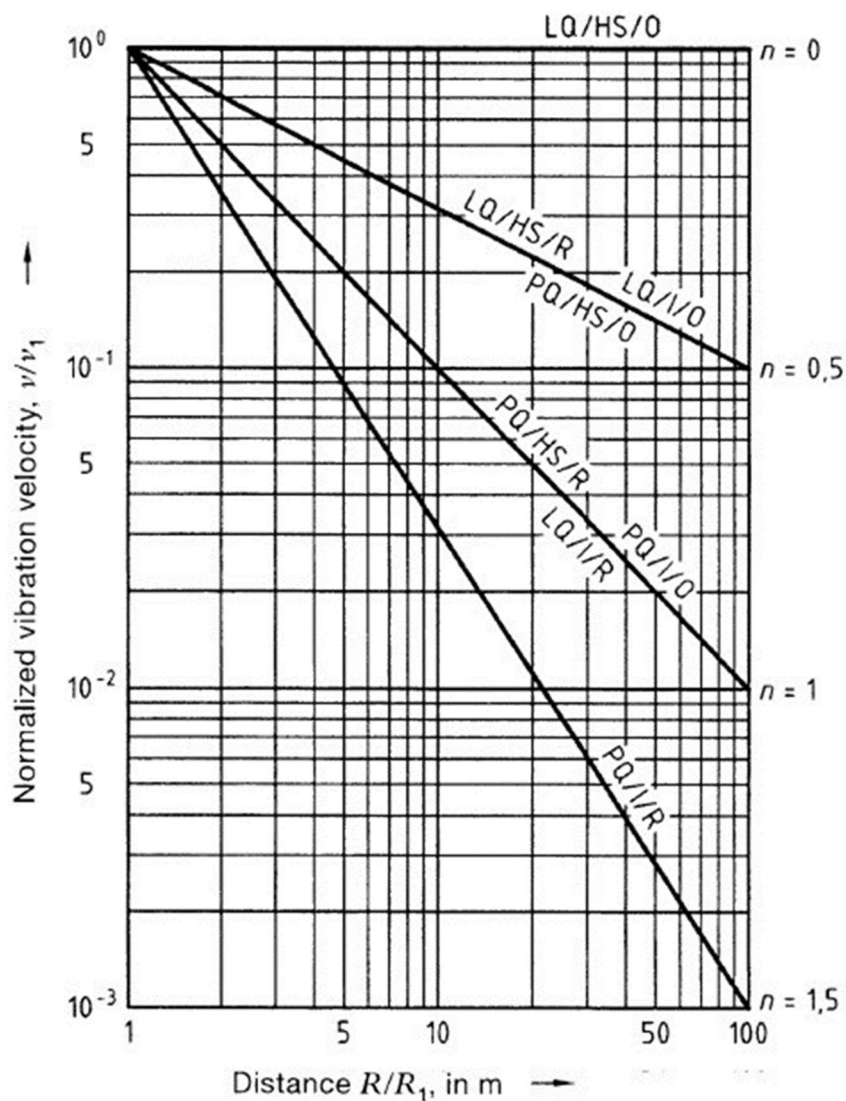
R_1 – referentna udaljenost (m),

n – eksponent koji ovisi o geometriji izvora, tipu vibracija i vrsti valova,

a – koeficijent slabljenja (m^{-1}).

Približna vrijednost koeficijenta slabljenja može se izračunati prema izrazu $\alpha = 2\pi D/\lambda$, gdje je D faktor prigušivanja masiva, a λ odgovarajuća valna duljina (m). Vrijednost valne duljine dobiva se kao c/f , gdje je c brzina rasprostiranja vala, a f frekvencija vibracija (Hz). Geometrijsko slabljenje amplitude, što predstavlja $(R/R_1)^{-n}$, rezultat je zapravo smanjivanja gustoće energije s povećanjem udaljenosti od izvora vibracija. Vrijednost eksponenta n određuje se na temelju dijagrama koji je prikazan na slici 5-3. koja predstavlja funkciju faktora:

- 1) geometriju izvora: točkasti (PQ) ili linijski (LQ),
- 2) tip vibracija: harmonično/stacionarno (HS) ili impulsno (I),
- 3.) vrsta vala: prostorni val (R) ili površinski val (O)



Slika 5-2. Dijagram za određivanje vrijednosti eksponenta n (Šumanovac, 2007.)

U određenim situacijama vrijednost eksponenta n može značajno varirati u odnosu na predložene aproksimativne vrijednosti na dijagramu uslijed izrazite stratifikacije masiva, prisutnosti struktura i diskontinuiteta kao i interakcije između nekoliko izvora vibracija. U tom slučaju potrebno je određivati vrijednost eksponenta zasebno od slučaja do slučaja koristeći dijagram samo kao vodič. Drugi faktor koji djeluje na slabljenje amplitude je upijanje energije od strane masiva (materijalno prigušivanje), što predstavlja $\exp[-\alpha(R-R_1)]$, koje je frekvencijski ovisno. Faktor prigušivanja D , koji se nalazi u izrazu za koeficijent slabljenja α , je ovisan o strukturi masiva. Kod preliminarnih istraživanja i proračuna, za faktor prigušivanja ne bi se smjela uzimati veća vrijednost od 0,01. Definicija koeficijenta slabljenja ima za posljedicu da se vibracije većih frekvencija značajno više prigušuju od strane masiva nego vibracije manjih frekvencija što je značajka većinom svakog masiva.

Iako je procjena vibracijskih parametara prema normi HRN DIN 4150-1 (2011) više prilagođena stvarnoj fizici rasprostiranja valova, njena primjena u slučaju procjene vibracijskih parametara kod miniranja nije pogodna iz više razloga. Kao prvo, miniranjem, koje se najčešće izvodi sa stupnjevitim paljenjem eksploziva, se generiraju valovi širokog frekvencijskog spektra sa značajnim međusobnim interakcijama, a drugo, na brzinu rasprostiranja i distribuciju frekvencije značajno imaju utjecaja lokalni geološki uvjeti. Osim navedenog, energija vibracija zavisi i od trenutno aktivirane količine eksploziva, pri čemu je gotovo nemoguće mjerenje brzine na referentnoj udaljenosti R_l .

Procjena maksimalne vrijednosti brzina vibracija izazvanih miniranjem u nekoj točki koja se nalazi u području slobodnog širenja valova (značajno udaljena od izvora) može se aproksimirati izrazom:

$$v_{max} = k \left(\frac{L}{L_0}\right)^b \cdot \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-m} \left(\frac{mm}{s}\right) \quad (5-7)$$

Gdje su: L – masa eksploziva po stupnju paljenja (kg),
 L_0 – 1 kg (referentna vrijednost),
 R – udaljenost od mjesta miniranja (m),
 R_0 – 1 m (referentna vrijednost),
 k – korekcijski faktor koji se utvrđuje empirijski (mm/s),
 b, m – karakteristike veze koje se utvrđuju empirijski

Veličine k, b i m utvrđuju se empirijski na osnovi pokusnih miniranja pri čemu geološki uvjeti, tehnološki parametri miniranja i udaljenosti moraju biti slične onima kod kojih će se procjena provoditi. Ako se prethodni izraz usporedi s izrazom za procjenu brzina vibracija prema metodi Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM, 1992) onda se može konstatirati da se zapravo radi o istoj funkciji samo u drugačijem obliku izražena. Prema tome, za procjenu brzina vibracija uzrokovanih miniranjem jednakovrijedno je koristiti bilo koji od ova dva izraza.

5.3. Djelovanje vibracija na objekte

Djelovanje miniranja na objekte ocjenjuje se najčešće indirektnim postupkom na osnovi izmjerenih veličina pomaka, brzina i ubrzanja točaka masiva. Međutim, u praksi se najviše uvriježio kriterij zasnovan na brzini vibracija (oscilacija). Svi ovi elementi su ugrađeni u kriteriju norme HRN DIN 4150-3 (2011). Prema ovoj normi razlikuju se kratkotrajne i dugotrajne vibracije. Ukoliko se za neku situaciju ne može procijeniti o kojem se tipu vibracija radi, potrebno je provesti procjenu i prema jednom i prema drugom kriteriju. Za vibracije

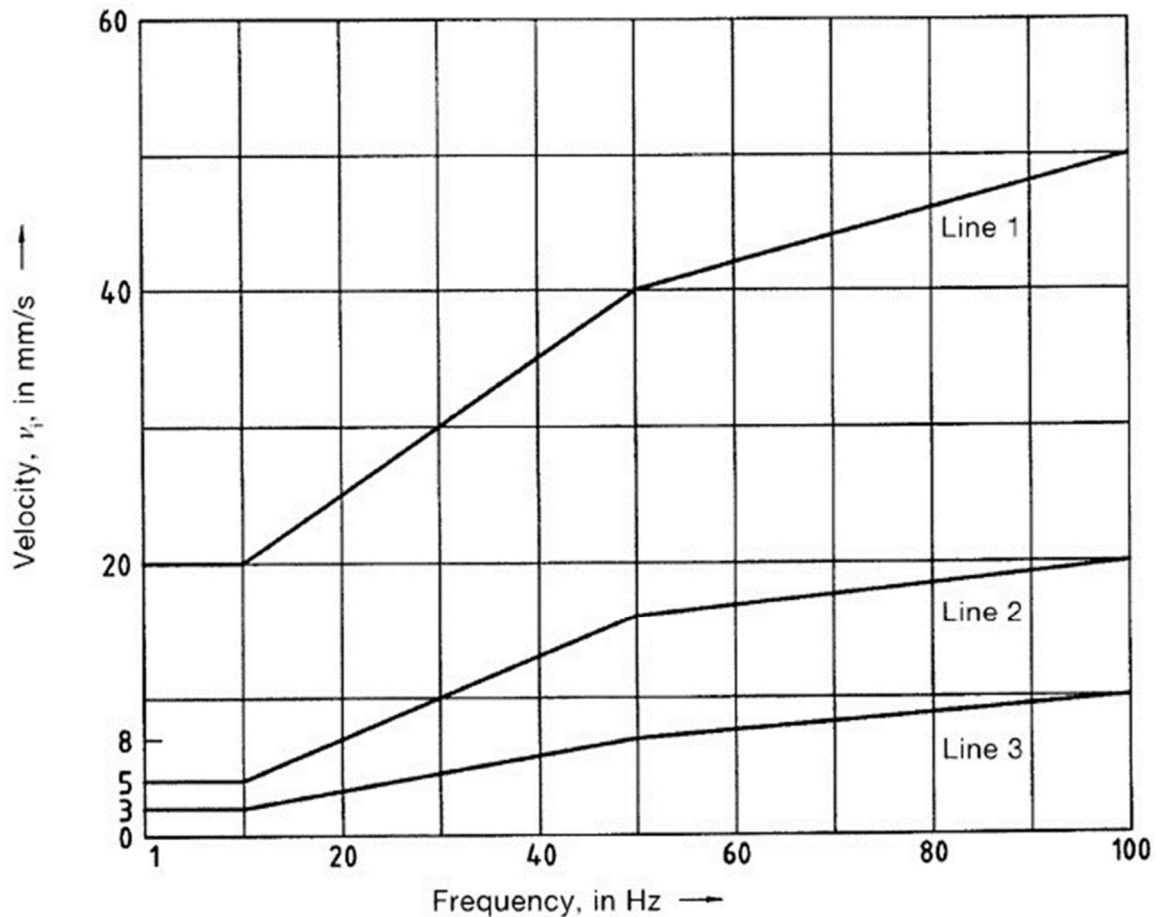
nastale miniranjem jasno je da se radi o kratkotrajnim vibracijama, zbog čega će se u nastavku detaljnije prikazati procjena efekata djelovanja kratkotrajnih vibracija na objekte.

Mnogobrojna mjerenja brzine vibracija u temeljima građevina omogućila su empirijske vrijednosti koje daju smjernice određivanju kratkotrajnih strukturnih vibracija. Procjene kao u ovom standardu temelje se na maksimalnoj apsolutnoj vrijednosti brzine, $|v|_i, \max$, za tri komponente (gdje $i=x, y$ ili z), težinski neponderirane veličine $v_i(t)$ mjerene na temeljima građevina. Vibracije mjerene u ravnini najvišeg kata koji leži na vanjskim zidovima također daju značajne informacije za ove procjene, uzimajući kao osnovu maksimume od dviju horizontalnih komponenta. Provedena mjerenja u tim točkama mogu biti upotrijebljena kod određivanja horizontalnog odziva strukture na pobudu u temeljima. U tablici 1. dane su smjernice za granične vrijednosti v_i na temelju i u ravnini najvišeg kata za različite tipove građevina. Iskustvo je pokazalo da, ako se radi u skladu s ovim vrijednostima, oštećenje koje bi smanjilo uporabljivost zgrade se neće dogoditi. Ako se oštećenje ipak dogodi, pretpostavlja se da postoje drugi razlozi koji su za to odgovorni. Prekoračivanje vrijednosti, odnosno za veće vrijednosti od onih u tablici, ne mora nužno voditi ka oštećivanju; ako bi one ipak znatno prekoračile, onda su potrebna dodatna istraživanja i razmatranja. Kod kratkotrajnih vibracija koje uzrokuju oscilacije etaža, ako v_z nije veća od 20 mm/s (mjerena u točki maksimalne brzine, što je obično u središtu ploče), uporabljivost etaže se ne bi trebala smanjiti. (Hrženjak, 2018.)

Tablica 5-1. Vrijednosti graničnih linija za brzine vibracija v_i kod građevina

Linija	Tip građevine	Granične vrijednosti za brzine v_i (mm/s)			
		Vibracije u temelju s frekvencijama			Vibracije u horizontalnoj ravnini najvećeg kata kod svih frekvencija
		1 – 10 Hz	10 – 50 Hz	*50 – 100 Hz	
1	Zgrade koje se koriste za komercijalne svrhe, industrijske zgrade i zgrade sličnog dizajna	20	20 – 40	40-50	40
2	Stambene zgrade i zgrade sličnog dizajna i/ili upotrebe	5	5 – 15	15 – 20	15
3	Konstrukcije koje se, zbog svoje osjetljivosti na vibracije, ne mogu klasificirati pod 1 i 2 ili su od velike vrijednosti (na primjer zgrade pod posebnom zaštitom)	3	3 – 8	8 – 10	8

*Na višim frekvencijama od 100 Hz, vrijednosti dane u ovom stupcu mogu biti korištene kao minimalne vrijednosti.



Slika 5-3. Krivulje graničnih vrijednosti za brzine vibracija v_i kod građevina (Šumanovac, 2007)

Za slučaj zakopanih cjevovoda, smjernice za granične vrijednosti v_i su dane tablicom 2. Pri tome se pretpostavlja da su cijevi obrađene i postavljene primjenom današnje tehnologije, a ako to nije slučaj, potrebno je provesti posebna razmatranja. Dodatna razmatranja potrebno je također provesti i kada mehanički procesi u masivu mogu imati štetne učinke na cijevi, ili ako se spojevi cijevi i konstrukcija nalaze u različitim uvjetima naprezanja. Vrijednosti dane u tablici 1 za temelje se također upotrebljavaju za slučaj prva dva metra (najbliže zgradi) cijevi za plin i vodu. Odvodne cijevi trebaju se promatrati kao konstrukcije koristeći granične vrijednosti linije 3 iz tablice 5-2.

Tablica 5-2. Vrijednosti graničnih linija za brzine vibracije v_i kod cjevovoda

Linija	Materijal cijevi	Granične vrijednosti za brzine v_i mjerene na cijevi (mm/s)
1	Čelik (uključujući varene cijevi)	100
2	Glina (keramika), beton, armirani beton, prenapregnuti beton, metal (sa ili bez bandaža)	80
3	Zidani, plastični	50

Za zadane granične brzine oscilacija uz navedene vrijednosti frekvencija smatra se da do oštećenja objekata ne može doći. Međutim, objekti bez oštećenja i pukotina vrlo su rijetki. U blizini mjesta miniranja, neovisno da li se radi o proizvodnim ili građevinskim, sva šteta na objektima najčešće se pripisuje upravo miniranju. Kako takve situacije mogu dovesti do neželjenih posljedica vrlo je bitno dobro razlikovati štetna djelovanja prouzrokovana miniranjem te ona koja su uzrokovana nekim drugim procesima kao što su: slijeganje terena, nejednolika nosivost temeljnog tla, trošenje materijala tijekom vremena, kemijske i temperaturene promjene te svakodnevne ljudske aktivnosti u objektu (ISRM, 1992). Da bi se utvrdilo da se uistinu radi o štetnim djelovanjima miniranja (bilo da se radi o seizmičkom djelovanju ili zračnom udaru) potrebno je provoditi praćenje (monitoring) vibracija nastalih miniranjem te pregled i kontrolu stanja građevina. Vizualnim pregledom građevine prije i poslije miniranja utvrđuje se njeno stanje.

Međutim, treba voditi računa da se nekontroliranim miniranjem uistinu može uzrokovati šteta na objektima, a ona se može klasificirati kao (ISRM, 1992):

- granična (kozmetička) oštećenja (engl. cosmetic cracking) koja predstavljaju otvaranje samo starih pukotina te formiranje vrlo malih (debljine kose) novih pukotina samo na žbuci i cigli;

- manja oštećenja (engl. displaced cracks) koja predstavljaju površinska oštećenja koja ne utječu na stabilnost i uporabljivost objekta, kao na primjer pucanje prozora, padanje žbuke ili oštećenja cigle;

- veća oštećenja (engl. permanent distortion) kod kojih dolazi do značajnog oslabljenja i neuporabljivosti objekta, kao na primjer nastanak velikih pukotine, pomicanje temelja ili nosećih zidova, velika slijeganja koja uzrokuju distorziju ili oslabljenje velikih konstrukcija.

Da bi se utvrdilo stvarno djelovanje vibracija na građevine, odnosno učinak vibracija na njihove konstruktivne elemente, a naročito u situacijama kod kojih se sumnja na nastala oštećenja, potrebno je provesti analize naprezanja i deformacija konstrukcija. Na temelju izmjerenih amplituda i frekvencija pomaka, brzina ili akceleracija nastalih vibracijama, mogu se izračunati vrijednosti naprezanja i deformacija u konstrukcijama. U analizi stanja naprezanja i deformacija konstrukcija potrebno je koristiti najsuvremenije numeričke metode za takve proračune. Pritom je za ocjenu konačne stabilnosti i uporabljivosti građevina potrebno primijeniti faktore sigurnosti te zahtjeve propisa koji su nadležni za to područje. (Hrženjak, 2018.)

5.4. Seizmički utjecaj miniranja pod vodom

Dio oslobođene energije eksplozivnog punjenja koji se nije potrošio na razaranje i drobljenje stijene pretvara se u kinetičku energiju različitih tipova elastičnih valova koji se međusobno razlikuju u brzini širenja, intenzitetu i obliku deformacije. Pri prolasku elastičnih valova nastaju oscilacije tla, odnosno umjetni potresi. To je nepoželjna pojava kad se minira u blizini građevinskih objekata i naseljenih mjesta, jer kod određenog intenziteta potresa mogu nastati oštećenja, pa čak i rušenje građevinskih objekata. Intenzitet potresa ovisi o količini i vrsti eksplozivnog punjenja, udaljenosti od mjesta miniranja i sredini kroz koju se valovi šire (Krsnik, 1989.).

Nekontrolirano razbacivanje materijala ne predstavlja značajan problem pod vodom, no stvoreni udarni val je opasan za ribe i ometa komunikaciju morskim sisavcima, no seizmički je najveći problem miniranja u urbanim sredinama. Prilikom detonacije eksplozivni naboj prelazi iz čvrstog u plinovito stanje pri čemu se oslobađa energija. Takva reakcija u zatvorenom i ograničenom prostoru minske bušotine izaziva tlačna naprezanja čiji iznos prelazi dinamičku čvrstoću stijene. U najbližoj zoni oko bušotine, tlakovi lome i usitnjavaju stijenu. Pored zdrobljenog područja je frakturirano područje jer energija drobljenja s udaljenošću iščezava i nije dovoljno za svladavanje tlačne čvrstoće stijene, te je u tim područjima primjetna samo pokoja radijalna pukotina. Posljednja zona je elastična zona, i ona seže radijalno u daljinu. U toj zoni čestice poprimaju i dalje energiju detonacije, no nedovoljnu za destrukciju. Čestice time samo osciliraju, i nakon djelovanja energije se vraćaju u svoj prvobitni ravnotežni položaj (Glasović, 2014.).

Prema Krsniku (1989.), razina širenja seizmičkih valova i njihov domet ovise o vrsti stijene i o prigušenju na putu širenja. Na prigušenje seizmičkih valova utječu:

- Frekvencija seizmičkih valova,

- Porozitet i raspucalost stijene,
- Sastav i struktura stijene,
- Sadržaj vode i temperatura stijene
- Adsorpcija i apsorpcija vode
- Rasipanje i disipacija energije.

Veličina deformacija građevinskih objekata ovisi o intenzitetu oscilacija koji je definiran veličinom amplitude, frekvencijom i valnom duljinom. Frekvencija oscilacija čestica tla je vrlo važna veličina koja određuje njihovo djelovanje na objekt, jer su kod konstantne amplitude oscilacije objekata to veće što je veća frekvencija. Frekvencije seizmičkih valova kreću se od 5 Hz 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.).

6. TEHNIČKI OPIS MINERSKIH RADOVA

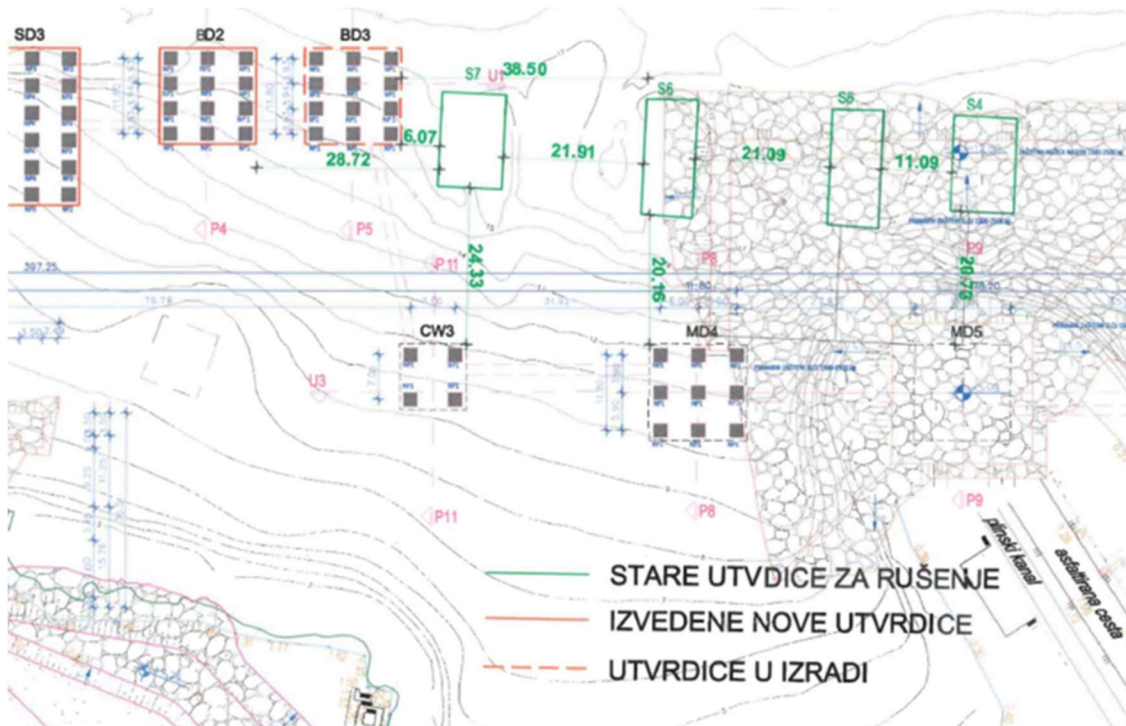
6.1. Opći podaci o projektu

Unutar projekta izrade prihvatnog terminala za ukapljeni naftni plin na otoku Krku, potrebno je bilo ukloniti elemente stare luke. Dio objekata uklonjen je mehaničkim načinom dok privezne utvrđice i privezne platforme-pristani, nisu u potpunosti razgrađene te je to potrebno učiniti bušenjem i miniranjem. (Dobrilović, 2020.)

Utvrdice servisne platforme imaju oznake S5 i S6, dok su oslonačke utvrđice označene oznakama S4 i S7. Postojeća servisna platforma je poligonalnog pravokutnog oblika, tlocrtna projekcije cca 667,80 m², sastoji se od dvije utvrđice (S5 i S6) na koje se oslanjaju nosači rasponske konstrukcije (armiranobetonske grede). Tlocrtna dimenzije utvrđica servisne platforme su 18,25 x 8,1 m, i one su temeljene na nasipu od kamenih materijala i izvedene od predgotovljenih armiranobetonskih elemenata. Dubina na liniji obale servisne platforme iznosi 15-18 m, a kota vrha iznosi +5,0 m. Oslonačke utvrđice (S4 i S7) veznim mostovima su spojene sa servisnom platformom. Podmorski dio oslonačkih utvrđica kao i podmorski dio utvrđica servisne platforme izgrađen je od predgotovljenih armiranobetonskih elemenata sa otvorima kružnog poprečnog presjeka kroz koje su izvedeni stupovi koji po visini povezuju elemente. Šupljine između stijenki svih utvrđica ispunjene su kamenim materijalom mase 0-50 kg, dok je nadmorski dio utvrđica izveden od armiranog betona. Kota vrha oslonačkih utvrđica iznosi + 3,0 , dok tlocrtna projekcija iznosi 147,70 m². Utvrđice pristana S5 i S6, te oslonačke utvrđice S4 i S7 prikazane su na slici 6-1. Rušenje utvrđica S4 i S5 potrebno je izvesti do linije kontakta nasipnog materijala sa utvrđicom, dok je utvrđice S6 i S7 potrebno razgraditi do dna. Ukupni volumeni betona za razgradnju, odnosno rušenje miniranjem, dani su u tablici 6-1. (Dobrilović, 2020.)

Tablica 6-1. Volumeni utvrđica za razgradnju

Utvrdica	Volumen (m ³)
S4	448
S5	442
S6	759
S7	708



Slika 6-1. Prikaz položaja utvrdica S4, S5, S6 i S7

6.2. Tehnologija izvođenja radova na miniranju

Osnova za određivanje parametara bušenja i miniranja predstavljaju potrebne mase eksploziva za drobljenje armiranog betona a specifične količine su korigirane obzirom na stanje betona pilota utvrdica te stanje predpripremljenih betonskih blokova utvrdice. Budući da je površina zidova neravna i bušenje nije moguće u više redova odabran je raspored bušotina u pilotu i između pilota u betonskim elementima, s koncentracijom punjenja u pilotima. Prema raspoloživim duljinama bušotina izvedene su tri vrste konstrukcije punjenja, a to su: konstrukcije bez razdjela (bušotine srednje duljine), konstrukcija s jednim razdjelom (srednja duljina bušotina) i konstrukcija s dva razdjela (najdulje bušotine). Podmorsko miniranje betona utvrdica izvesti će se s minskim bušotinama promjera 89 mm, a vertikalne minske bušotine će se bušiti sa usidrene ploveće platforme maone. Točnost bušenja kontrolirat će stručni ronionci, izbušene minske bušotine će se zacijeviti plastičnim cijevima 75/71 mm na ušćima bušotine zbog sprječavanja prodora sipkog materijala i na taj način zatvaranja bušotine, te se svaka bušotina označava odgovarajućim priborom broj reda (rimski broj) i broj bušotine u redu (arapski broj). (Dobrilović, 2020.)

Odabrani eksploziv za miniranje pri podvodnim miniranjima mora imati sljedeće minersko tehničke karakteristike: gustoću ρ (kg/dm³) znatno veću od 1, veliku vodootpornost, plastičnu konzistenciju, relativnu dobru osjetljivost-mogućnost iniciranja s neelektričnim sustavom, veliku energiju eksplozije. Odabran je želatinozni eksploziv Riodin HE koji zadovoljava sve spomenute minerske i sigurnosne uvjete. 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, a iniciranje pojedinog minskog polja odnosno mreže neelektričnog sustava će se izvesti trenutnim električnim detonatorima. Nakon usidrenja plovila eksplozivni naboji će se spuštati ronioncima po prethodno utvrđenom redosljedu punjenja minskih bušotina, prihvaćene eksplozivne naboje ronionci stavljaju u pripadajuće minske bušotine. Iznad eksplozivnog naboja stavljat će se čep od pijeska u polietilenskom crijevu duljine 30 cm, pomoću tog čepa se znatno smanjuje tlak u vodenom udarnom valu. Nakon završetka punjenja minskog polja ugrađuju se neelektrični konektori s usporenjem od 25 ms na završetke inicijalne cjevčice svake minske bušotine, te se na taj način osigura vremenski odvojeno otpucavanje svake minske bušotine. (Dobrilović, 2020.)

6.3. Probna miniranja pojedinih utvrđica

Prema elaboratima koje je izradila Buljan (2020.), probna miniranja na utvrđicama S4, S5, S6 i S7 su izvedena u rasponu od 18.svibnja do 18.lipnja 2020., na 6 različitih minskih polja. U nastavku će biti prikazani glavni podaci parametara bušenja i miniranja, situacijske karte, povezivanje minskih bušotina, načelne konstrukcije punjenja i mase punjenja pojedinih minskih bušotina za svaku utvrđicu.

6.3.1. Miniranje utvrđice S4

18.svibnja 2020. god., na minskom polju 1 uz pomoć hidrauličke bušilice sa pontona uz zacjevljivanje bušotina bušen je dio zida AB konstrukcije oslonjačke utvrđice S4 servisne platforme pristana. Glavni podaci parametara bušenja i miniranja utvrđice su sljedeći:

Volumen zidova betona:

- Zid 1

$$V_1 = l \cdot d \cdot h = 14,0 \cdot 1,6 \cdot 4,13 = 92,51 \text{ m}^3$$

- Zid 2

$$V_2 = l \cdot d \cdot h = 14,0 \cdot 1,6 \cdot 3,69 = 82,66 \text{ m}^3$$

- Zid 3

$$V_3 = l \cdot d \cdot h = 6,5 \cdot 1,6 \cdot 7,7 = 80,08 \text{ m}^3$$

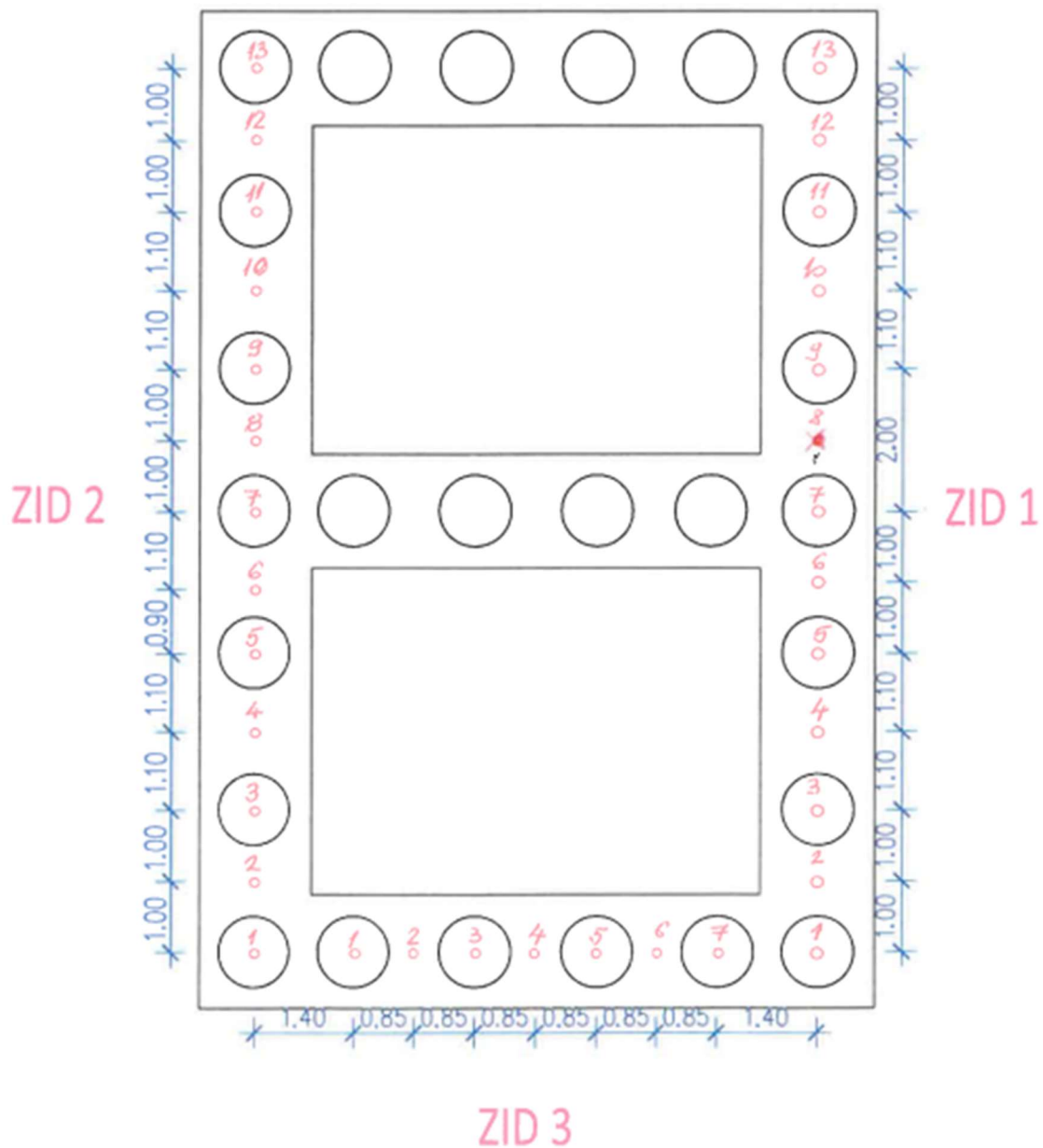
$$\text{Ukupno: } V_{1-3} = 92,51 + 82,66 + 80,08 = 255,25 \text{ m}^3$$

Ostali parametri bušenja su prikazani u tablici 6-2.

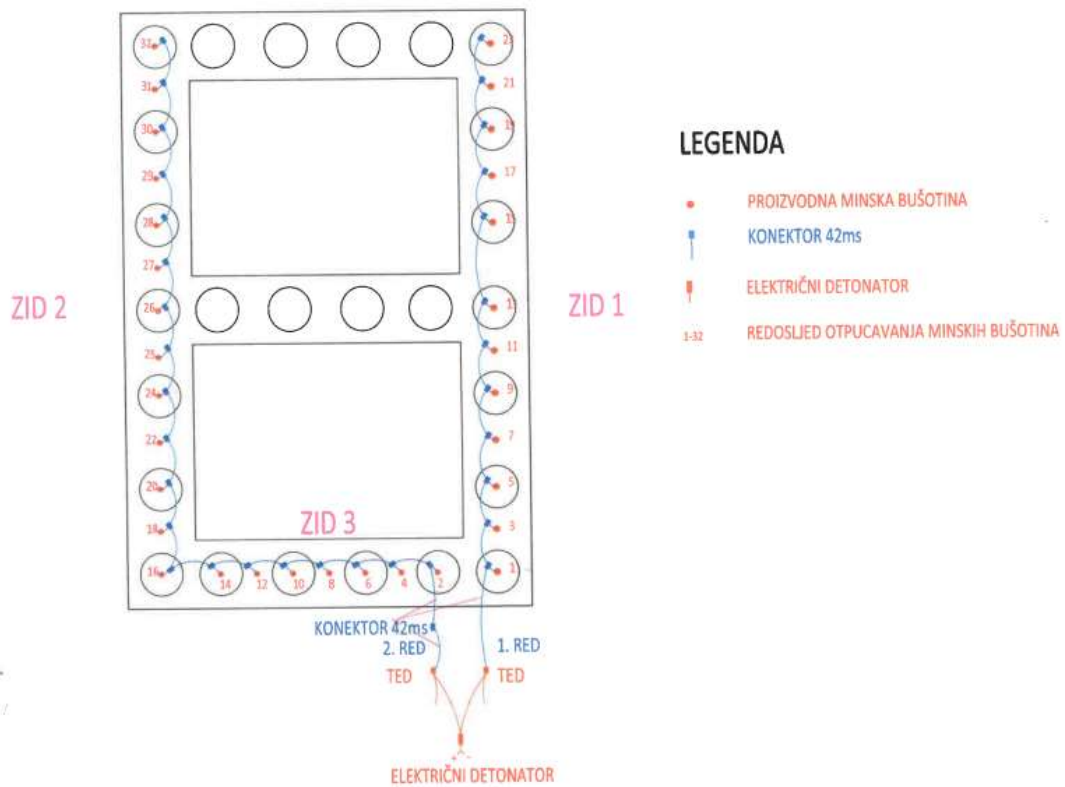
Tablica 6-2. Parametri bušenja na utvrđici S4

Promjer bušenja	89 (mm)
Nagib	90 (°)
Prosječni razmak minskih bušotina (a)	0,7 – 1,05 (m)
Prosječna duljina izbojnice (w)	1,6 m
Prosječna dubina bušenja	5,06 (m)
Broj vertikalnih bušotina	32
Ukupno izbušeno	161,80 m

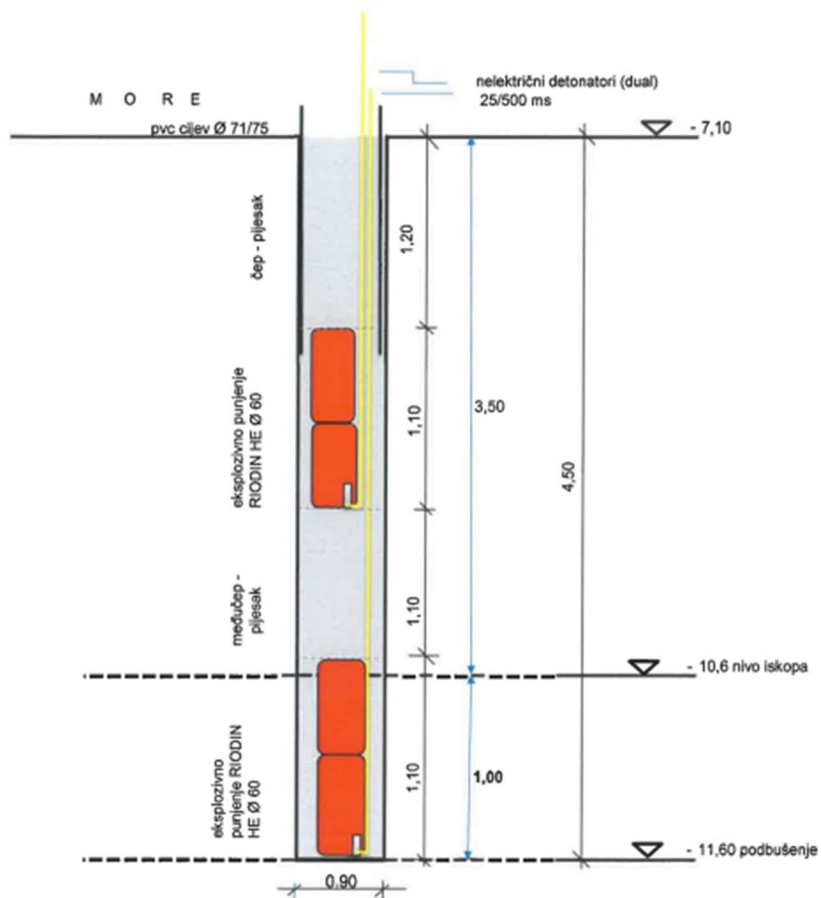
Miniranje je obavljeno na tri zida utvrđice S4 prema situaciji prikazanoj na na slici 6-2., povezivanje minskih bušotina izvedeno je prema slici 6-3., a načelna konstrukcija punjenja je prikazana na slici 6-4.



Slika 6-2. Situacijska karta miniranja utvrđice S4 (Buljan, 2020.)



Slika 6-3. Shema povezivanja i redosljed otpucavanja minskih bušotina (Buljan, 2020.)



Slika 6-4. Presjek kroz minsku bušotinu B11 utvrđice S4 i konstrukcija eksplozivnog punjenja (Buljan, 2020.)

Mase punjenja pojedinih minskih bušotina i utrošak eksploziva na svim zidovima su prikazani na tablicama koje je izradila Buljan (2020.), u nastavku.

Tablica 6-3. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – zid 1 utvrđice S4

Bušotina	Dubina bušenja u zidu	Dubina punjenja - donji nivo	Dubina punjenja - srednji nivo	Dubina punjenja - gornji nivo ø 60	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (Riodin HE ø 60)			Ukupno
							Eksploziv donji dio	Eksploziv srednji nivo	Eksploziv gornji nivo	
	m1	m1	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg
B1 P	6,30	1,40	0,75	0,75	(1,10+1,10)	1,10	5,00	3,00	3,00	11,00
B2	6,40	1,10	-	1,10	3,20	1,00	4,00	-	4,00	8,00
B3 P	6,50	1,40	1,10	0,80	(1,10+1,10)	1,00	5,00	4,00	3,00	12,00
B4	5,80	1,10	-	1,10	2,60	1,00	4,00	-	4,00	8,00
B5 P	5,50	1,70	-	1,70	1,50	1,00	6,00	-	6,00	12,00
6	2,20	1,10	-	-	-	1,10	4,00	-	-	4,00
B7 P	4,80	1,40	-	1,10	1,30	1,00	5,00	-	4,00	9,00
B9 P	4,00	1,10	-	0,80	1,10	1,00	4,00	-	3,00	7,00
10	4,80	1,10	-	0,60	2,10	1,00	4,00	-	2,00	6,00
B11 P	4,50	1,10	-	1,10	1,10	1,20	4,00	-	4,00	8,00
12	4,30	1,10	-	0,55	1,60	1,00	4,00	-	2,00	6,00
B13 P	3,30	0,55	-	0,55	1,10	1,10	2,00	-	2,00	4,00
Ukupno:	12	58,4	-	-	-	-	51,00	7,00	37,00	95,00
Prosjeck:	-	1,18	0,93	0,92	1,49	1,04	4,25	3,50	3,36	7,92

Tablica 6-4. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – zid 2 utvrđice S4

Bušotina	Dubina bušenja u zidu	Dubina punjenja - donji nivo	Dubina punjenja - srednji nivo	Dubina punjenja - gornji nivo ø 60	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (Riodin HE ø 60)			Ukupno
							Eksploziv donji dio	Eksploziv srednji nivo	Eksploziv gornji nivo	
	m1	m1	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg
B1 P	6,10	1,10	1,10	0,80	(1,10+1,00)	1,00	4,00	4,00	3,00	11,00
B2	6,10	1,10	-	1,10	2,90	1,00	4,00	-	4,00	8,00
B3 P	2,70	1,40	-	-	-	1,30	5,00	-	-	5,00
B4	5,70	1,10	-	1,10	2,50	1,00	4,00	-	4,00	8,00
B5 P	2,50	1,30	-	-	-	1,20	5,00	-	-	5,00
6	3,60	1,10	-	0,55	1,10	0,90	4,00	-	2,00	6,00
B7 P	6,20	1,70	-	1,40	1,10	1,00	6,00	-	5,00	11,00
8	4,80	1,10	-	1,10	1,60	1,00	4,00	-	4,00	8,00
B9 P	4,30	1,40	-	0,80	1,00	1,10	5,00	-	3,00	8,00
10	3,10	0,75	-	0,55	1,00	0,80	3,00	-	2,00	5,00
B11 P	2,60	1,40	-	-	-	1,20	5,00	-	-	5,00
12	2,20	1,10	-	-	-	1,10	4,00	-	-	4,00
B13 P	1,50	0,75	-	-	-	0,75	3,00	-	-	3,00
Ukupno:	13	51,4	-	-	-	-	56,00	4,00	27,00	87,00
Prosjeck:	-	3,95	1,18	0,80	0,93	1,50	4,31	4,00	3,38	6,69

Tablica 6-5. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – zid 3 utvrđice S4

Bušotina	Dubina bušenja u zidu	Dubina punjenja - donji nivo	Dubina punjenja - srednji nivo	Dubina punjenja - gornji nivo ø 60	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (Riodih HE ø 60)				
							Eksploziv donji dio	Eksploziv srednji nivo	Eksploziv gornji nivo	Ukupno	
	m1	m1	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg	
B 1 P	8,20	1,70	1,40	1,40	(1,0+1,10)	1,10	6,00	5,00	5,00	16,00	
B2	7,00	1,10	0,80	0,80	(1,50+1,00)	1,30	4,00	3,00	3,00	10,00	
B3 P	8,20	1,70	1,40	1,40	(1,50+1,10)	1,10	6,00	5,00	5,00	16,00	
B4 P	7,00	1,10	0,80	0,80	1,50+1,50	1,30	4,00	3,00	3,00	10,00	
B5 P	6,4	1,40	0,80	0,80	(1,10+1,10)	1,00	5,00	4,00	3,00	12,00	
B6	7,0	1,1	0,8	0,8	(1,50+1,10)	1,30	4,00	3,00	3,00	10,00	
B7 P	8,2	1,7	1,4	1,4	(1,00+1,00)	1,10	6,00	5,00	5,00	16,00	
Ukupno:	7	52	-	-	-	-	35,00	28,00	27,00	90,00	
Prosjek:	-	7,4	1,4	1,10	1,1	-	1,17	5	4,00	3,83	12,86

6.3.2. Miniranje utvrđica S5 i S4

6. lipnja 2020. god., na dva minska polja uz pomoć hidrauličke bušilice sa pontona uz zacjevljivanje bušotina bušeni su zidovi AB konstrukcije oslonjačke utvrđice S5 i betonska ispuna šupljine sanduka konstrukcije oslonjačke utvrđice S4 servisne platforme pristana. Glavni podaci parametara bušenja i miniranja na minskom polju 1 utvrđice S5 su sljedeći:

Volumen zidova betona:

- Zid 1-zapad

$$V_1 = l \cdot d \cdot h = 17,4 \cdot 1,6 \cdot 5,03 = 140,03 \text{ m}^3$$

- Zid 2-istok

$$V_2 = l \cdot d \cdot h = 17,4 \cdot 1,6 \cdot 3,9 = 108,57 \text{ m}^3$$

- Zid 3-jug

$$V_3 = l \cdot d \cdot h = 4,8 \cdot 1,6 \cdot 8,9 = 68,35 \text{ m}^3$$

- Zid 4-sredina

$$V_4 = l \cdot d \cdot h = 4,8 \cdot 1,6 \cdot 3,8 = 29,18 \text{ m}^3$$

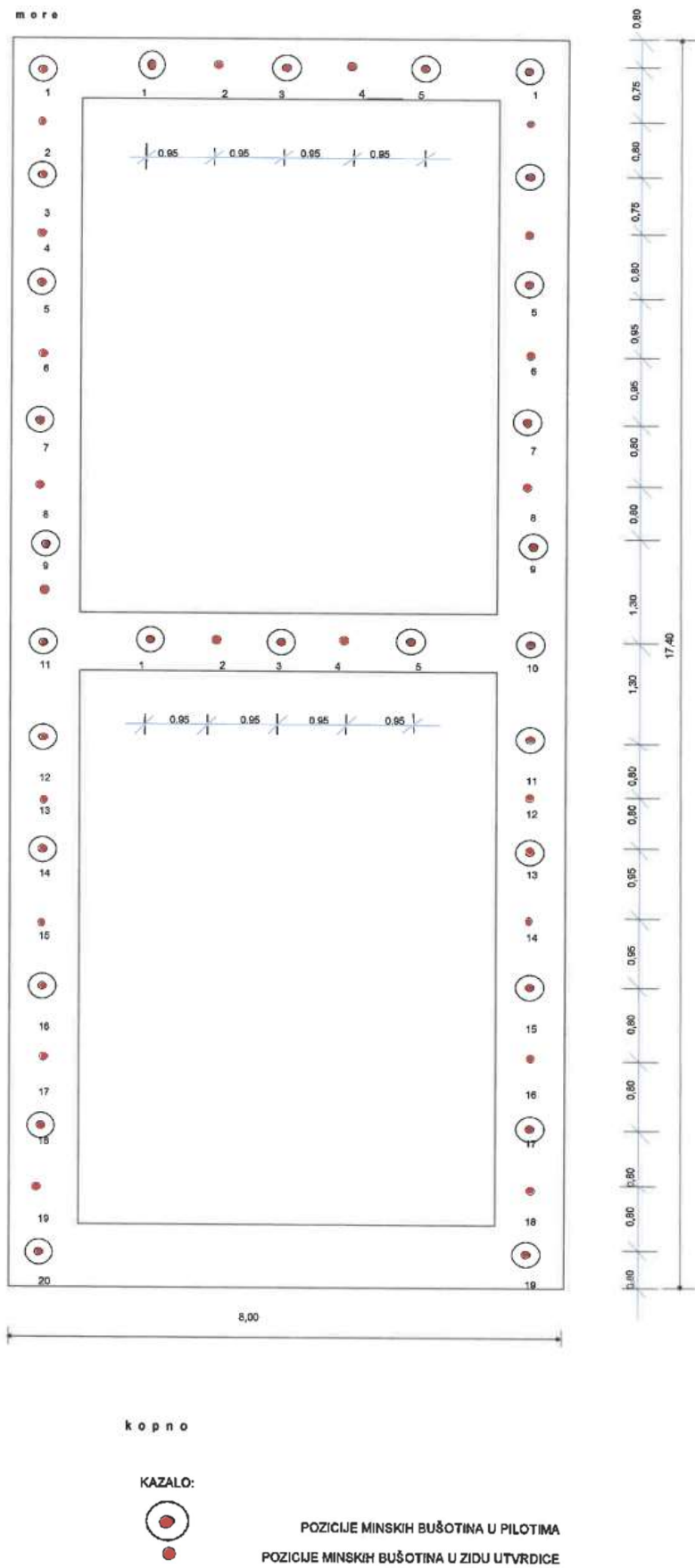
$$\text{Ukupno: } V_{1-4} = 140,03 + 108,57 + 68,35 + 29,18 = 346,13 \text{ m}^3$$

Ostali parametri bušenja su prikazani u tablici 6-6.

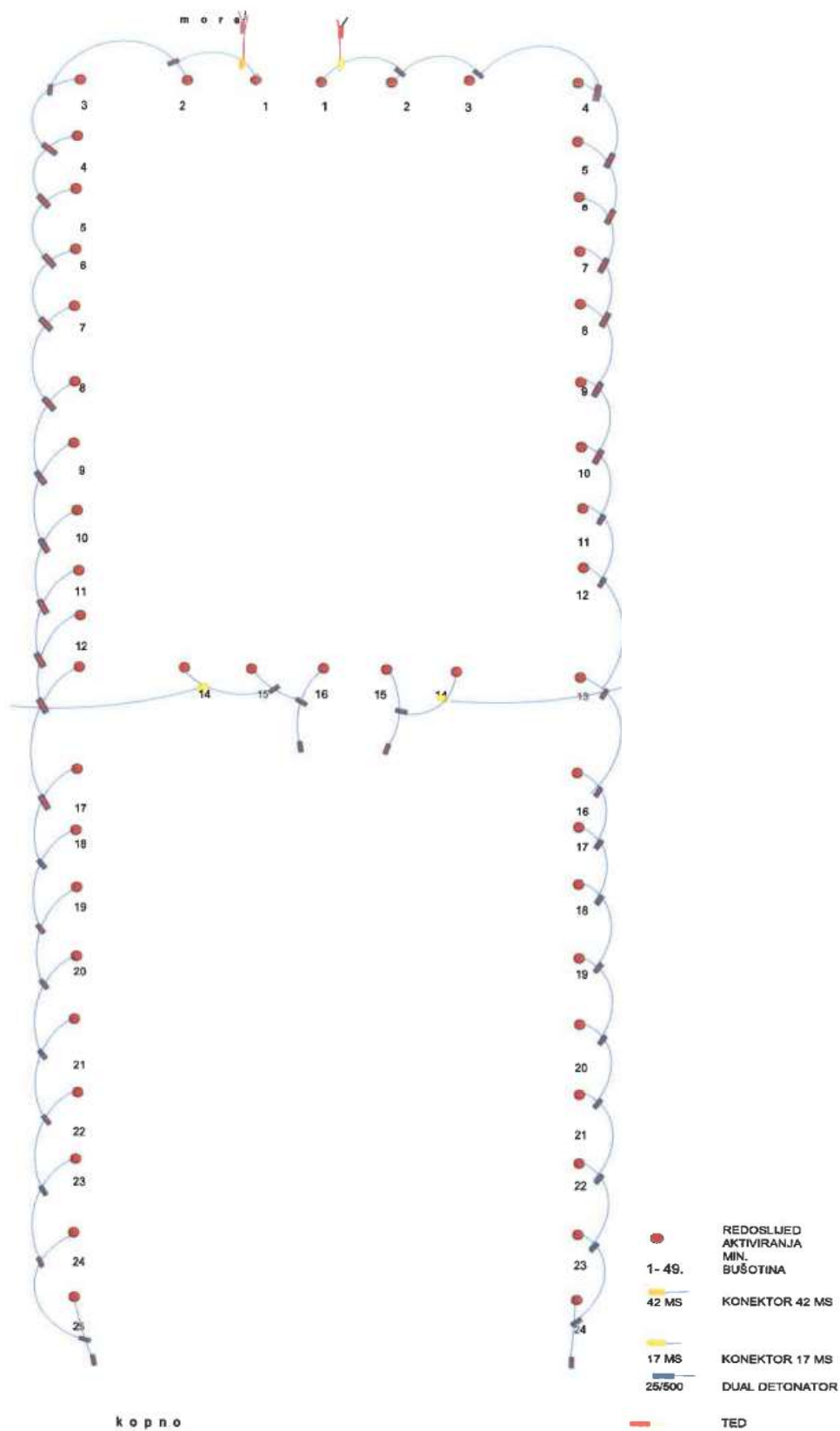
Tablica 6-6. Parametri bušenja utvrđice S5 na minskom polju 1

Promjer bušenja	89 (mm)
Nagib	90 (°)
Prosječni razmak minskih bušotina (a)	0,65 – 1,30 (m)
Prosječna duljina izbojnice (w)	1,6 m
Prosječna dubina bušenja	4,85 (m)
Broj vertikalnih bušotina	49
Ukupno izbušeno	237,70 m

Miniranje na minskom polju 1 je obavljeno na četiri zida utvrđice S5 prema situaciji prikazanoj na slici 6-5., a shema spajanja i redoslijed usporavanja minskih bušotina izvedeno je prema slici 6-6.



Slika 6-5. Situacija minskih bušotina polja 1 na utvrđici S5 (Buljan, 2020.)



Slika 6-6. Shema spajanja i redoslijed usporavanja minskih bušotina polja 1 na utvrđici S5 (Buljan, 2020.)

Utrošak eksploziva na minskom polju 1 utvrđice S5 svakog pojedinačnog zida je prikazan tablicama 6-7, 8, 9 i 10.

Tablica 6-7. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 tvrđice S5 – istočni zid od Cresa

Bušotina	Dubina mora	Dubina bušenja u zidu	Dno bušotine	Dubina punjenja - donji nivo	Dubina punjenja - srednji nivo	Dubina punjenja - gornji nivo ø 60	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN ø 60)			Ukupno	
									Eksploziv donji dio	Eksploziv srednji nivo	Eksploziv gornji nivo		
	m1	m1	m1	m1	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg	
B1 P	7,30	8,70	16,00	1,38	1,38	1,65	1,5+1,5	1,30	5,20	5,20	5,20	15,60	
B2	8,80	6,60	15,40	1,10	0,83	0,83	1,20+1,20	1,40	4,16	3,12	3,12	10,40	
B3 P	7,20	6,80	14,00	1,10	1,10	0,83	1,2+1,2	1,40	4,16	4,16	3,12	11,44	
B4	8,80	6,00	14,80	0,83	0,83	0,83	1,20+1,20	1,10	3,12	3,12	3,12	9,36	
B5 P	9,20	6,00	15,20	1,10	0,83	0,83	1,1+1,1	1,00	4,16	3,12	3,12	10,40	
6	10,00	4,60	14,60	1,10	-	0,55	1,60	1,35	4,16	-	2,08	6,24	
B7 P	9,10	5,10	14,20	1,38	-	1,10	1,30	1,30	5,20	-	4,16	9,36	
8	9,60	4,40	14,00	1,10	-	0,55	1,60	1,35	4,16	-	2,08	6,24	
B9 P	9,70	4,10	13,80	1,10	-	0,83	1,00	1,15	4,16	-	3,12	7,28	
B10P	9,20	4,10	13,30	1,10	-	0,83	1,00	1,15	4,16	-	3,12	7,28	
B11	9,40	3,20	12,60	0,55	-	0,55	1,10	1,00	2,08	-	2,08	4,16	
B12 P	9,10	3,00	12,10	0,55	-	0,55	1,00	0,90	2,08	-	2,08	4,16	
13	9,30	2,40	11,70	0,83	-	-	-	1,50	3,12	-	-	3,12	
B14P	9,00	2,30	11,30	1,10	-	-	-	1,20	4,16	-	-	4,16	
15	9,00	2,00	11,00	0,83	-	-	-	1,20	3,12	-	-	3,12	
B16P	8,50	1,80	10,30	0,90	-	-	-	1,00	3,46	-	-	3,46	
17	8,40	1,80	10,20	0,90	-	-	-	0,90	3,12	-	-	3,12	
B18P	8,50	1,40	9,90	0,55	-	-	-	0,90	2,08	-	-	2,08	
19	7,10	2,60	9,70	0,90	-	-	-	1,70	3,12	-	-	3,12	
B20 P	7,35	1,80	9,15	0,90	-	-	-	0,90	3,12	-	-	3,12	
Ukupno:	20	-	78,70	-	-	-	-	-	72,10	18,72	36,40	127,22	
Prosjeak:	-	8,73	3,94	-	0,97	0,99	0,83	-	1,19	3,61	3,74	3,03	6,36

Tablica 6-8. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 utvrđice S5 – zapadni zid do Omišlja

Bušotina	Dubina mora	Donja kota bušenja	Dubina bušenja u zidu	Dubina punjenja - donji nivo	Dubina punjenja - srednji nivo	Dubina punjenja - gornji nivo	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN ø 60)			Ukupno	
									Eksploziv donji dio	Eksploziv srednji nivo	Eksploziv gornji nivo		
	m1	m1	m1	m1	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg	
B1 P	8,50	16,00	7,50	1,10	1,10	1,10	1,4+1,4	1,40	4,16	4,16	4,16	12,48	
B2	7,00	15,80	8,80	1,10	1,10	0,83	2,2+2,2	1,40	4,16	4,16	3,12	11,44	
B3 P	7,20	16,00	8,80	1,47	1,47	1,10	1,5+1,5	1,80	5,20	5,20	4,16	14,56	
B4	7,60	15,80	8,20	1,10	0,83	0,83	2,0+2,0	1,40	4,16	3,12	3,12	11,44	
B5 P	8,20	15,00	6,80	1,10	1,10	0,83	1,2+1,2	1,40	4,16	4,16	3,12	11,44	
6	8,20	14,80	6,60	1,10	0,83	0,83	1,20+1,20	1,40	4,16	3,12	3,12	10,40	
B7 P	6,60	14,10	7,50	1,38	1,10	1,10	1,2+1,2	1,40	5,20	4,16	4,16	13,52	
8	6,70	13,80	7,10	1,10	0,83	0,83	1,5+1,5	1,30	4,16	3,12	3,12	10,40	
B9 P	6,90	13,30	6,40	1,10	1,10	0,83	1,2+1,1	1,10	4,16	4,16	3,12	11,44	
B10P	6,65	12,40	5,80	1,10	0,83	0,83	1+1	1,00	4,16	3,12	3,12	10,40	
B11 P	7,85	11,95	4,10	1,10	-	0,82	1,00	1,10	4,16	-	3,12	7,28	
12	7,45	11,45	4,00	0,82	-	0,82	1,20	1,20	3,12	-	3,12	6,24	
B13P	7,60	11,30	3,80	1,10	-	0,82	1,00	0,90	4,16	-	3,12	7,28	
14	8,55	10,85	2,40	0,82	-	-	-	1,55	3,12	-	-	3,12	
B15P	8,10	10,30	2,20	0,82	-	-	-	1,30	3,12	-	-	3,12	
16	8,50	9,90	1,40	0,55	-	-	-	0,85	2,08	-	-	2,08	
B17P	8,30	9,80	1,50	0,55	-	-	-	0,95	3,12	-	-	3,12	
18	8,20	9,60	1,40	0,55	-	-	-	0,85	2,08	-	-	2,08	
B19 P	7,90	9,10	1,20	0,55	-	-	-	0,65	2,08	-	-	2,08	
Ukupno:	19	-	95,5	-	-	-	-	-	70,72	38,48	43,68	153,92	
Prosjeak:	-	7,68	12,7	5,03	0,97	1,03	0,89	-	1,21	3,72	3,85	3,36	8,10

Tablica 6-9. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 utvrđice S5 – južni zid

Bušotina	Dubina mora	Dubina bušenja u zidu	Donja kota bušenja	Dubina punjenja - donji nivo	Dubina punjenja - srednji nivo	Dubina punjenja - gornji nivo ø 60	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN ø 60)			
									Eksploziv donji dio	Eksploziv srednji nivo	Eksploziv gornji nivo	Ukupno
	m1	m1		m1	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg
B1 P	6,20	9,10	15,30	1,65	m1	1,65	1,10+1,10	1,95	5,55	5,55	5,55	16,65
B2	6,70	9,00	15,70	1,10	1,10	1,10	2,0+2,0	1,70	4,16	4,16	4,16	12,48
B3 P	6,20	9,00	15,20	1,65	1,65	1,65	1,10+1,10	1,80	5,55	5,55	5,55	16,65
B4	7,20	8,80	15,80	1,10	1,10	1,10	2,0+2,0	1,30	4,16	4,16	4,16	12,48
B5 P	7,00	8,90	15,90	1,65	1,65	1,65	1,10+1,10	1,80	5,55	5,55	5,55	16,65
Ukupno:	5	-	98,9	77,9	-	-	-	-	24,97	24,97	24,97	74,91
Prosjeak:	-	6,66	8,92	15,58	-	-	-	-	4,99	4,99	4,99	14,98

Tablica 6-10. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 utvrđice S5 – srednji zid

Bušotina	Dubina mora	Donja kota bušenja	Dubina bušenja u zidu	Dubina punjenja - donji nivo	Dubina punjenja - gornji nivo ø 60	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN ø 60)			
								Eksploziv donji dio	Eksploziv gornji nivo	Ukupno	
kom	m1	m1	m1	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	
B1 P	8,40	12,60	4,20	1,10	1,10	1,00	1,00	4,16	4,16	8,32	
B 2	8,60	12,70	4,10	0,83	0,55	1,50	1,20	3,12	2,08	5,20	
B3 P	8,90	12,80	3,90	1,10	0,91	1,00	0,90	4,16	3,46	7,62	
B4	8,90	12,60	3,70	0,83	0,55	1,20	1,10	3,12	2,08	5,20	
B5 P	8,80	11,80	3,00	0,55	0,55	1,00	0,90	2,08	2,08	4,16	
Ukupno:	5	-	-	18,90	-	-	-	16,64	13,86	30,50	
Prosjeak:	-	-	-	3,78	0,88	0,73	1,14	1,02	3,3	2,77	6,10

Kao što je već spomenuto, na minskom polju 2 uz pomoć hidrauličke bušilice je bušena betonska ispuna šupljine sanduka konstrukcije oslonjačke utvrđice S4 servisne platforme pristana, poprečni srednji i poprečni sjeverni zid. Glavni podaci parametara bušenja i miniranja na minskom polju 2 utvrđice S4 su sljedeći:

Volumen zidova betona:

- Zid 1

$$V_1 = l \cdot d \cdot h = 6,5 \cdot 1,6 \cdot 5,5 = 23,92 \text{ m}^3$$

- Zid 2 - sredina

$$V_2 = l \cdot d \cdot h = 6,5 \cdot 1,6 \cdot 5,2 = 54,08 \text{ m}^3$$

- Zid 3 - sjever

$$V_3 = l \cdot d \cdot h = 6,5 \cdot 1,6 \cdot 2,0 = 20,80 \text{ m}^3$$

$$\text{Ukupno: } V_{1-3} = 23,92 + 54,08 + 20,80 = 98,80 \text{ m}^3$$

Ostali parametri bušenja na minskom polju 2 su prikazani u tablici 6-11.

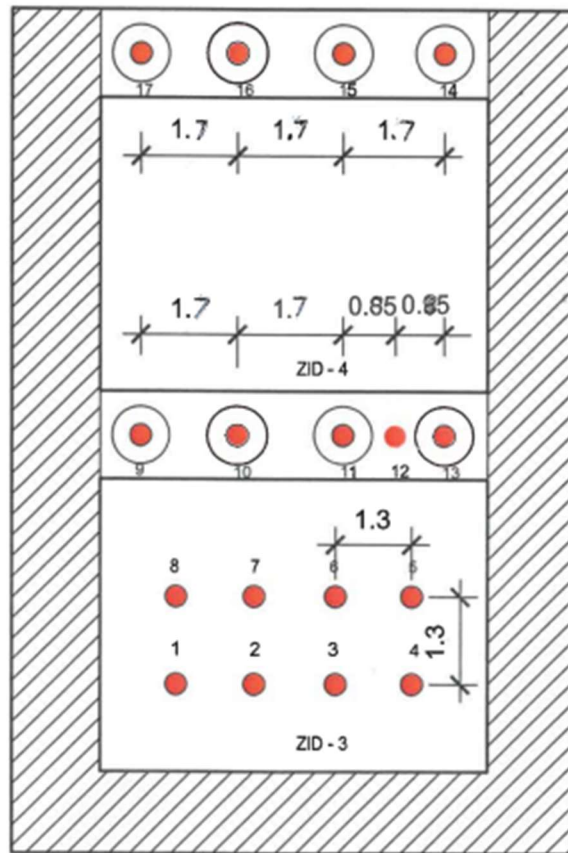
Tablica 6-11. Parametri bušenja utvrđice S4 na minskom polju 2

Promjer bušenja	89 (mm)
Nagib	90 (°)
Prosječni razmak minskih bušotina (a)	0,70 – 1,90 (m)
Prosječna duljina izbojnice (w)	1,6 (m)
Prosječna dubina bušenja	3,24 (m)
Broj vertikalnih bušotina	17
Ukupno izbušeno	55,10 m

Miniranje na minskom polju 2 je obavljeno na tri zida utvrđice S4 prema situaciji prikazanoj na slici 6-7., shema povezivanja i otpucavanja minskih bušotina je prikazana na slici 6-8., a na slici 6-9. se može vidjeti presjek kroz minsku bušotinu B11 na zidu 4, odnosno konstrukciju eksplozivnog punjenja bušotine.

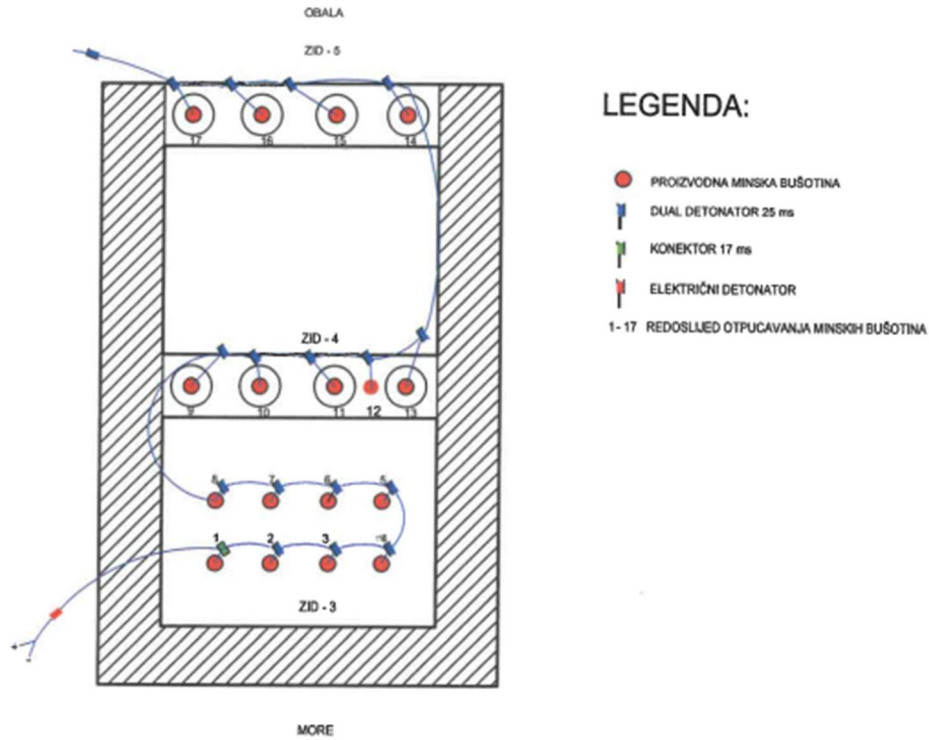
OBALA

ZID - 5

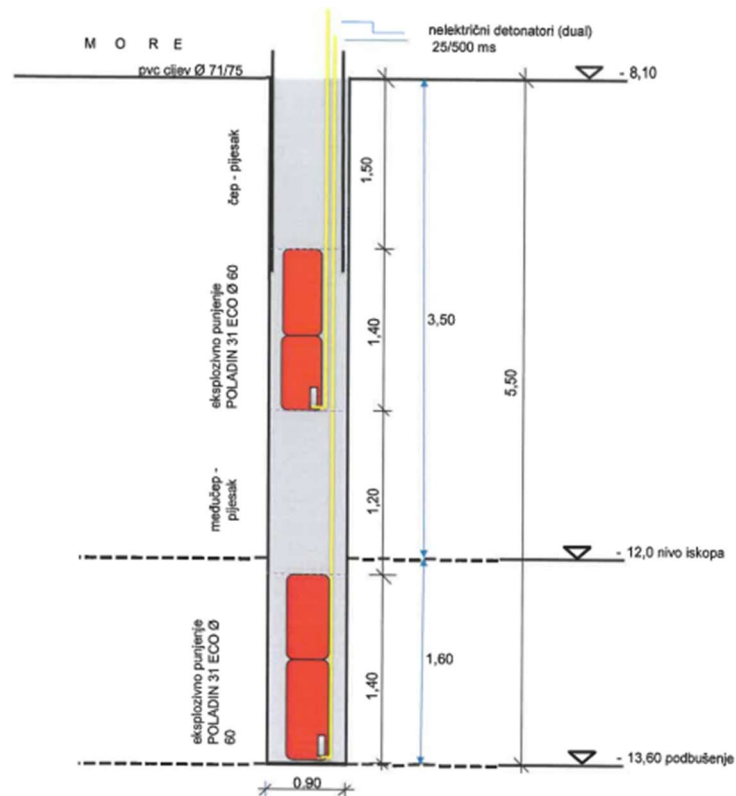


MORE

Slika 6-7. Situacija minskog polja 2 utrdice S4 (Buljan, 2020.)



Slika 6-8. Shema povezivanja i redoslijed otpucavanja minskih bušotina – utvrdica S4 (Buljan, 2020.)



Slika 6-9. Presjek kroz minsku bušotinu B11 – zid 4 utvrdice S4 i konstrukcija eksplozivnog punjenja (Buljan, 2020.)

Utrošak eksploziva na minskom polju 2 utvrđice S4, na pojedinačnim poprečnima zidovima (južni, sjeverni i srednji) je vidljiv u tablici 6-12.

Tablica 6-12. Utrošak eksploziva na minskom polju utvrđice S4 na zidovima

Bušotina	Dubina mora	Dubina bušenja u zidu	Donja kota bušenja	Dubina punjenja - donji nivo	Dubina punjenja - gornji nivo ø 60	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN ø 60, ø 65)			
								Eksploziv donji dio	Eksploziv srednji nivo	Eksploziv gornji nivo	Ukupno
	m1	m1	m1	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg
1	13,00	2,30	15,30	0,80	-	-	1,50	3,54	-	-	3,54
2	13,00	2,30	15,30	0,80	-	-	1,50	3,54	-	-	3,54
3	13,00	2,30	15,30	0,80	-	-	1,50	3,54	-	-	3,54
4	13,00	2,30	15,30	0,80	-	-	1,50	3,54	-	-	3,54
5	13,00	2,30	15,30	0,80	-	-	1,50	3,54	-	-	3,54
6	13,00	2,30	15,30	0,80	-	-	1,50	3,54	-	-	3,54
7	13,00	2,30	15,30	0,80	-	-	1,50	3,54	-	-	3,54
8	13,00	2,30	15,30	0,80	-	-	1,50	3,54	-	-	3,54
9	8,10	5,50	13,60	1,40	1,40	1,20	1,50	5,20	-	5,20	10,40
10	8,10	5,50	13,60	1,40	1,40	1,20	1,50	5,20	-	5,20	10,40
11	8,10	5,50	13,60	1,40	1,40	1,20	1,50	5,20	-	5,20	10,40
12	8,10	5,50	13,60	1,40	1,40	1,20	1,50	5,20	-	5,20	10,40
13	8,10	5,50	13,60	1,40	1,40	1,20	1,50	5,20	-	5,20	10,40
14		2,30	-	0,55	-	-	1,75	2,00	-	-	2,00
15		2,30	-	0,55	-	-	1,75	2,00	-	-	2,00
16		2,30	-	0,55	-	-	1,75	2,00	-	-	2,00
17		2,30	-	0,55	-	-	1,75	1,40	-	-	1,40
Ukupno:	17	-	55,1	-	-	-	-	61,72	-	26,00	87,72
Prosjeak:	-	6,66	3,24	-	-	-	-	3,63	-	5,2	5,16

6.3.3. Miniranje utvrđice S6

12. lipnja 2020. god. na dva minska polja uz pomoć hidrauličke bušilice sa pontona bušeni su zidovi AB konstrukcije oslonjačke utvrđice S6 servisne platforme pristana. Glavni parametri bušenja i miniranja na minskom polju 1 su:

Volumen zidova betona:

- Zid 1-zapad

$$V1=l \cdot d \cdot h=17,4 \cdot 1,6 \cdot 9,84=273,94 \text{ m}^3$$

- Zid 2-istok

$$V2=l \cdot d \cdot h=17,4 \cdot 1,6 \cdot 8,10=225,50 \text{ m}^3$$

- Zid 3-jug

$$V3=l \cdot d \cdot h=4,8 \cdot 1,6 \cdot 8,3=63,70 \text{ m}^3$$

- Zid 4-sredina

$$V4=l \cdot d \cdot h=4,8 \cdot 1,6 \cdot 8,3=63,70 \text{ m}^3$$

- Zid 5-obala

$$V5=l \cdot d \cdot h=4,8 \cdot 1,6 \cdot 6,64=51,0 \text{ m}^3$$

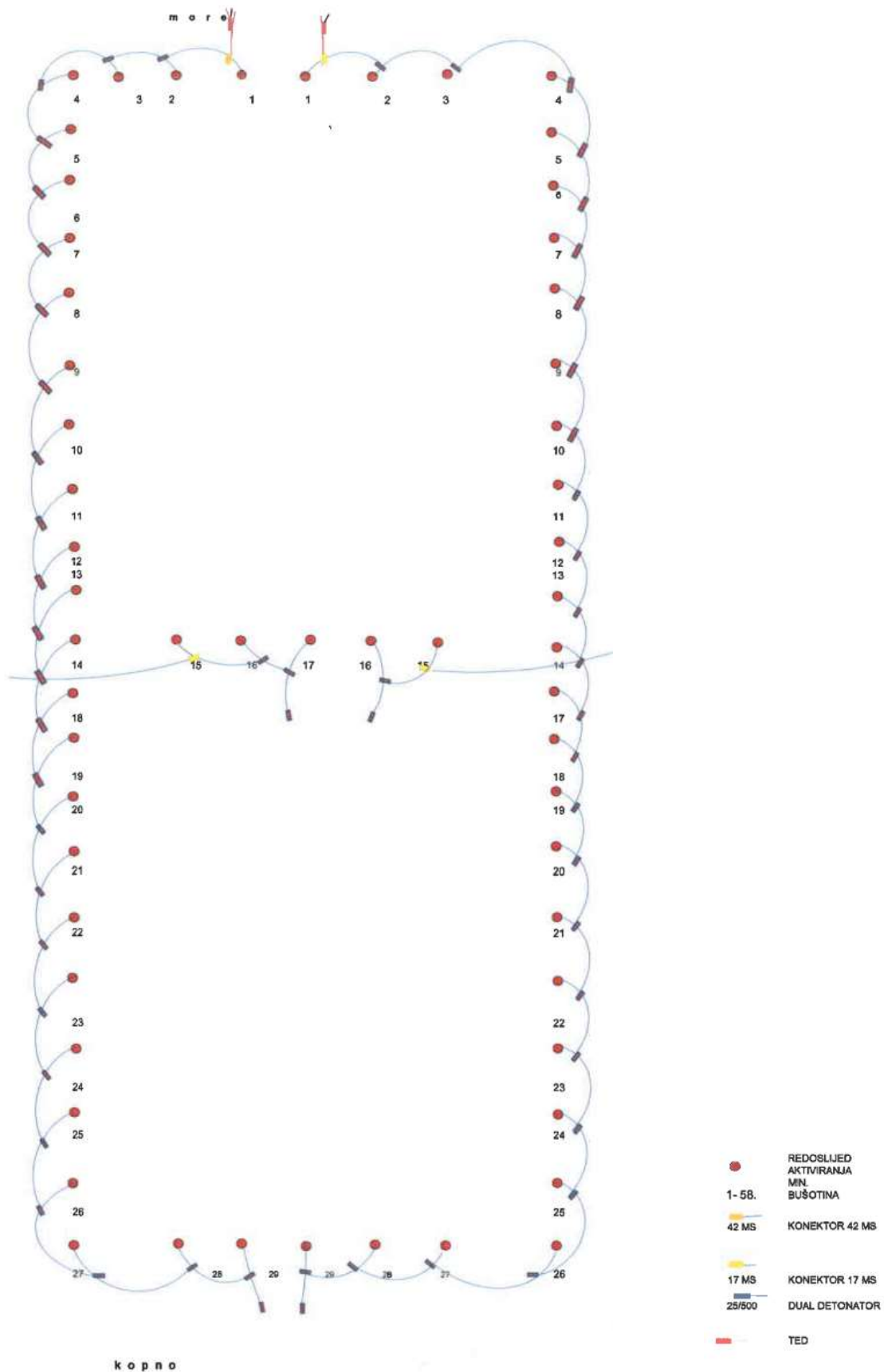
$$\text{Ukupno: } V1-5=273,94+225,50+93,70+63,70+51,0=707,84 \text{ m}^3$$

Ostali parametri bušenja su prikazani u tablici 6-13.

Tablica 6-13. Parametri bušenja utvrđice S6 na minskom polju 1

Promjer bušenja	89 (mm)
Nagib	90 (°)
Prosječni razmak minskih bušotina (a)	0,65 – 1,30 (m)
Prosječna duljina izbojnice (w)	1,6 (m)
Prosječna dubina bušenja	9,03 (m)
Broj vertikalnih bušotina	58
Ukupno izbušeno	523,55 m

Raspored minskih bušotina na minskom polju 1 utvrđice S6 je situacijski prikazan na slici 6-10., dok je shema spajanja i redoslijed otpucavanja minskih bušotina polja 1 prikazan na slici 6-11.



Slika 6-11. Shema spajanja i redosljed usporavanja minskih bušotina na minskom polju 1 utvrđice S6 (Buljan, 2020.)

Na tablicama u nastavku je prikazan utrošak eksploziva na minskom polju 1 za svaki pojedinačni zid koji je miniran na utvrđici S6, te također utrošak eksploziva na minskom polju 2.

Tablica 6-14. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – istočni zid utvrđice prema Cresu

Bušotina	Dubina mora	Dubina bušenja u zidu	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN ø 60, ø 65)					Ukupno
					Eksploziv 1. punjenje	Eksploziv 2. punjenje	Eksploziv 3. punjenje	Eksploziv 4. punjenje	Eksploziv 5. punjenje	
	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg	kg	kg
B1 P	8,30	12,80	1,4+1,4+1,4+1,4	2,20	5,00	5,00	4,16	4,16	4,16	22,48
B2	8,40	8,50	1,8+1,8	1,90	4,60	4,60	3,12	-	-	12,32
B3 P	8,60	10,00	1,4+1,4+1,4	1,80	5,00	5,00	4,16	4,16	-	18,32
B4	10,00	9,00	2,2+2,2	1,60	4,60	4,16	4,16	-	-	12,92
B5 P	10,00	7,00	1,3+1,3	1,30	5,00	4,60	4,16	-	-	13,76
B6	10,50	6,15	1,5+1,5	1,00	4,50	3,12	2,08	-	-	9,70
B7 P	9,40	8,60	1,3+1,3+1,3	1,00	5,00	4,60	4,16	3,12	-	16,88
B8	10,40	7,30	1,5+1,5	2,00	4,60	4,16	3,12	-	-	11,88
B9 P	11,20	9,00	1,3+1,3+1,3	1,50	4,60	4,60	4,16	3,12	-	16,48
B10	11,20	7,70	1,5+1,5	2,00	4,60	4,16	3,12	-	-	11,88
B11 P	8,40	8,80	1,3+1,3+1,3	1,00	5,00	4,60	4,16	3,12	-	16,88
B12	8,70	9,40	2,2+2,2	2,00	4,60	4,16	4,16	-	-	12,92
B13 P	8,70	9,00	1,3+1,3+1,3	1,50	4,60	4,60	4,16	3,12	-	16,48
B14	8,50	7,50	1,5+1,5	1,90	4,60	4,60	3,12	-	-	12,32
B15 P	10,00	7,40	1,4+1,4	1,00	5,00	4,60	4,16	3,12	-	16,88
B16	9,00	7,00	1,5+1,5	1,40	5,00	4,16	3,12	-	-	12,28
B17 P	9,50	7,00	1,30+1,30	1,40	5,00	5,00	4,60	-	-	14,60
B18	9,00	8,30	1,80+1,80	1,90	4,60	4,60	3,12	-	-	12,32
B 19 P	9,60	7,00	1,30+1,30	4,50	4,50	4,16	4,16	-	-	12,82
B 20	10,80	6,30	1,30+1,50	1,00	3,54	3,12	2,08	-	-	8,74
B 21 P	11,00	6,30	1,30+1,30	1,00	4,50	4,50	3,12	-	-	12,12
Ukupno:	21	-	170,05	-	98,44	92,10	76,36	23,92	4,16	294,98
Prosjeak:	9,58	8,10	-	1,66	4,69	4,39	3,64	3,42	4,16	14,05

Tablica 6-15. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – zapadni zid utvrđice prema Omišlju

Bušotina	Dubina mora	Dubina bušenja u zidu	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN ø 60, ø 65)						Ukupno
					Eksploziv 1. punjenje	Eksploziv 2. punjenje	Eksploziv 3. punjenje	Eksploziv 4. punjenje	Eksploziv 5. punjenje	Eksploziv 6. punjenje	
	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
B1 P	5,00	12,30	1,3+1,3+1,3+1,3+1,0	1,20	5,00	5,00	4,16	4,16	2,08	2,08	22,48
B2	5,00	12,40	2,0+2,0+2,0+1,0	2,20	5,00	5,00	4,16	4,16	2,08	-	20,40
B3 P	4,50	12,50	1,3+1,3+1,3+1,3+1,0	1,40	5,00	5,00	4,16	4,16	2,08	2,08	22,48
B4	4,50	12,80	2,2+2,2+2,2	1,30	5,00	4,16	4,16	4,16	-	-	17,48
B5 P	4,80	12,80	1,2+1,2+1,2+1,2	1,30	5,00	5,00	4,16	4,16	0,62	-	18,94
B6	6,00	9,20	2,2+2,2	1,80	5,00	4,50	4,16	-	-	-	13,66
B7 P	6,10	11,10	1,3+1,3+1,3+1,3	1,30	5,00	5,00	4,16	4,16	2,08	-	20,40
B8	6,80	10,80	2+2+2	1,00	5,00	4,16	4,16	3,12	-	-	16,44
B9 P	7,10	10,60	1,3+1,3+1,3+1,3	1,50	5,00	5,00	4,16	4,16	2,08	-	20,40
B10	7,50	9,40	2,20+2,20	2,00	4,60	4,16	4,16	-	-	-	12,92
B11 P	8,00	9,70	1,4+1,4+1,4	1,00	5,00	4,60	4,16	3,12	-	-	16,88
B12	8,60	8,80	2,2+2,2	1,40	5,00	4,16	4,16	-	-	-	13,32
B13 P	9,00	8,60	1,3+1,3+1,3	1,00	4,60	4,60	4,16	3,12	-	-	16,48
B14	9,50	8,50	1,8+1,8	1,90	4,60	4,60	3,12	-	-	-	12,32
B15 P	8,50	9,50	1,4+1,4+1,4	1,00	5,00	4,60	4,16	3,12	-	-	16,88
B16	8,80	8,80	2,2+2,2	1,40	5,00	4,16	4,16	-	-	-	13,32
B17 P	9,50	7,80	1,3+1,3	2,20	5,00	5,00	4,60	-	-	-	14,60
B18	9,20	8,40	1,8+1,8	1,90	4,60	4,60	3,12	-	-	-	12,32
B 19 P	9,40	7,80	1,3+1,3	2,20	5,00	5,00	4,60	-	-	-	14,60
B 20	9,40	7,80	1,8+1,8	1,90	5,00	4,60	3,12	-	-	-	12,72
B 21 P	10,00	6,00	1,3+1,3	1,40	5,00	4,50	-	-	-	-	9,50
Ukupno:	21	-	205,6	-	103,40	97,40	80,96	41,60	11,02	4,16	338,54
Prosjeak:	7,49	9,79	-	1,63	4,92	4,64	4,05	3,78	1,84	4,16	16,12

Tablica 6-16. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – poprečni južni zid utvrđice

Bušotina	Dubina mora	Dubina bušenja u zidu	Međučetep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN ø 60, ø 65)						Ukupno
					Eksploziv 1. punjenje	Eksploziv 2. punjenje	Eksploziv 3. punjenje	Eksploziv 4. punjenje	Eksploziv 5. punjenje	Eksploziv 6. punjenje	
	m1	m1	m1	m1	kg	kg				kg	kg
B1		13,20	1,40+1,40+1,40+1,40+1,0	1,20	5,00	5,00	4,16	4,16	2,08	2,08	22,48
B2 P		12,70	1,40+1,40+1,40+1,40	2,20	5,00	5,00	4,16	4,16	4,16	-	22,48
B3		12,20	2,0+2,0+2,0+1,0	1,00	5,00	5,00	4,16	4,16	2,08	-	20,40
B4 P		12,10	1,30+1,30+1,30+1,30+1,0	1,30	5,00	5,00	4,16	4,16	2,08	2,08	22,48
B5		12,80	2,20+2,20+2,20	2,20	5,00	5,00	4,16	4,16	-	-	18,32
B6 P		10,20	1,40+1,40+1,40+1,40	1,90	5,00	5,00	4,16	4,16	2,08	-	20,40
Ukupno:	6	73,2	-	-	30,00	30,00	24,96	24,96	12,48	4,16	126,56
Prosjeak:	-	12,2	-	1,63	5,00	5,00	4,16	4,16	2,5	2,08	21,09

Tablica 6-17. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – poprečni srednji zid utvrđice

Bušotina	Dubina mora	Dubina bušenja u zidu	Međučetep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN ø 60, ø 65)					Ukupno
					Eksploziv 1. punjenje	Eksploziv 2. punjenje	Eksploziv 3. punjenje	Eksploziv 4. punjenje	Eksploziv 5. punjenje	
kom	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg	kg	kg
B1 P		10,00	1,30+1,30+1,30+1,30	2,00	5,00	5,00	4,16	4,16	2,08	20,40
B2		8,00	1,80+1,80	2,20	5,00	5,00	3,12	-	-	13,12
B3 P		9,00	1,30+1,30+1,30	1,00	5,00	5,00	4,16	3,12	-	17,28
B4		6,00	2,00	1,30	4,16	4,16	-	-	-	8,32
B5 P		8,50	1,30+1,30+1,30	2,20	5,00	5,00	4,16	3,12	-	17,28
Ukupno:	5	41,5	-	-	24,16	24,16	15,60	10,40	2,08	76,40
Prosjeak:	-	8,3	-	1,74	4,83	4,83	3,9	3,47	2,08	15,28

Tablica 6-18. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – poprečni obalni zid utvrđice

Bušotina	Dubina mora	Dubina bušenja u zidu	Međučetep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN ø 60, ø 65)			Ukupno
					Eksploziv 1. punjenje	Eksploziv 2. punjenje	Eksploziv 3. punjenje	
kom	m1	m1	m1	m1	kg	kg		kg
B1 P		7,00	1,30+1,30	1,40	5,00	5,00	4,16	14,16
B2		6,00	1,20+1,20	1,30	4,60	3,12	2,08	9,80
B3 P		7,20	1,30+1,30	1,40	5,00	5,00	4,16	14,16
B4		6,00	1,00+1,00	2,00	5,00	4,16	2,08	11,24
B5 P		7,00	1,30+1,30	1,40	5,00	4,16	4,16	13,32
Ukupno:	5	33,2	-	-	24,60	21,44	16,64	62,68
Prosjeak:		6,64	-	1,50	4,92	4,29	3,33	12,54

Tablica 6-19. Utrošak eksploziva na minskom polju 2 – A.B. greda

	Bušotina	Dubina bušenja	Dubina punjenja - donji nivo	Čep	Eksploziv POLADIN Φ 65
	broj	m1	m1	m1	kg
	1	1,80	0,80	1,20	4,00
	2	1,80	0,80	1,20	3,96
	3	1,80	0,80	1,20	4,00
Ukupno:	3	5,40	-	-	11,96
Prosjek:	-	1,80	0,80	1,20	3,99

6.3.4. Miniranje utvrđice S7

18. lipnja 2020. god. pomoću hidrauličke bušilice sa pontona, na dva minska polja bušeni su zidovi AB konstrukcije oslonjačke utvrđice S7 servisne platforme pristana i AB greda na poziciji utvrđice MD 4. Osnovni parametri bušenja i miniranja na minskom polju 1 su:

Volumen zidova betona:

- Zid 1-zapad

$$V_1 = l \cdot d \cdot h = 14,0 \cdot 1,6 \cdot 7,45 = 166,88 \text{ m}^3$$

- Zid 2-istok

$$V_2 = l \cdot d \cdot h = 14,0 \cdot 1,6 \cdot 8,21 = 183,90 \text{ m}^3$$

- Zid 3-jug

$$V_3 = l \cdot d \cdot h = 6,3 \cdot 1,6 \cdot 8,29 = 83,56 \text{ m}^3$$

- Zid 4-sredina

$$V_4 = l \cdot d \cdot h = 6,3 \cdot 1,6 \cdot 9,30 = 93,74 \text{ m}^3$$

- Zid 5-obala

$$V_5 = l \cdot d \cdot h = 6,3 \cdot 1,6 \cdot 7,34 = 73,99 \text{ m}^3$$

$$\text{Ukupno: } V_{1-5} = 166,88 + 183,90 + 83,56 + 93,74 + 73,99 = 602,07 \text{ m}^3$$

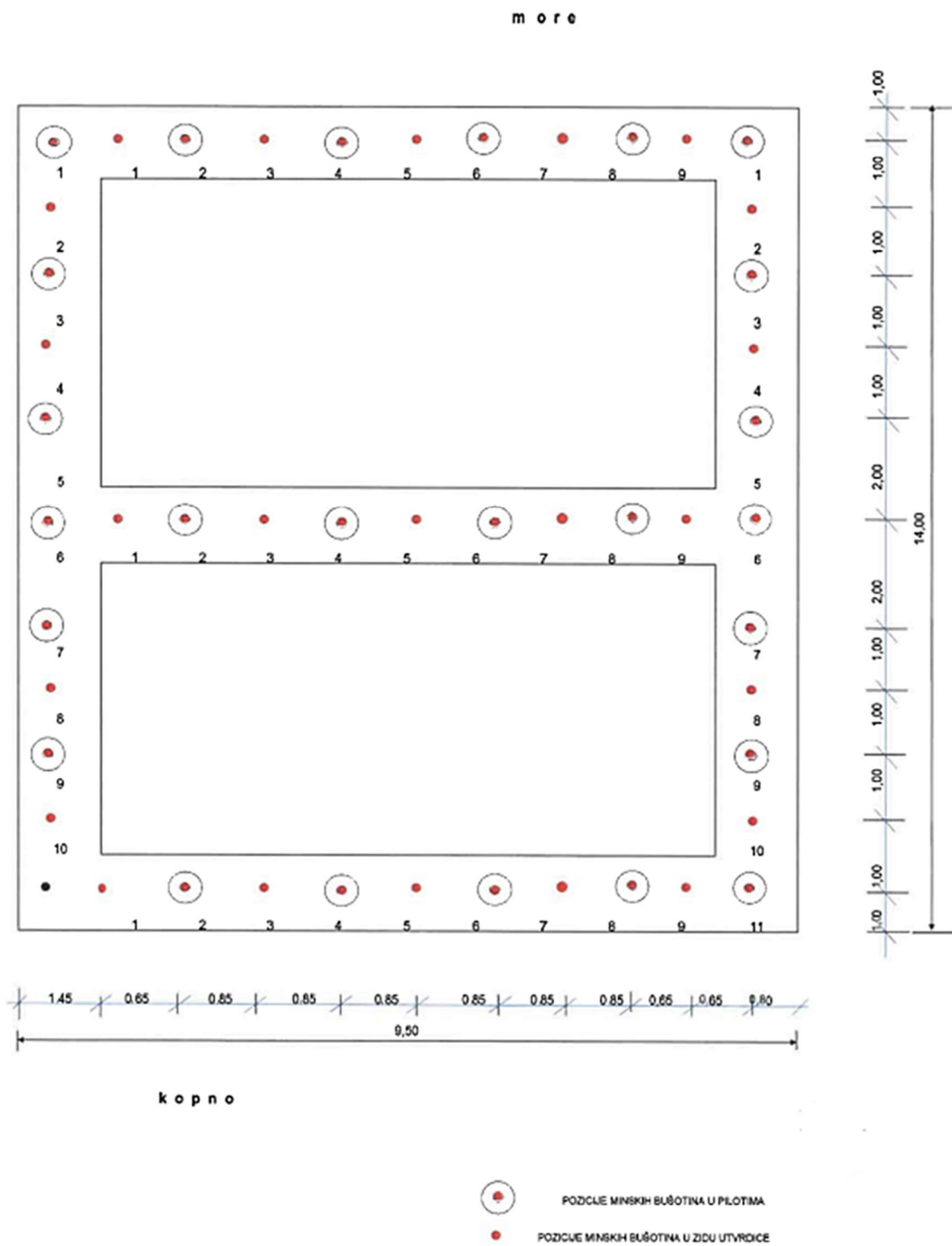
Ostali parametri bušenja su prikazani u tablici 6-20.

Tablica 6-20. Parametri bušenja utvrđice S7 na minskom polju 1

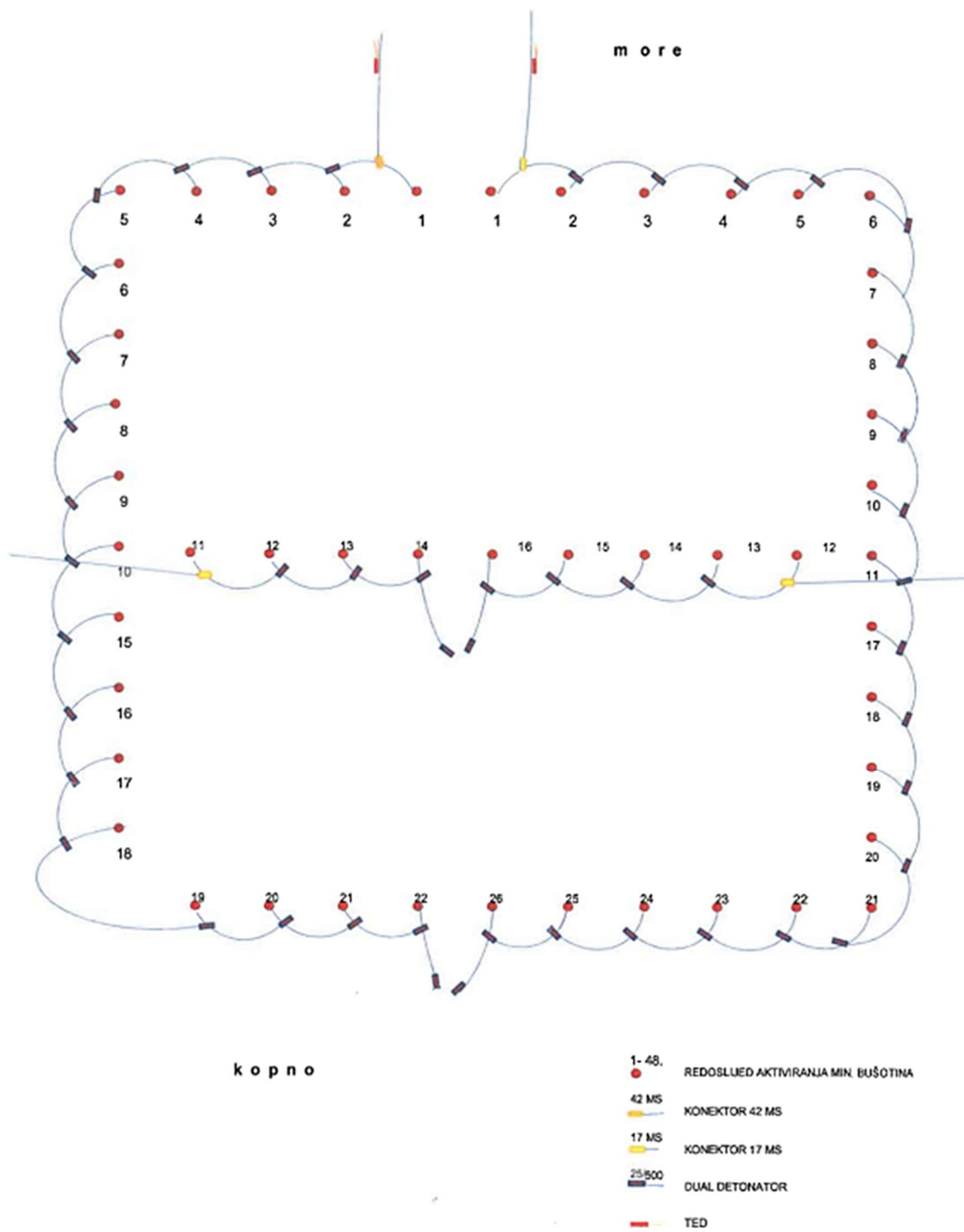
Promjer bušenja	89 (mm)
Nagib	90 (°)
Prosječni razmak minskih bušotina (a)	0,65 – 1,0 (m)
Prosječna duljina izbojnice (w)	1,6 (m)
Prosječna dubina bušenja	8,09 (m)
Broj vertikalnih bušotina	48
Ukupno izbušeno	388,50 m

Raspored minskih bušotina na minskom polju 1 utvrđice S6 je situacijski prikazan na slici 6-12., dok je shema spajanja i redosljed otpucavanja minskih bušotina polja 1 prikazan na slici 6-13.

Na minskom polju 2 se buši greda AB na pozici utvrđice MD 4, čiji ukupni volumen iznosi 18,0 m³, gdje je ukupno na 3 vertikalne bušotine izbušeno 5,40 m sa prosječnom dubinom bušenja od 1,80 m. Ukupna količina utrošenoog eksploziva (Poladin) iznosi 11,96 kg. Shema spajanja i usporavanja minskih bušotina je prikazana na slici 6-14.

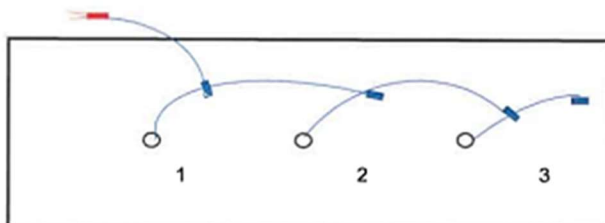


Slika 6-12. Situacija minskih bušotina na minskom polju 1 utvrđice S7 (Buljan, 2020.)



Slika 6-13. Shema spajanja i usporavanja minskih bušotina polja 1 na utvrđici S7 (Buljan, 2020.)

HEMA SPAJANJA I USPORAVANJA MINSKIH BUŠOTINA



KAZALO:

1-3. REDOSLIJED AKTIVIRANJA MIN. BUŠOTINA

25/500 DUAL DETONATOR

TED

Slika 6-14. Shema spajanja i usporavanja minskih bušotina na gredi AB (Buljan, 2020.)

Na tablicama u nastavku je prikazan utrošak eksploziva na pojedinačnim zidovima na minskom polju 1.

Tablica 6-21. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – istočni zid utvrđice S7

Bušotina	Dubina mora	Dubina bušenja u zidu	Dno bušotine	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN e 65)						Ukupno
						Eksploziv 1. punjenje	Eksploziv 2. punjenje	Eksploziv 3. punjenje	Eksploziv 4. punjenje	Eksploziv 5. punjenje	Eksploziv 6. punjenje	
	m1	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
B1 P	9,50	8,00	17,50	1,1+1,1+1,1+1,1	1,10	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	12,50
B2	9,50	8,00	17,50	1,1+1,1+1,1+1,1	1,10	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	12,50
B3P	7,00	10,20	17,20	1,1+1,1+1,1+1,1+1,1	1,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	15,00
B4	8,50	8,50	17,00	1,1+1,1+1,1+1,1	1,60	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	12,50
B5 P	8,20	7,50	15,70	1,1+1,1+1,1+1,1	0,85	2,50	2,50	2,50	2,50	1,25	-	11,25
B6 P	6,80	10,20	17,00	1,1+1,1+1,1+1,1+1,1	1,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	15,00
B7 P	7,50	9,80	17,30	1,1+1,1+1,1+1,1+1,1	1,10	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	15,00
B8	9,50	7,80	17,30	1,1+1,1+1,1+1,1	1,15	2,50	2,50	2,50	2,50	1,25	-	11,25
B9 P	11,00	6,40	17,40	1,1+1,1+1,1	1,00	2,50	2,50	2,50	1,25	-	-	8,75
B10	11,50	5,70	17,20	1,1+1,1+1,1	1,15	2,50	2,50	2,50	1,25	-	-	8,75
Ukupno:	10	-	82,1	-	-	25,00	25,00	25,00	22,50	17,50	7,50	122,50
Prosjek:	-	8,9	8,21	17,1	1,10	2,5	2,5	2,5	2,25	2,19	2,5	12,25

Tablica 6-22. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – zapadni zid utvrđice S7

Bušotina	Dubina mora	Dubina bušenja u zidu	Dno bušotine	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN ø 65)						Ukupno	
						Eksploziv 1. punjenje	Eksploziv 2. punjenje	Eksploziv 3. punjenje	Eksploziv 4. punjenje	Eksploziv 5. punjenje	Eksploziv 6. punjenje		
	m1	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	
B1 P	9,00	9,00	18,00	1,1+1,1+1,1+1,1+1,1	0,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,25	13,75	
B2	8,80	6,80	15,60	1,1+1,1+1,1	1,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	-	10,00	
B3P	10,00	6,30	16,30	1,1+1,1+1,1	1,00	2,50	2,50	2,50	1,25	-	-	8,75	
B4	9,20	7,00	16,20	1,1+1,1+1,1	1,70	2,50	2,50	2,50	2,50	-	-	10,00	
B5 P	8,20	9,50	17,70	1,1+1,1+1,1+1,1	1,40	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	12,50	
B6 P	8,50	9,00	17,50	1,1+1,1+1,1+1,1+1,1	0,75	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,25	13,75	
B7 P	9,50	8,40	17,90	1,1+1,1+1,1+1,1	1,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,25	-	11,25	
B8	10,70	6,00	16,70	1,1+1,1+1,1	1,10	2,50	2,50	2,50	1,25	-	-	8,75	
B9 P	11,00	6,30	17,70	1,1+1,1+1,1	1,00	2,50	2,50	2,50	1,25	-	-	8,75	
B10	11,80	6,20	18,00	1,1+1,1+1,1	1,15	2,50	2,50	2,50	1,25	-	-	8,75	
B11 P	10,20	7,50	17,70	1,1+1,1+1,1+1,1	0,85	2,50	2,50	2,50	2,50	1,25	-	11,25	
Ukupno:	11	-	82	-	-	27,50	27,50	27,50	22,50	10,00	2,50	117,50	
Prosjeck:	-	9,72	7,45	17,21	1,10	1,13	2,5	2,5	2,5	2,05	2	1,25	10,68

Tablica 6-23. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 - južni poprečni zid utvrđice S7

Bušotina	Dubina mora	Dubina bušenja u zidu	Dno bušotine	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN ø 60,ø 65)							Ukupno	
						Eksploziv 1. punjenje	Eksploziv 2. punjenje	Eksploziv 3. punjenje	Eksploziv 4. punjenje	Eksploziv 5. punjenje	Eksploziv 6. punjenje	Eksploziv 7. punjenje		
	m1	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	
B1	10,00	7,30	17,30	1,1+1,1+1,1	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50	-	-	-	10,00	
B2 P	9,80	7,80	17,60	1,1+1,1+1,1+1,1	0,90	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	-	12,50	
B3	11,00	6,70	17,70	1,1+1,1+1,1	1,40	2,50	2,50	2,50	2,50	-	-	-	10,00	
B4 P	10,00	6,80	16,80	1,1+1,1+1,1	1,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	-	-	10,00	
B5	11,10	6,10	17,20	1,1+1,1+1,1	1,15	2,50	2,50	2,50	1,25	-	-	-	8,75	
B6 P	6,80	10,40	17,20	1,1+1,1+1,1+1,1+1,1	1,80	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	15,00	
B7	7,80	10,50	18,30	1,1+1,1+1,1+1,1+1,1	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	15,00	
B8 P	7,80	10,80	18,60	1,1+1,1+1,1+1,1+1,1+1,1	0,70	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	13,00	
B9	7,50	8,20	15,70	1,1+1,1+1,1+1,1	1,30	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	-	-	10,00	
Ukupno:	9	-	74,6	-	12,75	21,50	21,50	21,50	20,25	11,50	7,00	1,00	104,25	
Prosjeck:	-	9,09	8,29	17,38	1,10	1,42	2,39	2,39	2,39	2,25	2,3	2,33	1	10,68

Tablica 6-24. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – poprečni srednji zid utvrđice S7

Bušotina	Dubina mora	Dubina bušenja u zidu	Dno bušotine	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN ø 65)						Ukupno
						Eksploziv 1. punjenje	Eksploziv 2. punjenje	Eksploziv 3. punjenje	Eksploziv 4. punjenje	Eksploziv 5. punjenje	Eksploziv 6. punjenje	
	m1	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
B1	6,80	10,60	17,40	1,1+1,1+1,1+1,1+1,1	2,10	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	15,00
B2 P	7,80	9,50	17,30	1,1+1,1+1,1+1,1+1,1	1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	15,00
B3	7,80	9,20	17,00	1,1+1,1+1,1+1,1	0,70	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	12,50
B4 P	8,40	9,00	17,40	1,1+1,1+1,1+1,1	2,20	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	12,50
B5	8,10	9,80	17,90	1,1+1,1+1,1+1,1+1,1	1,30	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	15,00
B6 P	7,40	10,00	17,40	1,1+1,1+1,1+1,1+1,1	1,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	15,00
B7 7	8,30	8,70	17,00	1,1+1,1+1,1+1,1	1,60	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	12,50
B8 P	8,50	8,50	17,00	1,1+1,1+1,1+1,1	1,60	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	12,50
B9	8,80	8,40	17,20	1,1+1,1+1,1+1,1	1,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	12,50
Ukupno:	9	-	83,70	-	-	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	10,00	122,50
Prosjeck:	-	7,99	9,30	17,29	1,10	1,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	13,61

Tablica 6-25. Utrošak eksploziva na minskom polju 1 – poprečni obalni zid utvrđice S7

Bušotina	Dubina mora	Dubina bušenja u zidu	Dno bušotine	Međučep - pijesak	Čep	Eksploziv (POLADIN ø 65)						Ukupno
						Eksploziv 1. punjenje (dno buš.)	Eksploziv 2. punjenje	Eksploziv 3. punjenje	Eksploziv 4. punjenje	Eksploziv 5. punjenje	Eksploziv 6. punjenje	
	m1	m1	m1	m1	m1	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
B1	11,00	6,50	17,50	1,1+1,1+1,1	1,20	2,50	2,50	2,50	2,50	-	-	10,00
B2 P	11,50	6,60	18,10	1,1+1,1+1,1	1,30	2,50	2,50	2,50	2,50	-	-	10,00
B3	7,20	9,80	17,00	1,1+1,1+1,1+1,1+1,1	1,30	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	15,00
B4 P	11,50	6,60	18,10	1,1+1,1+1,1	1,30	2,50	2,50	2,50	2,50	-	-	10,00
B5	7,00	10,00	17,00	1,1+3,0+1,1+1,1	1,20	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	12,50
B6 P	11,50	6,70	18,20	1,1+1,1+1,1	1,40	2,50	2,50	2,50	2,50	-	-	10,00
B7	7,00	6,90	13,90	1,1+1,1+1,1	1,50	2,50	2,50	2,50	1,25	-	-	8,75
B8 P	11,00	6,80	17,80	1,1+1,1+1,1	1,50	2,50	2,50	2,50	2,50	-	-	10,00
B9	11,00	6,20	17,20	1,1+1,1+1,1	0,90	2,50	2,50	2,50	2,50	-	-	10,00
Ukupno:	9	-	66,1	-	-	22,50	22,50	22,50	21,25	5,00	2,50	96,25
Prosjek:	-	9,86	7,34	17,2	1,10	2,50	2,50	2,50	2,36	2,50	2,50	10,69

7. MJERENJE SEIZMIČKIH UTJECAJA MINIRANJA TE TLAKA PODVODNOG UDARNOG VALA

Prilikom izvođenja miniranja na rušenju podvodnih utvrđica izvođena su mjerenja seizmičkih utjecaja miniranja, uglavnom na izgrađenim ili djelomično izgrađenim pilotima nove obale. Tlak podvodnog udarnog vala mjereno je na jednom do tri mjerna mjesta, hidrofona. Mjerenja su izvođena prilikom miniranja 18.05.; 09.06.; 12.06.; i 18.06.2020. Pri tome su prva miniranja za utvrđice S4, 18.05.2020. ujedno bila i probna miniranja.

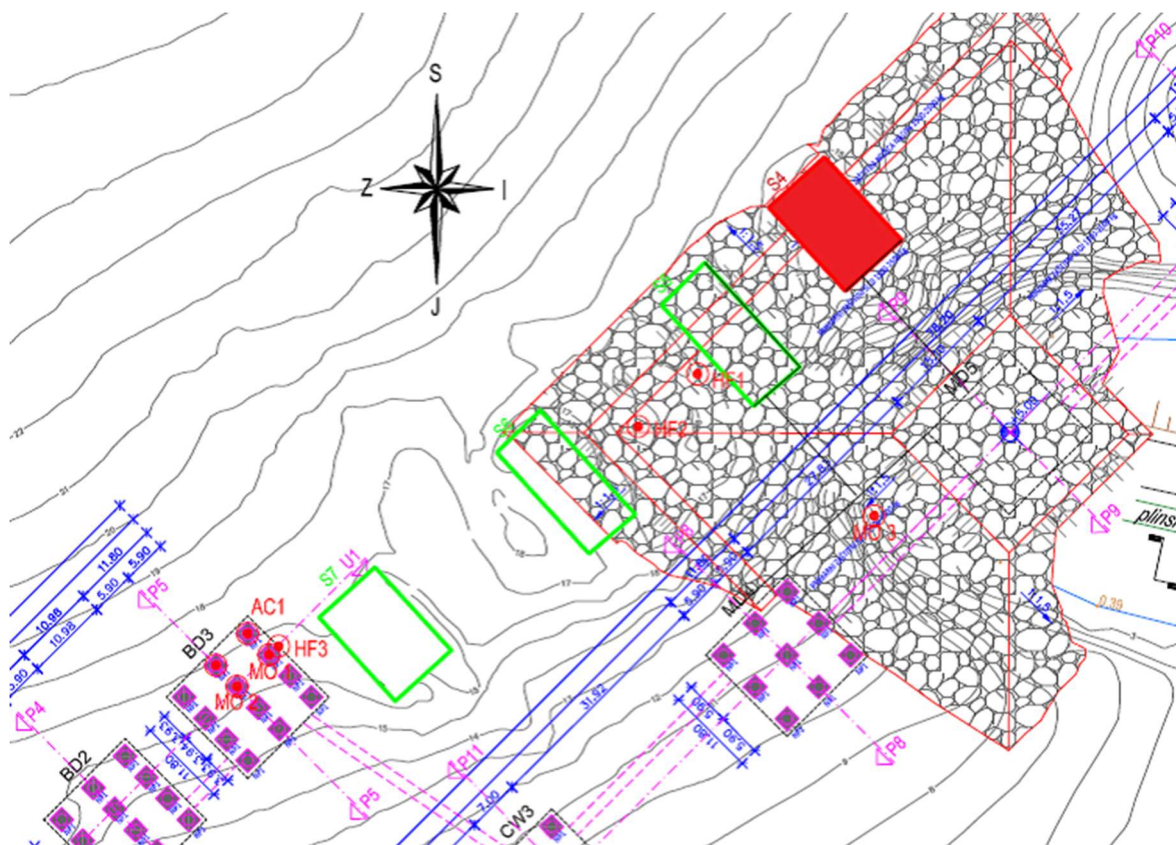
Kriterij mogućnosti nastanka oštećenja na pilotu predstavljala je horizontalna sila izazvana akceleracijom zbog izvođenja miniranja dok je tlak udarnog vala u vodi mjereno kako bi se eventualno procijenilo impulsno naprezanje na najbližim pilotima zbog djelovanja impulsa tlaka udarnog vala u vodi. Na bazi mjerenja brzina oscilacija na pilotima, ocijenjen je mogući utjecaj miniranja na pilote novih utvrđica u skladu sa zahtjevima norme HRN DIN 4150: 1-3; 2011.

Građevinskim projektom definirana su dozvoljena vršna naprezanja na pilotima. obzirom na položaj novih utvrđica u odnosu na postojeće, trenutno je najkritičniji položaj pilota utvrđice BD3. Kod utvrđice BD3 najkritičniji piloti nalaze se na dubini 17 m. Dijametri pilota su 1,5 m. Ukupna visina iznad temeljnog tla iznosi 19,4 m. Ukupna visina pilota gledano od točke upetosti iznosi 22,5 m. Ukupna horizontalna sila (F) koju pilot može prenijeti uz koeficijent sigurnosti $F_s = 1,5$ iznosi $F = 800$ kN. Kada se uzme u obzir da se rezultanta pritiska fluida na pilot, sila F, nalazi oko 10 m iznad točke upetosti, ukupni moment koji stvara predmetna sila na području upetosti pilota iznosi 7965 kNm. Uz suglasnost projektanta predložen je program mjerenja utjecaja na pilote utvrđice BD 3 prilikom probnog miniranja utvrđice S4. Prema rezultatima mjerenja udarnog vala u vodi i akceleracija na pilotima BD3 evaluirati će se utjecaj miniranja i dati smjernice za miniranja utvrđica S5, S6 i S7 koje su bliže utvrđici BD 3.

Vršni tlak hidrodinamičkog vala u vodi mjereno pored pilota na dubini od 9 m iznosi 73,6 kPa. Za ilustraciju, dozvoljena vrijednost za ribe (zbog mjehura je 100 kPa a za ljude oko 650 kPa). Brzine oscilacija mjerene na dva pilota, u najvećoj rezultanti su 40,16 mm/s a na drugom 46,6 mm/s, s pripadajućim akceleracijama (komponentnim) od 0,6-1,5 g. Norma HRN DIN 4150 dozvoljava za masivne temeljne strukture brzine do 100 mm/s.

7.1. Mjerenja prilikom miniranja utvrđice S4 18.05.2020.

Položaj mjesta mjerenja i raspored mjernih točaka prikazan je na slici 7-1.



Slika 7-1. Položaj mjesta mjerenja i raspored mjernih točaka prilikom miniranja utvrđice S4 (Buljan, 2020.)

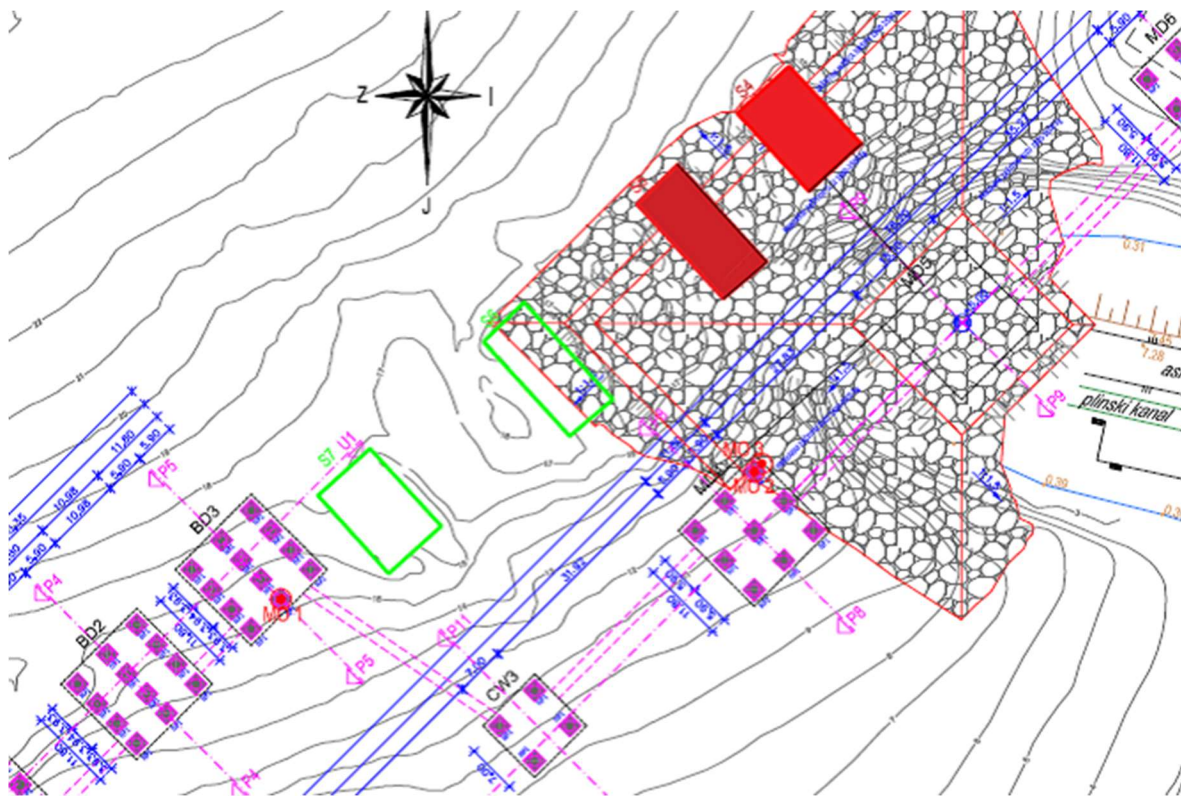
Rezultati mjerenja prilikom miniranja utvrđice su prikazani u tablici 7-1.

Tablica 7-1. Rezultati mjerenja prilikom miniranja utvrđice S4

I.PROBNO MINIRANJE 18.05.2020. UTVRĐICA S4													
Mjerno mjesto	Instrument	Ser. broj	Udaljenost [m]	Masa eksploziva po stupnju paljenja (kg)	Tran [mm/s]	Vert [mm/s]	Long [mm/s]	Pvs [mm/s]	F _{tran} [Hz]	F _{vert} [Hz]	F _{long} [Hz]	p [kPa]	NAPO MENA
HF1	MiniMat e Plus	BE 12944	22,0	6,0								overload	330 kPa
HF2	MiniMat e Plus	BE 12945	32,0									*	
HF3	BlastMat e III	BA 7958	87,0									73,62	
MO - 1	MiniMat e Blaster	BE 13570	88,0		22,2	42,8	10,67	46,60	37,0	37,0	28,0		
MO - 2	MiniMat e Blaster	5938	94,0		21,3	38,6	15,75	40,16	24,0	37,0	32,0		
MO - 3	BlastMat e II	1280	30,0		31,7	35,3	25,53	36,32	15,0	34,0	6,0		

7.2. Mjerenja prilikom miniranja utvrđice S5 i ostataka utvrđice S4 09.06.2020.

Položaj mjesta mjerenja i raspored mjernih točaka prikazan je na slici 7-2.



Slika 7-2. Položaj mjesta mjerenja i raspored mjernih točaka prilikom miniranja utvrđice S5 i ostataka S4 (Buljan, 2020.)

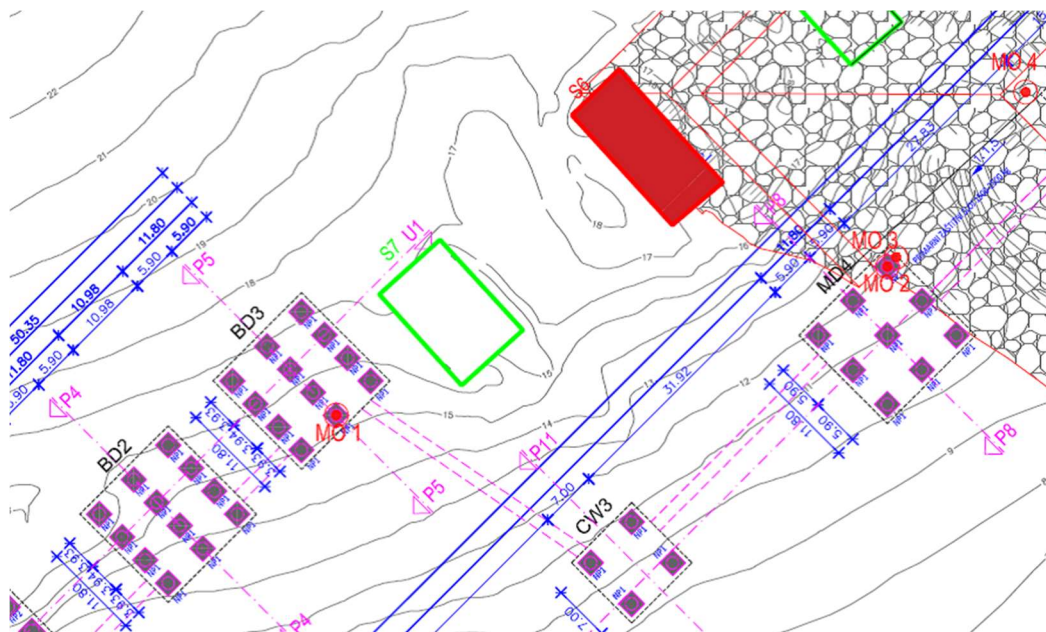
Rezultati mjerenja prilikom miniranja utvrđica su prikazani u tablici 7-2.

Tablica 7-2. Rezultati mjerenja prilikom miniranja utvrđice S5 i ostataka utvrđice S4

I. MINIRANJE - 09.06.2020. UTVRĐICA S4 15:10 h													
Mjerno mjesto	Instrument	Ser. broj	Udaljenost [m]	Masa eksploziva po stupnju paljenja (kg)	Tran [mm/s]	Vert [mm/s]	Long [mm/s]	Pvs [mm/s]	F _{tran} [Hz]	F _{vert} [Hz]	F _{long} [Hz]	P [kPa]	NAPOMENA
MO-1	Minimate Blaster	BE 13570	94,0	3,54	8,12	15,37	6,985	16,2	57,0	43,0	26,0		udaljeno st od utvrđice S4
MO-2	MiniMate	5938	40,0		14,2	23,11	15,49	27,6	39,0	51,0	47,0		udaljeno st od utvrđice S4
MO-3	MiniMate Plus	BE 12945	39,0									30,05	HF
II. MINIRANJE - 09.06.2020. UTVRĐICA S5 15:15 h													
Mjerno mjesto	Instrument	Ser. broj	Udaljenost [m]	Masa eksploziva po stupnju paljenja (kg)	Tran [mm/s]	Vert [mm/s]	Long [mm/s]	Pvs [mm/s]	F _{tran} [Hz]	F _{vert} [Hz]	F _{long} [Hz]	P [kPa]	NAPOMENA
MO-1	Minimate Blaster	BE 13570	75,0	5,55	8,25	28,57	14,60	29,6	11,0	43,0	43,0		
MO-2	MiniMate	5938	25,0		22,3	48,77	29,46	50,3	17,0	51,0	47,0		
MO-3	MiniMate Plus	BE 12945	24,0									111,60	HF

7.3. Mjerenja prilikom miniranja utvrđice S6 12.06.2020.

Položaj mjesta mjerenja i raspored mjernih točaka prikazan je na slici 7-3.



Slika 7-3. Položaj mjesta miniranja i raspored mjernih točaka prilikom miniranja utvrđice S6 (Buljan, 2020.)

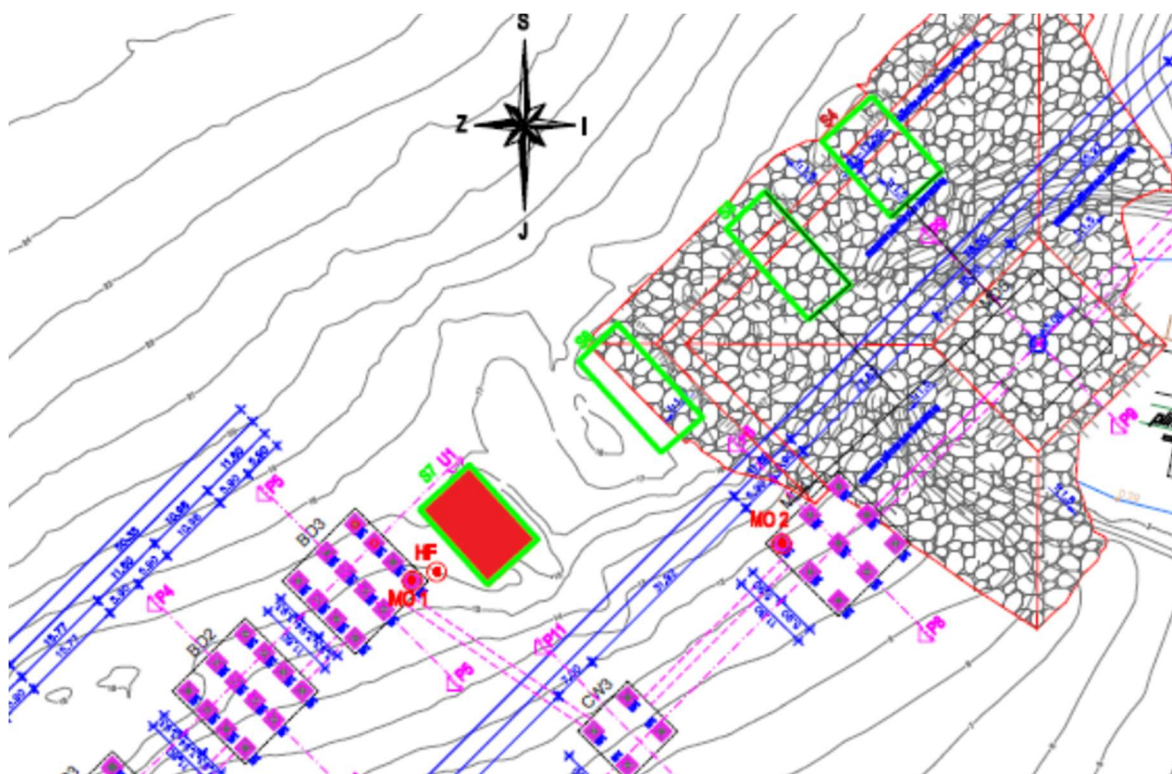
Rezultati mjerenja prilikom miniranja utvrđice S6 su prikazani u tablici 7-3.

Tablica 7-3. Rezultati mjerenja prilikom miniranja utvrđice S6

I. MINIRANJE - 12.06.2020. 15:10 h														
Mjerno mjesto	Instrument	Ser. broj	Udaljenost [m]	Količina eksploziva po stupnju paljenja (kg)	Tran [mm/s]	Vert [mm/s]	Long [mm/s]	Pvs [mm/s]	F _{tran} [Hz]	F _{vert} [Hz]	F _{long} [Hz]	P [kPa]	NAPO MENA	
MO - 1	Minimate Blaster	BE 13570	46,0	5,0	12,8	51,3	29,8	51,63	30	47	34			
MO - 2	MiniMat e	5938	22,0		66,0	107,7	75,2	113,5	24	43	26			
MO - 3	MiniMat e Plus	BE 12945	22,5										236,4	
MO - 4	BlastMat e II	1280	38,0		9,9	42,93	19,3	43,51	26	24	32			

7.4. Mjerenja prilikom miniranja utvrđice S7 18.06.2020.

Položaj mjesta mjerenja i raspored mjernih točaka prikazan je na slici 7-4.



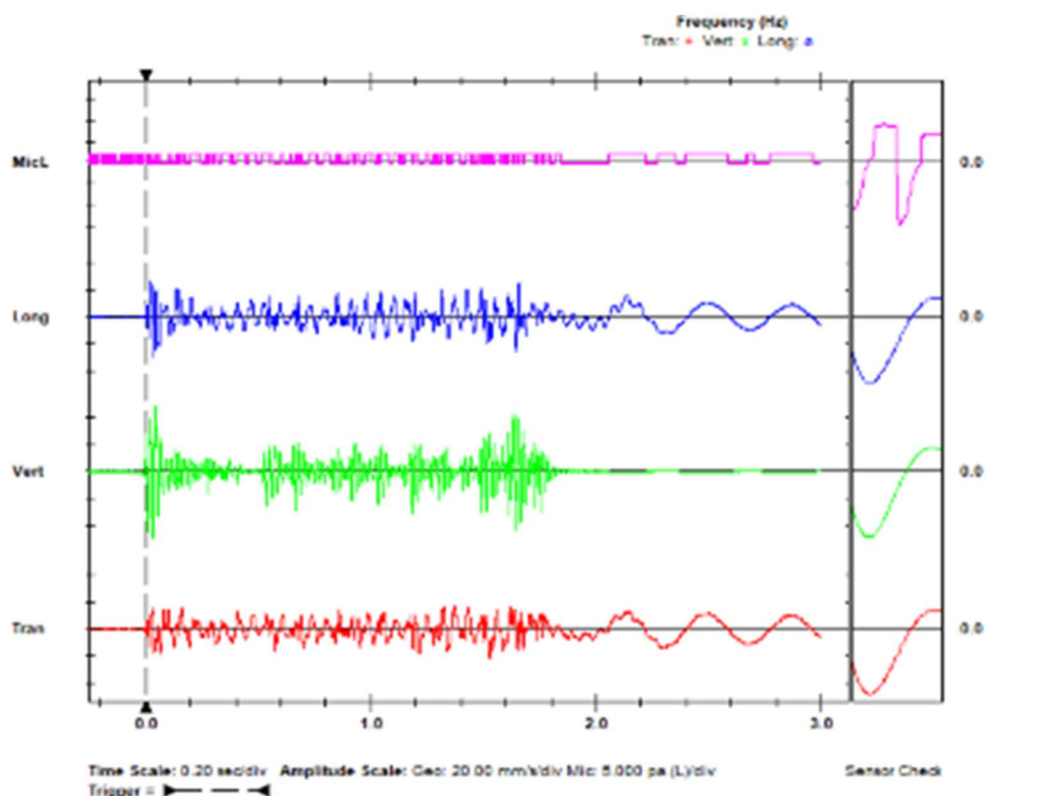
Slika 7-4. Položaj mjesta miniranja i raspored mjernih točaka prilikom miniranja utvrđice S7 (Buljan, 2020.)

Rezultati mjerenja prilikom miniranja utvrđice S7 su prikazani u tablici 7-4.

Tablica 7-4. Rezultati mjerenja prilikom miniranja utvrđice S7

I. MINIRANJE - 18.06.2020. 15:38 h													
Mjerno mjesto	Instrument	Ser. broj	Udaljenost [m]	Količina eksploziva po stupnju paljenja (kg)	Tran [mm/s]	Vert [mm/s]	Long [mm/s]	Pvs [mm/s]	F _{tra} [Hz]	F _{ver} [Hz]	F _{lon} [Hz]	P [kPa]	NAPOMENA
MO - 1	Minimate Blaster	BE 13570	7	25	185,7	*	136,9	*	37	51	3		* out of range (15:38)
MO - 2	MiniMate	5938	39	25	28,45	55,880	27,43	59,88	5	47	37		
MO - 3	MiniMate Plus	BE 12945	6									*	* out of range (672,6 KPa preko Analysis)

Karakterističan zapis mjerenja oscilacija na pilotima prikazan je na slici 7-5.



Slika 7-5. Karakterističan zapis mjerenja brzina oscilacija na pilotima (Dobrilović, 2020.)

8. ANALIZA I ZAKLJUČAK

Prilikom izvođenja miniranja za uklanjanje podvodnih utvrđica prilikom izgradnje novih obalnih elemenata postojala su ograničenja vezana na izvođenje radova. Miniranja su se izvodila unutar probnog režima jer projektom uklanjanja ona nisu bila predviđena. Na taj način obavili su se nužni radovi na rušenju koji nisu bili mogući mehaničkim iskopom hidrauličkim bagerima sa otkopnim čekićima.

Posebno ograničenje predstavljali su novoizgrađeni piloti za koje nisu bili prethodno određeni parametri seizmičkih utjecaja, već su se tijekom izvođenja obavljala usklađivanja s zahtjevima norme HRN DIN 4150: 1-3; 2011 te s mišljenjem projektanta novih pilota.

Primjenom projektnih rješenja i opreznih miniranja s i do 3 razdjelna punjenja po bušotini uz ugrađene mase punjenja u skladu s projektnim rješenjima, osigurana je izvodljivost miniranja bez opasnosti oštećenja novih pilota.

Prilikom svih izvedenih miniranja nije došlo do oštećenja na pilotima dok su miniranja učinkovito destruirala predmetne utvrđice. Zahtjev za najveću dozvoljenu brzinu oscilacija od 100 mm/s jedino je pređen u slučaju miniranja utvrđice S7 budući da je udaljenost do pilota izosila samo 6 m. Pri tome miniranju nije došlo do oštećenja pilota.

Primjer izvedenih radova pokazuje da primjenom utemeljenih projektnih rješenja, ispravnim i odgovornim izvođenjem minerskih radova je moguće, uz primjenu režima praćenja utjecaja, provesti u djelo i najzahtjevnije projekte.

9. LITERATURA

BULJAN, M., 2020. Projekt uklanjanja postojećeg pristana u Omišlju na otoku Krku. Elaborat podmorskog miniranja. Split

COLE, R. H., 1948. Underwater explosions. Princeton: Princeton University Press

DOBRILOVIĆ, M., BOHANEK, V., 2020. Projekt bušenja i miniranja za rušenje prihvatnih utvrđica u sklopu projekta izrade prihvatnog terminala za ukapljeni naftni plin na otoku Krku. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

ESTER Z., 2005. Miniranje I: Eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

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.

GLASOVIĆ, I., 2014. Usporedba metoda proračuna seizmičkog utjecaja podvodnog miniranja u splitskoj luci. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

GUSTAFSSON, R., 1982. Swedish Blasting Technique. Dynamit Nobel Wien. Austria

GVOZDEN A., 2018. Udarni val u vodi i njegov utjecaj na okoliš. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

HRŽENJAK, P., 2018. Istraživanje djelovanja miniranja na okolinu površinskog kopa „Sv.Juraj – Sv.Kajo“. Izvještaj. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

KEEVIN, T. M., HEMPEN, G. L., 1997. The environmental effects of underwater explosions with methods to mitigate impacts. St. Louis: Corps of engineers

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

LEWIS, J. A., 1996. Effects of underwater explosions on life in the sea (No. DSTO-GD0080). Canberra: Defence science and technology organisation

OLOFSSON, O.S., 1990. Applied Explosives Technology for Construction and Mining. Applex. Pennsylvania University

RAO, S. K., VIJAYAKUMAR, R., 2012. Underwater Explosion and Effect on Structures. International Journal of Innovative Research and Development. 1(10), str. 200-234

ŽEPAČKIĆ, I., 2014. Tlačni udarni val kod podvodnog miniranja. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

ŽUPAN, J., 2012. Seizmički utjecaji miniranja prilikom iskopa miniranjem kanala usisnog cjevovoda hotela Marijan. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.