

# Utjecaj stijenske mase na brzinu detonacije ANFO eksploziva

---

Jerković, Tina

Undergraduate thesis / Završni 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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:439534>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-24**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**UTJECAJ STIJENSKE MASE NA BRZINU DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA**

Završni rad

Tina Jerković

R4536

Zagreb, 2023.



KLASA: 602-01/23-01/102  
URBROJ: 251-70-11-23-2  
U Zagrebu, 03.07.2023.

Tina Jerković, studentica

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/102, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 28.06.2023. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### UTJECAJ STIJENSKE MASE NA BRZINU DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Izv.prof.dr.sc. Vječislav Bohanek nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

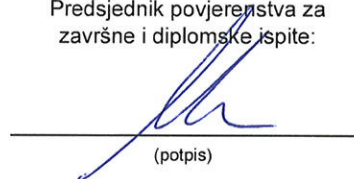


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vječislav Bohanek

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

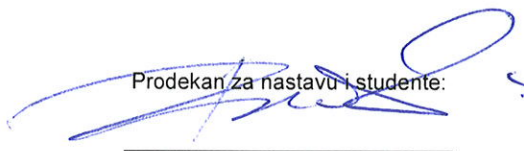


(potpis)

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)

**Zahvala:**

Zadovoljstvo mi je zahvaliti se Dr. Peter Schimeku i tvrtki VA Erzberg GmbH koji su omogućili izvođenje mjerenja na površinskom kopu Erzberg. Pored toga zahvaljujem se Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.mont. Philipp Hartliebu i tehničaru Gerold Wölfleru na organizaciji i sudjelovanju u ispitivanju za potrebe završnog rada.

## **UTJECAJ STIJENSKE MASE NA BRZINU DETONACIJE ANFO EKSPLOZIVA**

Tina Jerković

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

### Sažetak

U radu je prikazan utjecaj stijenske mase na brzinu detonacije ANFO eksploziva. Brzina detonacije mjerena je kontinuiranim načinom mjerenje upotrebom MREL MicroTrap™ uređaja za mjerenje brzine detonacije. Mjerenja su izvedena na površinskom kopu Erzberg u sklopu projekta HR 14/2020 "Influence of Confinement on Detonation Parameters of ANFO explosives" bilateralna suradnja RGNF-a i Montanuniversitat Leoben.

Ključne riječi: Obloga, brzina detonacije, eksplozivi  
Završni rad sadrži: 30 stranice, 7 tablica, 19 slika, i 14 referenci.  
Jezik izvornika: Hrvatski  
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb  
Mentor: Dr.sc. Vječislav Bohanek, izvanredni profesor RGNF  
Ocjenjivači: Dr.sc. Vječislav Bohanek, izvanredni profesor RGNF  
Dr.sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF  
Dr.sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	4
2. RUDNIK ERZBERG .....	5
3. ANFO EKSPLOZIVI .....	8
4. UTJECAJ STIJENSKE MASE NA BRZINU DETONACIJE .....	11
5. METODE MJERENJA BRZNE DETONACIJE .....	16
5.1. Kontinuirane metode mjerenja brzine detonacije .....	17
5.2. MREL uređaju za mjerenje brzine detonacije .....	18
6. MJERENJE .....	21
7. REZULTATI .....	26
8. ZAKLJUČAK .....	28
9. LITERATURA .....	29

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Prikaz načina rada prije razvitka suvremene opreme (“Erzberg Mine in Austria: An Iron Ore Reserve with a Long Tradition”) .....	5
<b>Slika 2-2.</b> Izgled rudnika Erzberg danas (“Erzberg Adventure – ERIH”) .....	6
<b>Slika 2-3.</b> Geološki presjek kroz ležište siderita u Erzbergu (Prochaska, 2012.) .....	7
<b>Slika 3-1.</b> ANFO eksploziv (“ANFO”).....	8
<b>Slika 3-2.</b> Prikaz proizvodnje ANFO eksploziva (Bohanek, 2016.).....	9
<b>Slika 4-1.</b> (a) Sink obloga, (b) savršena obloga, (c) energetska obloga. (Bohanek i sur., 2022).....	11
<b>Slika 4-2.</b> Izmjerene i predviđene brzine detonacije prema jednadžbi (Esen, 2004).....	13
<b>Slika 4-3.</b> Utjecaj obloge i promjera minske bušotine na performansu eksploziva Blend 1 prema jednadžbi 4-1. (Esen, 2004).....	14
<b>Slika 4-4.</b> Rezultati Taylorovog vala za obloge u slabim i srednje jakim stijenama promjera minske bušotine 152 i 250 mm (Esen, 2004) .....	14
<b>Slika 5-1.</b> Point to point metoda (desno) (Tete et al.), shematski prikaz bušotine s mjernih sustavom (lijevo) (Žganec i dr; 2016) .....	16
<b>Slika 5-2.</b> Graf brzine detonacije (CEJEM, 2016) .....	17
<b>Slika 5-3.</b> MicroTrap <sup>TM</sup> uređaj za mjerenje brzine detonacije (“MREL Blasting Instrumentation - MicroTrap <sup>TM</sup> VOD/Data Recorder - Overview”).....	18
<b>Slika 5-4.</b> Graf brzine detonacije za četiri minske bušotine (“MREL Blasting Instrumentation - MicroTrap <sup>TM</sup> VOD/Data Recorder - Overview”).....	19
<b>Slika 5-5.</b> Način spajanja četiri uzastopne bušotine s MictoTrap <sup>TM</sup> uređajem (“MREL Blasting Instrumentation - MicroTrap <sup>TM</sup> VOD/Data Recorder - Overview”).....	20
<b>Slika 5-6.</b> Otpucane bušotine i graf kao rezultat mjerenja (“MREL Blasting Instrumentation - MicroTrap <sup>TM</sup> VOD/Data Recorder - Overview”).....	20
<b>Slika 6-1.</b> Spuštanje udarne patrone mjernog kabela u bušotinu .....	25
<b>Slika 6-2.</b> Mjerenje brzine detonacije na 8 bušotina .....	25
<b>Slika 7-1.</b> Grafički prikaz brzine detonacije .....	26
<b>Slika 7-2.</b> Grafički prikaz brzine detonacije .....	27

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 3-1.</b> Odnos karakteristika povećanjem udjela emulzije .....	10
<b>Tablica 6-1.</b> Vrste stijena u rudniku Erzberg (Navaro i sur., 2021) .....	21
<b>Tablica 6-2.</b> Kemijski sastav bušotina u jalovini.....	22
<b>Tablica 6-3.</b> Kemijski sastav bušotina u željeznoj rudi .....	23
<b>Tablica 6-4.</b> Tehničke specifikacije korištenih eksploziva.....	24
<b>Tablica 7-1.</b> Opis bušotina u kojima su ostvareni rezultati .....	26
<b>Tablica 7-2.</b> Opis bušotina u kojima su ostvareni rezultati .....	27



## 1. UVOD

Eksplziv je tvar koja sadrži veliku količinu potencijalne energije koja, pod određenim uvjetima, može izazvati eksploziju. Iako postoje različite vrste eksploziva, danas su u najširoj primjeni u rudarstvu ANFO eksplozivi. ANFO je mješavina poroznih granula amonijevog nitrata i ulja ili goriva u omjeru 94,5% amonijeva nitrata i 5,5% ulja ili goriva koji osiguravaju odgovarajuću ravnotežu kisika koja pruža optimalnu energiju. Prema Baumu eksplozija je proces vrlo brze fizičke ili kemijske pretvorbe sustava uz prijelaz njegove potencijalne energije u mehanički rad. Izvršeni rad eksplozije je rezultat nagle ekspanzije plinova i para. Kemijske eksplozije su procesi koji se događaju u eksplozivnim tvarima i čija se energija koristi za dobivanje mehaničkog rada (Dobrilović i dr., 2022): Eksplozivi i razvoj društva). Vrsta kemijske reakcije koja je prisutna kod ANFO eksploziva je detonacija koja se može prikazati kao proces djelovanja udarnog vala u eksplozivu i u okolnom sredstvu i kao djelovanje ekspandirajućih plinova u sredstvu.

U ovom radu prikazan je utjecaj stijenske mase na brzinu detonacije ANFO eksploziva. Brzina detonacije mjerena je kontinuiranim načinom mjerenje upotrebom MREL MicroTrap™ uređaja za mjerenje brzine detonacije. Mjerenja su izvedena na površinskom kopu Erzberg u sklopu projekta HR 14/2020 “Influence of Confinement on Detonation Parameters of ANFO explosives” bilateralna suradnja RGNF-a i Montanuniversitat Leoben.

## 2. RUDNIK ERZBERG

Rudnik Erzberg, smješten u Štajerskoj u Austriji u gradu Eisenerzu, jedan je od najvećih i najmodernijih rudnika u Europi koji je otvoren još za vrijeme rimskog doba. Erzberg je rudnik željezne rude koji se prostire preko cijele planine od 700 do 1400 metara nadmorske visine. Glavni rudni minerali su siderit, ankerit i željezni dolomit.

U prošlosti se ruda eksploatirala čekićem i dljetom sve do uvođenja miniranja crnim barutom 1720. godine kada se vađenje željezne rude odvijalo sustavom hodnika. U drugoj polovici 19. stoljeća crni barut je zamijenjen dinamitom koji je omogućio efikasniju eksploataciju. Danas se za površinske eksplozive koriste suvremeni gospodarski eksplozivi, a eksploatacija se odvija na više od 30 etaža. Na slici 2-1. prikazan je način rada prije razvoja suvremene opreme, dok je na slici 2-2. prikazan današnji izgled rudnika.



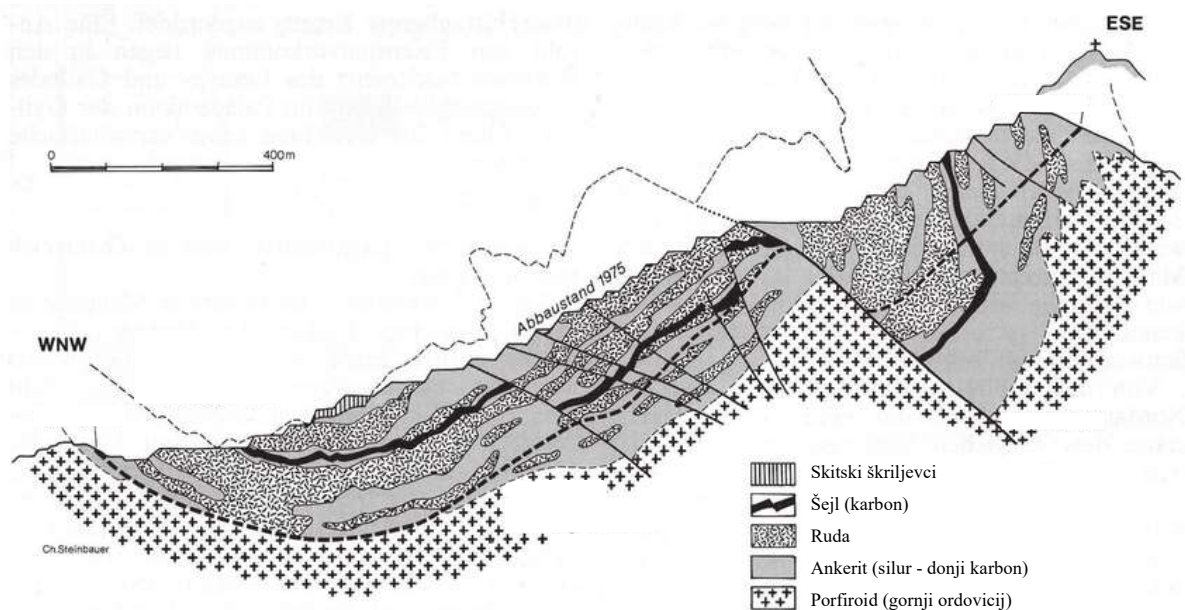
**Slika 2-1.** Prikaz načina rada prije razvitka suvremene opreme (“Erzberg Mine in Austria: An Iron Ore Reserve with a Long Tradition”)



**Slika 2-2.** Izgled rudnika Erzberg danas (“Erzberg Adventure – ERIH”)

S geološke strane, rudnik Erzberg pripada pojasu paleozojskih metamorfiziranih sedimentnih stijena umetnutih između sjevernih vapnenačkih i centralnih Alpa, što se može vidjeti na geološkom presjeku prikazanom na slici 2-3.

Od otvaranja rudnika iskopano je oko 230 milijuna tona željezne rude, a preostalo je još 140 milijuna tona iskoristivih rezervi i 95 milijuna tona geoloških rezervi. Godišnja proizvodnja je oko 3,2 milijuna tona čiste željezne rude, a s najsuvremenijom tehnologijom se proizvede ukupno 12 milijuna tona kamena godišnje.



**Slika 2-3.** Geološki presjek kroz ležište siderita u Erzbergu (Prochaska, 2012.)

S obzirom na veličinu i razvijenost rudnika, može se podijeliti u nekoliko dijelova: područje aktivnog rudarenja, napuštena rudarska područja, rudarska odlagališta i jalovišta u upotrebi, jalovišta, stara rudarska odlagališta i deponiji. Iako je primarna namjena rudnika rudarenje, razvijene su i ostale aktivnosti unutar rudnika. Gospodarstvo na tom području dosta ulaže u turizam pa se zbog toga na napuštenim rudarskim područjima organiziraju razne atrakcije za turiste. Turisti imaju mogućnost obilaska cijelog rudnika, vožnje u radnim strojevima te mogu steći iskustvo svih faza eksploatacije kao i miniranje.

### 3. ANFO EKSPLOZIVI

Eksplozivi na bazi amonijevog nitrata su široka klasa eksplozivnih smjesa čija je glavna komponenta amonijev nitrat koji se proizvodi u obliku granula (slika 3-1.). Dimenzija granula, kao i njihova poroznost, važna su svojstva koja utječu na izvedbe i performanse eksploziva. Uz glavnu komponentu, amonijev nitrat, ANFO eksplozivi u svom sastavu koriste i ulja od kojih se najčešće koriste mineralna i plinska ulja te naftni derivati. Iako imaju nisku otpornost na vodu i probleme vezane uz ne idealnu detonaciju, jedan je od najčešće korištenih eksploziva u rudarstvu najprije zbog niske nabavne cijene i jednostavnosti proizvodnje. Uz to, pružaju mogućnost pripreme direktno na terenu jer su neosjetljivi na inicijalni impuls što ga čini sigurnim za transport. U slučaju da se ANFO eksploziv proizvodi direktno na mjestu upotrebe, način njegove primjene je direktnim usipavanjem u bušotinu, a u ostalim slučajevima se eksploziv pakira u patrone koje se stavljaju u bušotinu ili u vreće iz kojih se sipa u bušotinu. Iako ANFO ima niski detonacijski tlak i detonacijsku brzinu, odlikuje se značajnom razornom snagom zbog velikog volumena detonacijskih plinova.

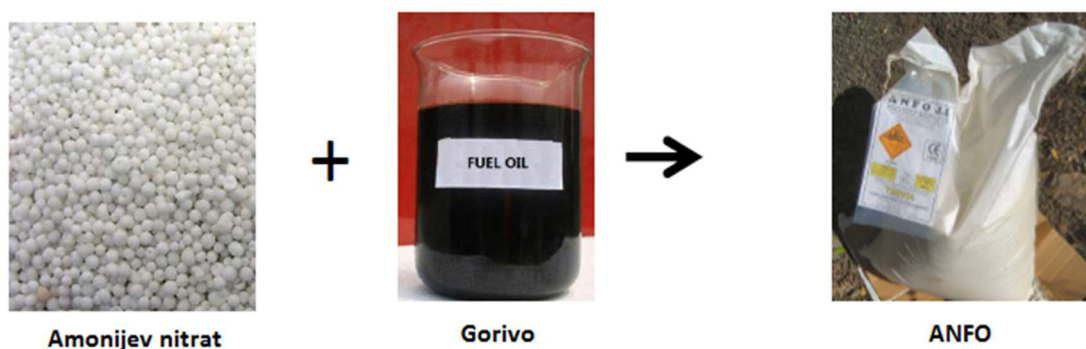


**Slika 3-1.** ANFO eksploziv (“ANFO”)

ANFO spada u skupinu ne idealnih eksploziva (NIHE), koji se od konvencionalnih eksploziva razlikuju po tome što ih karakterizira velika poroznost i niska gustoća, kao i činjenica da gorivo i oksidacijsko sredstvo nisu spojeni u jednu molekulu i mogu tvoriti

zasebne faze. Kao rezultat toga, materijale klase NIHE karakteriziraju niske vrijednosti brzine detonacije.

Jedan od važnijih parametara prilikom korištenja amonijevog nitrata za izradu eksploziva je njegova poroznost koja je povezana s učinkovitošću. Prilikom proizvodnje, ANFO se obično izrađuje u omjeru od 94,5% AN i 5,5% nafte (slika 3-2.) te sadrži i 4% vlage koju je, prije korištenja eksploziva, potrebno isušiti prilikom čega dolazi do stvaranja porozne strukture. Veća poroznost označava veći adsorpcijski kapacitet ulja na površini amonijevog nitrata, a gustoća eksploziva se smanjuje. Zbog poroznosti postoji mogućnost upijanja veće količine vlage od potrebne što smanjuje efikasnost i radnu sposobnost samog eksploziva. U slučaju skladištenja, eksploziv bi se trebao iskoristiti unutar tri mjeseca jer tijekom vremena dolazi do isparavanja goriva te na taj način gubi svoja eksplozivna svojstva.



Slika 3-2. Prikaz proizvodnje ANFO eksploziva (Bohanek, 2016.)

Kao jedan od važnijih čimbenika koji utječu na učinkovitost ANFO eksploziva je njegova nasipna gustoća koja se može mijenjati miješanjem ANFA s različitim količinama emulzije. Uobičajeni način povećavanja napisne gustoće je dodavanje aluminija, ali to se također može postići dodavanjem veće količine emulzije (minimalno 50%) kada ANFO postaje vodootporan i takav proizvod se zove teški ANFO ili HANFO (engl. *Heavy ANFO*).

Emulzija je, po svojoj konzistenciji, tekućina kojoj su glavni sastojci amonijev nitrat, natrijev nitrat, voda, loživo ulje i emulgator s kalcijevim nitratom. S obzirom na ne mješivost sastojaka međusobno, za stabilizaciju se koriste različite vrste emulgatora. Kako bi se postigla veća osjetljivost smjese, ANFO eksploziv se miješa s umjetnim mjehurićima od smole, plastike ili stakla te sa sitnim mjehurićima zraka. Kao što smo spomenuli da su teški ANFO eksplozivi vodootporni jer se koristi emulzijski eksploziv koji nastaje miješanjem vode u ulju, u odnosu na obične ANFO eksplozive, također imaju i veću gustoću, idealniju

detonaciju, veću osjetljivost na detonatore, nisku emisiju plinova, kraće vrijeme punjenja te ostvaruju bolje performanse. U tablici 3-1. možemo vidjeti kako se različite karakteristike mijenjaju povećanjem udjela emulzije u ANFO eksplozivu. Možemo primijetiti da dolazi do povećanja svih vrijednosti.

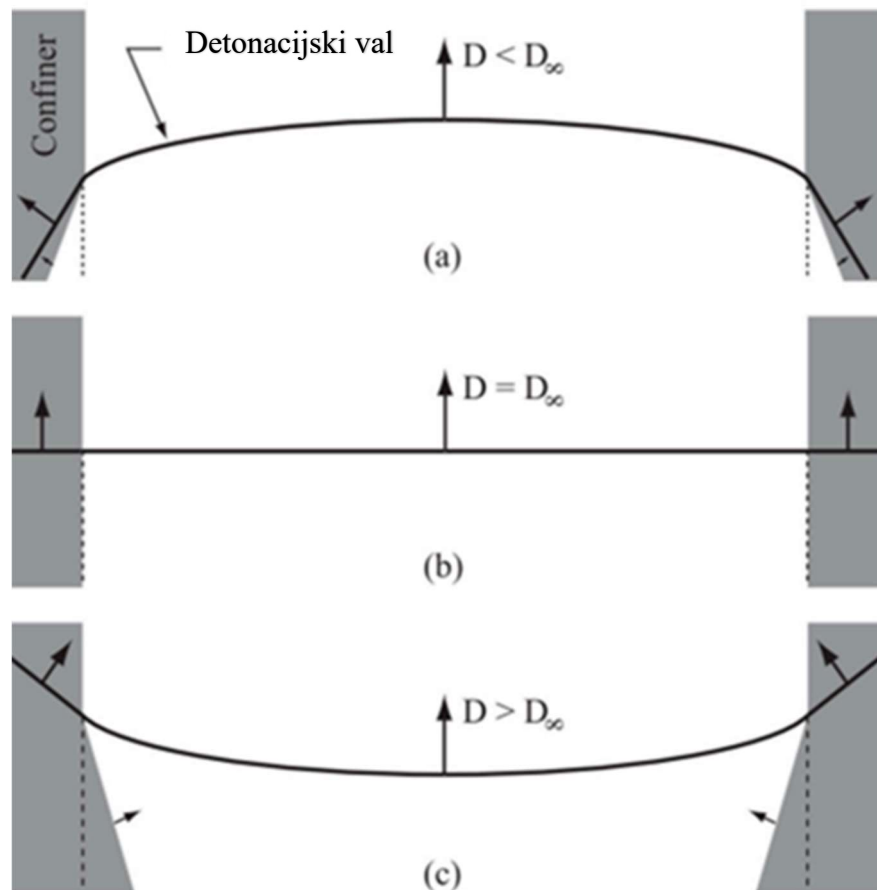
**Tablica 3-1.** Odnos karakteristika povećanjem udjela emulzije

<b>EKSPLOZIVNO</b>	<b>GUSTOĆA (g/cc)</b>	<b>RELATIVNA TEŽINA SNAGA</b>	<b>RELATIVNA NASIPNA ČVRSTOĆA</b>
<b>ANFO</b>	0,83	100	100
<b>5% AL/ANFO</b>	0,87	113	118
<b>7% AL/ANFO</b>	0,88	118	126
<b>10% AL/ANFO</b>	0,91	124	136
<b>ANFO + 20% EMULZIJA</b>	0,98	96	113
<b>ANFO + 30% EMULZIJA</b>	1.10	92	122
<b>ANFO + 40% EMULZIJA</b>	1.20	91	132

#### 4. UTJECAJ STIJENSKE MASE NA BRZINU DETONACIJE

Brzina detonacije važan je mjerni parametar prilikom određivanja učinkovitosti eksploziva. Postoje razni čimbenici koji utječu na brzinu detonacije kao što su gustoća eksploziva, promjer bušotine, način iniciranja, temperatura eksploziva i sl.

Uz to, kod ANFO eksploziva imamo ne idealnu detonaciju pa je obloga važan čimbenik za održavanje njegove stabilne brzine detonacije. Savršenu oblogu možemo reći da predstavlja ona obloga koja niti doprinosi energiji niti ju uklanja. U slučaju da dodaje energiju u reakcijsku zonu tada kažemo da je to energetska obloga, a u slučaju da uklanja energiju iz reakcijske zove kažemo da je to tzv. *sink* obloga. Na slici 4-1. možemo vidjeti različite tipove obloga i način djelovanja udarnog vala.



Slika 4-1. (a) Sink obloga, (b) savršena obloga, (c) energetska obloga. (Bohanek i dr., 2022)



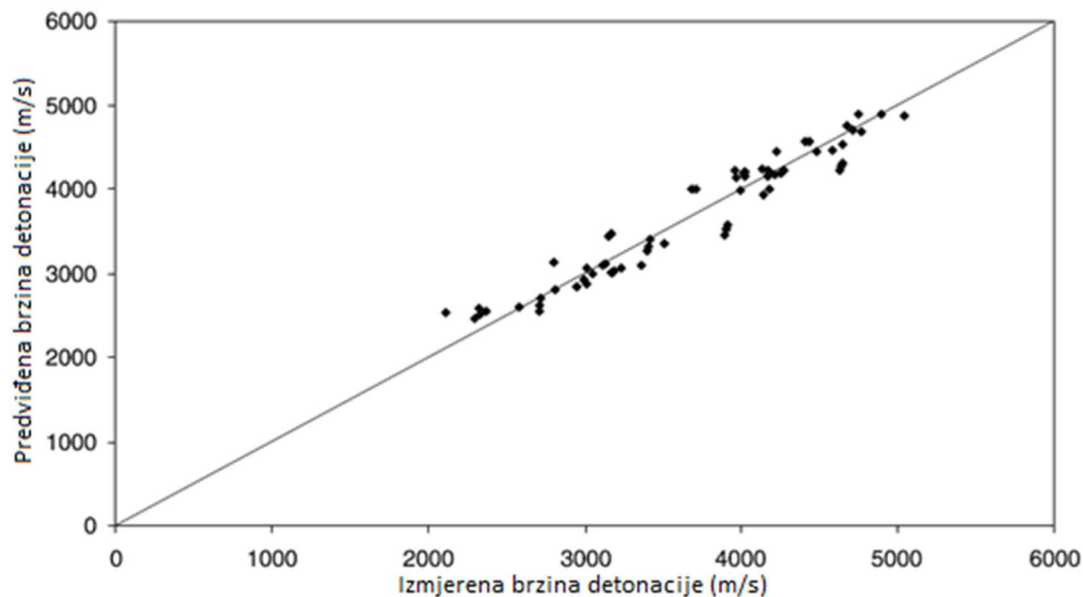
Pregledom različite literature u navedenom području vidljivo je da se različite vrste obloge ugrubo mogu podijeliti u tri glavne skupine:

- Lagane obloge ( kartonska obloga i PVC obloga sa tankom stijenkam)
- Teške obloge (različiti metali)
- Stijena kao obloga (različite vrste stijena)

Na temelju već provedenih ispitivanja učinka različitih stijena na brzinu detonacije došlo se do zaključka da isti eksploziv neće imati jednaku brzinu detonacije u različitim vrstama stijena. S obzirom da prilikom detonacije dolazi do lomljenja i usitnjavanja stijenskog materijala, pretpostavka je da brzina detonacije eksploziva ovisi o fizičko-mehaničkim svojstvima stijene koja se minira. Kako bi se povećala brzina reakcije potrebno je usporiti pad tlaka i temperature, a to je omogućeno različitim vrstama obloga. Prema tome, povećanje čvrstoće stijene uzrokuje povećanje brzine detonacije. Osim o čvrstoći, brzina detonacije ovisi i o drugim svojstvima stijena kao što su gustoća i brzine  $p$  i  $s$  valova.

Pri istraživanju utjecaja stijene kao obloge izvedena su šezdeset četiri mjerenja brzine detonacije u nekoliko rudnika u Turskoj uz ispitivanja bez obloge (Bilgin i dr., 1999). Podatke o brzini detonacije s oblogom su iznjeli Bilgin i Esen (1999 i 2000).

Za istraživanje su se koristili modeli stijena čiji je Youngov modul elastičnosti manji od 92 GPa koji se također mogu koristiti i za neke veće vrijednosti. Na slici 4-2. možemo vidjeti izmjerene brzine detonacije s oblogom i predviđene, a na slici 4-3. prikazan je utjecaj obloge i promjera minske bušotine na performansu eksploziva Blend 1.



Slika 4-2. Izmjerene i predviđene brzine detonacije prema jednadžbi (Esen, 2004)

Prilikom istraživanja koristila se slijedeća jednadžba:

$$D_{confined} = D_{unconfined} + a \cdot \left[ \frac{D_{CJ} - D_{unconfined}}{D_{CJ}} \cdot \frac{K}{1+b \cdot K} \right] \quad (4-1.)$$

gdje su:

$D_{confined}$  - brzina detonacije s oblogom

$D_{unconfined}$  - brzina detonacije bez obloge

a i b - konstante s vrijednostima 112,819 i 0,132

K - čvrstoća stijene [GPa]

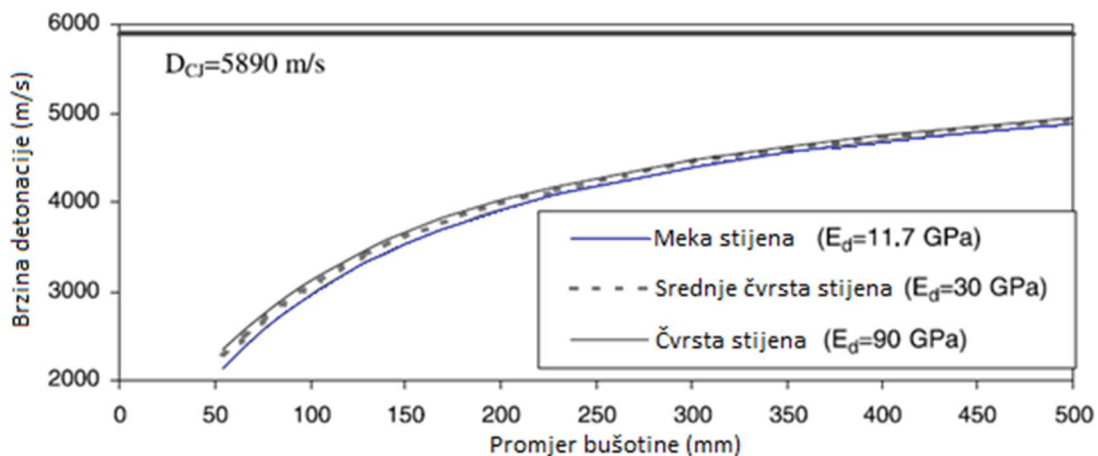
Čvrstoća stijene K izračunata je prema izrazu:

$$K = \frac{E_d}{1+\nu_d} \quad (4-2.)$$

gdje su:

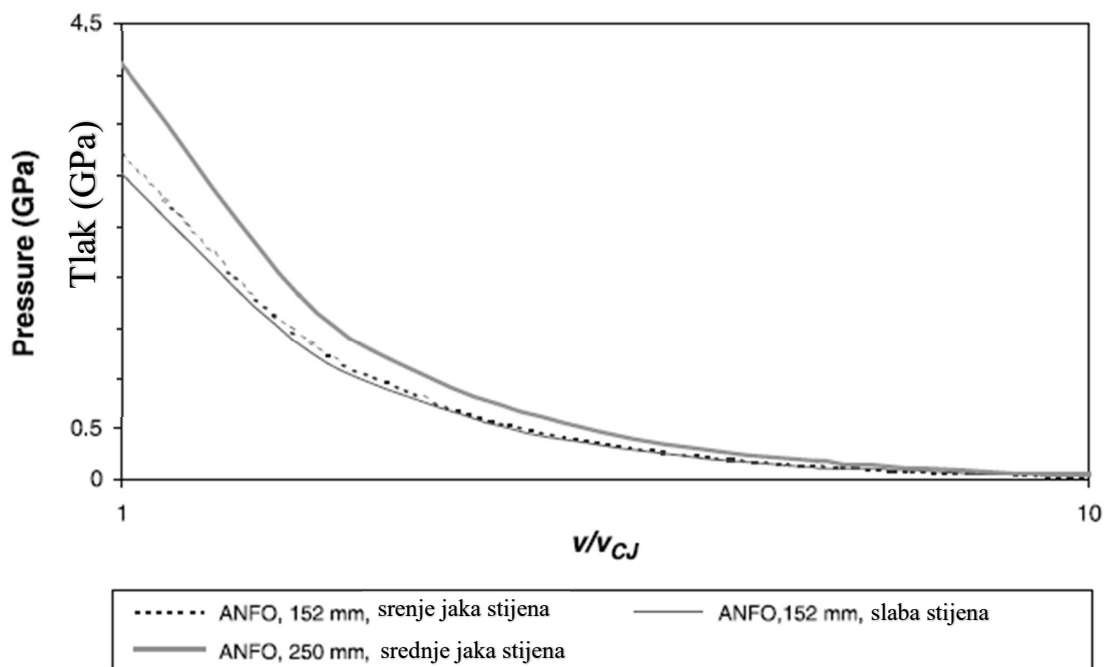
$E_d$  - youngov modul elastičnosti [GPa]

$\nu_d$  - poissonov koeficijent



**Slika 4-3.** Utjecaj obloge i promjera minske bušotine na performansu eksploziva Blend 1 prema jednadžbi 4-1. (Esen, 2004)

Rezultati se mogu prikazati i pomoću Taylor-ovog udarnog vala koji se odnosi na udarni val uzrokovan jakim eksplozijom. Prilikom detonacije ANFO-a u čvršćoj stijeni, Taylorov udarni val je viši što se može vidjeti na slici 4-4.

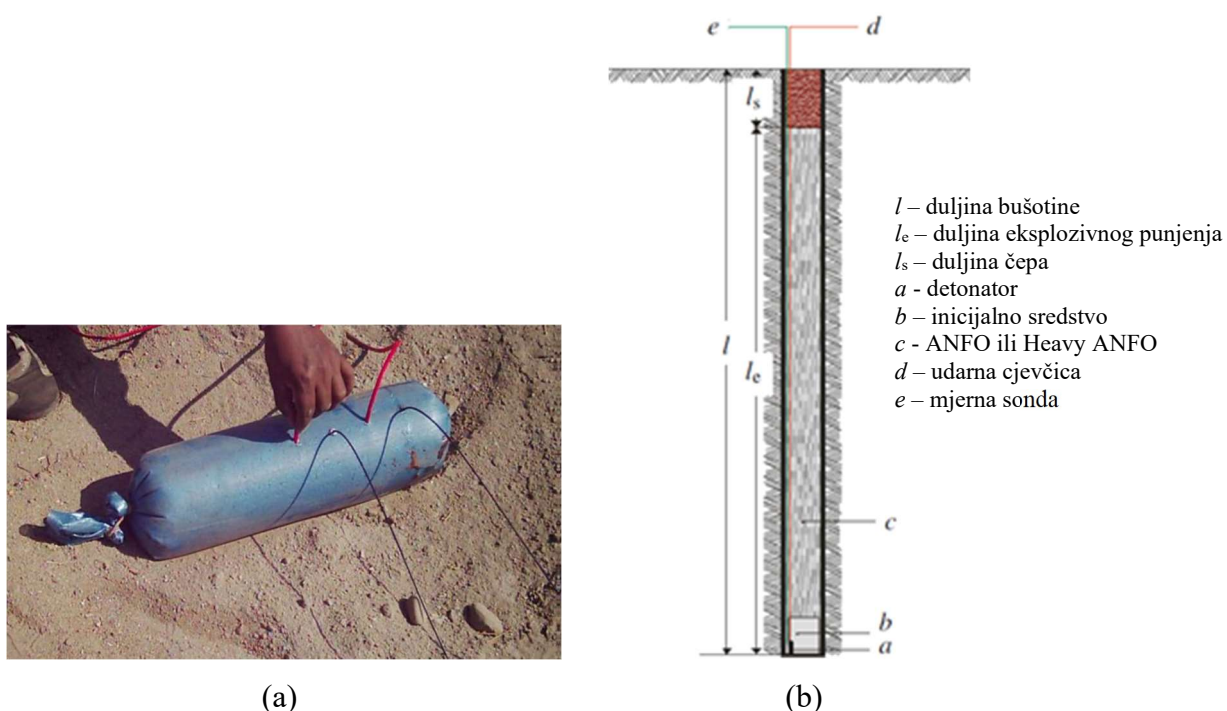


**Slika 4-4.** Rezultati Taylorovog vala za obloge u slabim i srednje jakim stijenama promjera minske bušotine 152 i 250 mm (Esen, 2004)

Prema svim istraživanjima možemo zaključiti da je odnos stijenske mase i obloge veoma složen. Stijena po dubini bušotine ne mora imati jednaka svojstva jer uvijek postoje neka oslabljenja i diskontinuiteti što odnos stijenske mase i obloge čini više složenijim.

## 5. METODE MJERENJA BRZNE DETONACIJE

Brzina detonacije važan je parametar u procjeni učinka eksploziva koji je prethodno potrebno izmjeriti. Utvrđeno je da su rezultati mjerenja brzine detonacije dobar pokazatelj snage, a samim time govore i o učinkovitosti eksploziva. Ovisno o korištenom eksplozivu, vrijednosti brzine detonacije se kreću od 2500 do 7000 m/s. Brzina detonacije je veličina na koju utječu parametri kao što su obloga, gustoća eksploziva, veličina promjera patrone, temperatura i sl. U našem slučaju ispitujemo kako stijenska masa utječe na brzinu detonacije gdje stijenska masa ima ulogu obloge. Metode mjerenja brzine detonacije mogu se podijeliti u dvije grupe: point to point metoda i kontinuirana metoda. Na slici 5-1. vidljivi su načini izvođenja pojedinih metoda. U ovom radu opisana je metoda mjerenja brzine detonacije koja se koristila u ovom istraživanju, ali postoje i mnogi drugi načini mjerenja brzine detonacije. Brzina detonacije mjerena je kontinuiranim načinom mjerenja upotrebom MREL MicroTrap<sup>TM</sup> uređaja za mjerenje brzine detonacije.

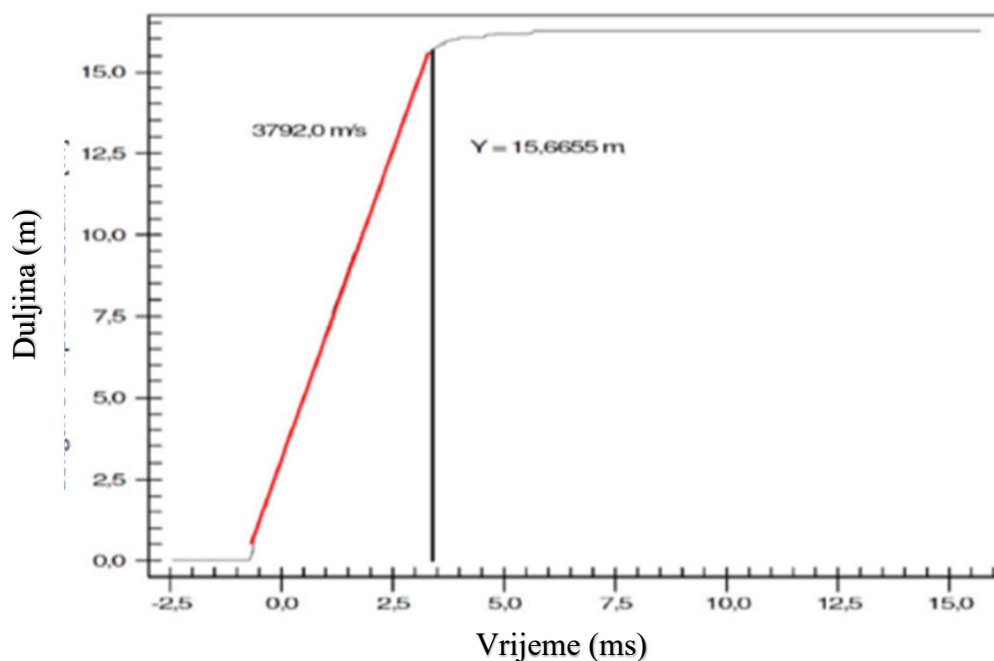


**Slika 5-1.** (a) Point to point metoda (Tete i dr.), (b) shematski prikaz kontinuirane metode (Žganec i dr; 2016)

## 5.1. Kontinuirane metode mjerenja brzine detonacije

Kontinuirane metode mjerenja brzine detonacije odnose se na slučajeve kada se brzina detonacije mjeri duž cijelog eksplozivnog punjenja i koristi se za dobivanje stvarne raspodjele brzine detonacije u vremenu. Način određivanja brzine detonacije korištenjem kontinuirane metode temelji se na kontinuiranom snimanju promjene električnog otpora posebne vrste sonde kroz koje teče stalna struja. Napredovanjem detonacijskog vala kroz eksplozivno punjenje duljina mjerne sonde se skraćuje. Unutar eksplozivnog punjenja stavlja se sonda paralelno s njegovom uzdužnom osi. Sonda se skraćuje i mijenja joj se otpor pod utjecajem detonacijskog vala. Na slici 5-2. je prikazan graf koji svojim nagibom predstavlja brzinu detonacije eksploziva na određenom mjestu.

Primjena električnog otpora uzrokuje promjenu napona u strujnom krugu koja se bilježi na oscilogramu kao funkcija vremena. Pomoću očitavanja na oscilogramu moguće je izračunati brzinu detonacije u bilo kojem dijelu eksplozivnog punjenja (Sućeska, 1995).



Slika 5-2. Graf brzine detonacije (Žganec i dr., 2016)

## 5.2. MREL uređaji za mjerenje brzine detonacije

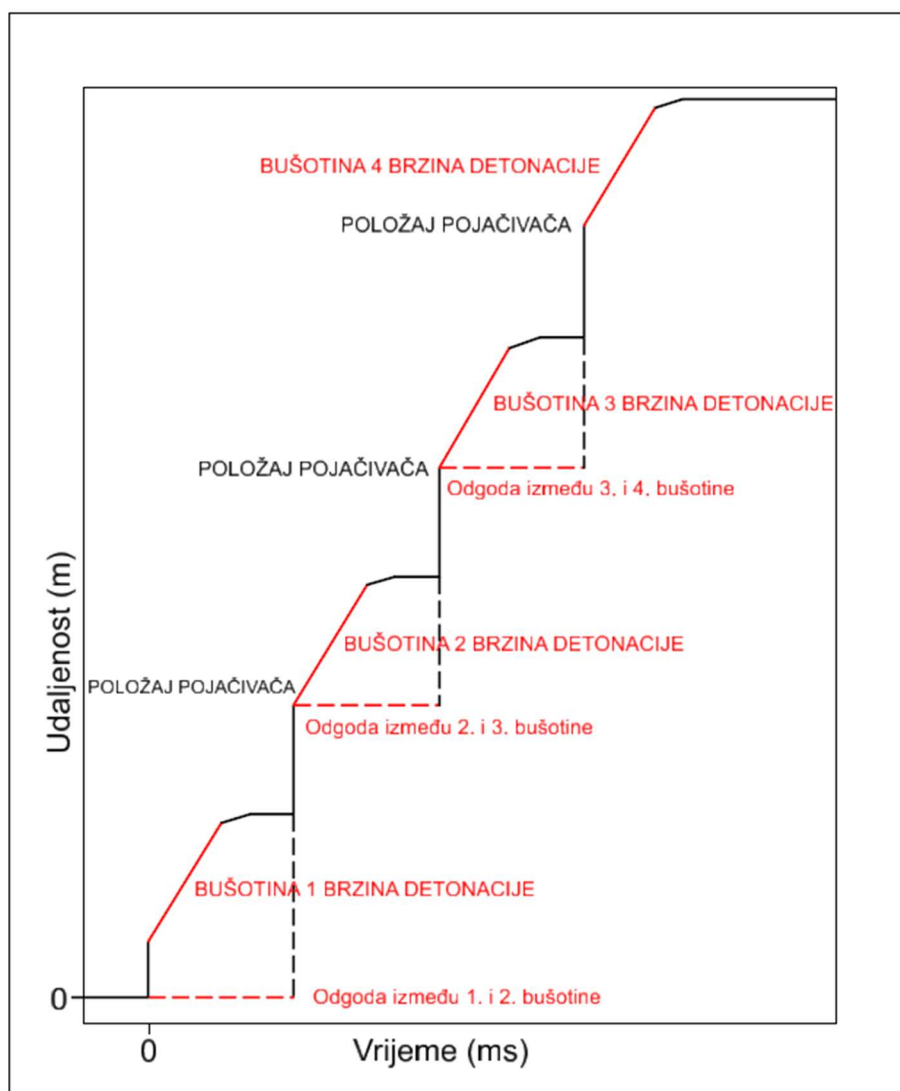
Uređaji za mjerenje brzine detonacije proizvođača MREL temelje se na sustavu s otpornom žicom u kontinuiranom načinu mjerenja brzine detonacije. U ovoj metodi konstantna struja prolazi kroz otporni par žica koji se kontinuirano skraćuje zbog detonacije. Brzina pada napona daje brzinu detonacije. Ovaj uređaj, prikazan na slici 5-3., mjeri brzinu detonacije eksploziva po cijeloj njegovoj dužini unutar bušotine te ima mogućnost istovremenog mjerenja brzine detonacije za više različitih bušotina. U našem slučaju, pomoću ovog uređaja, mjerena je brzina detonacije na osam različitih bušotina istovremeno.



**Slika 5-3.** MicroTrap™ uređaj za mjerenje brzine detonacije (“MREL Blasting Instrumentation - MicroTrap™ VOD/Data Recorder - Overview”)

MicroTrap™ je uređaj koji se koristi dokazanom tehnologijom kontinuirane otporne žice, odnosno ima sondu poznatog linearnog otpora koja se stavlja aksijalno u minsku bušotinu. Pri detonaciji, fronta udarnog vala troši sondu te će se otpor smanjiti proporcionalno smanjenju duljine sonde. Snimač bilježi smanjenje napona na sondi u vremenu, a pomoću softvera se snimljeni podaci izravno pretvaraju u grafove s određenim nagibom koji na bilo kojoj točki predstavljaju brzinu detonacije. Na slici 5-4. može se vidjeti graf brzine

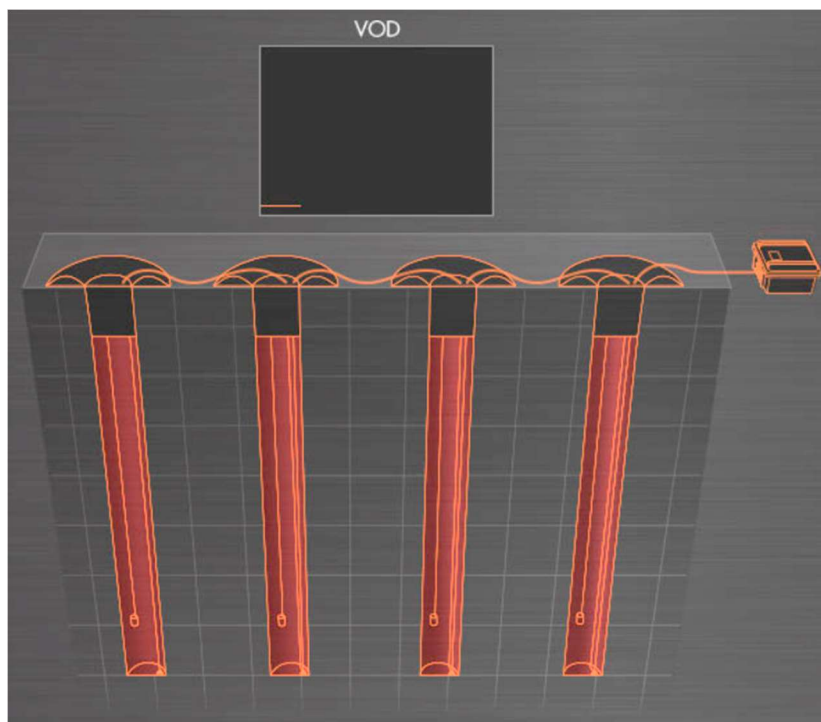
detonacije za 4 minske bušotine, a na slikama 5-5. i 5-6. prikazan je način spajanja više bušotina istovremeno i njihovo otpucavanje.



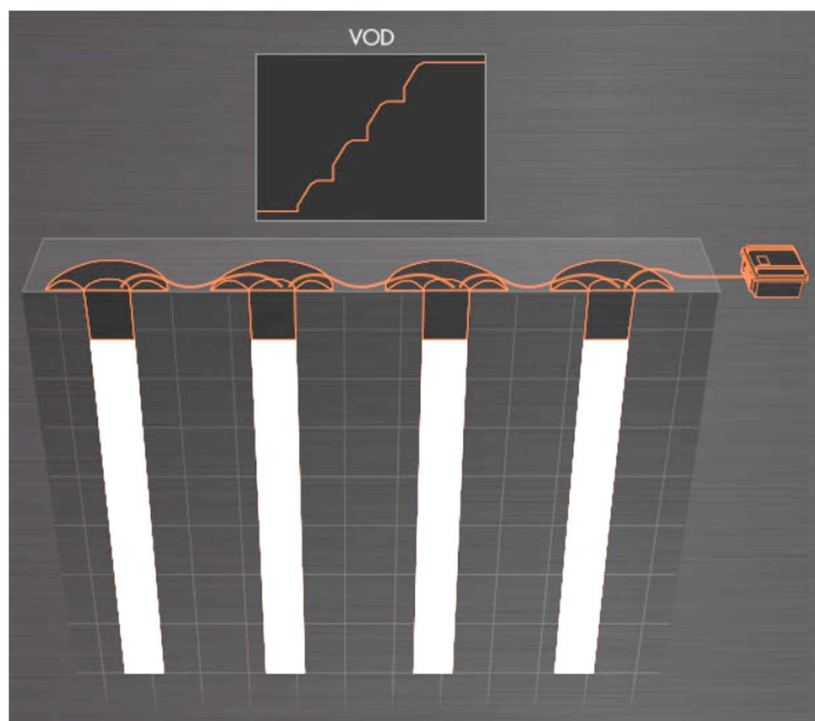
**Slika 5-4.** Graf brzine detonacije za četiri minske bušotine (“MREL Blasting Instrumentation - MicroTrap™ VOD/Data Recorder - Overview”)

Da bi se ovim uređajem, na siguran i efikasan način, mogla izmjeriti brzina detonacije važno je prvo ga postaviti na sigurnu udaljenost da ne bi došlo do oštećenja. Zatim se koaksijalni kabel stavlja u minsku bušotinu s tim da se treba ostaviti dovoljna dužina kabela kako bi se mogla odraditi produktivna detonacija. Koaksijalni se kabel spaja s MicroTrap™ uređajem s njegove stražnje strane na način da se središnji vodič i zaštitni vodič ne dodiruju preko spoja.





**Slika 5-5.** Način spajanja četiri uzastopne bušotine s MicroTrap™ uređajem (“MREL Blasting Instrumentation - MicroTrap™ VOD/Data Recorder - Overview”)






**Slika 5-6.** Otpucane bušotine i graf kao rezultat mjerenja (“MREL Blasting Instrumentation - MicroTrap™ VOD/Data Recorder - Overview”)

## 6. MJERENJE

Stijenska se masa sastoji od različitih vrsta minerala koji imaju različita mehanička svojstva te predstavljaju važan parametar za miniranje. Važna mehanička svojstva, koja se određuju laboratorijskim ispitivanjima, su čvrstoća stijene, deformabilnost i stabilnost. Uz to, važne su i geološke značajke poput strukturnog stanja te karakteristika diskontinuiteta – hrapavost stijenki i orijentacija.

U Erzbergu, najvećem nalazištu siderita u svijetu, se još kao korisna mineralna sirovina može izdvojiti ankerit s različitim sadržajem željeza, između 10 i 17%. Sideriti bogati magnezijem se najčešće sadrže 20 do 42% željeza. Uz korisne mineralne sirovine uvijek imamo i nekorisne, a u ovom su slučaju to najvećim dijelom različite vrste vapnenaca unutar rudonosnih formacija. Podina ležišta formirana je od vulkanskih silikatnih stijena, a krovina se djelomično sastoji od škriljastog pješčenjaka. U tablici 6-1. prikazane su vrste stijena koje se pojavljuju na površinskom kopu.

**Tablica 6-1.** Vrste stijena u rudniku Erzberg (Navaro i sur., 2021)

Vrsta stijene	Škriljasti pješčenjak	Vapnenac	Siderit
UCS (MPa)	40	125	125
Ruda/jalovina	Jalovina	Jalovina	Ruda
Referentna slika			

Mjerenje se izvodilo u dva dana na dva različita minska polja u dva različita materijala, promjer bušotina bio je 152 mm. Prvi dan otpucano je minsko polje od ukupno jedanaest bušotina, u jednom redu, dubine od 28,5 do 30 m. Po dubini svake bušotine mijenja se mineralni sastav s najmanjim udjelom željeza, a zatim ovisno o bušotini se izmjenjuju manja ili veća količina vapna i silicija. Kemijski sastav materijala po pojedinom bušotini dan je u tablici 6-2.

**Tablica 6-2.** Kemijski sastav bušotina u jalovini

<b>Bušotina</b>	<b>Fe</b>	<b>CaO</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>S</b>	<b>P</b>
<b>1</b>	4,66	21,74	15,48	0,045	0,017
<b>2</b>	4,93	26,56	5,44	0,098	0,012
<b>3</b>	5,73	26,77	4,43	0,125	0,012
<b>4</b>	5,14	27,12	4,11	0,052	0,011
<b>5</b>	4,87	26,03	7,25	0,059	0,014
<b>6</b>	6,27	17,90	21,91	0,068	0,023
<b>7</b>	3,32	3,87	48,76	0,023	0,033
<b>8</b>	4,98	4,69	45,14	0,023	0,035
<b>9</b>	3,15	4,22	46,92	0,120	0,035
<b>10</b>	2,75	4,39	49,48	0,161	0,034
<b>11</b>	3,47	4,13	46,97	0,138	0,036

U drugom danu istraživanja mjerenje je izvedeno na minskom polju od dvanaest bušotina. Dubine izbušenih minskih bušotina kreću se od 17 do 18 metara što je znatno manje u odnosu na duljine izbušenih minskih bušotina prvi dan koja je bila otprilike 30 metara. I u ovom se slučaju po dubini svake bušotine mijenja mineralni sastav, ali ovaj put nama važne bušotine imaju najveći udio željeza, a zatim se ovisno o bušotini izmjenjuju manja ili veća količina vapna i silicija. Kemijski sastav bušotina može se vidjeti u tablici 6-3.

**Tablica 6-3.** Kemijski sastav bušotina u željeznoj rudi

<b>Bušotina</b>	<b>Fe</b>	<b>CaO</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>S</b>	<b>P</b>
<b>1-1</b>	25,02	13,75	13,00	0,031	0,019
<b>1-2</b>	29,95	10,90	7,37	0,118	0,013
<b>1-3</b>	31,38	8,15	7,26	0,053	0,016
<b>1-4</b>	33,43	7,20	5,20	0,187	0,039
<b>1-5</b>	36,24	3,27	5,46	0,048	0,040
<b>2-1</b>	30,83	11,10	5,36	0,039	0,016
<b>2-2</b>	26,13	14,39	6,43	0,044	0,016
<b>2-3</b>	26,25	14,20	6,39	0,059	0,014
<b>2-4</b>	23,59	16,25	6,32	0,051	0,016
<b>2-5</b>	18,05	21,25	7,03	0,037	0,017
<b>2-6</b>	12,63	27,95	6,72	0,028	0,016
<b>2-7</b>	18,56	25,46	6,16	0,029	0,016
<b>2-8</b>	28,39	12,12	6,42	0,027	0,017
<b>2-9</b>	34,03	5,88	6,01	0,044	0,015
<b>2-10</b>	33,68	6,32	6,26	0,044	0,015
<b>2-11</b>	33,85	6,32	5,15	0,061	0,020
<b>2-12</b>	34,57	6,30	4,84	0,051	0,024

Za miniranja su korištena dva različita eksploziva u različitim omjerima: Riomex SC 5000 i Riomex SC 7000. Razlika između ta dva eksploziva je u postotku matrice. Riomex SC 5000 je mješavina 50% RIOMEX Matrix i 50% ANFO-a, dok Riomex SC 7000 ima 70% matrice. Sukladno sadržaju emulzije mijenjaju se i detonacijski parametri eksploziva. Tehničke specifikacije eksploziva dane su u tablici 6-4.

**Tablica 6-4.** Tehničke specifikacije korištenih eksploziva

<b>Tehničke specifikacije</b>	<b>Riomex SC 5000</b>	<b>Riomex SC 7000</b>
<b>Gustoća</b>	0,9 – 1,1 g/cm <sup>3</sup>	1,1 – 1,2 g/cm <sup>3</sup>
<b>Volumen plinova</b>	985 l/kg	994 l/kg
<b>Specifična energija</b>	925 kJ/kg	880 kJ/kg
<b>Gustoća energije</b>	925 kJ/l	1012 kJ/l
<b>Toplina eksplozije</b>	3762 kJ/kg	3189 kJ/kg
<b>Bilanca kisika</b>	-3%	-4%
<b>Brzina detonacije (za d=52mm)</b>	4100 m/s	4600 m/s

Eksplozivi su upumpavani u bušotinu direktno iz kamiona dok je za iniciranje pojedine bušotine korištena udarna patrona emulzijskog eksploziva i neelektrični detonator. Za udarnu patronu pričvršćen je koaksijalni kabel za mjerenje brzine detonacije i spušten na dno bušotine. Brzina detonacije je mjerena na 8 bušotina pri čemu je za svaku bušotinu korišten zaseban kabel spojen na zaseban kanal instrumenta. Spuštanje udarne patrone mjernog kabela u bušotinu i mjerni sustav prije otpucavanja dani su slikama 6-1. i 6-2.



Slika 6-1. Spuštanje udarne patrone mjernog kabela u bušotinu



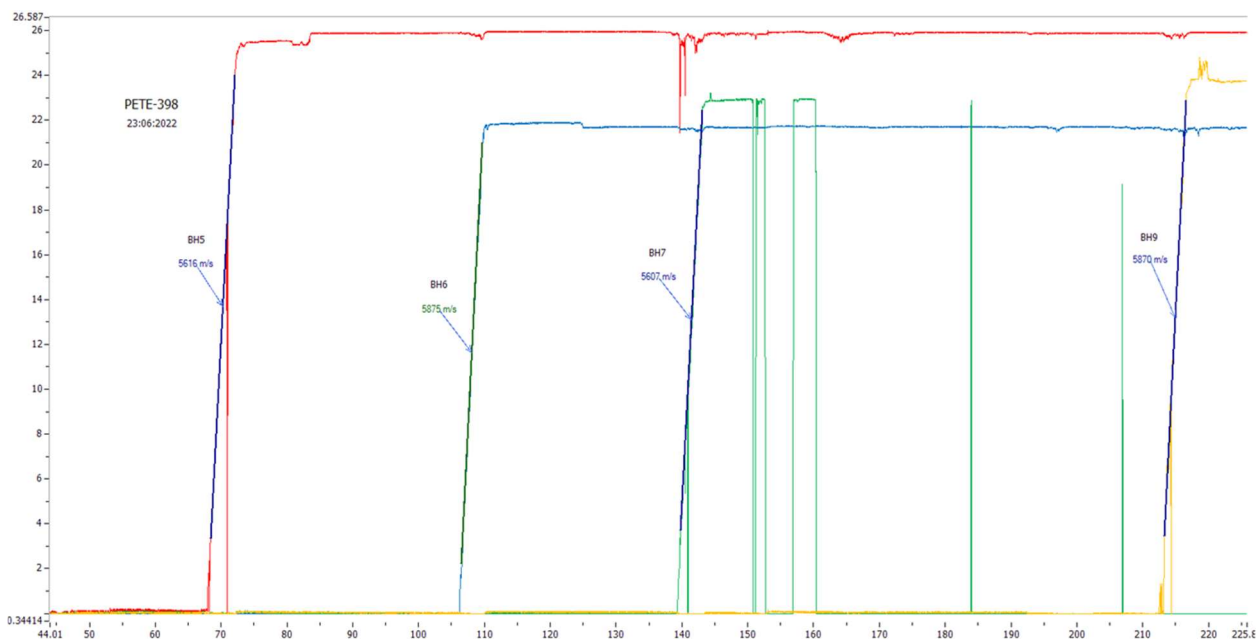
Slika 6-2. Mjerenje brzine detonacije na 8 bušotina

## 7. REZULTATI

Miniranje prvi dan izvedeno je u jalovini s visokim sadržajem SiO<sub>2</sub> pri čemu je korišteno 100 kg Riomex SC 7000 i 350 i više kg Riomex SC 5000. Uspješno je izmjerena brzina detonacije na 4 od 8 bušotina. Na slici 7-1. dan je grafički prikaz izmjerenih brzina detonacije, a u tablici 7-1. izmjerene brzine detonacije i eksplozivno punjenje po pojedinoj minskoj bušotini.

Tablica 7-1. Opis bušotina u kojima su ostvareni rezultati

Bušotina	Dubina (m)	Riomex SC 7000	Riomex SC 5000	Brzina detonacije (m/s)
5	30	100	380	5616
6	29,5	100	350	5875
7	29	100	380	5607
9	29	100	350	5870



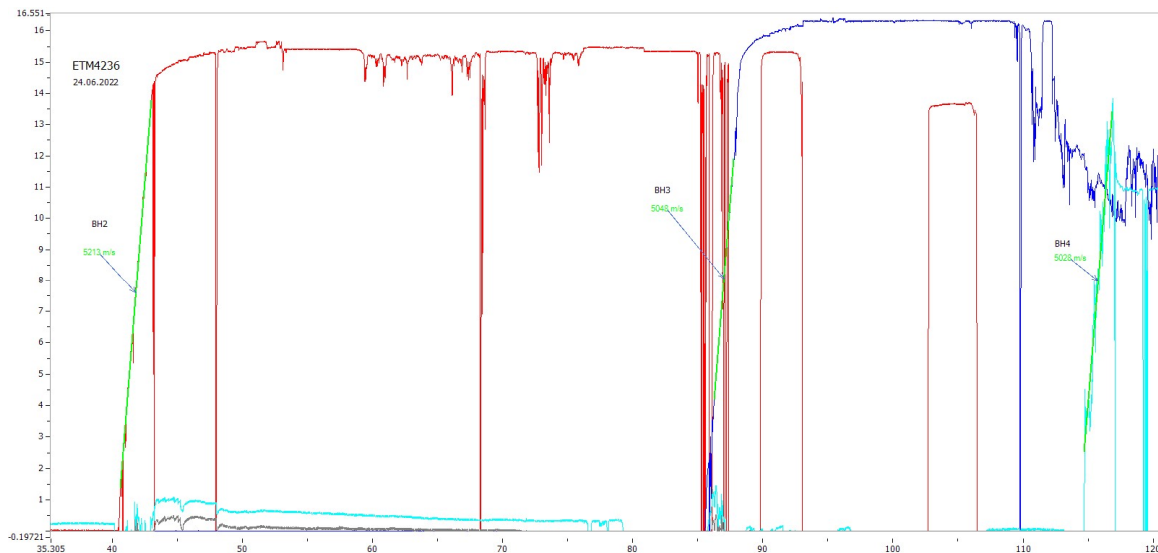
Slika 7-1. Grafički prikaz brzine detonacije

Za razliku od prvog dana, drugi dan je mjerenje izvedeno u rudi siderita te su dobiveni rezultati brzine detonacije za tri bušotine. Na slici 7-2. dan je grafički prikaz izmjerenih brzina detonacije, a u tablici 7-2. izmjerene brzine detonacije i eksplozivno punjenje po pojedinoj minskoj bušotini.

**Tablica 7-2.** Opis bušotina u kojima su ostvareni rezultati

Bušotina	Dubina (m)	Riomex SC 7000	Riomex SC 5000	Brzina detonacije (m/s)
1-4	17	200	0	5028
1-5	17	70	150	5213
2-12	18	260	0	5048

Na slici 7-2. možemo vidjeti prikaz valova izmjerenih kontinuiranom metodom mjerenja pomoću MREL mjerača. Na horizontalnoj osi se nalazi vrijeme, a na vertikalnoj dubina pa se prema formuli za brzinu u svakoj točki krivulje može odrediti brzina.



**Slika 7-2.** Grafički prikaz brzine detonacije



## 8. ZAKLJUČAK

Mjerenje brzine detonacije na površinskom kopu Erzberg izvedeno je u dvije različite stijenske mase. Prvi dan brzina detonacije mjerena je u vapnencima koji predstavljaju jalovinu čija prosječna jednoosna tlačna čvrstoća iznosi 120 MPa dok je drugi dan mjerenje izvedeno u sideritnoj željeznoj rudi koja ima istu prosječnu jednoosnu tlačnu čvrstoću od 120 MPa. Bitno je napomenuti da jednoosna tlačna čvrstoća nije mjerena na mikrolokacijama gdje se izvodilo miniranje. Sideritna ruda također ima značajno veću gustoću od oko 3,96 g/cm<sup>3</sup>. Rezultati mjerenja su na neki način u suprotnosti s podacima prikazanim u literaturi gdje su kod stijena s većom jednoosnom tlačnom čvrstoćom i većom gustoćom dobivene veće mjerene brzine detonacije za isti eksploziv. U našem slučaju viša izmjerena brzina detonacije ostvarena je za slabiji eksploziv pri miniranju vapnenačke jalovine, dok su niže brzine izmjerene za jači eksploziv pri miniranju sideritne rude. Razlog tomu može biti visok udio SiO<sub>2</sub> u vapnenačkoj jalovini (do približno 50%) koji je znatno veći u odnosu na udio SiO<sub>2</sub> u sideritnoj rudi (5-7%). Veći udio SiO<sub>2</sub> ima direktan utjecaj na povećanu tvrdoću stijene. Pored toga, iako su prosječne vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće identične, moguće je da na mikrolokaciji, jalovina ima veću vrijednost u odnosu na sideritnu rudu. Za detaljnu analizu potrebno je imati više mjerenja brzina detonacije te dodatno istraživanje svih fizičko-mehaničkih svojstava stijene te strukturnog sklopa stijenskog masiva. Preliminarna istraživanja potvrđuju kompleksnost utjecaja stijenske mase kao obloge na brzinu detonacije ANFO eksploziva. Krajnji cilj istraživanja bi bio optimizirati parametre minskog polja u odnosu na vrstu stijene pri eksploataciji mineralnih sirovina.

## 9. LITERATURA

BOHANEK, V., 2011. *Model nastajanja i analiza djelovanja kumulativnog procesa linearnih eksplozivnih nabojâ. Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.*

DOBRILOVIĆ, M., 2008. *Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju elektroničkog detonatora. Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.*

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

ESEN, S. 2004. *A statistical approach to predict the effect of confinement on the detonation velocity of commercial explosives. Rock mechanics and rock engineering, 37(4), str. 317-330.*

ESEN, S. 2004. *A non-ideal detonation model for commercial explosives. Brisbane, Julius Kruttschnitt mineral research centre, Department of mining, minerals and materials engineering, University of Queensland.*

DOBRILOVIĆ, M., BOHANEK, V., ŽGANEC, S., 2014. *Influence of explosive charge temperature on the velocity of detonation of ANFO explosives. Central european journal of energetic materials, 11 (2), str. 191-197.*

BILGIN, H.A., ESEN, S. 1999. *Assessment of ideality of some commercial explosives. 25th conference on explosives and blasting technique, Nashville, Tennessee, SAD, vol. 1, str. 35-44.*

BILGIN, H.A., ESEN, S. 2000. *Results and impact of in-situ continuous velocity of detonation measurements. Ninth international symposium on mine planning and equipment selection, Atena, str. 21-26.*

BILGIN, H.A., ESEN, S., KILIC, M. 1999. *Patarge project*. Ankara, Internal report, Bartusan A.S., Elmadag.

“ANFO.” *Wikipedia*, 2 May 2023,  
en.wikipedia.org/wiki/ANFO#/media/File:Ammonium\_nitrate-  
fuel\_oil\_(ANFO)\_explosive.jpg. Accessed 25 June 2023.

“Erzberg Mine in Austria: An Iron Ore Reserve with a Long Tradition.” *Deposits Mag*, 16 Nov. 2017, [depositsmag.com/2017/11/16/the-erzberg-mine-in-austria-an-iron-ore-reserve-with-a-long-tradition/](https://depositsmag.com/2017/11/16/the-erzberg-mine-in-austria-an-iron-ore-reserve-with-a-long-tradition/). Accessed 25 June 2023.

Tete, Aruna Dhanraj, et al. “Velocity of Detonation (VOD) Measurement Techniques - Practical Approach.” *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 2, no. 3, 27 Aug. 2013, p. 259, <https://doi.org/10.14419/ijet.v2i3.1023>. Accessed 25 June 2023.

Jackson, S.I.; Kiyanda, C.B.; Short, M. Precursor Detonation Wave Development in Anfo Due to Aluminum Confinement. *Proceedings - 14th International Detonation Symposium, IDS 2010 2010*, 740–749.

ŽGANEC, S., BOHANEK, V., DOBRILOVIĆ, M. *Influence of a primer on the velocity of detonation of ANFO and Heavy ANFO blends*. *Central european journal of energetic materials* 13 (3), str. 701-711.