

Radna sposobnost eksploziva - Trauzlov test

Maršić, Mislav Matija

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:065630>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**



Repository / Repozitorij:

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



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

RADNA SPOSOBNOST EKSPLOZIVA – TRAUZLOV TEST

Završni rad

Mislav Matija Maršić

R4377

Zagreb, 2023



KLASA: 602-01/23-01/55
URBROJ: 251-70-11-23-2
U Zagrebu, 04.09.23

Mislav Matija Maršić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/55, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 22.05.2023. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

RADNA SPOSOBNOST EKSPLOZIVA – TRAUZLOV TEST

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Prof.dr.sc. Mario Dobrilović nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i suvoditeljicu Dr.sc. Ivana Dobrilović.

Voditelj

(potpis)

Prof.dr.sc. Mario Dobrilović

(titula, ime i prezime)

Suvoditeljica

(potpis)

Dr.sc. Ivana Dobrilović

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomске 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)

RADNA SPOSOBNOST EKSPLOZIVA – TRAUZLOV TEST

Mislav Matija Maršić

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

Sažetak

Trauzlova proda, odnosno test u olovnom bloku jedna je od metoda za određivanje radne sposobnosti eksploziva koja se može definirati i kao sposobnost obavljanja rada detoniranog eksploziva nad okolinom. Ona je primjenjivana i prilikom ispitivanja gospodarskih eksploziva u Laboratoriju za ispitivanje eksplozivnih tvari Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta. U radu je prikazana metoda ispitivanja i rezultati mjerenja za ANFO eksplozive, amonij nitratne praškaste eksplozive i emulzijske eksplozive

Ključne riječi: Rudarstvo, radna sposobnost eksploziva, Trauzlov test, olovni blok, emulzijski eksplozivi

Završni rad sadrži: 22 stranice, 6 tablica, 8 slika, 0 priloga, i 15 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

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

Komentorica: Dr.sc. Ivana Dobrilović, poslijedoktorand RGNF

Ocjenjivači: Dr.sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF
Dr.sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF
Dr.sc. Siniša Stanković, docent RGNF

Zahvaljujem:

Prof. dr. sc. Muhamedu Sućeski na ideji za odabir metode ispitivanja eksploziva potaknutoj istraživanjima u sklopu projekta HRZZ projekt IP-2019-04-1618 „Poboljšani model neidealne detonacije gospodarskih eksploziva“ NEIDEMO.

Svojem mentoru prof. dr. sc. Mariu Dobriloviću, što mi je svojim znanjem i stručnim savjetima pomogao u izradi završnog rada.

Svojoj komentorici dr. sc. Ivani Dobrilović na strpljenju, kontinuiranom usmjeravanju, svim savjetima i podršci.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEORETSKE OSNOVE	2
3. PREGLED ISTRAŽIVANJA.....	4
4. ODREĐIVANJE RADNE SPOSOBNOSTI EKSPLOZIVA PO TRAUZLU.....	6
4.1. Postupak ispitivanja	6
4.2. Svojstva olovnog bloka	9
4.3. Proračun rezultata ispitivanja.....	10
4.4. Rezultati ispitivanja.....	15
4.4.1. Procjena mjerne nesigurnosti.....	18
5. ZAKLJUČAK.....	20
6. LITERATURA	21

POPIS SLIKA

Slika 4-1. Olovni blok spreman za detonaciju. (Memim encyclopedia, 2023)	7
Slika 4-2. Presjek olovnog bloka prije detonacije.	8
Slika 4-3. Presjek olovnoga bloka nakon detonacije.....	8
Slika 4-4. Dimenzije olovnog bloka u milimetrima. (Dobrilović, 2018)	10
Slika 4-5. Pentrit. (Wikipedia, 2023.).....	14
Slika 4-6. ANFO eksploziv (lijevo) (Zečić, 2015.) i patronirani ANFO eksploziv (desno) (POLIEX, 2021.).	15
Slika 4-7. Emulzijska matrica (lijevo) (Zečić, 2015.) i emulzijski eksploziv (desno) (AUSTIN POWDER, 2023).	16
Slika 4-8. Amonij nitratni praškasti eksploziv AMONEKS. (Trayal, 2023)	16

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Uobičajene vrijednosti detonacijskih parametara analiziranih eksploziva.	3
Tablica 3-1. Trauzlov test vrijednosti. (Locking, 2022).....	5
Tablica 4-1. Svojstva olova. (Murati i Paulin, 1984)	9
Tablica 4-2. Korekcijski faktor temperature. (Dobrilović, 2018).....	11
Tablica 4-3. Ispitivanje radne sposobnosti ELMEX-a u olovnom bloku. (Ester, 2005)	14
Tablica 4-4. Rezultat mjerenja volumena proširenja Trauzlovim testom.	17
Tablica 4-5. Rezultati statističke analize.	19

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
ρ	g/cm ³	gustoća
V	cm ³	volumen
D	m/s	brzina detonacije
AN	-	amonijev nitrat
TNT	-	trinitrotoulen
NG	-	nitroglicerín
PENT	-	pentrit
RDX	-	heksogen
NM	-	nitrometan
Al	-	aluminij
Pb	-	olovo
V_1	(cm ³)	volumen bruto proširenja poslije eksplozije
V_0	(cm ³)	volumen rupe u bloku prije eksplozije
V_k	(cm ³)	korekcije vrijednosti V_1 u ovisnosti od temperature bloka prije eksplozije
k	(%)	korekcijski faktor
\bar{q}	(cm ³)	aritmetička sredina
n	-	broj neovisnih mjerenja
s_p	(cm ³)	skupno standardno odstupanje
u	(cm ³)	standardna nesigurnost
U_{rel}	(%)	relativna nesigurnost

1. UVOD

Radna sposobnost eksploziva po Trauzlu je metoda razvijena kako bi se mogla odrediti učinkovitost pojedinih eksploziva. To je indeksni pokazatelj koji ima primjenu i kod neidealnih eksploziva.

Uobičajeno se radna sposobnost izražena preko relativne masene, ili volumske snage za eksplozive izražava preko teoretskih, izračunatih toplina detonacije, jer gospodarski eksplozivi, koji nisu idealni i njihova detonacija se naziva neidealnom, ne prate u potpunosti postavke teoretskih modela, tako se i njihova radna sposobnost ne može ocijeniti prema toplini detonacije.

U radu je prikazana metoda određivanja radne sposobnosti po Trauzlu, te pripadajuća mjerna nesigurnost kako bi bilo naglašeno s kojom pouzdanošću je moguće primijeniti indeksni pokazatelj.

Analiza je provedena na rezultatima ispitivanja provedenim u Laboratoriju za ispitivanje eksplozivnih tvari Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta na ANFO i emulzijskim eksplozivima.

2. TEORETSKE OSNOVE

Djelovanje eksploziva opisuje se preko veličina: energija eksploziva, snaga, brizantnost, rad i radna sposobnost. Razlika značenja pojmova brizantnosti i radne sposobnosti (poznata i kao energija detonacijskih produkata, te jačina eksploziva) je u tome što se pod pojmom brizantnosti podrazumijeva razorna snaga eksploziva kao posljedica impulsa tlaka, dok radna sposobnost označava mogućnost obavljanja rada eksploziva naknadnom ekspanzijom plinova detonacije.

Za određivanje brizantnosti i radne sposobnosti eksploziva primjenjuju se sljedeće metode:

- određivanje radne sposobnosti eksploziva olovnim cilindrom – Trauzl,
- relativna radna sposobnost određena pomoću balističkog njihala,
- određivanje brizantnosti eksploziva deformacijom cilindra (po Hessu),
- određivanje brizantnosti eksploziva deformacijom cilindra (po Kastu),
- određivanje brizantnosti eksploziva metodom otiska na čeličnoj ploči,
- određivanje brizantnosti eksploziva širenjem (ekspanzijom) bakrenog cilindra,
- podvodni detonacijski pokus,
- ispitivanje s dvostrukim cijevima,
- linearno povećanje izbojnice,
- određivanje volumena kratera,
- ljevkasti pokusi.

Rezultati su izraženi kao relativno određene vrijednosti u odnosu na referentni eksploziv, ili kao usporedba učinaka više različitih eksploziva (Marek, 2019).

Predmet rada je određivanje radne sposobnosti eksploziva olovnim cilindrom – Trauzlov test.

Kako bi se radna sposobnost mogla teoretski odrediti, te pri tome i kvantificirati mehaničko djelovanje eksplozije (detonacije), primjenjuju se hidrodinamičke teorije detonacije i termodinamički zakoni.

Prilikom detonacije eksploziva oslobađa se energija koja se može iskoristiti za obavljanje mehaničkog rada (Sućeska, 1995).

Potencijalni učinak eksploziva nije moguće odrediti jednim termokemijskim ili detonacijskim parametrom kao što su toplina oslobođena pri kemijskoj reakciji ili brzina detonacije. Sposobnost pojedinog eksploziva da izvede mehanički rad određuje se s više parametara: brzinom detonacije, tlakom detonacije, jediničnim volumenom nastalih plinova.

Uobičajene vrijednosti detonacijskih parametara analiziranih eksploziva dane su u tablici 2-1.

Tablica 2-1. Uobičajene vrijednosti detonacijskih parametara analiziranih eksploziva.

Eksploziv	Teoretska toplina eksplozije (kJ/kg)	Volumen plinova detonacije (l/kg)	Brzina detonacije u cijevi promjera 20 mm (m/s)
ANFO	3600	1050	1000
amonij nitratni praškasti	4000	970	1500
Emulzijski	5000	1010	5000

Koji od navedenih parametara ima najvažniju ulogu ovisi o uvjetima u kojima će proces eksplozije biti proveden. Kako je predmet rada Trauzlov test koji simulira bušotinu, važni parametri su količina plinovitih produkata i oslobođena toplina.

3. PREGLED ISTRAŽIVANJA

Metoda ispitivanja radne sposobnosti eksploziva po Trauzlu poznata je i pod engleskim nazivom Lead block test. Iako metoda nosi naziv po Isidoru Trauzlu, začetnikom ove metode (u nastavku Trauzlov test) može se smatrati francuski kemičar Barthelot koji u svojoj knjizi „Eksplozivi i njihova snaga“ iz 1892. godine, uveo pojam karakterističnih produkata koji je u osnovi odnos volumena i topline detonacije, a primijenio ga je kako bi usporedio radnu sposobnost različitih eksploziva.

Isidor Trauzl bio je austrijski stručnjak za miniranje koji je 1880.-tih godina dao prijedlog mjerenja radne sposobnosti eksploziva detonacijom na uzorku eksploziva mase 10 grama unutar šupljeg olovnog cilindra. Od prijedloga metode do njene standardizacije prošlo je 20-tak godina. H. Brunswick, njemački stručnjak za eksplozive, na 5. međunarodnom kongresu o primijenjenoj kemiji održanom 1903. godine u Berlinu predložio je da se standardizira Trauzlov test kako bi se omogućila bolja usporedba eksploziva s obzirom na njihovu radnu sposobnost.

U Republici Hrvatskoj metoda je bila standardizirana pod nazivom Ispitivanje radne sposobnosti u olovnom bloku, oznake HRN H.D8.007., do povlačenja iste zbog preuzimanja europskih normi.

Trauzlov test je jednostavna metoda određivanja radne sposobnosti eksploziva, a korištenjem Brunswickovog opisa izvedbe Trauzlovog testa usvojena je kao standardna metoda (Locking, 2022). Trauzlov test se koristi za ocjenu radne sposobnosti eksploziva, a rezultat mjerenja je volumen proširenja.

Radnu sposobnost eksploziva moguće je iskazati i kao relativnu snagu u odnosu na referentni eksploziv (Sućeska, 1995).

Mnogi autori radili su na prijedlogu formule odnosno matematičkog izraza kojim bi se mogla procijeniti radna sposobnost eksploziva. Među istaknutim autorima su Afanasenkov koji je predložio formulu za računanje apsolutne snage eksploziva određene Trauzlovim testom koja bi sadržavala samo jedan parametar, relativnu snagu eksploziva računatu iz topline eksplozije i volumena plinova detonacije (Afanasenkov, A.N., 2004). Zatim su Keshavarz i koautori predložili formulu za procjenu specifičnog impulsa i korekcije topline detonacije na bazi razgradnje H_2O-CO_2 kako bi izračunali snagu eksploziva molekularne formule $C_aH_bN_cO_d$ određene Trauzlovim testom (Keshavarz H. M. i dr., 2011).

U Tablici 3-1 prikazani su rezultati volumena proširenja za pojedine vrste eksploziva preuzeti iz Lockinga (Locking, 2022). Rezultati se odnose na učinak uzorka eksploziva mase 10 g.

Tablica 3-1. Trauzlov test vrijednosti. (Locking, 2022)

Eksploziv	Volumen proširenja (cm ³ /10g)
nitroglikol	610
metilnitrat	630
Nitroglicerin (NG)	530
pentaeritritol-tetranitrat (PENT)	523
heksogen (RDX)	483
nitrometan (NM)	458
etilnitrat	422
tetril	410
nitroceluloza 13%N	373
etilen diamin dinitrat (EDD)	350
HMTD	330
pikrinska kiselina	315
trinitoanilin	311
TNT	300
urea nitrat	272
dinitrofenol (DNP)	243
dinitrobenzen	242
DNT	240
gvanidin nitrat	240
amonijev perklorat	194
amonijev nitrat	178
Oktogen (HMX)	480

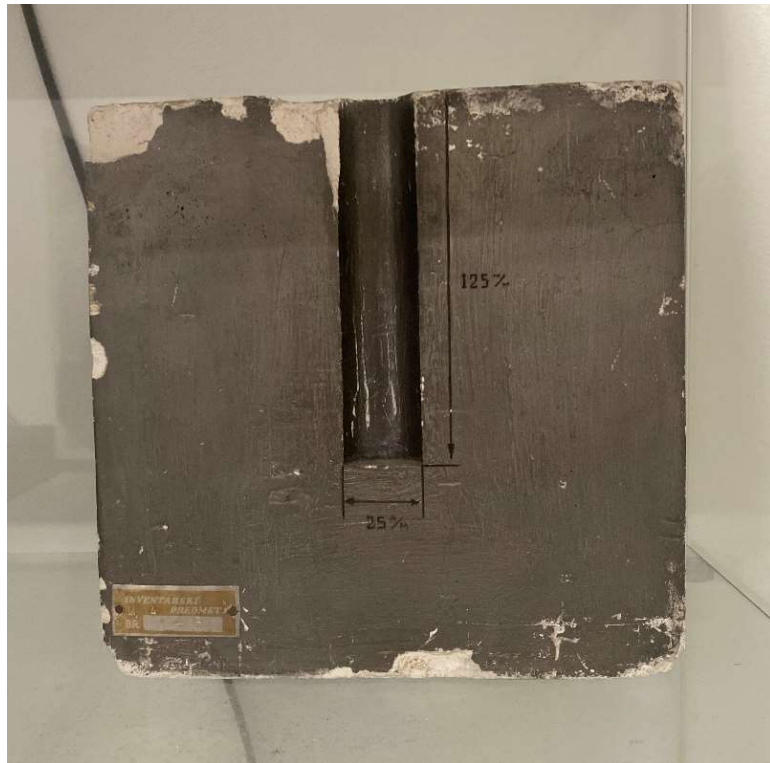
4. ODREĐIVANJE RADNE SPOSOBNOSTI EKSPLOZIVA PO TRAUZLU

4.1. Postupak ispitivanja

Prije početka mjerenja olovni blok je potrebno kondicionirati u termostatiranoj komori u trajanju od 24 sata kako bi postigao temperaturu od 15°C. Za ispitivanje se koristi 10 grama eksploziva kojeg je potrebno umotati u polietilensku foliju u obliku patrone s promjerom od 25 milimetara. U središte patrone potrebno je postaviti inicijalno sredstvo (rudarska kapica br. 8, električni, ili neelektrični detonator). Patrona s eksplozivom smješta se na dno cilindričnog prostora unutar olovnog bloka. Eksploziv se utiskuje kalibriranim bakrenim štapom na dno cilindričnog udubljenja. Prostor iznad eksploziva potrebno je zapuniti, odnosno začepiti suhim kvarcnim pijeskom (slika 4-1). Na slici 4-2 i slici 4-3 prikazan je presjek olovnog bloka prije i nakon detonacije eksploziva. Nakon iniciranja olovni blok se pregleda i očisti od ostataka pijeska i dijelova detonatora. Zatim se izmjeri volumen šupljeg prostora u cilindru prelijevanjem vode iz menzure, te se na taj način odredi bruto volumen (Dobrilović i dr., 2018).



Slika 4-1. Olovni blok spreman za detonaciju. (Memim encyclopedia, 2023)



Slika 4-2. Presjek olovnog bloka prije detonacije.



Slika 4-3. Presjek olovnoga bloka nakon detonacije.

4.2. Svojstva olovnog bloka

U Trauzlovom testu koristi se olovo zbog svojih specifičnih svojstava koja su ključna za provođenje testa. Olovo je metal niske mehaničke čvrstoće i elastičnosti s niskom točkom taljenja, što ga čini pogodnim za oblikovanje blokova potrebnih za testiranje. (Tablica 4-1) (Murati i Paulin, 1984).

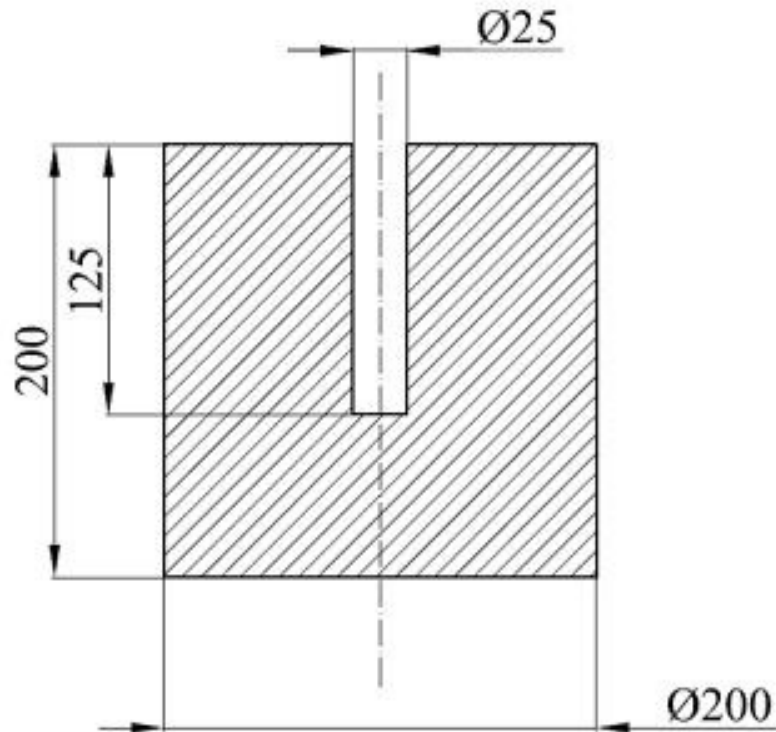
Tablica 4-1. Svojstva olova. (Murati i Paulin, 1984)

Svojstvo	Vrijednost
Mehanička čvrstoća	Niska
Vlačna čvrstoća	17 N/mm ²
Modul elastičnosti	16000 N/mm ²
Talište	327,4 °C
Toplinska vodljivost	0,347 J/cm·s·K
Koeficijent linearnog širenja	31·10 ⁻⁶ K ⁻¹
Specifična toplina na 20°C	0,13 J/K·g
Gustoća na 20°C	11,34 g/cm ³

Važnost temperature bloka pri izvođenju testa leži u činjenici da se temperatura olova može promijeniti tijekom samog eksperimenta. Prilikom detonacije eksploziva, generira se značajna količina topline koja može utjecati na temperaturu bloka. Promjene temperature mogu utjecati na fizička svojstva olova, uključujući gustoću, topljivost i čvrstoću.

Stoga je važno kontrolirati temperaturu bloka kako bi se osigurala dosljednost i pouzdanost rezultata testa. Time se osigurava da se testiranje vrši pod uvjetima koji su što bliži standardiziranim uvjetima i da se rezultati mogu usporediti i analizirati na ispravan način.

Locking (2022.) navodi dimenzije olovnog bloka koje je H. Brunswick postavio kao standardne. Promjer i visina bloka iznose 200 mm. Promjer proširenja u olovnom bloku iznosi 25 mm, a njegova dubina 125 mm. (Slika 4-4).



Slika 4-4. Dimenzije olovnog bloka u milimetrima. (Dobrilović, 2018)

4.3. Proračun rezultata ispitivanja

Proširenje cilindrične rupe u olovnom bloku, izražene u cm^3 , koje nastaje prilikom detonacije računa se prema izrazu:

$$V = V_1 - V_0 + V_k \quad (4-1)$$

gdje su:

V_1 – volumen bruto proširenja poslije eksplozije (cm^3)

V_0 – volumen rupe u bloku prije eksplozije (cm^3)

V_k – korekcije vrijednosti V_1 u ovisnosti od temperature bloka prije eksplozije (cm^3)

$$V_k = k \cdot V_1 \quad (4-2)$$

gdje je:

k – korekcijski faktor, (%)

Za svaki se uzorak ispitivanje provodi tri puta, a računa se srednja vrijednost rezultata svih triju ispitivanja. Ako temperatura olovnog bloka prije izvođenja pokusa nije 15 °C, dobiveno proširenje se korigira prema tablici 4-2.

Tablica 4-2. Korekcijski faktor temperature. (Dobrilović, 2018)

Temperatura (°C)	Korekcijski faktor (%)	Temperatura (°C)	Korekcijski faktor (%)
-10	+6,25	+20	-1,25
-5	+5,00	+25	-2,50
0	+3,75	+30	-3,75
5	+2,50	+35	-5,00
10	+1,25	+40	-6,25
15	0,00	-	-

Iako koristan indeksni pokazatelj, Trauzlov test ima određene prednosti i nedostatke koji u konačnici imaju i direktan utjecaj na rezultate ispitivanja, te ih je bitno navesti. Dobru sistematizaciju prednosti i nedostataka dao je Locking u svom radu 2022.

Nedostaci Trauzlovog testa:

- Radna sposobnost se izražava u jedinicama volumena, ne u jedinicama energije.
- Nema precizne proporcionalnosti između stvarne radne sposobnosti i nastalog šupljeg prostora zbog smanjenja debljine i otpornosti stjenke olovnog bloka.
- Gustoća eksploziva kao njegovo važno svojstvo nije sastavni dio proračuna.
- Podatci dostupni u literaturi za do sada ispitane vrijednosti uvelike variraju.
- Nemogućnost preciznog mjerenja sekundarne reakcije izgaranja, odnosno naknadnog sagorijevanja.
- Test nije primjenjiv za snažnije eksplozive, jer njihova snaga često razlomi, ili na neki drugi način ošteti olovni blok ne stvarajući volumen proširenja koji se može precizno izmjeriti. Za takve eksplozive koristi se aluminijski blok, no vrlo je ograničena baza podataka o rezultatima Trauzlovog testa na aluminiju.
- Obzirom na veliku gustoću olova, $\rho_{Pb} = 11,35 \text{ g/cm}^3$, olovni blok ima veliku masu čime je rukovanje takvim blokom otežano, ali i skupo. Moguće je koristiti i druge materijale poput aluminija, gustoće $\rho_{Al} = 2,70 \text{ g/cm}^3$, koji ima značajno manju masu u odnosu na olovni blok. (Locking, 2022)

Prednosti Trauzlovog testa su:

- Test je relativno jednostavan za izvođenje.
- Oprema za ispitivanje je jednostavna.
- Način izvođenja testa simulira minsku bušotinu što omogućuje proučavanje radne sposobnosti eksploziva u uvjetima sličnima stanju na terenu.
- Standardiziranost mjerenja Trauzlovog testa omogućuje usporedbu rezultata različitih eksploziva.
- Široka prihvaćenost u industriji i istraživačkim radovima čini Trauzlov test korisnim alatom za procjenu radne sposobnosti eksploziva.
- Dugogodišnja primjena doprinosi njegovoj vjerodostojnosti (Locking, 2022).

Radna sposobnost eksploziva može se mjeriti i modificiranim Trauzlovim testovima koji su varijacija originalnog Trauzlovog testa, a koji su razvijeni kako bi se proširile mogućnosti testiranja eksplozivnih materijala. Važno je napomenuti da su za modificirani Trauzlov test i veliki Trauzlov test (engl. *large Trauzl test*) karakteristični specifični pristupi testiranju eksplozivnih materijala i njihova primjena može biti ovisna o specifičnim potrebama i

svrhama testiranja. Ove varijacije se mogu prilagoditi kako bi zadovoljile svoje specifične zahtjeve i tako dobili relevantni rezultati.

Modificirani Trauzlov test uključuje promjene u metodi i materijalima korištenima za testiranje. To može uključivati korištenje drugih materijala za izradu blokova, te se umjesto olova mogu koristiti aluminij, čelik, ili drugi metali. Također, mogu se primijeniti različite tehnike mjerenja i analize rezultata.

Veliki Trauzlov test se odnosi na primjenu Trauzlovog testa na većim uzorcima, ili eksplozivnim napravama. Ovaj test se koristi za procjenu radne sposobnosti, ili snage eksplozivnih sredstava većih dimenzija.

Modificirani Trauzlov test i veliki Trauzlov test često nisu isplativi zbog visokih troškova opreme, vremenskih i resursnih zahtjeva, te tehničkih poteškoća. Provedba ovih testova može biti skupa, zahtijevati više vremena i stručnjaka, te nositi rizik od oštećenja opreme. Stoga se njihova primjena obično ograničava na specifične istraživačke, ili industrijske potrebe koje zahtijevaju detaljnije, ili specijalizirane podatke o radnoj sposobnosti eksploziva.

U laboratoriju za ispitivanje eksplozivnih tvari na RGNF-u kao referentni eksploziv koristi se pentrit (engl. pentaerytriol tetranitrate, PETN). Pentrit je jednomolekularni eksploziv koji ima široku primjenu u različitim eksplozivnim sredstvima. Ključni je sastojak za punjenje svih vrsta detonirajućih štapina, igrajući važnu ulogu kao glavno (brizantno) punjenje rudarskih kapica i drugih detonatora. Također, koristi se u proizvodnji pojačnika kako bi povećao učinkovitost drugih eksploziva. Radna sposobnost pentrita prema Trauzlu iznosi $523 \text{ cm}^3/10\text{g}$ (Ester, 2005). Izgledom je pentrit bezbojni kristalni prah kao što je prikazano na slici 4-5.



Slika 4-5. Pentrit. (Wikipedia, 2023.)

Za svaki eksploziv kojem se testirala radna sposobnost provođena su tri testa. Osim mjerenja volumena bruto proširenja nakon eksplozije, kod svakog testa je mjerena temperatura bloka, što je omogućilo određivanje korekcijskog faktora. Na primjeru eksploziva ELMEX-a, u tablici 4-3 prikazani su zapisani podatci za provedene testove.

Tablica 4-3. Ispitivanje radne sposobnosti ELMEX-a u olovnom bloku. (Ester, 2005)

Broj uzroka	Masa eksploziva (g)	Volumen bruto proširenja nakon eksplozije (cm ³)	Temperatura bloka (°C)	Faktor korekcije temperature (%)	Volumen neto proširenja nakon korekcije (cm ³)
1.	10	380	11.5	+1.25	323.43
2.	10	390	11.5	+1.25	333.55
3.	10	305	11.5	+1.25	247.49

4.4. Rezultati ispitivanja

Mjerenja radne sposobnosti provedena su za ANFO, emulzijske eksplozive i amonij nitratne praškaste. Spomenuti eksplozivi svrstavaju se pod sekundarne eksplozive, a ovoj skupini pripadaju svi eksplozivi koje koristimo u gospodarstvu. Povoljni su za korištenje jer su stabilni, sigurni pri transportu, rukovanju, te imaju široku primjenu.

ANFO eksplozivi (engl. *ammonium nitrate fuel oil*) su jedni od najčešće korištenih eksploziva. Sastoje se od amonijevog nitrata najčešće u obliku granula, rjeđe u prahu, te od goriva na bazi nafte, odnosno mineralnog ulja. Ključni čimbenici koji utječu na njihovu kvalitetu uključuju karakteristike amonijevog nitrata kao osnovnog sastojka (npr. poroznost i granulacija), odabir pogodnog goriva, te postupak miješanja amonijevog nitrata s gorivom. Nedostatak ovih eksploziva je njihova osjetljivost na vlagu što ograničava vrijeme skladištenja. Osim toga, slaba vodootpornost ograničava njihovo korištenje u suhim uvjetima (Ester, 2005). Na Slici 4-6 prikazan je ANFO eksploziv prije i nakon patroniranja.



Slika 4-6. ANFO eksploziv (lijevo) (Zečić, 2015.) i patronirani ANFO eksploziv (desno) (POLIEX, 2021.).

Emulzijski eksplozivi su mješavine dvaju otopina. Jedna od tih otopina je kontinuirana uljna faza koja sadrži gorivo, a druga otopina su disperzirane anorganske soli i emulgator. Uloga emulgatora je smanjiti površinsku napetost između disperzirane i kontinuirane faze, te tako osigurati stabilnost emulzije. Ova mješavina se naziva emulzijska matrica i neeksplozivna je sve dok se ne senzibilizira dodatkom plinske faze u obliku čvrstih staklenih, ili plinskih mjehurića koji sadrže tzv. tople točke, te koji iniciraju reakciju pod djelovanjem udarnog vala. Dodavanjem plinske faze matrici reguliraju se gustoća, a time i tehničke karakteristike emulzijskih eksploziva. To je korisno jer omogućuje izradu eksploziva koji mogu biti prilagođeni za različite potrebe (Ester, 2005). Slika 4-7 prikazuje emulzijsku matricu i patronirani emulzijski eksploziv.



Slika 4-7. Emulzijska matrica (lijevo) (Zečić, 2015.) i emulzijski eksploziv (desno) (AUSTIN POWDER, 2023).

Amonij nitratni praškasti eksplozivi su praškasti eksplozivi izrađeni na bazi TNT-a i amonijum nitrata. Slabe su osjetljivosti na udar i trenje, zbog čega spadaju u eksplozive sigurne za rukovanje i transport, a nisu ni štetni za okolinu. Pri niskim temperaturama ne smrzavaju. Primjenjuju se prije svega za masovna rudarska miniranja u podzemnoj i površinskoj eksploataciji, za miniranje od mekih do čvrstih stjenskih masa, gdje nisu prisutni metan i eksplozivna ugljena prašina. Iniciraju se klasičnim sredstvima za iniciranje: rudarskom kapicom, električnim detonatorima, neelektričnim sustavom iniciranja i detonirajućim štapinom. Zbog svoje niske vodootpornosti koriste se za miniranja u suhim i vlažnim mitskim bušotinama, a nisu primjenjivi za miniranje u bušotinama u kojima ima vode. na Slici 4-8 prikazan amonij nitratni praškasti eksploziv.



Slika 4-8. Amonij nitratni praškasti eksploziv AMONEKS. (Trayal, 2023)

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4-4, gdje su eksplozivi grupirani u tri glavne grupe: ANFO, emulzije i amonij nitratni praškasti eksplozivi. Opći sastav ANFO eksploziva je AN i mineralno ulje u omjeru od 95/5 do 94/6, odnosno 93,5/6,5. Emulzijski eksplozivi sastoje se od AN i nitrata u vodi, uljne faze (goriva), emulgatora i plinske faze, odnosno mjehurića sa zrakom. Amonij nitratni praškasti eksplozivi su smjese mljevenog AN-a, goriva (najčešće drvenog brašna), te TNT-a.

Unutar pojedine grupe eksploziva, točni udjeli pojedinih komponenata definirani su recepturama proizvođača, te stoga sastavi ispitivanih eksploziva nisu u potpunosti jednaki.

Tablica 4-4. Rezultat mjerenja volumena proširenja Trauzlovim testom.

Vrsta eksploziva	Volumen proširenja, V (cm ³)		
	Test 1	Test 2	Test 3
ANFO	319	329	244
	323	334	248
	323	304	314
	325	311	327
	324	315	329
	343	336	340
EMULZIJA	286	240	269
	279	273	264
	274	274	264
	274	273	273
	273	283	322
	294	289	248
	322	337	344
	364	371	359
	362	350	329
AMONIJ NITRATNI PRAŠKASTI	319	295	294
	351	335	342
	385	336	370
	372	382	384

4.4.1. Procjena mjerne nesigurnosti

Mjerni rezultat je aproksimacija, odnosno procjena vrijednosti mjerene veličine i potpun je samo kada je uz njega iskazana nesigurnost te procjene (JCGM 100:2008).

S obzirom na nedostatke mjerenja navedene u poglavlju 4.3. provedena je procjena mjerne nesigurnosti tipa A kako bi se izbjegla mogućnost da se pri prepoznavanju sastavnica mjerne nesigurnosti pojedina izostavi. Tip A procjene mjerne nesigurnosti je procjena mjerne nesigurnosti na osnovu statističke analize serije mjerenja a pri procjeni mjerne nesigurnosti primjenjuju se sljedeći statistički parametri: aritmetička sredina, standardno odstupanje, standardna nesigurnost i relativna nesigurnost.

Aritmetička sredina, \bar{q} , dana je izrazom:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (4-3)$$

gdje su:

q_k – pojedinačna mjerenja promjene volumena (cm³)

n – broj neovisnih mjerenja (-)

Standardno odstupanje, s_p , dano je izrazom:

$$s_p^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (4-4)$$

Standardna nesigurnost mjerenja, u , dana je izrazom:

$$u = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \quad (4-5)$$

Relativna nesigurnost mjerenja, U_{rel} dana je izrazom:

$$U_{rel} = \frac{u}{\bar{q}} \cdot 100 \quad (4-6)$$

Rezultati statističke analize prikazani su u Tablici 4-5.

Tablica 4-5. Rezultati statističke analize.

Vrsta eksploziva	Aritmetička sredina, \bar{q} (cm ³)	Standardno odstupanje, s_p (cm ³)	Standardna nesigurnost, u (cm ³)	Relativna nesigurnost, U_{rel} (%)
ANFO	316.0	27.4	6.4	2.0
EMULZIJA	299.6	17.5	3.4	1.1
AMONIJ NITRATNI PRAŠKASTI	349.6	32.7	9.5	2.7

Analizom rezultata Trauzlovog testa za ispitane eksplozive dobivene su sljedeće srednje vrijednosti proširenja:

- Za ANFO eksploziv iznosi $316.0 \pm 6.4 \text{ cm}^3$
- Za emulzijske eksplozive iznosi $299.6 \pm 3.4 \text{ cm}^3$
- Za amonij nitratne praškaste eksplozive iznosi $349.6 \pm 9.5 \text{ cm}^3$

Srednja vrijednost proširenja za PETN, koji koristimo kao referentni eksploziv, iznosi 523 cm^3 . Usporedbom vrijednosti referentnog eksploziva i vrijednosti sve tri grupe eksploziva može se uočiti da je radna sposobnost ispitanih eksploziva niža u odnosu na referentni eksploziv.

5. ZAKLJUČAK

Trauzlov test je metoda koja omogućava uspoređivanje učinka detonacije eksploziva putem mjerenja volumena nastalog proširenja u olovnom bloku. Metoda je primjerena jer omogućava posrednu kvantifikaciju učinka pojedinog eksploziva u odnosu na referentni eksploziv jednostavnim postavom mjerenja.

Unatoč standardizaciji metode, podaci mjerenja za različite eksplozive iz literaturnih izvora djelomično su usporedivi zbog nedostatka podataka o detaljima postavaka metode. Metoda je primjenjivana i kao alat za korelaciju pojedinih teoretskih izračunatih detonacijskih parametara te mjerenog volumena proširenja. Analizirani podaci mjerenja volumena proširenja dani u radu usmjereni su na tri grupe eksploziva, odnosno ANFO eksplozive, emulzijske eksplozive i amonij nitratne praškaste eksplozive. Analizirani rezultati mjerenja odnosili su se na prosječne vrijednosti mjerenja dobivenih za pojedine uzorke različitih proizvoda. Pojedini proizvodi, unutar navedenih grupa mogu se razlikovati po sastavu, obzirom na recepturu smjese odnosno tvornička odstupanja pojedine šarže. U tom smislu, rezultate mjerenja treba promatrati sa širim pojasom tolerancije, odnosno nesigurnosti.

Usporede li se rezultati s teoretskim generalnim parametrima, odnosno toplinom detonacije, brzinom detonacije i volumenom plinovitih produkata ne nalazi se značajnija korelacija detonacijskih parametara s mjerenim volumenima proširenja. Nadalje, obzirom na metodu mjerenja, nalaze se mala odstupanja mjerenja, odnosno mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja.

Za zaključiti je da je potrebno provesti dodatna ispitivanja odnosno mjerenja proširenja Trauzlovim testom u dobro kontroliranim uvjetima, kako ispitivanja, tako i mjerenja, u svrhu dobivanja relevantnih iznosam čime bi se omogućila provedba pouzdanije analize.

6. LITERATURA

1. AUSTIN POWDER, 2023. Emulex 900 series.
URL:<https://www.austinpowder.com/canada/products/emulex-900-series/>
(24.7.2023)
2. DOBRILović M., BOHANEK V., ŠKRLEC V., STANKOVIĆ S., PEĆINA D., 2018. *Priručnik za laboratorijske vježbe iz Miniranja I*. Sveučilište u Zagreb: Rudarsko-geološki-naftni fakultet.
3. ESTER, Z. 2005. *Miniranje I. Eksplozivne tvari, Svojstva i Metode ispitivanja*
4. IZVJEŠĆE br.101/999 o ispitivanju ANFO eksploziva ELMEX. Laboratorij zavoda za rudarstvo i geotehniku 10000 Zagreb, Pierottijeva 6: RUDARSKO-GEOČOŠKO-NAFTNI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU
5. JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. 2008. JCGM 100:2008. *Evaluation of measurement data Guide to the expression of uncertainty in measurement*
6. KESHervAZ M.H., GHORBANIFARAZ M., RAHIMI H., RAHMANI M. *A new approach to predict the strength of high energy materials*, Journal of Hazardous Materials 186 (2011) 175–181
7. LOCKING M.P., 2022. *TNT Equevalence, Berthelot theory and the Trauzl lead block test*
8. MAREK M. 2019 *Ispitivanje radne sposobnosti eksploziva metodom ekspanzije metalne cijevi*. Diplomski rad. Sveučilište u Zagreb: Rudarsko-geološki-naftni fakultet
9. Memim encyclopedia, Trauzl lead block test.
URL: <https://memim.com/trauzl-lead-block-test.html> (12.7.2023)
10. MURATI I., PAULIN A., *Tehnička enciklopedija*, 9. svezak: Olovo, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 1984.
11. POLIEX, 2021. ANFO EKSPLOZIVI – BERANEX – A (TIP ANFO)
URL:<https://poliex.me/product/explosive-beranex-a-type-anfo/> (24.7.2023)
12. SUĆESKA, M. 1995. *Test Methods for Explosives*, Springer-Verlag, New York
13. UNITED NATIONS SUB-COMMITTEE OF EXPERTS N THE TRANSPORT OF DANGEROUS GOODS. 2017. *Revision pf the Manual of the Tests and Criteria: Part II (section 20 to 28)*

14. WIKIPEDIA,2023 Pentaeritritol tetranitrat.

URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Pentaerythritol_tetranitrate (12.7.2023)

15. ZEČIĆ L., 2015. *Emulzijski i ANFO eksplozivi s dodatkom organskog otpada.*

Diplomski rad. Sveučilište u Zagreb: Rudarsko-geološki-naftni fakultet