Utjecaj značajki miniranja na kotlovsko proširenje u glinenome tlu

Težak, Denis

Doctoral thesis / Disertacija

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:659035

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-23**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište u Zagrebu

RUDARSKO - GEOLOŠKO - NAFTNI FAKULTET

Denis Težak

UTJECAJ ZNAČAJKI MINIRANJA NA KOTLOVSKO PROŠIRENJE U GLINENOME TLU

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu

RUDARSKO - GEOLOŠKO - NAFTNI FAKULTET

Denis Težak

UTJECAJ ZNAČAJKI MINIRANJA NA KOTLOVSKO PROŠIRENJE U GLINENOME TLU

DOKTORSKI RAD

Mentor(i):
Izv. prof. dr. sc. Mario Dobrilović
Prof. dr. sc. Josip Mesec

Zagreb, 2018.

University of Zagreb

FACULTY OF MINING, GEOLOGY
AND PETROLEUM ENGINEERING

Denis Težak

INFLUENCE OF THE BLASTING FEATURES ON THE EXPANSION IN CLAY SOIL

DOCTORAL THESIS

Supervisor(s):
Associate Professor Mario Dobrilović, PhD
Full Professor Josip Mesec, PhD

Zagreb, 2018.

I. Autor

Ime i prezime:	Denis Težak
Datum i mjesto rođenja:	26. prosinca 1984. godine, Varaždin
Sadašnje zaposlenje:	Stručni suradnik u nastavi na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu

II. Doktorska disertacija

Naslov:	Utjecaj značajki miniranja na kotlovsko proširenje u glinenome tlu
Broj stranica:	248 stranica
Broj tablica:	34 tablice
Broj slika:	217 slika
Broj literaturnih navoda:	85 literaturna navoda
Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen:	Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Znanstveno područje:	Tehničke znanosti
Znanstveno polje:	Rudarstvo, nafta i geološko inženjerstvo
Komentor:	Izv. prof. dr. sc. Mario Dobrilović
Komentor:	Prof. dr. sc. Josip Mesec

III. Ocjena i obrana

Datum prijave teme:	16. listopada 2017. godine
Datum sjednice fakultetskog vijeća na kojoj je doktorska disertacija prihvaćena:	26. siječnja 2018. godine
Sastav povjerenstva koje je ocijenilo doktorsku disertaciju:	Doc. dr. sc. Vječislav Bohanek Izv. prof. dr. sc. Mario Dobrilović Prof. dr. sc. Josip Mesec Prof . dr. sc. Muhamed Sućeska Doc. dr. sc. Ivan Kovač
Datum obrane doktorske disertacije:	20. srpnja 2018. godine
Sastav povjerenstva pred kojim je obranjena doktorska disertacija:	Doc. dr. sc. Vječislav Bohanek Izv. prof. dr. sc. Mario Dobrilović Prof. dr. sc. Josip Mesec Prof . dr. sc. Muhamed Sućeska Doc. dr. sc. Ivan Kovač

Zahvala

U izboru područja i metodologije za izradu disertacije, preciziranju naziva disertacije, izvođenju terenskih istraživanja na fizičkom modelu te pomoći tijekom obrade disertacije, posebnu zahvalnost želim izraziti komentoru prof. dr. sc. Josipu Mesecu, dipl. ing. rudarstva.

Drugom komentoru, izv. prof. dr. sc. Mariju Dobriloviću, dipl. ing. rudarstva, zahvaljujem na svesrdnoj pomoći na savjetima i potpori koju mi je pružao tijekom obrade disertacije.

Doc. dr. sc. Vječislavu Bohaneku, dipl.ing. rudarstva, zahvaljujem na korisnim savjetima koje mi je davao tijekom poslijediplomskog studija i obrade disertacije.

Zahvaljujem prof. dr. sc. Stjepanu Strelecu, dipl. ing. rudarstva na mogućnosti korištenja geotehničke opreme u svrhu istraživanja i obradi seizmičkih terenskih istraživanja, te Kristijanu Grabaru, dipl. ing. geotehnike na pomoći u obavljanju terenskih opažanja i obradi dijela podataka terenskih istraživanja.

Zahvaljujem se i doc. dr. sc. Mariu Gazdeku na pomoći u obavljanju seizmičkih opažanja i obradi dijela podataka terenskih istraživanja.

Zahvalnost dugujem i kolegama Ivanu Golubu, dipl. ing. geotehnike te Alenu Filipoviću, dipl. ing. geotehnike na izradi minskih bušotina za kotlovska miniranja.

Dipl. ing. geotehnike Damiru Štuhecu zahvaljujem na laboratorijskoj obradi i analizi uzoraka tla iz ležišta gline Cukavec.

Zahvaljujem se i direktoru Mladenu Grđanu, dipl. ing., iz tvrtke "Leier-Leitel" d.o.o., na nesebičnom i pravovremenom osiguravanju istražnog poligona i mogućnosti obavljanja terenskih istraživanja.

Također se zahvaljujem direktoru Božidaru Kočetu, dipl ing. geotehnike i tvrtci "Geotehna Varaždin d.o.o." na osiguravanju minersko-tehničkih sredstava i opreme te realizaciji pokusnih miniranja.

Kolegama, Davoru Stanku, magistar fizike i Jasminu Jugu, mag. ing. geoing., zahvaljujem na pomoći prilikom izvođenja mjerenja dubinskom kamerom, te ostalima sa Geotehničkog fakulteta u Varaždinu zahvaljujem na potpori koju su mi pružali prilikom izrade disertacije.

Na kraju želim izraziti zahvalnost svojoj obitelji na potpori i razumijevanju koju mi je pružala pri izradi disertacije tijekom posljednjih nekoliko godina.

Najdražima, Ivani, Lari i Leu...ovo je za Vas...

SAŽETAK

Poboljšanje inženjerskih svojstava glinenih tala može se postići djelovanjem koncentriranih eksplozivnih punjenja odnosno primjenom metode zbijanja koherentnih tla miniranjem. Detonacija koncentriranog eksplozivnog punjenja u tlu generira udarni val koji je podržan ekspanzijom produkata eksplozije te u tlu stvara intenzivan porni predtlak i oscilacije u okolini eksplozivnog punjenja. Pri tome se razara prirodna struktura glinenog tla, postiže se značajno povećanje zapremnine bušotine, odnosno generira se kuglasto proširenje, te se u susjednom području glineno tlo značajno stlačuje, a njegova gustoća povećava.

Eksplozijom nastali slobodni volumen služi za smještaj injekcijske mase i geotehničkog sidra, sa svrhom stvaranja mehaničke i adhezijske veze okolnog glinenog tla i injekcijske mase. Čvrstoća ostvarene veze uz ostalo ovisi o volumenu proširenja i o koeficijentu zbijenosti.

Mjera uspješnosti izvedenih miniranja je volumen generiranog proširenja. Volumen proširenja i svojstva zbijenog glinenog tla moguće je odrediti terenskim i laboratorijskim metodama.

U tu svrhu je razvijen sustav opažanja, mjerenja i računanja oblika i zapremnine nastalog proširenja. Sustav uključuje instrumentalni i programski dio, gdje je osmišljena aplikacija koja uz izračun koordinata bušotina omogućuje i detaljnu grafičku interpretaciju proširenja u 2D i 3D prikazu.

Primjenom standardnih terenskih i laboratorijskih metoda moguće je odrediti promjene u tlačnoj čvrstoći, posmičnoj čvrstoći, gustoći te modulu elastičnosti u tlu nakon miniranja. Ta ispitivanja omogućavaju određivanje mjere poboljšanja svojstava tla u ovisnosti o detonacijskim parametrima, masi i vrsti eksploziva.

Prema tome, uz određivanje utjecaja navedenih parametara miniranja na oblik i zapremninu miniranjem izvedenog proširenja u radu su predložene i smjernice za odabir parametara miniranja prema traženim svojstvima okolnog, na taj način poboljšanog tla, a u skladu sa zahtjevima na sidrenje konkretne strukture, primjerice kosina glinenih tla u geotehničkoj praksi.

Ključne riječi: *glineno tlo, eksplozivno punjenje, kuglasto proširenje, aplikacija*

ABSTRACT

Improvement of engineer properties of clay soils can be achieved by the action of the concentrated explosive charge or by applying a blasting method in the coherent soil. Detonation of the concentrated explosive charge in the clay soil generates a shock wave supported by the expanding explosion product that creates intense strong pore excess pressure and oscillations in the surrounding area of the explosive charge. In that case, the natural structure of the clay soil is destroyed, a significant increase in the borehole volume is achieved, the spherical cavity is generated, and in the adjacent area the clay soil is significantly compressed and its density increases.

With the detonation of the generated shock wave in the soil, the released energy creates a strong pore excess pressure and intense vibrations in the surrounding area of explosive charge. During this process, the natural structure of the clay soil is destroyed, cavities are created near the explosive charge, and in the zone along the wall, there is an intense compression of clay soil with an increasing density.

The efficiency rate of conducted blasting is a volume of the resulting expansion. The expansion volume and the compaction of the clay soil can be determined by field and laboratory research.

For this purpose, the system of observation, measurement, and calculation of the shape and volume of the resulting cavity is being developed. The system includes an instrumental and programming part, where a designed application enables detailed graphical interpretation of the cavity in 2D and 3D views, along with the borehole coordinate calculations.

This system represents the integration of RTK GNSS, Heavy Duty GeoVision Borehole Camera and Laser (EDS-C). For calculating the generated cavity and its volume at a certain depth of recording, an application "Bušotine" was created.

Field researches and innovations in field data processing resulted in a sufficient amount of quality data that enabled the development of this type of application.

The significance and contribution of the application "Bušotine" are reflected on the one hand in the use of open source technology, and secondly in commercial utility compatibility and the ability to connect to other systems through a series of interfaces. The added value of

an application is achieved through the use of web technology, enabling secure login to the system from any computer, tablet, cell phone or other similar device connected to the Internet. All the information that users collect and enter into the system are immediately available to all remaining process parts.

The concept and possibilities of the application in the technical field are innovativeness. Aside from the application's calculation of the coordinates and the generated cavity and its volume, the application gives a detailed graphical interpretation of the 2D and 3D view of the resulting cavity. Also, the compatibility of the application with other CAD tools will greatly contribute to a check and a more detailed 3D cavity view.

The use of the standard field and laboratory methods will determine changes in the compressive strength, shear strength, density and elasticity modulus in the clay soil after blasting. This research will enable the determination the improvement of the soil properties depending on the detonation parameters, quantity, and type of explosives.

Accordingly, with the determination of the influence of the above-mentioned blasting parameters on the shape and volume of the implemented extension in the doctoral dissertation, suggestions will be proposed for selecting the blasting parameters according to the required properties of the surrounding clay soil improved in accordance with the requirements for anchoring the concrete soil structure in geotechnical practice.

Keywords: *clay soil, explosive charge, cavities, GNSS, Borehole Camera, Laser, application.*

Sadržaj

1. UVOD 1

2. TLO 5

2.1. OPĆENITO O TLU 5

2.2. STRUKTURNE I GEOTEHNIČKE ZNAČAJKE TLA 9

2.2.1. Strukturne značajke tla 10

2.2.2. Geotehničke značajke tla 11

2.2.2.1. Poroznost, vlaga i obujamska masa 12

2.2.2.2. Kohezija i kut unutrašnjeg trenja 18

3. SIDRENJE U TLU 22

3.1. OPĆENITO O SIDRENJU 23

3.2. NAČINI PRIMJENE U GOSPODARSTVU 32

4. EKSPLOZIVI I MINERSKO-TEHNIČKE ZNAČAJKE EKSPLOZIVA 34

4.1. EKSPLOZIVI 34

4.1.1. Eksplozivni procesi 35

4.1.2. Eksplozivne tvari 39

4.2. MINERSKO-TEHNIČKE ZNAČAJKE EKSPLOZIVA 41

4.2.1. Brzina detonacije 42

4.2.2. Brizantnost eksploziva 42

4.2.3. Radna sposobnost eksploziva 43

4.2.4. Volumen i specifični tlak eksplozije 43

4.2.5. Tlak detonacije 44

4.2.6. Kritična masa i promjer eksploziva 44

4.2.7. Gustoća eksploziva 44

4.2.8. Temperatura eksplozije 44

4.2.9. Bilanca kisika 44

4.2.10. Osjetljivost na udar 45

4.2.11. Prijenos detonacije 46
4.2.12. Vodootpornost 46
4.3. MINERSKO-TEHNIČKE ZNAČAJKE EKSPLOZIVA KORIŠTENIH PRILIKOM ISTRAŽIVANJA NA EP CUKAVEC II 47
4.3.1. Amonij nitratno praškasti eksplozivi 47
4.3.2. ANFO eksplozivi 48
5. KOTLOVSKA MINIRANJA 50
5.1. DJELOVANJE EKSPLOZIJE U KOHERENTNIM TLIMA 53
5.2. PRIMJENA KOTLOVSKIH MINIRANJA 55
6. PRIKAZ DOSADAŠNJIH REZULTATA ISTRAŽIVANJA 57
6.1. OPIS LOKACIJA I KONCEPCIJA POKUSNIH KOTLOVSKIH MINIRANJA 57
6.2. TERENSKA ISTRAŽIVANJA 59
6.3. LABORATORIJSKA ISTRAŽIVANJA 63
7. RECENTNA TERENSKA I LABORATORIJSKA ISTRAŽIVANJA 66
7.1. LOCIRANJE MINSKIH POLJA I ISKOLČENJE MINSKIH BUŠOTINA 67
7.1.1. Priprema, izvedba i usporedba geodetskih mjerenja 71
7.2. TERENSKA GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA 73
7.2.1. Geofizička istraživanja 73
7.2.2. Istražno bušenje 92
7.2.3. Laboratorijska ispitivanja 99
7.3. POKUSNA MINIRANJA I ODREĐIVANJE EFEKTIVNOG RASPONA MASA DVIJU VRSTA EKSPLOZIVA KOJIMA SE DOBIVA KUGLASTO PROŠIRENJE PRI DNU MINSKIH BUŠOTINA 104
7.4. UTVRĐIVANJE NASTALIH KUGLASTIH PROŠIRENJA NAKON AKTIVIRANJA EKSPLOZIVNOG PUNJENJA 109
7.4.1. Postupak mjerenja sustavom dubinska kamera-laser 111

7.5. MJERENJE BRZINA OSCILACIJA U KOHERENTNOM GLINOVITOM TLU ... 112

7.5.1. Seizmografi ... 114

8. ANALIZA I INTERPRETACIJA PODATAKA DOBIVENIH TERENSKIM I LABORATORIJSKIM ISTRAŽIVANJIMA ... 118

8.1. OPIS APLIKACIJE ZA UTVRĐIVANJE VOLUMENA NASTALIH KUGLASTIH PROŠIRENJA ... 118

8.1.1. Arhitektura sustava ... 119

8.1.2. Funkcionalna specifikacija ... 120

8.1.3. Tehnička specifikacija ... 126

8.1.4. Korisničke upute ... 128

8.1.5. Korištenje aplikacije na konkretnim primjerima u geotehničkoj praksi ... 135

8.2. OBRADA GEOFIZIČKIH REZULTATA MJERENJA DOBIVENIH REFRAKCIJSKOM SEIZMIKOM I MASW ... 140

8.2.1. Seizmička terenska ispitivanja u 2014. godini ... 140

8.2.2. Seizmička terenska ispitivanja u 2015. godini ... 141

8.2.2.1. Prikaz koeficijenta poboljšanja tla dobivenog MASW metodom ... 155

8.2.3. Seizmička terenska ispitivanja u 2016. godini ... 157

8.3. OBRADA LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA ... 158

8.4. OVISNOST BRZINE OSCILACIJE TLA O REDUCIRANOJ UDALJENOSTI ... 163

8.5. OBRADA I PRIKAZ VOLUMENA NASTALOG KUGLASTOG PROŠIRENJA NAKON AKTIVIRANJA EKSPLOZIVNOG PUNJENJA ... 168

8.5.1. Analiza rezultata dobivenih nakon aktiviranja dviju različitih vrsta eksplozivnog punjenja ... 174

9. ZAKLJUČAK ... 175

10. LITERATURA ... 178

Popis slika 185
Popis tablica 199
Popis priloga 202
Prilozi 203
Popis korištenih oznaka i odgovarajućih jedinica 229
Popis kratica 233
Životopis 235
Popis objavljenih radova 236

1. UVOD

Koncem osamdesetih godina prošlog stoljeća u okviru prijavljenog patenta "Postupak sidrenja u mekom tlu" provedena su određena istraživanja u kojima je sudjelovalo devet znanstvenika sa Sveučilišta u Zagrebu (Hudec M. et al., 1989). Svrha istraživanja je bila utvrditi mogućnosti primjene proširenja sidara i zatega i na objekte koji se izgrađuju u mekom tlu.

Iskop kroz zemljani materijal predstavlja jedan od složenijih zadataka pri izgradnji podzemnih prostorija i tunela. Radi toga se pokušalo razviti postupke koji mogu olakšati izradu prostorija u stijenama koje su po svojim geotehničkim karakteristikama zapravo tla.

Gotovo svi dotada poznati postupci sidrenja pomoću šipki armaturnog čelika, cijevi ili kablova za prednaprezanje, uz primjenu cementnih ili plastičnih masa za injektiranje nisu bili dovoljno uspješni pri usidrenjima koje je trebalo izraditi u glini, ilovači ili sličnim mekanim ili zemljanim materijalima. Sidra se izvode u obliku krutih profila (šipke armiranih željeza ili cijevi), ili u obliku čeličnih užadi (Muhovec I., 1987).

Spomenuti postupak koji je bio zaštićen patentom temelji se na činjenici da eksplozija određene mase eksploziva, smještene u bušotini koherentnog tla, daje kao rezultat ograničeno proširenje najčešće oblika kugle, a volumen iste ovisi o masi i vrsti uporabljenog eksploziva i naravno o geotehničkim karakteristikama tla (Frgić L. et al., 1988). U nastalo kuglasto proširenje se ulaže kraj sidra sa kukom ili raspletenim kablom i nakon toga proširenje se ispunjava betonom ili cementnom injekcijskom smjesom (Arapov I. et al., 2009). Na taj način, željelo se projektantima i geotehničarima omogućiti znatno ekonomičnije projektiranje i izvođenje nadzemnih i podzemnih objekata. Primjena sidara u mekanim tlima pojeftinjuje izgradnju potpornih zidova uz objekte i prometnice, temelje visokih tornjeva, dimnjaka, dalekovodnih stupova i slično (Goel S. et al., 2006). Osim toga, pojeftinjuje se i povećava sigurnost izvođenja primarne podgrade u najtežim uvjetima izgradnje podzemnih prostorija.

Težište tadašnjih istraživanja bilo je usmjereno na utvrđivanje nosivosti sidara ugrađenih u proširenje nastalo detonacijom eksplozivnog punjenja primjenom kotlovskih miniranja, pri čemu su učinci miniranja u tlu bili slabije istraženi (Pranjić J., 1991).

Dobiveni rezultati, prijašnjim istraživanjima omogućili su veliki istraživački potencijal, koji se primjenom modernih tehnika miniranja i opažanja oblika i volumena nastalog proširenja nakon detonacije određene vrste i mase eksploziva uz primjenu računalne aplikacije može značajno unaprijediti.

Upravo ta spoznaja bila je najvažnija pri odluci o nastavku programa istraživanja koji u prvi plan postavlja učinke detonacije eksploziva u glinenim tlima. U tu svrhu 2013. godine definirana su istraživanja, uz kratkoročnu financijsku Sveučilišnu potporu, za provjeru djelovanja eksplozivnog punjenja u glinovitom tlu i za provedbu terenskih geotehničkih istraživanja, naziva *Poboljšanje glinenih tala korištenjem eksploziva* (Mesec J. et al., 2015).

Značajni dio terenskih geotehničkih istraživanja proveden je tijekom 2015. godine na gliništu Cukavec II. Glinište se nalazi u bližoj okolici grada Varaždina, a terenska i laboratorijska istraživanja izvođena su i tijekom 2014., 2015. i 2016. godine. Kod provođenja istraživanja korišteni su instrumenti kojima su se opažali terenski podaci, izvodila terenska i laboratorijska istraživanja (Strelec S. et al., 2014), te programska podrška kojom su se analizirali i interpretirali rezultati istraživanja.

Proširenja izvedena otpucavanjem kotlovskih punjenja bila su različita po obliku i veličini. Kod homogenih glinenih tla u osnovi se formira proširenje u obliku kugle (Araya K. et al., 1993). Kuglasta proširenja minskih bušotina nastale su detonacijom amonijsko nitratno praškastog eksploziva Permonex V19 i ANFO eksploziva komercijalnog naziva Pakaex. Brzina detonacije je u minersko tehničkom smislu svojstvo na osnovi kojega se preliminarno može odrediti uspješnost djelovanja detonacije eksploziva u različitim sredinama, a tako i u glinovitom koherentnom tlu. Za eksplozive korištene u istraživanju mjerena je uspješnost djelovanja detonacije u *Laboratoriju za ispitivanje eksplozivnih tvari* Rudarsko-geološko-naftnog fakultetu akreditiranog sukladno zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025:2007.

Pri detonaciji kotlovskih punjenja djeluje visoki tlak plinova eksplozije (detonacije) (Qingwen L. et al., 2015). Uslijed toga se tlo neposredno u zoni eksplozije počinje gibati, a udaljeniji slojevi stlače (Zhongqi W. & Yong L., 2003). Pri tomu, tlačni val radijalno istiskuje slojeve tla koji na taj način postaju kompaktniji, gušći i čvršći. U neposrednoj zoni eksplozije tlo se potpuno istisne, pri čemu se formira proširenje u obliku kugle. Slabljenjem tlačnog vala od centra eksplozije, formiraju se zona zbijanja i zona oscilacija tla. Radi procjene dinamičkih svojstava tla po dubini profila, prije i poslije miniranja, korištena je MASW (engl. *Multi-*

Channel Analysis of Surface Waves) metoda višekanalne analize površinskih valova kojom je mjerena brzina posmičnih valova V_s (Gabriels P. et al., 1987; Park C.B. et al., 1999).

Geomehanička laboratorijska ispitivanja poremećenih i neporemećenih uzoraka predmetnog glinenog tla izvedena su u akreditiranom laboratoriju Geotehničkog fakulteta prema međunarodnoj normi HRN EN ISO/IEC 17025:2007. Za potrebe projekta istraživanja ciljano je utvrđena vlažnost glinenog tla prije i poslije miniranja.

Prilikom istraživanja od posebne važnosti bilo je određivanje oblika i volumena proširenja nastalih na određenoj dubini glinenog tla nakon otpucavanja eksplozivnog punjenja koji je smješten u cilindričnoj bušotini promjera najmanje 131 mm. U tu svrhu je na Geotehničkom fakultetu razvijen sustav opažanja, mjerenja i računanja oblika volumena nastalog proširenja. Taj sustav predstavlja integraciju RTK GNSS metode, primjenom online transformacijskih parametara putem CROPOS-a (NN 110/2004, 114/2004; Pribičević B. & Medak D. 2003; Marjanović M., 2010), dubinske kamere, *Heavy Duty GeoVision Borehole Camera* (http://www.geovision.org/) i lasera, EDS-C (https://dimetix.com/en/?product=eds-c).

Također, osmišljena je i aplikacija "Bušotine" koja izračunava koordinate minske bušotine na temelju poznatih *E* i *N* koordinata (dobivenih GPS-uređajem) i visine *H* (u konkretnom slučaju dubine bušotina) dobivene upotrebom dubinske kamere i lasera. Za izračun nastalog proširenja i njezinog volumena na određenoj dubini korištena je aplikacija koja uz izračun koordinata daje i detaljnu grafičku interpretaciju u 2D i 3D prikazu (Težak D. et al., 2018).

Pregledom dostupne literature nisu evidentirana sustavna istraživanja koja definiraju utjecaj minersko-tehničkih značajki eksploziva na nastanak kuglastog proširenja na određenoj dubini glinenog tla nakon otpucavanja eksplozivnog punjenja. Također nisu pronađena istraživanja u kojima je definirana metoda za određivanje oblika i volumena nastalog kuglastog proširenja. Nakon pregleda, sistematizacije i analize literature, definiran je cilj istraživanja iz kojeg su proizašle i hipoteze istraživanja.

Cilj istraživanja:

Cilj istraživanja usmjeren je određivanju utjecaja i optimalizaciji pojedinih značajki pri izvođenju kotlovskih miniranja sa svrhom postizanja dovoljnog volumena proširenja. Cilj je moguće postići određivanjem utjecaja vrste i mase eksploziva, geometrijskih parametara miniranja te veze s potencijalno štetnim utjecajima miniranja na okolinu.

Ciljem istraživanja definirane su hipoteze istraživanja:

- značajke miniranja utječu na volumen i svojstva nastalog kuglastog proširenja u glinenom tlu,
- volumen nastalog kuglastog proširenja ovisi o brzini detonacije i masi eksploziva,
- razvoj metode i mjernih uređaja unaprjeđuje određivanje oblika i volumena nastalog kuglastog proširenja,
- brzina oscilacija u okolnom tlu ovisi o minersko-tehničkim značajkama primijenjenih vrsta eksploziva.

2. TLO

Tlo je sastavljeno od čvrstih čestica koje čine skelet tla, vode i zraka u porama između čvrstih čestica. Uslijed temperaturnih promjena, djelovanja vode (smrzavanje, otapanje, prenošenje), vjetra, bilja i ljudske djelatnosti stijena se razgrađuje u sitnije elemente (šljunak, pijesak, prah - mehanička razgradnja), rastapa se ili dolazi do promjena u kristalima stijene (kemijska razgradnja). Pri tome usitnjeni, rastopljeni ili drugačije promijenjeni materijal ostaje na mjestu ili se transportira u dubinu, niz padinu, na manje ili veće udaljenosti. Preneseni materijal se taloži na način uvjetovan temperaturom, slanoćom vode, brzinom strujanja vode ili zraka, granulometrijskim sastavom i drugim uvjetima na mjestu taloženja. Svojstva tla koja su interesantna u graditeljstvu vezana su na raspodjelu veličine čvrstih čestica (granulometrijski sastav), na svojstva pojedinih čvrstih čestica (mineraloška svojstva), te na način i rezultat nastajanja tla (Zlatović S., 2006; Mesec J., 2009)

Sedimentna tla su ona čije se čvrste čestice, nastale razgradnjom stijene (mehaničkom ili kemijskom), nošene vodom, vjetrom, ledom, organizmima ili uslijed sile teže (pri čemu dolazi do daljeg trošenja, otapanja, sortiranja) talože (sedimentiraju) na novom mjestu. Način sedimentiranja može znatno utjecati na svojstva tla (Zlatović S., 2006).

Rezidualna tla čini materijal nastao razgradnjom stijene koji nije odnesen. Česta su u vlažnim i toplim krajevima, te su prilično slabo istražena.

Nasip nastaje ugradnjom (graditeljskom djelatnošću) sa pozajmišta materijal se vadi, prenosi do željenog mjesta i ugrađuje, sa ili bez zbijanja.

Svaki od ovih procesa spor je i dugotrajan, te se često može smatrati da još uvijek traje. Zato tlo treba promatrati ne samo u trenutnoj datosti, nego i - ovisno o uvjetima u okolini - u trajnom mijenjanju. Veoma važan proces može biti razgradnja tla uslijed djelovanja vode, promjena temperature (Zlatović S., 2006).

2.1. OPĆENITO O TLU

Postoji niz različitih klasifikacija tla. Svakako, klasifikacija treba omogućiti da se pomoću jednostavnih pokusa svrstaju tla u grupe (klase) unutar kojih će ponašanje tla biti slično (Zlatović S., 2006; Nonveiller E., 1990).

Uglavnom, tla se dijele prije svega na (Zlatović S., 2006):

- **nekoherentna ili krupnozrna tla**, za koja vrijedi da je više od 50% mase ili težine čvrstih čestica veličine šljunka ili pijeska (tj. većih od 0,06 mm ili 0,074 mm, čestica koje se uglavnom vide golim okom). To su sipka tla, kod kojih je kohezija između čvrstih čestica zanemariva,
- **koherentna ili sitnozrna tla**, za koja vrijedi da je više od 50% mase ili težine čvrstih čestica veličine praha ili gline (tj. čestica koje se ne vide golim okom). To su tla kod kojih je kohezija između čvrstih čestica bitna, i zbog velike specifične površine čvrstih čestica i zbog postojanja električnih sila koje vežu vodu. To su tla koja se na neki način mogu mijesiti.

Pri rješavanju niza inženjerskih problema kao što su sidrenje, stabiliziranje pokosa, temeljenje u tlima i slično, do konačnih rješenja dolazi se na osnovi (Hudec M. et al., 1989):

- geoloških ispitivanja sastava i geotehničkih značajki,
- proučavanja naprezanja, odnosno deformacijskih svojstava i teorijskim analizama,
- iskustvom koje se zasniva na dobrim rješenjima prethodnika, ali i učenjem na tuđim pogreškama.

Kako bi rješenje sasvim određenog inženjerskog problema bilo najučinkovitije, o tlu treba znati i slijedeće (Zlatović S., 2006; Nonveiller E., 1990):

- tlo u osnovi karakterizira anizotropnost, heterogenost i plastičnost,
- tlo je supstrat koji je priroda stvorila tijekom dugih geoloških razdoblja, kad su na prvobitne sastojke zemaljske kore djelovali najrazličitiji mehanički, fizikalni i kemijski utjecaji i mijenjali njihova svojstva,
- sadrži slojeve i proslojke različitog sastava, prostiranja, debljine, čvrstoće, stišljivosti, vodopropusnosti i drugih svojstava,
- tlo vrlo često sadrži najraznovrsnije smjese proizvoda trošenja i raspadanja.

U geološkom smislu izraz stijena, označava sve materijale koji formiraju zemaljsku koru, dok se u geotehničkom smislu stijenom smatra prirodni agregat minerala koji su međusobno povezani jakim kohezijskim silama. Za razliku od kompaktne stijene, sastojci tla se obično mogu razdvojiti već i jednostavnim miješanjem s vodom ili čak samo sijanjem. Stoga je za

geotehniku tlo nakupina zrna različite veličine i oblika, povezanih gušće ili rahlije, s porama potpuno ili djelomično ispunjenim vodom ili zrakom ili vodom i zrakom.

Današnji oblik i sastav tla rezultat je formiranja Zemlje tijekom milenija. Za to vrijeme mijenjao se Zemljin oblik, sastav njezine atmosfere, raspored i svojstva vode-od pare do leda-a mijenjali su se postupno i u raznim kataklizmama naprezanja, temperatura i vlaga u kori. Posljedica takvih dugotrajnih procesa je promjena sastava i svojstava materijala na zemaljskoj površini, te je onaj dio zemljine kore koji se naziva tlo vrlo raznolik. Tijekom vremena od postanka Zemlje do danas djeluju na materijal u njezinoj kori čimbenici koji izazivaju trošenje i raspadanje prvobitnih stijena, transport nastalih proizvoda, taloženje čestica ili stvorenih novih taloga i dijagenezu.

Procesi trošenja i raspadanja su reakcije na tendenciju uspostavljanja ravnotežnog stanja u novim uvjetima, a svode se na prijelaz stijena iz masivnog, kompaktnog stanja u klastično, pa djelomično i u otopinu. Proces počinje progresivnim drobljenjem i razlaganjem stijenske mase in situ. Kao produkt trošenja nastaje smjesa otpornih primarnih minerala i niz novostvorenih mineralnih sastojaka, stabilnih u novoj sredini i odgovarajuće vodene otopine produkata trošenja.

Često se između glavnih vrsta trošenja-fizikalnog, kemijskog i biološkog-ne može odrediti jasna granica. U fizikalne procese raspadanja spadaju svi oni mehanički procesi koji uzrokuju drobljenje stijene bez bitnih kemijskih i mineralnih promjena. Usitnjavanje stijena povećava relativnu površinu čestica, čime potiče i ubrzava kemijsko trošenje. Svi ovi procesi mogu teći istovremeno, kao što i teku, makar značaj svakoga od njih pojedinačno koleba prema uvjetima sredine.

U usporedbi s fizikalnim, često mehaničkim procesima, kemijsko trošenje ima snažniji utjecaj na stijene i njihove mineralne sastojke, bilo da se radi o reakcijama razlaganja i pretvorbe. Međutim, na svim razinama i u svim sredinama kemijsko trošenje zavisi od prisutnosti vode i vodenih otopina. Svi su minerali više ili manje topljivi, pa i u čistoj vodi.

Prisutnost otopljenog kisika, ugljičnog dioksida i humusnih spojeva u velikoj mjeri povećava korozijsku sposobnost vode. Kišnica u normalnim okolnostima sadrži male, ali vrlo značajne količine otopljenog kisika i ugljičnog dioksida, a pored toga i kloride i sulfate koji potječu iz mora i ljudske djelatnosti. Perkolacijom kroz zemljište ove vode dobivaju humusne

tvari, još više CO_2 i mnoge druge produkte organskog podrijetla. Podzemne vode dobivaju i razne nove sastojke oslobođene iz stijena zahvaćenih procesima trošenja ili miješanja s termalnim ascedentnim vodama. Tijekom kemijskog trošenja nastaju brojni i obično složeni procesi, u kojima su zastupljeni svi tipovi kemijskih reakcija, kao što su npr. hidratacija i hidroliza, oksidacija, redukcija, djelovanje kiselina i lužina, otapanje i disocijacija, stvaranje klorida, izmjena iona, itd.

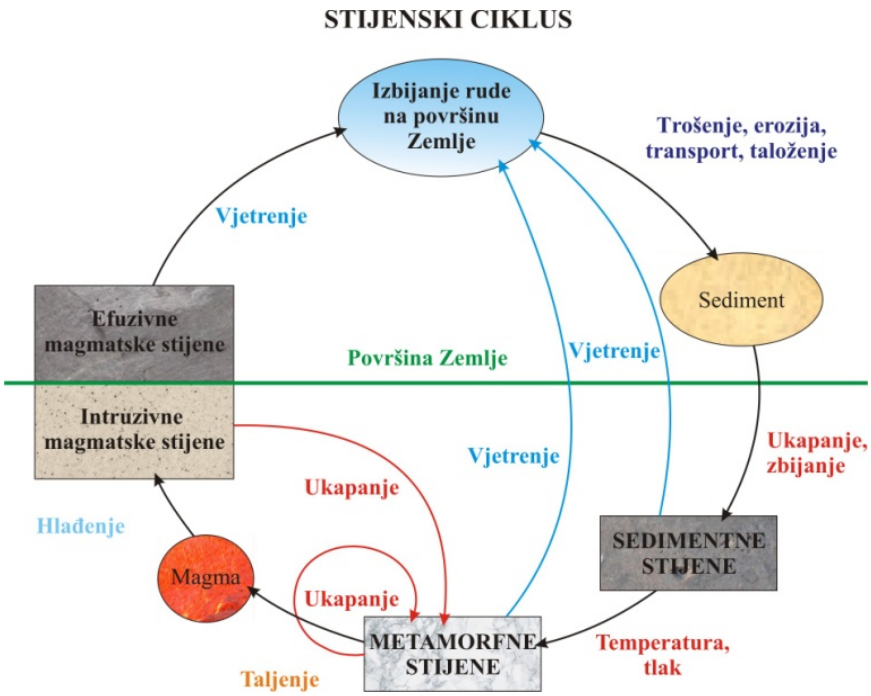
U strogom smislu biološko razlaganje je samo dio fizikalnog i kemijskog razlaganja, koje se odvija djelovanjem vegetacije i mikroorganizama.

Materijali koji nastaju raspadanjem primarnih stijena mogu se prema prilikama prenijeti do mjesta odlaganja, gdje ulaze u sastav tla. Glavni čimbenici transporta su gravitacija, vjetar i u najvećoj mjeri voda, ponajviše kao tekućina. Kad nestanu sile za daljnji prijenos materijala ili se iz raznih razloga izluče iz otopine netopljivi sastojci, dolazi do taloženja, te nastanu sedimenti različite granulacije i vrste.

Tlo je produkt svih tih i takvih procesa, te je stoga različitog mineološkog i granulometrijskog sastava. Za opisivanje i razvrstavanje tla u geotehnici su najpogodnije i najčešće se koristi AC-klasifikacija (Casagrande A., 1947) i sve više jedinstvena klasifikacija, koje se međusobno malo razlikuju, uglavnom na temelju plastičnosti koherentnih materijala. Prema njima se sve vrste tla svrstavaju u dvije grupe: krupnozrnato, tj. nekoherentno i sitnozrnato odnosno koherentno tlo. Uz to razlikuje se i pet osnovnih grupa: šljunak, pijesak, prah, glina, organsko tlo i treset, sve s odgovarajućim podgrupama. Dakako, u prirodi se materijali ne mogu uvijek točno svrstati u jednu određenu grupu, već su pomiješani ili su na granici dviju ili triju grupa. Od posebne je važnosti mineraloški sastav tla, pogotovo u glinovitom tlu. Humus je kao specifična mineralno-organska formacija, nastao razlaganjem površinskog sloja kombiniranim djelovanjem klimata-vode, plinova, biljaka i životinja, naročito obogaćen organskom tvari, ali ga mehanika tla u pravilu ne obrađuje (Zlatović S., 2006; Nonveiller E., 1990).

Tlo je trofazni sustav, čija su geotehnička svojstva uvjetovana velikim brojem različitih činitelja, koji su u velikoj mjeri ovisni o vodi u tlu, te je često odnos tlo-voda odlučujući na njegova geomehanička svojstva (Zlatović S., 2006; Nonveiller E., 1990).

Kao što voda kruži u prirodi, tako se slično može promatrati kruženje stijena koje tvore Zemljinu koru. Shematski prikaz ciklusa stijene prikazan je na slici 2.1.



Slika 2.1 Ciklus stijene

2.2. STRUKTURNE I GEOTEHNIČKE ZNAČAJKE TLA

Struktura tla odnosi se na (Mitchell J.K., 1976):

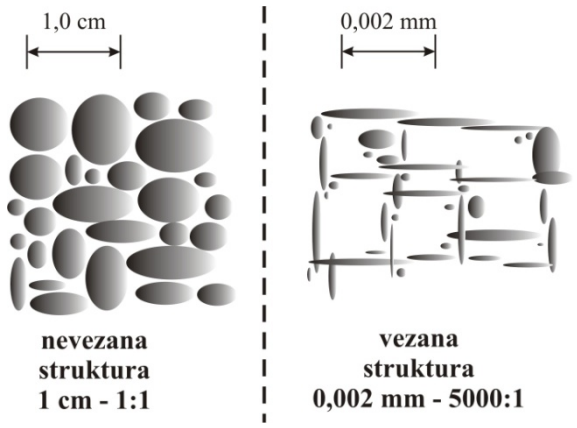
- raspodjelu čvrstih čestica i grupa čvrstih čestica, kao i pora između njih, veličine i orijentacije,
- sile između čvrstih čestica - prije svega elektrokemijske sile između sitnih čestica (Nonveiller E., 1990; Lambe T.W. & Whitman R.V. 1969).

Za potrebe ispitivanja čvrstoće i stišljivosti tla, te za zahtjevnija ispitivanja, ulaže se značajni napor da bi se sačuvala originalna neporemećena struktura tla, tj. izvadio, prenio i ugradio neporemećeni uzorak tla, jer sastav i proces nastajanja tla rezultiraju jedinstvenom strukturom koja će biti jedinstvenog ponašanja u danim okolnostima (Zlatović S., 2006).

Ipak, ponašanje tla dade se djelomično procijeniti pomoću jednostavnih numeričkih opisa čvrstih čestica, volumena pora i količine vode u tlu, čime se omogućava usporedba ispitivanog tla sa već upoznatim tlima (Zlatović S., 2006).

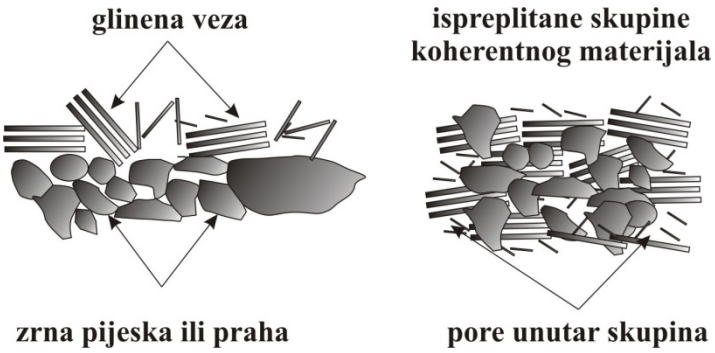
2.2.1. Strukturne značajke tla

U osnovi razlikujemo dvije elementarne strukture tla, nevezana i vezana kako je to prikazano slikom 2.2.

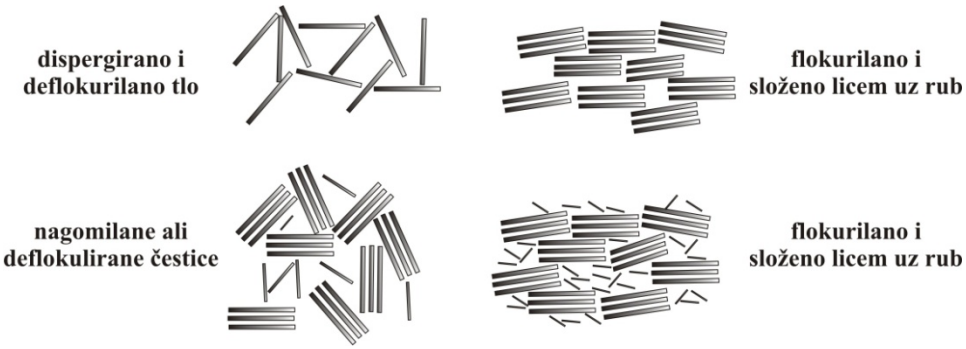


Slika 2.2 Struktura tla

Rekonstrukcijom fotografija dobivenih pomoću elektronskog mikroskopa vidi se da je tlo sastavljeno od krupnih i sitnih čestica, slike 2.3 i 2.4.



Slika 2.3 Mješavina čestica tla različite krupnoće



Slika 2.4 Shematski prikaz strukture sitnozrnatih materijala

Različite strukture mekanih stijena uvjetuju i različite geotehničke značajke sitnozrnih materijala. Upravo radi toga, mehanika tla bavi se više značajkama tala koja sadrže sitnozrnate čestice. Krupnozrnati materijali su stabilniji, te prema tomu stvaraju manje problema pri geotehničkim zahvatima. Iznimku čini likvefakcija jednoliko graduiranog pijeska.

Mogućnost analize pod elektronskim mikroskopom osvijetlila je i oblik i veličinu pora u tlu. Uočljivo je da su pore različitih veličina, da se nalaze među zrnima ali i među nakupinama čestica.

Po toj analizi mogli bi pore podijeliti na:

- unutar elementarne,
- među česticama,
- među grupama,
- unutar nakupina,
- među nakupinama.

Ovakva je struktura tla posljedica toga što se najsitnije čestice koherentnih materijala talože u mirnoj vodi. Te čestice u vodi inače lebde i stvaraju koloidne suspenzije. Lebdeći, sudaraju se s molekulama vode i međusobno. Čestice jednakog naboja se međusobno odbijaju. Prilikom sudaranja dogodi se da se susretnu čestice različitih naboja koje se pod utjecajem elektrokemijskih sila spoje u veće nakupine, flokule. Nakupine počinju tonuti i talože se na dno. Na taj način nastaje vrlo rahla struktura tla sastavljenog od čestica koherentnog materijala i velikog volumena šupljina među česticama. Takva struktura naziva se saćasta ili još rahlija, pahuljasta. Posljedica ovakve strukture tla je i značajka da su ovakva tla vrlo stišljiva i izrazito male čvrstoće na smicanje.

2.2.2. Geotehničke značajke tla

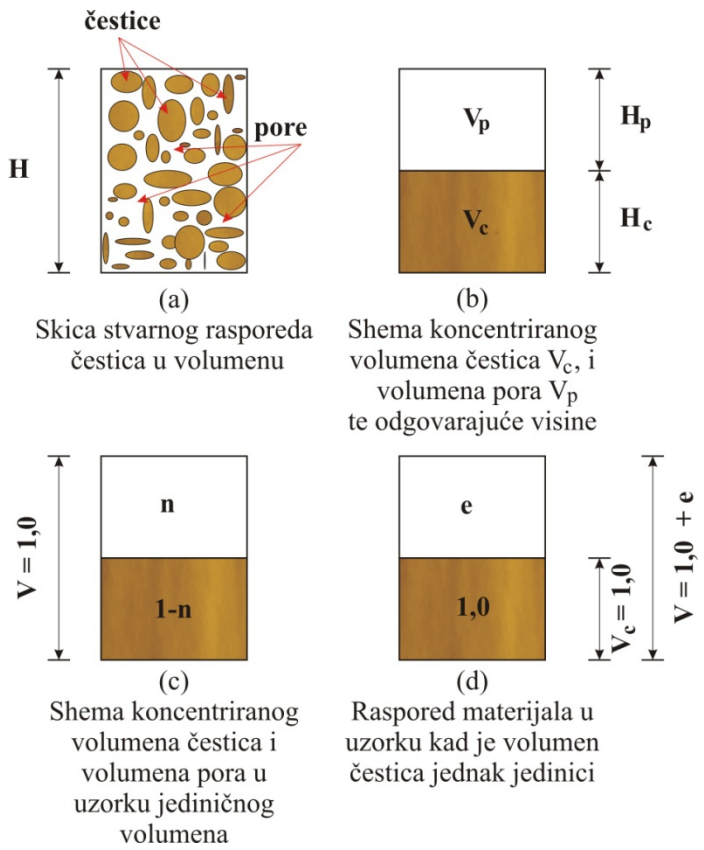
Osnovne geotehničke značajke o kojima ovisi i veličina, odnosno volumen proširenja nastao kotlovskim miniranjima u mekanim stijenama su poroznost, vlaga, obujamska masa, kohezija i kut unutrašnjeg trenja.

2.2.2.1. Poroznost, vlaga i obujamska masa

Tlo je nakupina zrnaca različite veličine i oblika poredanih gušće ili rahlije tako da je samo dio ukupnog volumena ispunjen čvrstom tvari. Prostor između čestica su pore ili šupljine. Tlo je porozna materija, slika 2.5 (a). Pore mogu biti ispunjene vodom, zrakom ili vodom i zrakom. U prvom je slučaju tlo zasićeno, u drugome suho, a u trećemu vlažno, ali djelomično zasićeno. Svojstva materijala ovise o rasporedu pora, o njihovu odnosu prema ukupnom volumenu i o količini vode u njima.

Pokazatelji koji izražavaju stanje materijala su:

- relativna poroznost, n [%],
- koeficijent pora, e,
- vlaga, w_s [%],
- stupanj zasićenosti, S_r [%],
- obujamska masa vlažnog, suhog i uronjenog tla, ρ [g/cm^3], ρ_d [g/cm^3], ρ' [g/cm^3].



Slika 2.5 Shema rasporeda materijala u uzorku tla

Pri tome je relativna poroznost, n odnos je između volumena pora i volumena uzorka tla, a koeficijent pora, e jest odnos između volumena pora i volumena samih čestica u uzorku. Relativna poroznost u inženjerskoj je praksi uobičajena, ali je za proračune u geotehnici manje prikladna. Kod zbijanja tla, mijenjaju se ukupni volumen i volumen pora, a volumen čestica tla ostaje konstantan.

Na slici 2.5 (b) uzorak je podijeljen na skupljenu ukupnu visinu pora, H_P, volumena pora, V_p i skupljenu visinu čestica, H_c, ukupnog volumena, V_c. Masa uzorka, m u prirodnom stanju je masa osušenog uzorka, m_d, ukupni volumen uzorka, V_u, a obujamska masa čestica tla ρ_s.

Iz mase suhog uzorka i obujamske mase materijala računamo:

$$V_c = \frac{\mathrm{m_d}}{\rho_\mathrm{s}}, \qquad V_p = V_u - V_c, \qquad [\mathrm{cm}^3] \qquad 2\text{-}1$$

gdje je: V_c - ukupni volumen, [cm^3],

m_d - masa osušenog uzorka [g],

ρ_s - obujamska masa čestica tla [g/cm^3],

V_u - ukupni volumen uzorka [cm^3],

V_c - ukupnog volumena [cm^3],

V_p - volumena pora [cm^3].

Iz čega je prema definiciji:

$$n = \frac{V_p}{V_u} = 1 - \frac{m_d}{V_u \cdot \rho_s}, \qquad [\%] \qquad 2\text{-}2$$

$$e = \frac{V_d}{V_c} = \frac{V \cdot \rho_s}{m_d} - 1 \qquad 2\text{-}3$$

gdje je: n - relativna poroznost, [%],

e - koeficijent pora.

Iz definicije se vidi da je relativna poroznost jednaka volumenu pora u jedinici volumena tla, što je shematski prikazano na slici 2.5 (c). Slika 2.5 (d) shematski donosi uzorak koji sadrži jedinicu volumena čestica materije $V_c = 1$, ukupnog volumena $V = 1 + e$, u kojemu je volumen pora jednak koeficijentu pora. Te dvije skice služe kao podsjetnik za definicije prema kojima se onda jednostavno mogu izračunati željene veličine. Primjenom definicije koeficijenta pora na sliku 2.5 (c) dobiva se koeficijent pora izražen relativnom poroznošću:

$$\frac{e}{1} = \frac{n}{1-n} \qquad 2\text{-}4$$

a iz odnosa na slici 2.5 (d) relativna poroznost izražena koeficijentom pora:

$$\frac{n}{1} = \frac{e}{1+e} \qquad 2\text{-}5$$

Kako bi se utvrdila vlaga uzorka, najprije se uzorak tla suši na standardnoj temperaturi od 105 °C u toku najmanje 24 sata, pri čemu se iz pora ispari sva slobodna voda i stanovit dio adhezijske vode. Standardna je temperatura propisana jer bi se sušenjem istog uzorka pri različitim temperaturama višim od 100 °C isparila različita količina adhezijske i molekularne vezane vode, a moglo bi doći i do razgradnje eventualno prisutne organske tvari, pa bi se mijenjala obujamska masa materijala.

Važući uzorak prije sušenja i nakon njega određuje se masa isparene vode:

$$m_V = m - m_d, \qquad [\text{g}] \qquad 2\text{-}6$$

gdje je: m - masa uzorka, [g],

m_V - masa isparene vode, [g].

Vlaga uzorka je odnos između mase isparene vode i mase suhog uzorka:

$$w_s = \frac{m_V}{m_d} = \frac{m}{m_d} - 1, \qquad [\%] \qquad 2\text{-}7$$

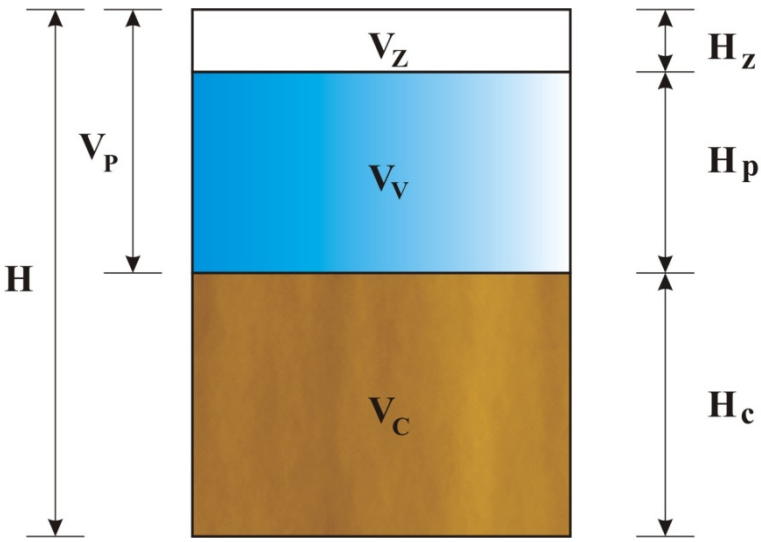
gdje je: w_s - vlaga uzorka, [%].

Kad sve pore nisu ispunjene vodom, tlo je djelomično zasićeno, slika 2.6. Stupanj zasićenosti, S_r prema definiciji je odnos između volumena vode sadržane u porama i volumena pora:

$$S_r = \frac{V_v}{V_p} = \frac{\rho_s \cdot (m - m_d)}{\rho_w \cdot [(V \cdot \rho_s) - m_d]}, \qquad [\%] \qquad 2\text{-}8$$

gdje je: S_r - stupanj zasićenosti, [%],

ρ_w - obujamska masa vode, [g/cm^3].



Slika 2.6 Shematski prikaz djelomično zasićenog uzorka

Kad je volumen pora, V_p samo dijelom ispunjen vodom volumena, V_v, tada preostaje volumen pora ispunjen plinovima, $V_z = V_p - V_v$.

Na osnovi relativne poroznosti, obujamske mase čestica tla i stupnja zasićenosti dobivaju se:

- Zapreminska masa suhog tla, $(S_r = 0)$

$$\rho_d = (1 - n) \cdot \rho_s, \qquad [\text{g/cm}^3] \qquad 2\text{-}9$$

- Zapreminska masa vlažnog tla, $\left(0 < S_r \geq 1\right)$

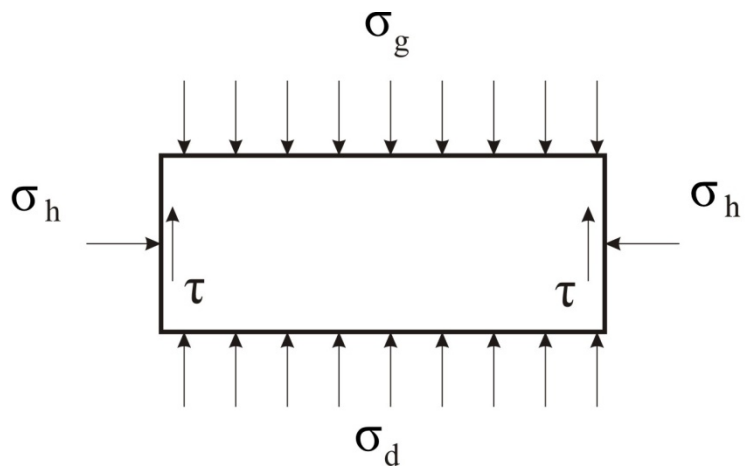
$$\rho = \left(1-n\right)\cdot\rho_s + S_r \cdot n \cdot \rho_w, \qquad [\text{g/cm}^3] \qquad 2\text{-}10$$

- Na tlo ispod površine podzemne vode djeluje uzgon, te je efektivna obujamska masa uronjenog tla $\left(S_r = 1\right)$

$$\rho' = \left(1-n\right)\cdot\left(\rho_s - \rho_w\right), \qquad [\text{g/cm}^3] \qquad 2\text{-}11$$

Stišljivost tla je pojava vertikalne deformacije tla pod utjecajem promjene efektivnih tlačnih naprezanja. Efektivna tlačna naprezanja u tlu mogu se mijenjati uslijed promjene totalnih naprezanja ili uslijed promjene pornog tlaka.

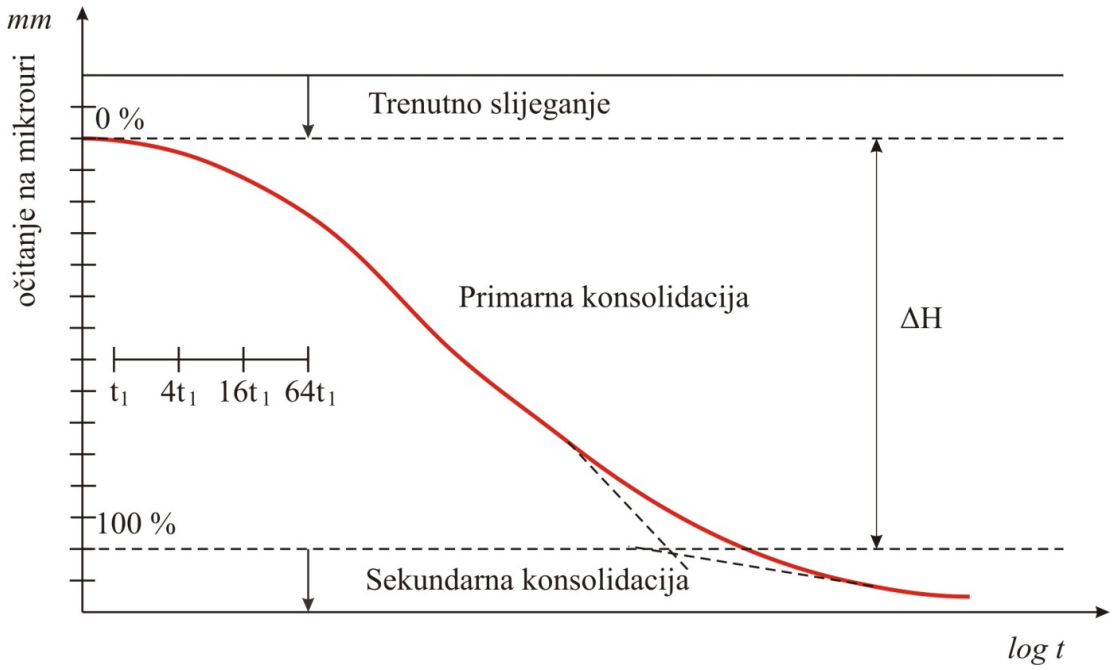
Tijekom edometarskog pokusa mijenja se opterećenje uzorka, a prati se njegova vertikalna deformacija u vremenu, pod utjecajem svakog pojedinog stupnja opterećenja. U slučaju potpuno zasićenog uzorka svako dodatno opterećenje izazvat će istiskivanje vode iz njega, što će kod slabo propusnog tla izazvati usporeno ostvarivanje deformacija. Osnovni problem je pojava trenja uz stjenke prstena, tako da je na dnu uzorka naprezanje, σ_d nešto manje nego na vrhu, slika 2.7. Ovo se minimalizira tako da se dimenzija uzorka smanji, te je visina uzorka u edometru vrlo mala, standardno 2 cm.



Slika 2.7 Stanje naprezanja u edometru

Vremenski tijek deformacija za neki trenutačni inkrement opterećenja izazvan usporenim istiskivanjem vode iz pora tla, tipičan za slabo propusna tla, je proces konsolidacije. Određivanje pripadne vertikalne deformacije nekog vertikalnog inkrementa opterećenja, $\Delta\sigma$

nije trivijalno. Razlog tomu je karakter ponašanja tla (usporeno istiskivanje vode-primarna konsolidacija, puzanje materijala-sekundarna konsolidacija), te tehnološki uzroci (utiskivanje poroznog kamena u uzorak tla) koji za pokus nisu bitni ali su prisutni. Na slici 2.8 prikazan je tipični dijagram mjerenja pomaka mikroure u vremenu za neki inkrement vertikalnog opterećenja u edometru.



Slika 2.8 Tipični dijagram mjerenja pomaka mikroure u vremenu za neki inkrement vertikalnog opterećenja $\Delta\sigma$ [kN/m^2] u edometru, te postupak određivanja pripadnog pomaka ΔH [m]

Uzorak tla opterećuje se u inkrementima i to obično tako da je pri opterećenju inkrement jednak ukupnom prethodnom opterećenju uzorka, a pri rasterećenju jednak je polovici prethodnog opterećenja.

Za svaki inkrement opterećenja odredi se inkrement deformacije:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \qquad 2\text{-}12$$

gdje je: $\Delta\varepsilon$ - promjena koeficijenta pora,

H_0 - početna visina uzorka, [mm],

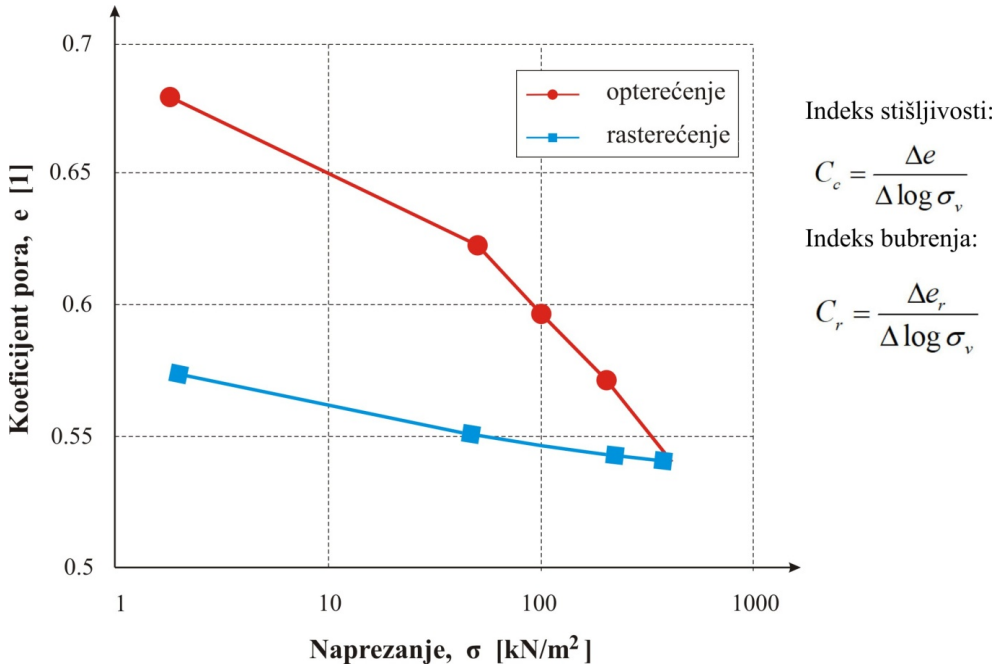
ΔH - pomak, [mm].

i pripadajuća promjena koeficijenta pora:

$$\Delta\varepsilon = \left(1 + e_0\right) \cdot \Delta\varepsilon \qquad 2\text{-}13$$

gdje je: e_0 - početni koeficijent pora.

Takvim postupkom moguće je dobiti edometarski dijagram, kojim se prikazuje ovisnost koeficijenta pora o opterećenju. Dijagram se obično prikazuje u polulogaritamskom mjerilu, kao na slici 2.9.



Slika 2.9 Tipičan edometarski dijagram

2.2.2.2. Kohezija i kut unutrašnjeg trenja

Kohezija, c je svojstvo sitnozrnatih koherentnih tala. Kako se smanjuje veličina čestica tla, tako se povećava njihov broj u jedinici volumena pri inače jednakom koeficijentu pora, e. Najsitnije čestice sastoje se mahom od minerala gline, koji su najmanje otporni na mehaničko trošenje, te se u takvom procesu najviše usitnjavaju. Na dodirnim točkama među česticama djeluju električne i Van der Waalsove sile. Njihov je intenzitet veći što je manji razmak među česticama, a ukupni im je utjecaj u jedinici volumena to veći što u njemu ima više čestica i više točaka međusobnih dodira, odnosno veća im je aktivna površina. Dakle, što su čestice manje, bit će dominantnije i djelovanje Van der Waalsovih i električnih sila s obzirom na gravitacijske sile među njima.

Van der Waalsove i električne sile rezultat su privlačenja između molekula susjednih čestica, kationa apsorbiranih u vodi oko jedne čestice i iona apsorbiranih u vodi oko susjednih čestica. Te sile, ovise i o elektrokemijskim svojstvima vode u porama, i mijenjaju se s njenim sastavom. Svojstva vode adsorbirane oko svake čestice zavise još i od veličine čestica, temperature, te količini i vrsti u njoj rastopljenih minerala. U vrlo sitnozrnatom tlu zapravo prevladavaju dodiri između apsorbiranih molekula vode oko čestice, a ne izravan materijalni dodir među samim česticama.

Najvažniji čimbenici o kojima ovisi kohezija sitnozrnatih materijala su:

- veličina čestica i njihov mineraloški sastav, što karakterizira granulometrijski sastav granice konzistencije;
- međusobni razmak susjednih čestica, što karakterizira koeficijent pora;
- elektrokemijska svojstva porne vode.

Prema tomu, kohezija, c nije konstanta materijala. Ona za svaki materijal ovisi o koeficijentu pora, trajanju opterećenja i drugom.

Kut unutrašnjeg trenja φ, odražava otpore pomicanju među česticama tla, koji nastaju zbog uklještenja, rotacije ili klizanja na kontaktima.

Dugotrajna istraživanja pokazala su da Coulombov zakon prilično realno izražava čvrstoću tla, kada se kohezija, c i kut unutrašnjeg trenja, φ utvrde za efektivna naprezanja, formula 2-14, te ona tada iznosi (Coulomb C.A., 1776; Ao-Hong Y., 2002; Freeze R.A. & Cherry J.A., 1979):

$$\tau_f = c' + \sigma_n' \cdot tg\varphi, \qquad [\mathrm{kN/m^2}] \qquad 2\text{-}14$$

gdje je:

τ_f	- efektivno naprezanje, [kN/m^2],
$\sigma_n' = \sigma_n - u$	- efektivno naprezanje tla zasićenog vodom, [kN/m^2],
σ_n	- normalno naprezanje, [kN/m^2],
u	- tlak vode u porama, [kPa],
c	- kohezija, [kN/m^2],
φ	- kut unutrašnjeg trenja, [^{O}].

Kohezija, c' i kut unutrašnjeg trenja, φ' utvrđuju se ispitivanjem uzoraka u laboratoriju ili različitim pokusima na terenu. Rezultati pokusa u uređaju za direktno smicanje ovise o načinu i brzini opterećivanja uzorka normalnim i tangencijalnim naprezanjima, ali i o prethodnom opterećivanju. Razlike su to veće što je uzorak manje propustan. O propusnosti uzorka ovisi brzina konsolidacije pornog tlaka. Uobičajeno je tlak vode u porama tla zvati porni tlak. Ako je tlo zasićeno vodom, o tom jedinstvenom prostoru govorimo kao o vrlo složenom sustavu "spojenih posuda", pa je tlak vode u tlu, bez obzira na postojanje čvrstih čestica u tlu, jednak:

$$u = \gamma_w \cdot h_p, \qquad [\text{kN/m}^2] \qquad 2\text{-}15$$

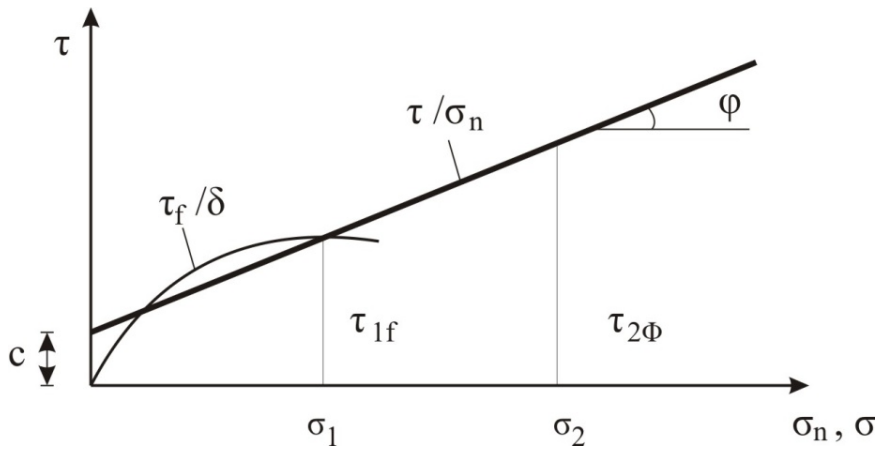
gdje je: γ_w - jedinična težina vode, [kN/m^3],

h_p - geometrijska visina ili geometrijski potencijal, [m].

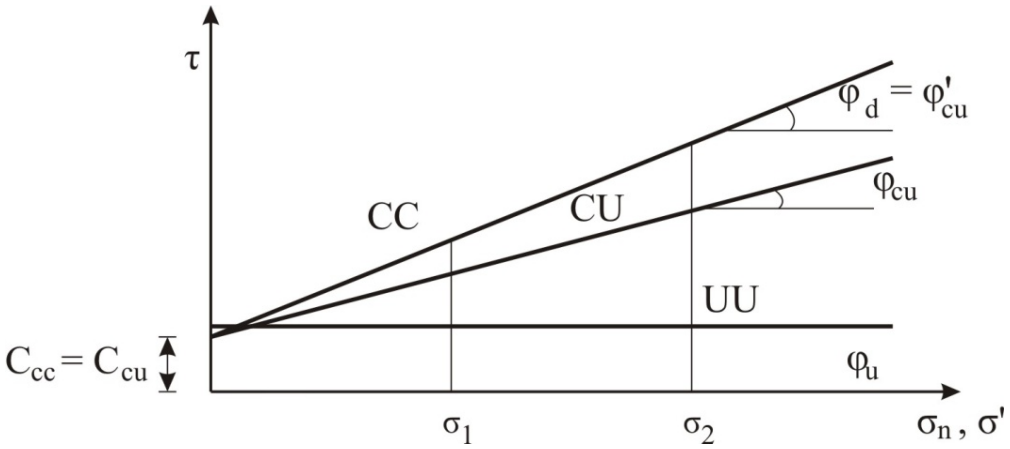
Radi toga se uzorci ispituju tako da je:

- porni tlak za vrijeme cijelog pokusa $u = 0$, - drenirani pokus CC,
- porni tlak od normalnog naprezanja $u = 0$, a od tangencijalnog naprezanja $u \neq 0$ - drenirani nekonsolidirani pokus CU,
- porni tlak od normalnog i tangencijalnog naprezanja $u > 0$ - nekonsolidirani pokus UU.

Najveća čvrstoća uzorka dobiva se CC pokusom, a najmanja pokusom UU. Na slikama 2.10 i 2.11 su prikazani mogući rezultati navedenih pokusa u uređaju za direktno smicanje.

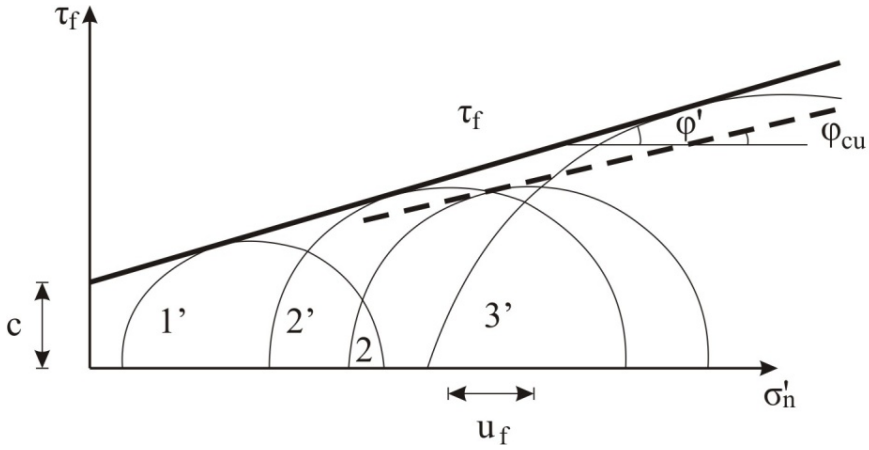


Slika 2.10 Rezultat pokusa u uređaju za smicanje



Slika 2.11 Čvrstoća uzorka pri različitim uvjetima dreniranja *CC*, *CU* i *UU* i brzina smicanja, 1 sporo smicanje, 2 brzo smicanje

Jedino ispitivanjem cilindričnih uzoraka u triaksijalnom uređaju moguće je najpouzdanije dobiti rezultate CU pokusa. Osim toga, ovom provedbom ispitivanja može se mjeriti i porni tlak, u. Mogući rezultat triaksijalnog CU pokusa prikazanje na slici 2.12.



Slika 2.12 Rezultati triaksijalnog pokusa *CU*

Ukupni otpor za smicanje zrnatog i koherentnog tla sastoji se od više komponenata, a njihov udio u ukupnom otporu ovisi o poroznosti. Te su komponente: trenje na kontaktima zrna, promjena rasporeda zrna i dilatacija volumena.

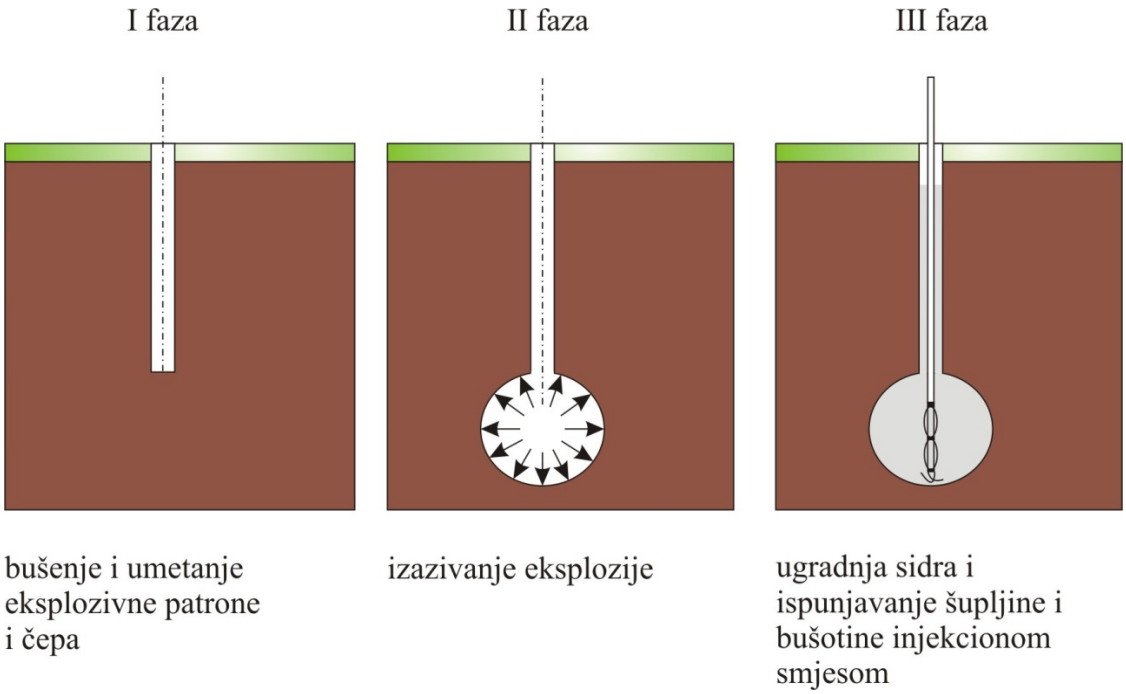
Smicanje pri maloj poroznosti, prati povećanje volumena, pa se troši energija za pomak u suprotnom smjeru od normalnog naprezanja. Pri vrlo velikom normalnom naprezanju to povećanje volumena postaje manje, jer se više energije troši za drobljenje zrna. Što je poroznost manja, to je manja i energija za promjenu rasporeda zrna. Kad je poroznost velika smicanjem se smanjuje volumen, a dio energije troši se za raspoređivanje zrna.

3. SIDRENJE U TLU

Sidrenje u tlu početkom dvadesetog stoljeća nije imalo veliku praktičnu primjenu u geotehnici, prije svega zbog nedovoljnog poznavanja glinenog tla kao radne sredine za preuzimanje vlačnih sila. Također nedostatak teoretskih objašnjenja i metoda proračuna za određivanja nosivosti vlačnih konstrukcija utjecao je na usporeni razvoj sidrenja u tlu (Pranjić J., 1991).

Gotovo svi poznati postupci sidrenja putem šipki armaturnog čelika, cijevi ili kablova za prednaprezanje, uz primjenu cementnih ili plastičnih masa za injektiranje nisu dovoljno uspješni ako treba usidrenje izraditi u glini, ilovači ili sličnim mekanim ili zemljanim materijalima (Frgić L. et al., 1988).

Postupak se temelji na činjenici da eksplozija određene mase eksploziva, smještene dovoljno duboko u tlu, daje kao rezultat ograničeno proširenje. Verificirano je da tako dobiveno proširenje u glinenom tlu ima oblik kugle, a da promjer iste ovisi o masi i vrsti upotrjebljenog eksploziva i naravno o geotehničkim karakteristikama tla. U kuglasto proširenje se ulaže kraj sidra sa kukom ili raspletenim kablom i nakon toga proširenje se ispunjava betonom ili cementnom injekcijskom smjesom, slika 3.1 (Frgić L. et al., 1988).



Slika 3.1 Sidrenje u koherentnom glinenom tlu, (Frgić L. et al., 1988).

Slijedom gore navedenog, postupak sidrenja u tlu prijavljen je kao izum 04.08.1988. godine tadašnjem Saveznom zavodu za patente iz oblasti rudarstva i graditeljstva općenito, a poglavito iz oblasti stabiliziranja nadzemnih i podzemnih objekata lociranih u mekanim stijenama (Hudec M. et al., 1989).

Prema međunarodnoj klasifikaciji patenata, predmet izuma je označen klasifikacijskim simbolima: E 02 D 3/00 kojim je definirano poboljšanje ili održavanje tla, te E 021 D 20/00 koji predviđa postavljanje sidrenih svornjaka (Hudec M. et al., 1989).

Tehnički problem koji se rješava ovim izumom je stabiliziranje, nadzemnih i podzemnih konstrukcija zategama usidrenim u mekanu stijenu. Tako definirani tehnički problem riješen je predloženim postupkom sidrenja prema ovom izumu (Hudec M. et al., 1989).

3.1. OPĆENITO O SIDRENJU

U vrlo opsežnoj literaturi iz posljednjih tridesetak godina postoje opisi velikog broja raznih sustava prijenosa vlačnih sila sa objekta u masiv pomoću čeličnih sidara. Sidro, u sklopu geotehničkih konstrukcija, predstavlja nosivi element preko kojeg se vlačna sila prenosi u tlo. Sidra se izvode u obliku krutih profila (šipke armiranih željeza ili cijevi), ili u obliku čeličnih užadi (Muhovec I., 1987).

U osnovi postoje tri glavne grupe sustava sidrenja:

1. **Ekspanzijska sidra** su kruti čelični štapovi od glavnog ili rebrastog okruglog čelika i cijevi koji se sastavljaju u prethodno izbušene bušotine projektirane duljine. Na završetku šipke imaju uređaj za razupiranje o stjenku bušotine. Uvjet za primjenu je dovoljna čvrstoća stijene pri čemu je omogućen trajni prijenos vlačne sile trenja u zoni sidrenja.
2. **Adhezijska sidra** sastavljena od krutih profila kao gore spomenuta sidra ili snopa tanjih čeličnih žica, pri čemu se bušotina cijelom duljinom ispunjava vezivnim sredstvom na bazi cementa, ili dvikomponentnih plastičnih masa. Primjena ovih sidara zahtjeva čvrstu ili srednje čvrstu stijenu određenih geotehničkih značajki. Vlačna sila prenosi se adhezijom s čelične šipke na veznu smjesu i dalje trenjem na stijenu.
3. **Prednapregnuta sidra**, obično veće duljine koja se izvode gotovo isključivo u čeličnim užetima. Nakon stavljanja sidra u bušotinu, ista se na sidrom dijeli pri dnu

bušotine ispunjavaju veznom smjesom. Po očvršćivanju vezne smjese izvodi se prednaprezanje, odnosno pritezanje kabla maticom. Radi zašite kabla od korozije, cijela se bušotina ispunjava veznom smjesom postupkom injektiranja.

Nijedan od navedenih sustava nije na dosadašnji način izvedbe efikasno primjenjiv u mekanim i rastresitim stijenama, a pogotovo u glinama, ilovači i sličnim tlima.

Cilindrična bušotina s umetnutim sidrom ispunjena veznom smjesom ima malu otpornost na izvlačenje, jer je trenje između vezne smjese i mekane ili rastresite stijene vrlo ograničeno i nedovoljno za preuzimanje većih sila. Posebice je nepovoljan utjecaj visokih svojstava mekanih materijala koja rezultiraju još nizom trajnom nosivošću takvih sidara.

Patentiranim postupkom sidrenja u tlu, zatega se usidruje primjerice u kuglasto sidreno proširenje ispunjenu povoljnom veznom smjesom: betonom, cementnim mortom, cementnom injekcijskom smjesom ili plastičnom masom.

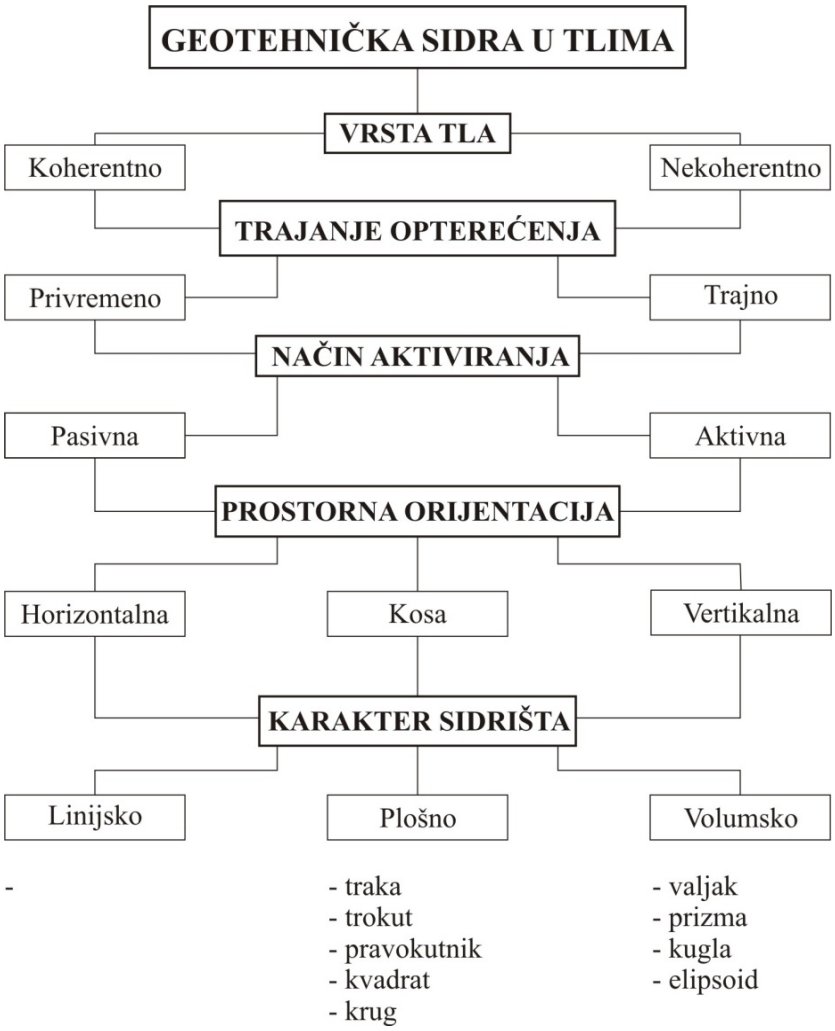
Pri izvlačenju kuglastih sidrenih tijela nastaju konusni oblici. Otpor kuglastog sidrenog tijela na izvlačenje višestruko premašuje nosivost gore opisanih sidara postavljenih u cilindričnu bušotinu.

Proširenje u obliku kugle ostvaruje se detonacijom eksplozivnog punjenja smještenog pri dnu minske bušotine. Volumen proširenja ovisi o geotehničkim značajkama predmetnog koherentnog tla (gline), i masi eksplozivnog punjenja smještenog pri dnu minske bušotine.

Opća klasifikacija geotehničkih sidara, onih u tlu i stijeni, predlaže se shema sustavnog klasificiranja geotehničkih sidara u tlima, (Muhovec I., 1987), slika 3.2.

Kada govorimo o upotrebi geotehničkih sidra u koherentnim tlima, uzimajući u obzir karakter sidrišta, u konkretnom primjeru poboljšanja tla kotlovskim miniranjem, koristimo:

a) linijska sidra sa sidrišnom dionicom i
b) volumska sidra.



Slika 3.2 Sustavno klasificiranje geotehničkih sidara u tlu (Muhovec I., 1987)

a) ***Linijska sidra***

Ako je tlo prilikom iskopa lošijih mehaničkih karakteristika, proračun nosivosti pokazat će da su sidrišne ploče velikih dimenzija, tako da sidrišna ploča mora biti izvedena ispod razine podzemne vode gdje su parametri čvrstoće tla veći u odnosu na namijenjenu silu usidrenja. Ovakav zahtjev nalazi svoje rješenje u upotrebi sidrišnih konstrukcija koje se izvode bušenjem, a vlačno opterećenje se u tlo prenosi linijski, a ne plošno.

Na vlačno linijsko sidro djeluju sile trenja između tla i konstrukcije sidra pa će nosivost ovisiti o otporu trenja tla po plastu sidra i težini sidra. Zbog sličnosti linijskih sidara sa vlačnim pilotima, nosivost sidara se može odrediti primjenom statičkih obrazaca za proračun vlačnih pilota. Statika nosivost linijskih sidara uglavnom ovisi o svojstvima tla (gline) po cijeloj duljini sidrene dionice u nosivom dijelu, pa rezultate proračuna treba uzimati uvjetno zbog promjene svojstava gline tijekom vremena.

Vrijednost nosivosti Q_s može se izračunati prema:

$$Q_s = d_s \cdot H \cdot c_a, \qquad [\text{kN}] \qquad 3\text{-}1$$

gdje je: d_s - promjer linijskog sidra, [m],

c_a - adhezija po kontaktu sidro-tlo.

Adhezija je ovisna o nedreniranoj koheziji:

$$c_a = \beta \cdot c_u, \qquad [\text{kN/m}^2] \qquad 3\text{-}2$$

gdje je: β - bezdimenzionalni adhezijski faktor.

Općenito nosivost linijskih sidara:

$$Q_{sidra} = \pi \cdot D_{sidra} \cdot H_{sidra} \cdot \beta \cdot c_u + W_s \cdot \cos\Phi; \qquad \left(0^\circ \le \Phi \le 90^\circ\right), \qquad [\text{kN}] \qquad 3\text{-}3$$

gdje je: Φ - kut između osi sidra i vertikale.

Ako je: $\Phi = 0^\circ$ - vertikalno linijsko sidro,

$\Phi = 90^\circ$ - horizontalno linijsko sidro,

$0^\circ < \Phi < 90^\circ$ - koso ugrađeno linijsko sidro.

Granična nosivost linijskog sidra je:

$$Q_u = Q_{us} + W_s, \qquad [\text{kN}] \qquad 3\text{-}4$$

gdje je: Q_{us} - nosivost sidra s obzirom na otpor tla, [kN],

W_s - težina sidra, [kN].

b) ***Volumska sidra***

Volumska sidra su sa stanovišta jednostavnosti izvedbe, najpovoljnija sidra za prijenos vlačnih sila s konstrukcije u tlo. Proširenje u tlu nastalo kotlovskim miniranjem, aktiviranjem eksplozivnog punjenja na dnu minske bušotine, sidri se, injektira te time postaje sidrišna dionica novog volumenskog sidra. Ispitivanja napravljena u ranijim istraživanjima (Pranjić J.,

1991) pokazala su da injektirana volumna sidra ("kotlovska" sidra) imaju od 30 %-40 % veću nosivost od neproširenih sidara.

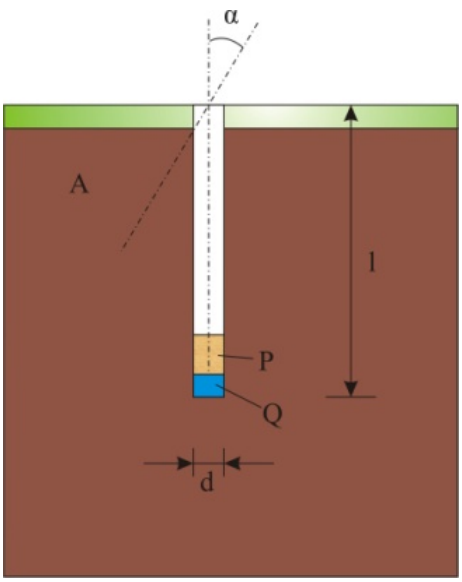
Sidrenje u tlu sastoji se od slijedećih faza rada:

- bušenje bušotina odabranog profila i odabrane dužine, a prema potrebi preuzimanja sile i lokalnim geotehničkim prilikama,
- proširenje dna bušotina u obliku kugle ili primjerice elipsoida, detonacijom eksplozivnog punjenja,
- kontrole dimenzija dobivenog proširenja,
- pripreme i ugradnja sidara,
- provjere nosivosti sidra.

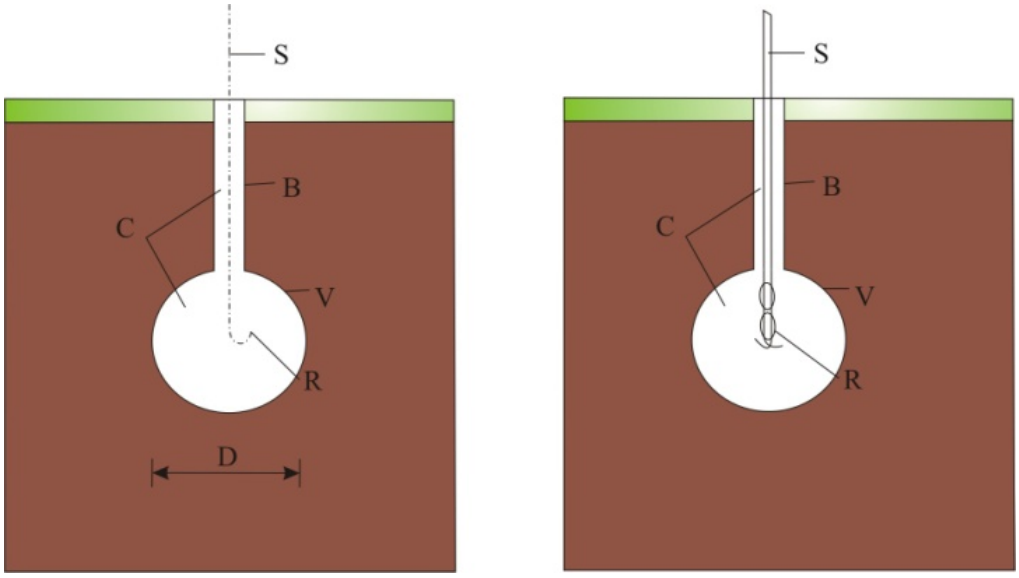
Osnovna ideja je stvaranje kuglastog sidrenog tijela dovoljno duboko u tlu, kako bi sidro imalo veliki otpor potreban za izvlačenje. Pri tome proširenje dobiveno detonacijom eksplozivnog punjenja kod ugradnje sidra je stabilno, a mekana stijena uz proširenje komprimirana i prekonsolidirana. Na taj način se potrebna sila za izvlačenje još više povećava.

Istraživanjima je utvrđeno da se u homogenim glinovitim naslagama eksplozijom dobiva kuglasto proširenje, čiji promjer ovisi o geotehničkim značajkama predmetnog tla i masi te vrsti upotrjebljenog eksploziva. Geotehničke značajke pri tom određuju odnos promjera kuglastog proširenja i udaljenost od slobodne površine terena, kod kojeg ne dolazi do stvaranja pukotina u tlu.

Na slikama 3.3 i 3.4 prikazan je idejni pristup u rješavanju sidrenja mekanim stijenama, a date oznake imaju slijedeće značenje: *A* - tlo, *B* - bušotina, *C* - vezna smjesa, *D* - promjer kuglastog proširenja ostvarenog detonacijom eksplozivnog punjenja, *L* - dužina bušotine, *Q* - eksplozivno punjenje, *P* - čep, *V* - kuglasto proširenje, *S* - metalno sidro, *R* - raširenі snop žica, *K* - kuka.



Slika 3.3 Konstrukcija kotlovske mine



Slika 3.4 Shematski prikaz moguće konstrukcije sidra

Prethodnim geotehničkim istraživanjima utvrđuju se osnovne geotehničke značajke mekanih stijena u sidrenoj zoni:

- poroznost,
- vlagu,
- zapreminsku masu,
- stišljivost,
- koheziju,
- kut unutrašnjeg trenja.

Proračunom se ispituju optimalne dubine sidrenja, pri kojima je položaj sidrenog tijela iza plohe mogućeg sloma ili klizanja. Osim toga, utvrđuju se deformacije i naprezanje mekanih stijena koje nastaje po detonaciji eksplozivnog punjenja u zoni sidrenja.

Nosivost vlačno opterećenog linijskog sidra može se odrediti probnim opterećenjem ili proračunom. Na vlačno linijsko sidro djeluju sile trenja između tla i konstrukcije sidra pa će nosivost ovisiti o otporu trenja tla po plaštu sidra i težini sidra. Zbog sličnosti linijskih sidara sa vlačnim pilotima, nosivost sidara se može odrediti primjenom statičkih obrazaca za proračun vlačnih pilota. Statička nosivost linijskih sidara uglavnom ovisi o svojstvima tla (gline) po cijeloj duljini sidrene dionice u nosivom dijelu, pa rezultate proračuna treba uzimati uvjetno zbog promjene svojstava gline tijekom vremena.

Prema uobičajenim koeficijentima koji određuju odnos graničnih i djelujućih sila u sidrima, dimenzionira se presjek čeličnog užeta ili šipke.

Promjer i nagib bušotina ovisi o geotehničkim značajkama predmetne mekane stijene, vrsti i masi upotrjebljenog eksploziva te lokalnim prilikama. Uobičajeno iznosi 70 do 150 mm. Manji promjeri odnose se na horizontalno ili koso položena sidra, pri kojima se dobiveno kuglasto proširenje puni veznom smjesom injektorski.

Sidrenje se izvodi užetima ili snopovima žica za prednaprezanja. Prenaprezanjem geotehničkih sidara postiže se:

- trenutno aktiviranje sidara samonaprezanjem, radi promjene stanja deformacija sustava objekt-sidro-mekana stijena iz bilo kojih razloga,
- nastajanje nepoželjnih pomaka usidrenog objekta,
- povoljno uklještenje mekane stijene u zoni sidra.

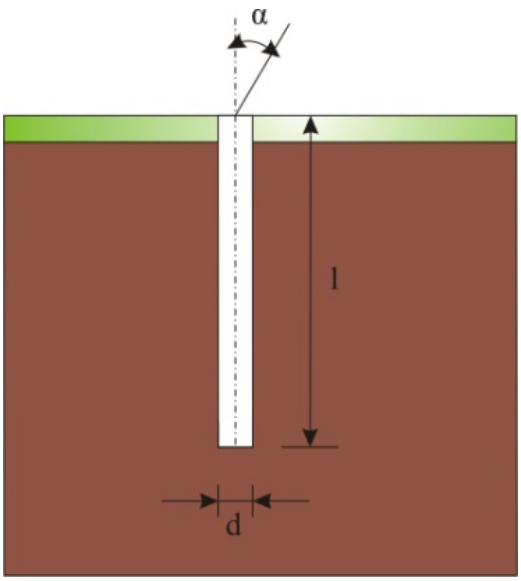
Snopovi žica raspliću se unutar kuglastog sidrenog proširenja. Kod kuglastih usidrenja preko 1,0 m promjera, u proširenje se polaže dopunska prostorna armatura sastavljena od tanjih žica radi stabilizacije sidrene kugle. Vertikalna i neznatno nagnuta sidra ispunjavaju se tekućim betonom odgovarajuće konzistencije i granulacije. U slučajevima kada je to potrebno i kod koso položenih i horizontalnih sidara koriste se dodaci za brže vezanje cementa radi ranog postizanja nosivosti.

Na predmetnoj lokaciji izvode se najmanje tri ispitivanja nosivosti sidra do sloma sidrenog sustava. Na taj način se na ispitano sidro ugrađuje trostruko veća površina čeličnih žica, kako

bi se izazvao slom u mekanoj stijeni, a ne u čeliku. Osim toga, projektom se utvrđuje broj sidara koja se u tijeku izvedbe ispituju na silu koja mora miti 1,5 puta veća od nazivne nosivosti dobivene proračunom.

Ispitivanja sloma utvrđuje se ili premoštenjem prelomne zone mekane stijene, ili sa oslonačkom pločom dimenzija kao i kuglasto sidro.

Na slikama 3.5, 3.6, 3.7 i 3.8 su prikazani opisani detalji tehničkog rješenja sidrenja u mekanim stijenama.



Slika 3.5 Geometrijske veličine konturne minske bušotine

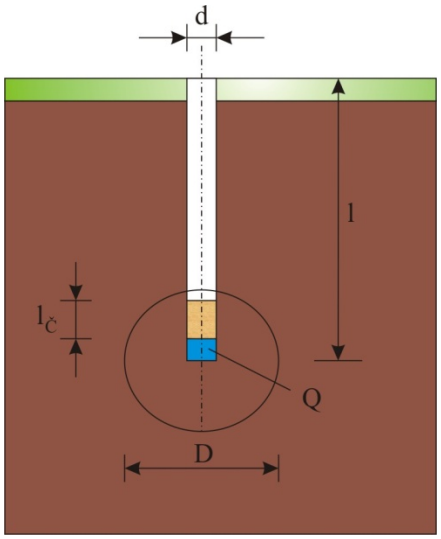
Prethodna ispitivanja:

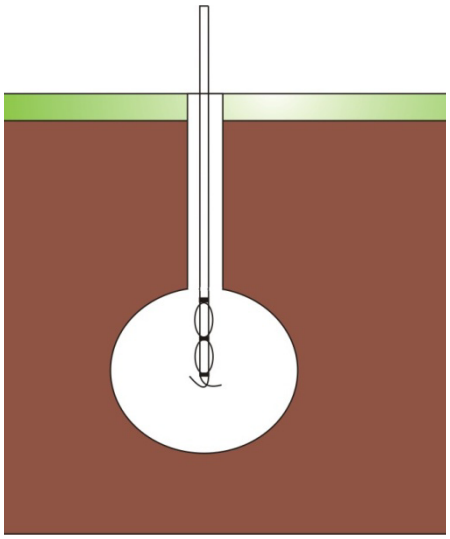
c - kohezija, [kN/m^2],

φ - kut nagiba Mohrove anvelope, [rad],

w - vlaga, [%],

ρ - zapreminska masa, [t/m^3].





Slika 3.6 Konstrukcija kotlovske mine i izgled kuglastog proširenja u glini

Slika 3.7 Shematski prikaz ugrađenog sidra

Presjek čeličnog užeta:

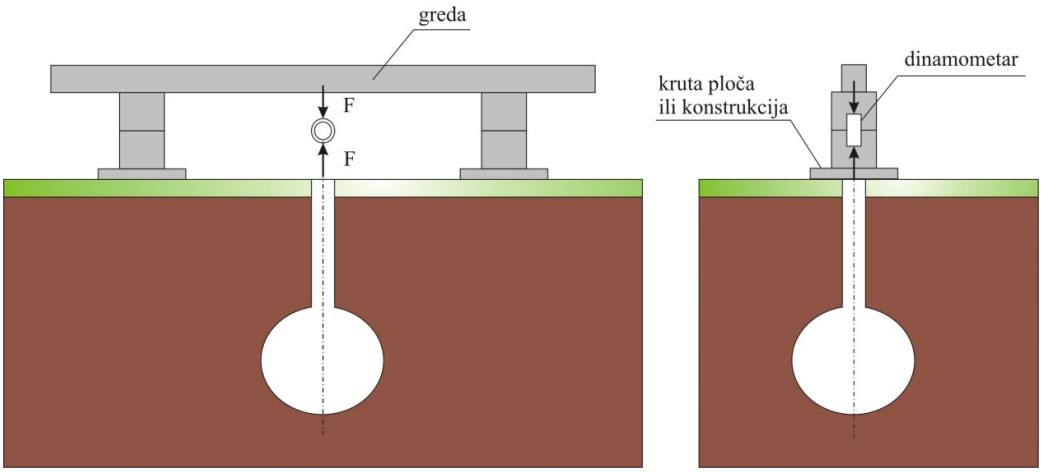
$$A_c = \frac{F}{\sigma_d}, \qquad [\mathrm{mm}^2] \qquad 3\text{-}5$$

gdje je: A_c - presjek čeličnog užeta (snopa) [mm^2],

σ_d - dozvoljeno naprezanje, [N/mm^2],

F - nosivost, [N].

Raspleteno i razvučeno uže ima zadatak povećanja prionjivosti usidrenja. Ispunjavanje sidrišta i bušotine smjesom (bentoniti mort ili injekcijska smjesa).



Slika 3.8 Shematski prikaz kontrole nosivosti ugrađenog sidra

3.2. NAČINI PRIMJENE U GOSPODARSTVU

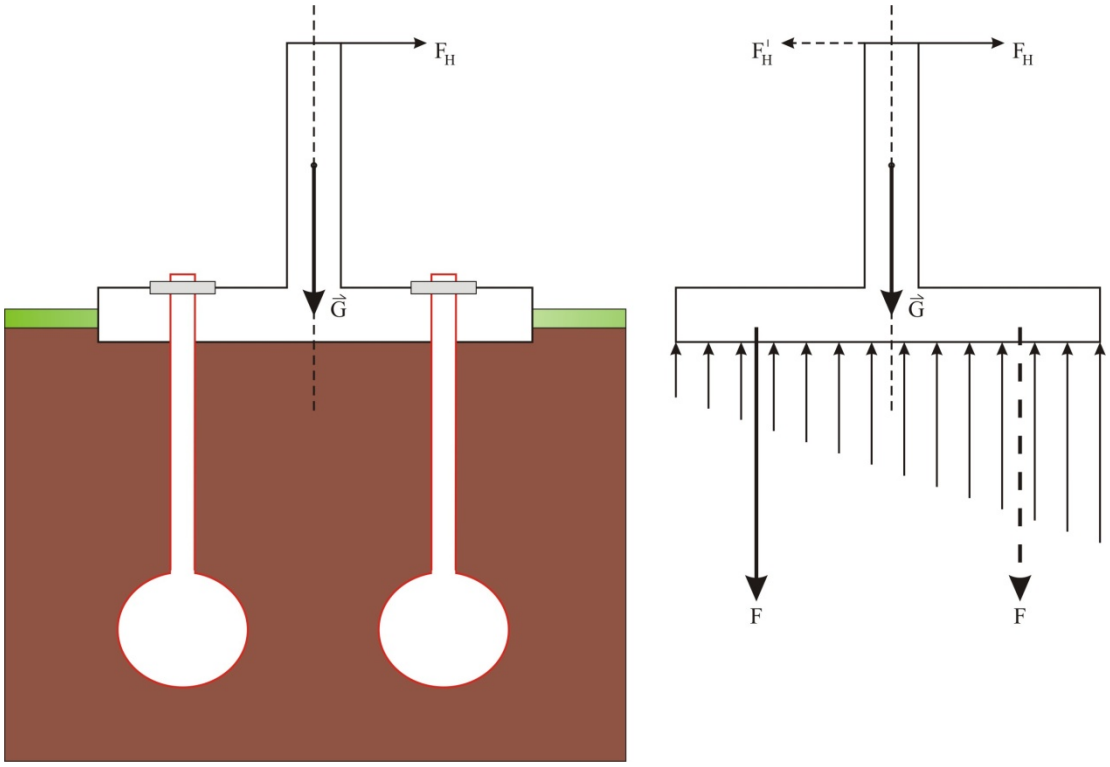
Postupak sidrenja u mekanim stijenama predstavlja proširenje primjene sidra i zatega i za objekte koji se grade na mekanom ili rastresitom tlu. Na taj način se konstruktorima i geotehničarima omogućava znatno ekonomičnije projektiranje i izvođenje nadzemnih i podzemnih objekata (Hudec M. et al., 1989).

Specifičnost postupka je u kompleksnijem načinu proračuna nosivosti i dozvoljenih opterećenja sidara, te u višefaznom načinu izvođenja.

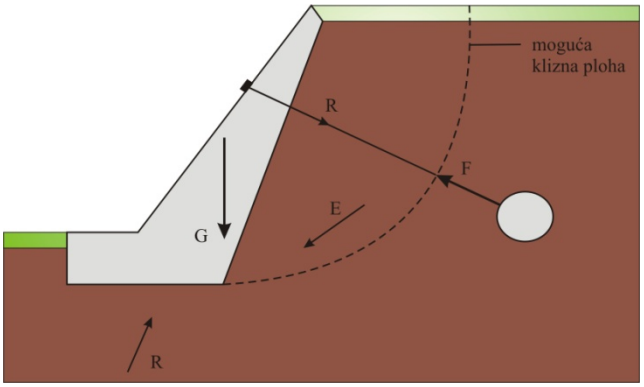
Primjena sidara u tlu pojeftinjuje izgradnju potpornih zidova uz objekte i prometnice, temelje visokih tornjeva i dimnjaka. Osim toga, pojeftinjuje se i povećava sigurnost izvođenja primarne podgrade u najtežim uvjetima izgradnje podzemnih prostorija.

Gotovo sve veze izrade sidara u tlu moguće je provesti standardnom geotehničkom opremom i strojevima: bušilica, betonskim pumpama, injektorima, uređajima za prednaprezanje, itd.

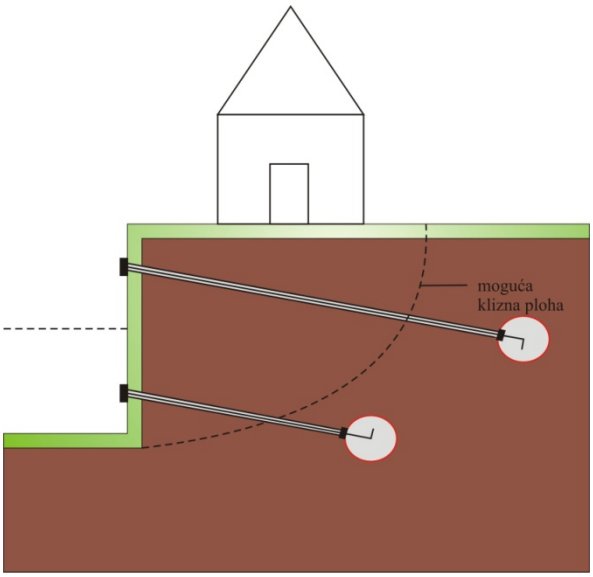
Na slikama 3.9, 3.10, 3.11 i 3.12 su prikazani primjeri sidrenja u tlu.



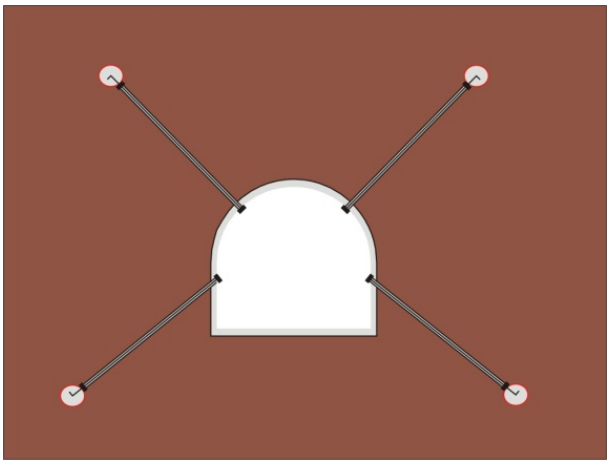
Slika 3.9 Prijenos vlačne sile duboko u tlu radi stabilizacije na prevrtanje



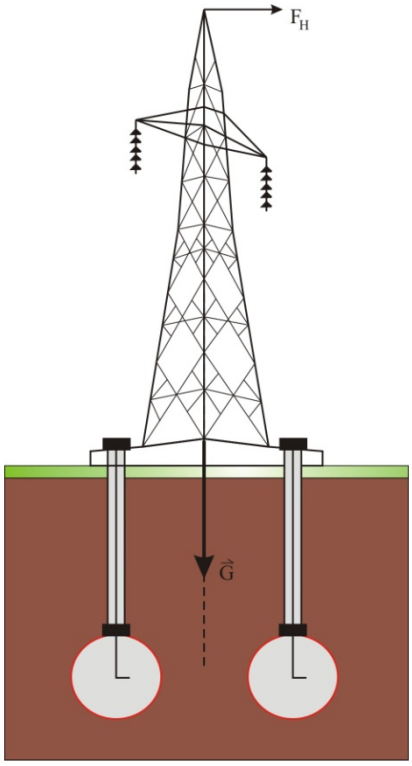
Slika 3.10 Sidrenje potpornih i obložnih zidova



Slika 3.11 Sidrenje objekata



Slika 3.12 Sidrenje tunela



Slika 3.13 Sidrenje dalekovodnih stupova

4. EKSPLOZIVI I MINERSKO-TEHNIČKE ZNAČAJKE EKSPLOZIVA

Gospodarski, rudarski ili civilni eksplozivi najčešće nisu čiste monomolekularne tvari već smjese detonacijskih svojstava zadovoljavajućih za gospodarske namjene. Općenito gledajući, gospodarski eksplozivi detoniraju neidealno, s nižim vrijednostima pojedinih parametara detonacijskog procesa kao što su tlak i brzina te s duljim trajanjem kemijskih reakcija i oslobađanja topline, i nakon početka ekspanzije plinovitih produkata. Pojedina svojstva čijim veličinama se opisuje karakter procesa eksplozije važna su i za procjenu te ocjenu djelovanja eksplozije u tlima.

4.1. EKSPLOZIVI

Eksplozivi su kemijski spojevi ili smjese koje imaju sposobnost da pod utjecajem vanjskog energetskog impulsa detoniraju, odnosno kemijski se razlažu u vrlo kratkom vremenskom periodu oslobađajući znatnu količinu plinova i topline (Krsnik J., 1989).

Rudarski (gospodarski, civilni, privredni) eksplozivi su energetski materijali koji eksplozivnom pretvorbom mijenjaju potencijalnu kemijsku energiju u kinetičku energiju udarnih valova i energiju ekspanzije plinovitih produkata kemijske reakcije. Djelovanjem udarnih valova i ekspandirajućih plinova one se u obliku mehaničkog rada troše na drobljenje, pomicanje i odlamanje stjenske mase (Škrlec V., 2015).

Prema Zakonu o eksplozivnim tvarima i oružju 70/17 17eksplozivnim tvarima u civilnom području upotrebe se smatraju:

- gospodarski eksplozivi,
- sredstva za iniciranje eksplozivnih tvari,
- pirotehnička sredstva,
- streljivo,
- baruti,
- proizvodi punjeni eksplozivnim tvarima, i
- sirovine eksplozivnih svojstava koje služe za proizvodnju eksplozivnih tvari.

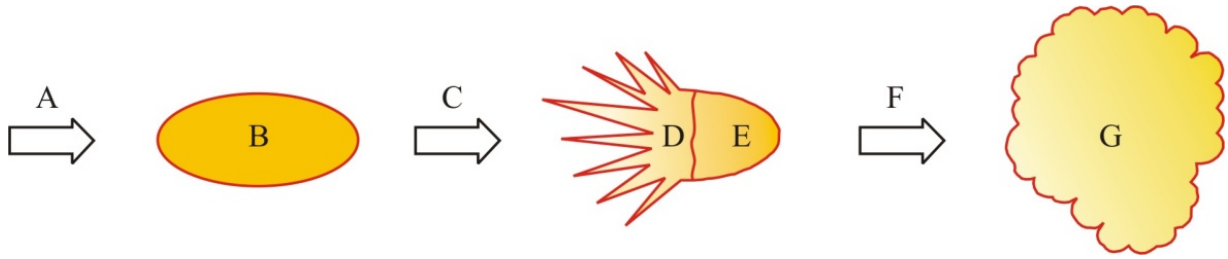
Za ilustraciju, može se navesti nekoliko činjenica povezanih s eksplozivnim procesima:

- Količina energije za većinu komercijalnih eksploziva iznosi otprilike 4 MJ/kg. Ova energija je dovoljna za zagrijavanje 10 kg vode od 4 °C do 100 °C (Ester Z., 2005).
- Temperatura eksplozije je reda veličina od 2000 K do 5000 K, a tlak detonacije reda veličina od 1 GPa do 20 GPa (10 kbar-200 kbar) (Ester Z., 2005).
- Proces detonacije eksplozivnog punjenja je kratkotrajan, npr. patrona eksploziva duljine 10 cm i promjera 28 mm kompletno detonira za $15\mu s\left(15\cdot 10^{-6}s\right)$, pojačanik (engl. booster) PD-80 kompletno detonira za $5\mu s\left(5\cdot 10^{-6}s\right)$, dakle u ekstremno kratkom vremenu (Ester Z., 2005).
- Goriva - kemijski spojevi koji su nositelji ugljika i vodika: razna mineralna ulja, organska brašna i voskovi.
- Oksidansa - nositelji su kisika, najčešće su to nitrati: amonijev nitrat, natrijev nitrat, kalijev nitrat i sl.
- Senzibilizatora - monomolekularni eksplozivi, najčešće nitroderivati služe za poticanje i održavanje stabilne detonacije.

4.1.1. Eksplozivni procesi

Pojam eksplozija dolazi od latinske riječi *explodere* što znači raspasti se. Definiciju pojma eksplozija ponudilo je više autora. Prema Baumu i suradnicima eksplozija se u općem smislu definira kao proces vrlo brze fizičke ili kemijske pretvorbe sustava uz prijelaz njegove potencijalne energije u mehanički rad. Prema Derminu eksplozija se definira kao proces brzog oslobađanja velike količine energije u ograničenom volumenu. Prema Johanssonu i Perssonu eksplozija se definira kao nagla ekspanzija tvari do volumena mnogo većeg od njena početnog volumena. Može se reći da je eksplozija egzotermna, vrlo brza pretvorba početne tvari ili sustava uz ekspanziju nastalih plinovitih produkata (Sućeska M., 2001).

Eksplozivna pretvorba odvija se u vremenu 10^{-5} s, a shematski prikaz eksplozije dan je na slici 4.1.



Kazalo:
A - inicijalni impuls (udar, plamen, toplina, trenje),
B - neporemećena eksplozivna tvar ($T \approx 20^{\circ}C, v \approx 0,2-1,5\,dm^3/kg, p \approx 1bar$),
C - kemijski proces pretvorbe,
D - plinoviti produkti,
E - neporemećena eksplozivna tvar,
F - ekspanzija plinovitih produkata,
G - plinoviti produkti u ekspanziji ($T \approx 2000-5000^{\circ}K, v \approx 1000\,kg/dm^3, p \approx 10^5\,bar, Q \approx 3,5-7,5\,kJ/g$).

Slika 4.1 Eksplozija (Sućeska M., 2001; Dobrilović M., 2008)

Poštujući te definicije, eksplozije se prema karakteru procesa pretvorbe mogu podijeliti na fizikalne, nuklearne i kemijske. U prirodi na Zemlji i u svemiru dolazi do eksplozija kao što su eksplozije električnog pražnjenja munje, vulkanske i eksplozije elastičnog sabijanja zemljinih ploča kod potresa (gorski udari) i provale plina u rudnicima, zatim eksplozije pri udaru (npr. meteora), eksplozije u svemiru itd. (Sućeska M., 2001).

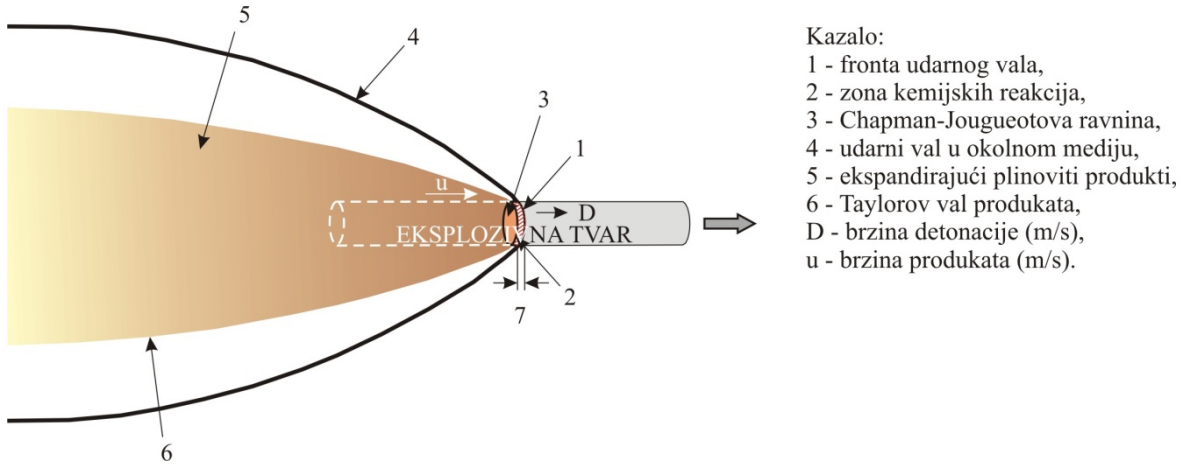
Fizikalne eksplozije u mehanizmu pretvorbe početne tvari uključuju fizikalne procese kod kojih, nakon povećanja tlaka sredine, dolazi do nagle ekspanzije uz eksplozivne pojave. Takve su eksplozije parnog kotla, ili ekspanzije jako stlačenog plina u spremniku. Nuklearne eksplozije uključuju reakcije fuzije i fisije uz oslobađanje velikih količina energije. Te se reakcije u svemiru, odnosno zvijezdama, dešavaju spontano, a na Zemlji su posljedica ljudskog djelovanja (Sućeska M., 2001). Prema Plešeu kemijske eksplozije su procesi koji se dešavaju u eksplozivnim tvarima i čija se energija koristi za dobivanje energije odnosno mehaničkog rada (Dobrilović M., 2008).

Iniciranje detonacije u praksi primjene eksplozivnih tvari može nastati na sljedeće načine:

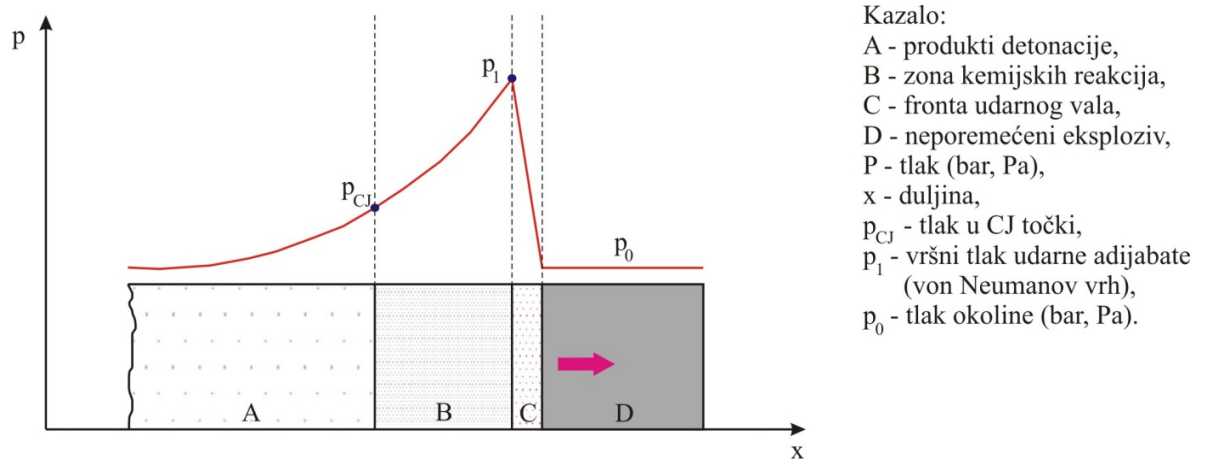
- dovođenjem topline eksplozivnom materijalu,
- prelaskom sagorijevanja u detonaciju - inicijalni eksplozivi, i
- djelovanjem udarnoga impulsa i toplim točkama - sekundarni eksplozivi.

Prema karakteristikama eksplozivne tvari i potrebnoj inicijalnoj energiji, pojedine eksplozivne tvari ne mogu iz sagorijevanja razviti detonaciju ni u kojim uvjetima. Za

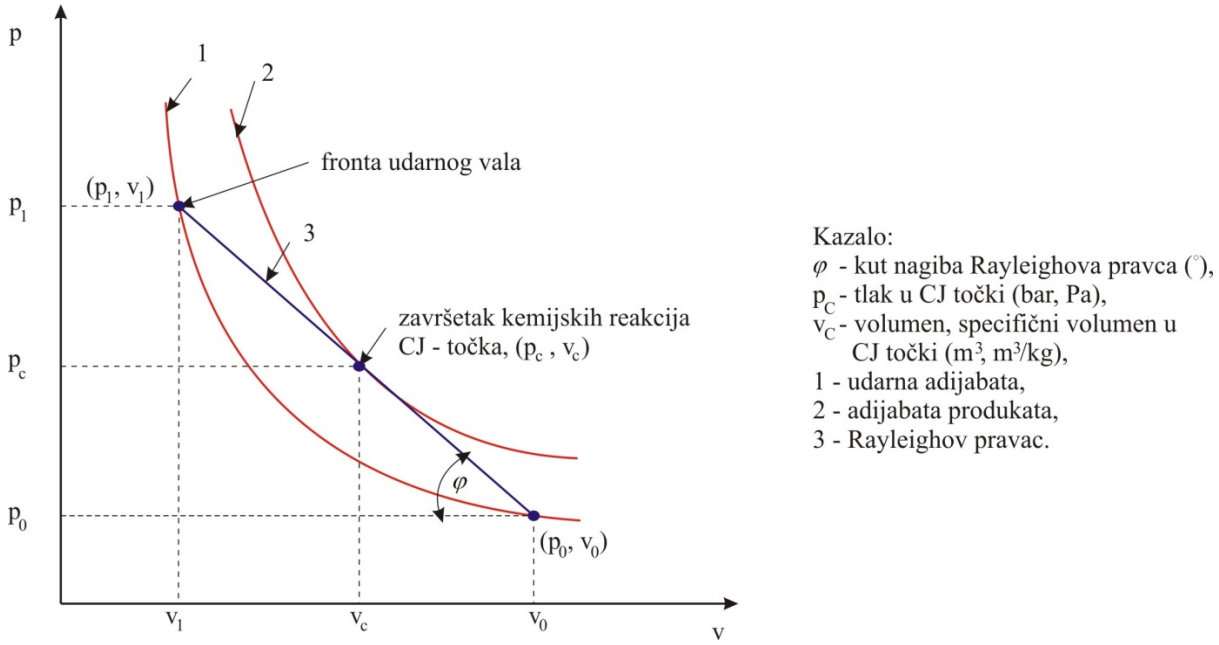
razvijanje stabilne detonacije potrebno im je dovesti energiju u obliku inicijalnog impulsa odgovarajućeg iznosa. Detonacija ima nekoliko karakteristika koji se razlikuju od sagorijevanja eksplozivne tvari i ostalih eksplozija. Detonacija je redovito nadzvučni proces u odnosu na brzinu zvuka u eksplozivnoj tvari. Proces detonacija se širi udarnim valom, vruće točke nastaju kao rezultat djelovanja udarnog vala koji postaju centri za daljnje širenje reakcije. Zbog visokih tlakova reda nekoliko stotina kilobara materijal ne reagira kao cjelina, već u malim segmentima. Ispred fronte kemijskih reakcija nalazi se fronta udarnog vala, zona visokostlačenog eksplozivnog materijala pripremljenog za reakciju. Cijela reakcija obavi se u redu veličine vremena ns do μs. Izreagirani produkti detonacije nalaze se u volumenu koji je gotovo identičan polaznom volumenu tvari, a toplina je već oslobođena pa su produkti zagrijani na visoke temperature i nalaze se pod visokim tlakom. Budući da su pod visokim tlakom, prilikom ekspanzije oslobađaju energiju i prate frontu udarnog vala koji se širi i kroz eksplozivnu tvar i kroz okolinu, zrak ili stijenu, ovisno o tome u kojem se mediju detonacija zbiva. Produkti se šire, ekspandiraju u vidu vala koji kasni za udarnim valom. Taj se val naziva Taylorov val izentropijske ekspanzije detonacijskih produkata (Sućeska M., 2001; Dobrilović M., 2008). Slika 4.2 prikazuje profil tlak-udaljenost od frotne udarnog vala. Slika 4.3 prikazuje raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu. Na slici 4.4 prikazan je detonacijski proces u p-v dijagramu.



Slika 4.2 Detonacijski proces u patroni eksploziva (Ester Z., 2005; Dobrilović M., 2008)



Slika 4.3 Raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu (Sućeska M., 2001; Dobrilović M., 2008)



Slika 4.4 Detonacijski proces u p-v dijagramu (Sućeska M., 2001; Dobrilović M., 2008)

Razumijevanjem detonacijskog procesa, uz poznavanje kemijskog sastava eksplozivne tvari i kemijskih reakcija koje se događaju tijekom procesa, moguće je predvidjeti ponašanje eksplozivne tvari u danim okolnostima i te procese opisati mehaničkim, termodinamičkim i kemijskim zakonima. Eksperimentalnim određivanjem pojedinih parametara detonacije i teoretskih opisa, poznavanje procesa i njihovo kvantificiranje daje informacije o svojstvima pojedinih eksplozivnih tvari i njihovim karakteristikama koje ih određuju u primjeni i dobivanju energije (Dobrilović M., 2008).

U svrhu razumijevanja detonacijskog procesa, tijekom 19. i 20. stoljeća razvijale su se teorije koje opisuju detonacijske procese. Takozvana CJ (Chapman & Jouguet) jednodimenzionalna teorija detonacijskog procesa pretpostavlja hidrodinamičku prirodu stabilne detonacije i odnose veličina tlaka, volumena i temperature prilikom odvijanja procesa koji se dešava u zoni tlačnog udarnog vala između izreagiranog i neporemećenog eksploziva. Ta teorija pretpostavlja odvijanje kemijskih reakcija u zoni udarnog vala. Prema njoj se sva energija trenutno oslobađa u toj zoni (Dobrilović M., 2008).

ZND teorija (Zeldovich, Von Neuman & Döring) nadopunjuje CJ teoriju na način da zona tlačnog vala nije zona reakcija već se ta zona nalazi iza zone tlačnog udarnog vala i te dvije zone čine detonacijski val. Prema tome, stanje tvari u toj zoni u pojedinim se vremenskim intervalima može opisati nizom paralelnih Hugoinotovih krivulja koje opisuju stanje tvari u danom trenutku. Poboljšanja modela detonacijskih procesa uključuju promatranje prostornih detonacijskih valova odnosno njihove zakrivljenosti, modele sekvencijalnog reagiranja eksplozivne tvari pod djelovanjem tlačenja i određivanja veličine politropskog (adijabatskog) eksponenta za realne tvari u području izuzetno visokih tlakova i temperatura (Dobrilović M., 2008).

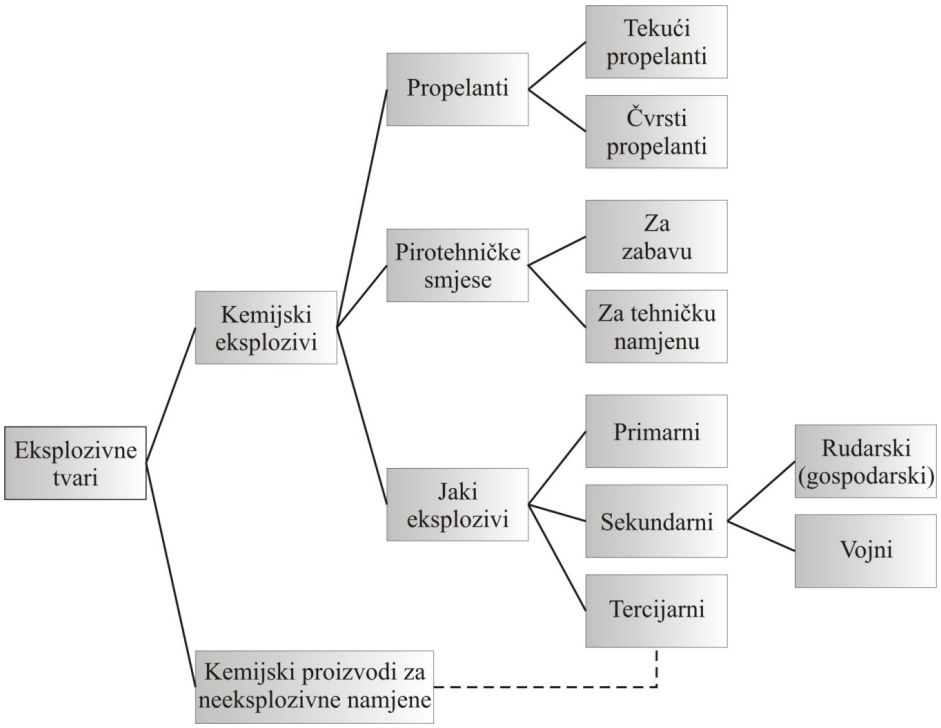
4.1.2. Eksplozivne tvari

Osnovne značajke eksplozivnih tvari su slijedeće (Agrawal J.P., 2010):

- potencijalna energija koja se temelji na kemijskoj strukturi eksplozivni tvari,
- brzo razlaganje prikladnim iniciranjem, i
- stvaranje plinovitih produkata s istovremenim oslobađanjem energije.

Trenutno je poznat veliki broj eksploziva koji se razlikuju po sastavu, fizičko-kemijskim i eksplozivnim svojstvima stoga se nameće potreba za racionalnom klasifikacijom eksploziva. S obzirom na veliki broj karakteristika prema kojima se eksplozivne tvari razlikuju postoji više različitih podjela eksplozivnih tvari predloženih od različitih autora (Škrlec V., 2015).

Na slici 4.5 prikazana je opća podjela eksplozivnih tvari.



Slika 4.5 Opća podjela eksplozivnih tvari (Bohanek V., 2013)

Pod jakim eksplozivima podrazumijevaju se sve vrste eksploziva koji u normalnoj upotrebi detoniraju. Svoju namjenu ostvaruju oslobođenom energijom detonacije i njezinom pretvorbom u mehanički ili razorni rad. Pri tome su u tu grupu uključeni svi eksplozivi takvih svojstava bez obzira na namjenu i kemijski sastav (Škrlec V., 2015).

U grupu slabih eksploziva spadaju baruti i propelanti. To su eksplozivi kojima je pri normalnoj upotrebi prvenstveni mehanizam kemijske promjene eksplozivno sagorijevanje. Obavljanje korisnog rada se ostvaruje većinom kroz potisno djelovanje stlačenih produkata raspada (Škrlec V., 2015).

U grupu pirotehničkih smjesa svrstavaju se svi eksplozivni materijali koji ne ulaze u gornje dvije grupe a proces njihove pretvorbe je eksplozivno sagorijevanje ili sagorijevanje s prisutnošću kisika iz okoline. Njihova primjena je različita od korištenja toplinske energije i plamena sagorijevanja, određene brzine sagorijevanja, razvijanja intenzivne svjetlosti ili dimnih plinova (Škrlec V., 2015).

Pirotehničke smjese koje se koriste u gospodarstvu, prema namjeni mogu podijeliti na:

- pirotehničke smjese za tehničku namjenu,
- pirotehničke smjese za zabavu.

Primarni ili inicirajući eksplozivi, kako se još nazivaju, koriste se za iniciranje detonacije drugih eksploziva i na prvom su mjestu u lancu iniciranja.

Karakteristična svojstva inicijalnih eksploziva su:

- iznimno su osjetljivi na vanjske impulse u obliku topline, udara ili trenja,
- maksimalna brzina detonacije se razvija u vrlo kratkom vremenu, gotovo trenutno.

Primarni eksplozivi se koriste pri proizvodnji različitih vrsta detonatora. Premda su vrlo osjetljivi na vanjski impuls kada ih se spreša u metalno kućište postaju sigurni za rukovanje. Primarni ili inicirajući eksplozivi koji se najviše koriste u praksi su: živin fulminat, olovni azid, srebro azid, olovni stifnat, tetracen, diazodinitrofenol (Škrlec V., 2015).

4.2. MINERSKO-TEHNIČKE ZNAČAJKE EKSPLOZIVA

Ukupna učinkovitost i primjena eksploziva u određenoj sredini ovisi o tome kolika se energija oslobađa prilikom detonacije eksplozivnog punjenja i koliki mehanički rad ta energija i produkti reakcije ostvaruju na okolni materijal. Minersko-tehničke značajke opisuju navedenu sposobnost pojedinih gospodarskih eksploziva (Škrlec V., 2015).

Minersko-tehničke značajke eksploziva su:

- brzina detonacije,
- brizantnost eksploziva,
- radna sposobnost eksploziva,
- volumen plinova i specifični tlak eksplozije,
- tlak detonacije,
- kritična masa i promjer eksploziva,
- gustoća eksploziva,
- temperatura eksplozije,
- bilanca kisika,
- osjetljivost na udar,
- prijenos detonacije,
- vodootpornost (Olofsson S.O., 1988).

4.2.1. Brzina detonacije

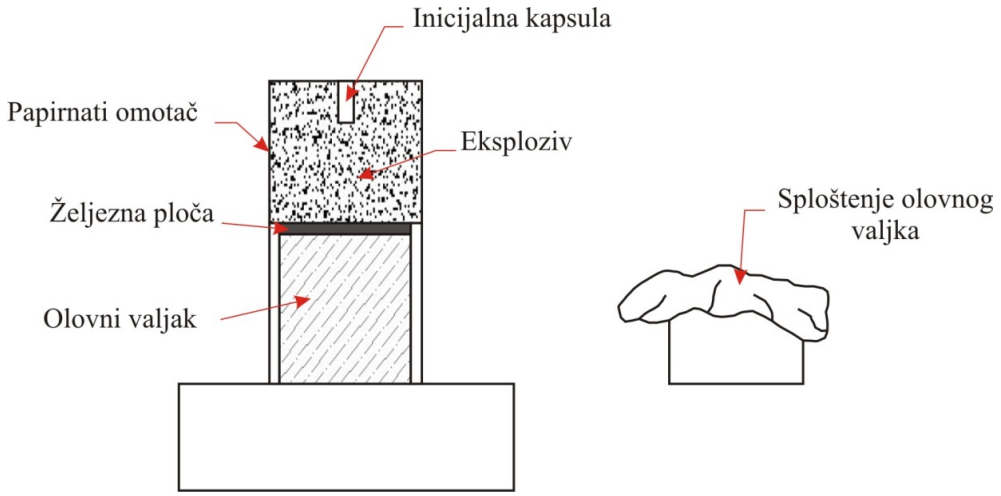
Brzina detonacije je brzina napredovanja detonacijskog udarnog vala od mjesta iniciranja kroz eksplozivni naboj. Na veličinu detonacijske brzine utječu gustoća i promjer patrone eksploziva, vlaga, obloga (vrsta materijala i debljina) i način iniciranja eksploziva. Brzina detonacijskog vala (detonacijska brzina) za danu eksplozivnu tvar ne ovisi značajno o vanjskim čimbenicima (tlak, temperatura).

Brzina detonacije eksploziva ovisi o:

- gustoći punjenja,
- kritičnom promjeru eksplozivnog punjenja, vrsti i debljini obloge,
- snazi inicijalnog impulsa dovedenog eksplozivnoj tvari.

4.2.2. Brizantnost eksploziva

Razorna snaga odnosno brizantnost eksploziva ovisi o brzini detonacije. Kod mnogih brizantnih eksploziva povećanjem gustoće povećava se i brzina detonacije pa samim time i razorna snaga eksploziva. Brizantnost eksploziva određuje se pomoću više metoda od kojih je jedna Hessova proba. Na olovnom valjku promjera 40 mm i visine 50 mm postavlja se tanki čelični cilindar s 50 g eksploziva koji se dovodi do detonacije rudarskom kapicom br.8. Uslijed detonacije olovni valjci se spljošte. Veličina spljoštenosti izražena u mm je mjerilo brizantnosti eksploziva na osnovi koje se može orijentacijski odabrati vrsta eksploziva za miniranje određene vrste stijena. Princip Hessove probe je prikazan na slici 4.6.

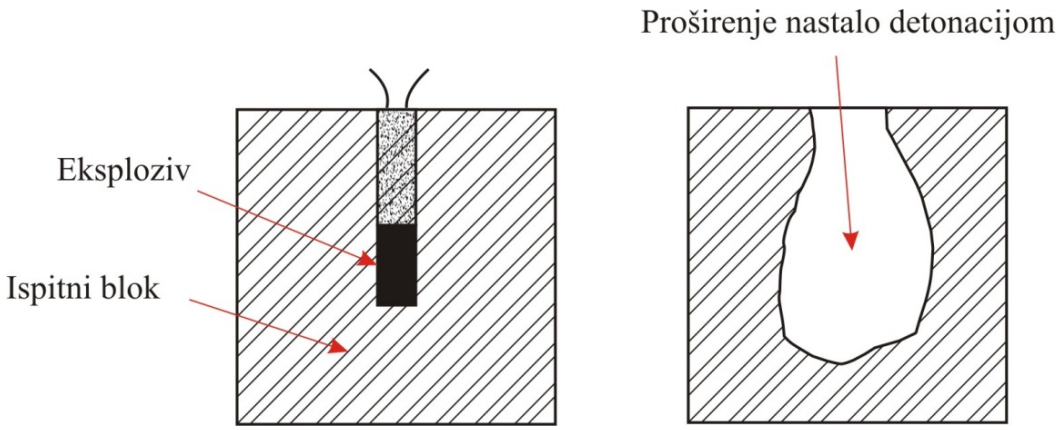


Slika 4.6 Princip Hessove probe (Krsnik J.,1989)

4.2.3. Radna sposobnost eksploziva

Radna sposobnost eksploziva određuje se pomoću Trauzlove probe u olovnom cilindru promjera 200 mm i visine 200 mm, u sredini kojeg se nalazi bušotina promjera 25 mm, dubine 125 mm.

Na dnu bušotine otpucava se 10 g eksploziva za ispitivanje zajedno s trenutnim električnim detonatorom. Ostatak bušotine ispuni se sitnim suhim pijeskom. Detonacijom eksploziva bušotina se proširi. Iznos volumena proširenja je mjera radne sposobnosti eksploziva. Uspoređivanjem rezultata mjerenja različitih eksploziva može se postaviti relativni odnos radnih sposobnosti kao mjera oslobođene snage prilikom detonacije u jednakim uvjetima. Princip Trauzlove probe je prikazan na slici 4.7 (Škrlec V., 2015).



Slika 4.7 Trauzlova proba (Krsnik J.,1989)

4.2.4. Volumen i specifični tlak eksplozije

Pri detonaciji eksploziva razvijaju se plinovi čija količina ovisi o vrsti eksploziva. Volumen plinova koji nastaje pri detonaciji 1 kg eksploziva izražava se u dm^3, a mjeri se kod temperature od T = 0 °C, T = 298,15 K i tlaka od 1 bara. Najveći tlak koji nastaje pri detonaciji 1 kg eksploziva u zatvorenom prostoru volumena 1 dm^3 naziva se specifični tlak i izražava se u barima. Specifični tlak može se izračunati na osnovi volumena plinova i temperature eksplozije.

Tlak nastalih plinova ovisi o količini razvijenih plinova, temperaturi eksplozije i volumena u kojem je izvedena eksplozija. Kod brizantnih eksploziva tlak plinova može doseći i nekoliko tisuća bara.

4.2.5. Tlak detonacije

Prilikom detonacije u eksplozivnom materijalu ispred fronte kemijskih reakcija kreće se fronta udarnog vala, zona visokostlačenog eksplozivnog materijala na tlak reda veličina nekoliko stotina kilobara. Izreagirani produkti detonacije nalaze se u volumenu koji je gotovo identičan polaznom volumenu tvari, a toplina je već oslobođena pa su produkti zagrijani na visoke temperature i nalaze se pod visokim tlakom. Budući da su pod visokim tlakom, prilikom ekspanzije oslobađaju energiju i prate frontu udarnog vala koji napreduje i kroz eksplozivnu tvar i kroz okolinu, odnosno zrak ili stijenu, ovisno o tome u kojem se mediju detonacija zbiva.

4.2.6. Kritična masa i promjer eksploziva

Kritična masa eksploziva je masa kod koje je moguć prijelaz sagorijevanja u detonaciju. Kritična masa se može korelirati s kritičnim promjerom ali se kritični promjer ne određuje preko kritične mase nego eksperimentalno, kod različitih promjera (Krsnik J.,1989).

4.2.7. Gustoća eksploziva

Gustoća eksploziva je odnos mase eksploziva i njegovog volumena. Povećanjem gustoće eksploziva raste detonacijska brzina i tlak detonacijskog udarnog vala. Na uspješnost miniranja bitno utječe odnos mase eksploziva i volumena minske bušotine.

Gustoća komercijalnim eksploziva se kreće u vrijednostima od 0,7 g/cm^3 do 1,6 g/cm^3.

4.2.8. Temperatura eksplozije

Temperatura prilikom reakcije detonacije uz konstantan volumen teoretski iznosi od 1000 °C do 6000 °C. Obzirom da se eksplozivi koriste u minskim bušotinama ta temperatura je niža zbog hlađenja okolnih stijena prilikom dodira (Tatiya R.R., 2012).

4.2.9. Bilanca kisika

Ravnoteža, balans ili bilanca kisika je parametar eksploziva koje određuje vrstu nastalih plinova detonacije. Pod bilancom (uravnoteženosti) podrazumijeva se odnos količine kisika

koju sadrži eksploziv i količine kisika koja je potrebna za potpuno sagorijevanje odnosno oksidaciju svih gorivih tvari u sastavu eksploziva. Pri tome ugljik se spaja s kisikom u ugljični dioksid i ugljični monoksid, vodik s kisikom daje vodu, a dušik s kisikom dušične plinove. Uz nedostatak kisika u strukturi eksploziva, nakon detonacije razvijaju se otrovni plinovi: CO_x i NO_x.

Ako količina kisika nakon eksplozije ostaje u suvišku onda je bilanca kisika pozitivna, a u suprotnom slučaju je negativna. Ako ne nastane ni višak ni manjak kisika, bilanca kisika je uravnotežena. Svi privredni eksplozivi moraju imati malo pozitivnu ili uravnoteženu bilancu kisika.

Bilanca kisika ima veliki utjecaj na razvijanje otrovnih plinova i na radni efekt miniranja. Pri uravnoteženoj bilanci kisika oslobađa se maksimalna količina energije eksplozivnog punjenja. Kod negativne bilance kisika oslobađa se manja količina energije zbog nepotpunog sagorijevanja gorivih tvari u eksplozivu. Pri jače pozitivnoj bilanci kisika dio potencijalne energije eksplozivnog punjenja potroši se na endotermalne reakcije pri stvaranju otrovnih dušikovih oksida (Konya C.J. & Walter E.J., 1991).

4.2.10. Osjetljivost na udar

Osjetljivost eksploziva na udar ovisi o kemijskom sastavu i mora biti unutar određene granice radi sigurnosti pri rukovanju, transportu i upotrebi. Za privredna miniranja primjenjuju se sigurnosni eksplozivi koji su neosjetljivi ili vrlo malo osjetljivi na udar i trenje.

Osjetljivost na udar ispituje se po Kastu ili prema BAM metodi. Kastvova metoda sastoji se u slobodnom padu utega od 2 kg na Kastov aparat u kojem se nalazi eksploziv. Mjerilo osjetljivosti je visina u cm s koje se 6 puta spušta uteg od 20 kg, a da pritom niti jednom ne dođe do detonacije. Osjetljivost na udar prema BAM metodi ispituje se padom utega različite mase s različite visine, pri čemu se kinetička energija udara postepeno povećava. Osjetljivost na udar je onaj najveći iznos mase i visine pri kojemu još ne dolazi iniciranja eksploziva. Na slici 4.8 prikazan je BAM uređaj za određivanje osjetljivosti eksploziva na udar.

Slika 4.8 BAM uređaj za određivanje osjetljivosti eksploziva na udar

4.2.11. Prijenos detonacije

Prijenos detonacije definira se kroz sposobnost iniciranja između dvije u pravcu postavljene patrone sa zračnim razmakom između njih. Ukoliko eksploziv prema deklaraciji proizvođača može stabilnu detonaciju razviti samo u zatvorenom prostoru, bušotini, ispitivanje prijenosa detonacije obavlja se na patronama s međusobnim razmakom u čeličnim cijevima. Patrone eksploziva trebaju biti slobodno ovješene u zraku. Razmaci između patrona povećavaju se u koracima ukoliko je na početnom razmaku došlo do prijenosa detonacije. U početnoj fazi ispitivanja koraci mogu biti veći, a pri kraju iznose 1 cm. Ispitivanje ne mora početi od kontakta dvije nego se preporučuje proizvođačem deklariran razmak. Veličina prijenosa detonacije je onaj najveći razmak $D(D_{max})$ pri kojemu je u tri ispitivanja tri puta došlo do prijenosa detonacije (Škrlec V., 2015).

4.2.12. Vodootpornost

Vodootpornost eksploziva je sposobnost eksploziva da izdrži izloženost vodi bez pogoršanja ili gubitka svojih svojstava detonacije. U suhim uvjetima rada vodootpornost eksploziva nema utjecaj na detonaciju eksploziva. U vlažnim uvjetima rada, posebno pri prisustvu vode u bušotini, vodootpornost ima veliku ulogu. Želatine i emulzije imaju najveću

vodootpornost u odnosu na ostale eksplozive. Eksplozivi veće gustoće uglavnom imaju odličnu vodootpornost, dok eksplozivi manje gustoće imaju malu ili nikakvu vodootpornost.

4.3. MINERSKO-TEHNIČKE ZNAČAJKE EKSPLOZIVA KORIŠTENIH PRILIKOM ISTRAŽIVANJA NA EP CUKAVEC II

Prilikom pokusnih miniranja na eksploatacijskom polju Cukavec II korištena su eksplozivna punjenja Permonex V19 i Pakaex. To su amonij nitratni praškasti, odnosno ANFO eksplozivi, a za koje postoje podaci o brzinama i prijenosu detonacije, te ostalim ispitivanjima. Ispitivanja su sistematizirana i prikazana u tablicama.

4.3.1. Amonij nitratno praškasti eksplozivi

Amonij nitratno praškasti eksplozivi sastoje se od mljevenog amonijevog nitrata i organskih goriva, a senzibilizirani su trinitrotoluolom. Osjetljivi su na inicijalni impuls rudarske kapice br. 8 i nisu vodootporni.

Permonex V19 je patronirani amonij-nitratno praškasti eksploziv proizvođača *Explosia a.s.*, iz Republike Češke. Osjetljiv je na inicijalni impuls rudarske kapice br. 8.

Teoretske značajke Permonexa V19 prema specifikaciji proizvođača prikazane su u tablici 4.1, a rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.2.

Tablica 4.1 Teoretske značajke eksploziva Permonex V19 prema specifikaciji proizvođača

PERMONEX V19	
Gustoća eksploziva	0,95 [g/cm^3]
Brzina detonacije	4500 [m/s]
Toplina eksplozije	4,36 [MJ/kg]
Obujam plinova, V	900 [l/kg]
Prijenos detonacije	maksimalno do 5cm
Vodootpornost	mala u patroni
Iniciranje	rudarska kapica br.8

Tablica 4.2 Rezultati ispitivanja amonij nitratno praškastog eksploziva komercijalnog imena Permonex V19

PERMONEX V19				
Datum ispitivanja	**Gustoća eksploziva** ρ **[g/cm^3]**	**Prijenos detonacije** **D** **[cm]**	**Promjer patrone** Φ **[mm]**	**Srednja brzina detonacije** **v** **[m/s]**
18.11.2000.	-	4	28	3475
11.06.2001.	1,129	4	28	3279
30.07.2002.	1,129	3	28	3781
23.12.2004.	1,129	4	60	4182
11.04.2006.	1,126	3	70	4322
30.04.2007.	1,129	3	60	4038
14.05.2008.	1,082	4	70	4151
30.03.2009.	1,088	4	70	4476
24.06.2009.	1,086	5	70	4839
07.07.2010.	1,050	6	60	4291
07.07.2010.	1,043	6	60	4295
30.06.2011.	-	5	60	4286
08.08.2011.	-	6	60	4222

4.3.2. ANFO eksplozivi

ANFO eksplozivi sastoje se od granuliranog amonijevog nitrata s dodatkom mineralnih ulja. Nisu osjetljivi na inicijalni impuls rudarske kapice br. 8. Nisu vodootporni. Prijenos detonacije kod ANFO eksploziva se ostvaruje kontaktom. Ispitan je eksploziv Pakaex.

Teoretske značajke Pakaex-a prema specifikaciji proizvođača prikazane su u tablici 4.3, a rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.4.

Tablica 4.3 Teoretske značajke eksploziva Pakaex-a prema specifikaciji proizvođača

PAKAEX	
Gustoća eksploziva (nasipna)	0,870±0,02 [g/cm^3]
Brzina detonacije	2950±100 [m/s]
Toplina eksplozije	3700±100 [kJ/kg]
Obujam plinova, V	984 [l/kg]
Temperatura eksplozije	2194 [$^\circ C$]
Prijenos detonacije	potpunim kontaktom
Vodootpornost	nije vodootporan

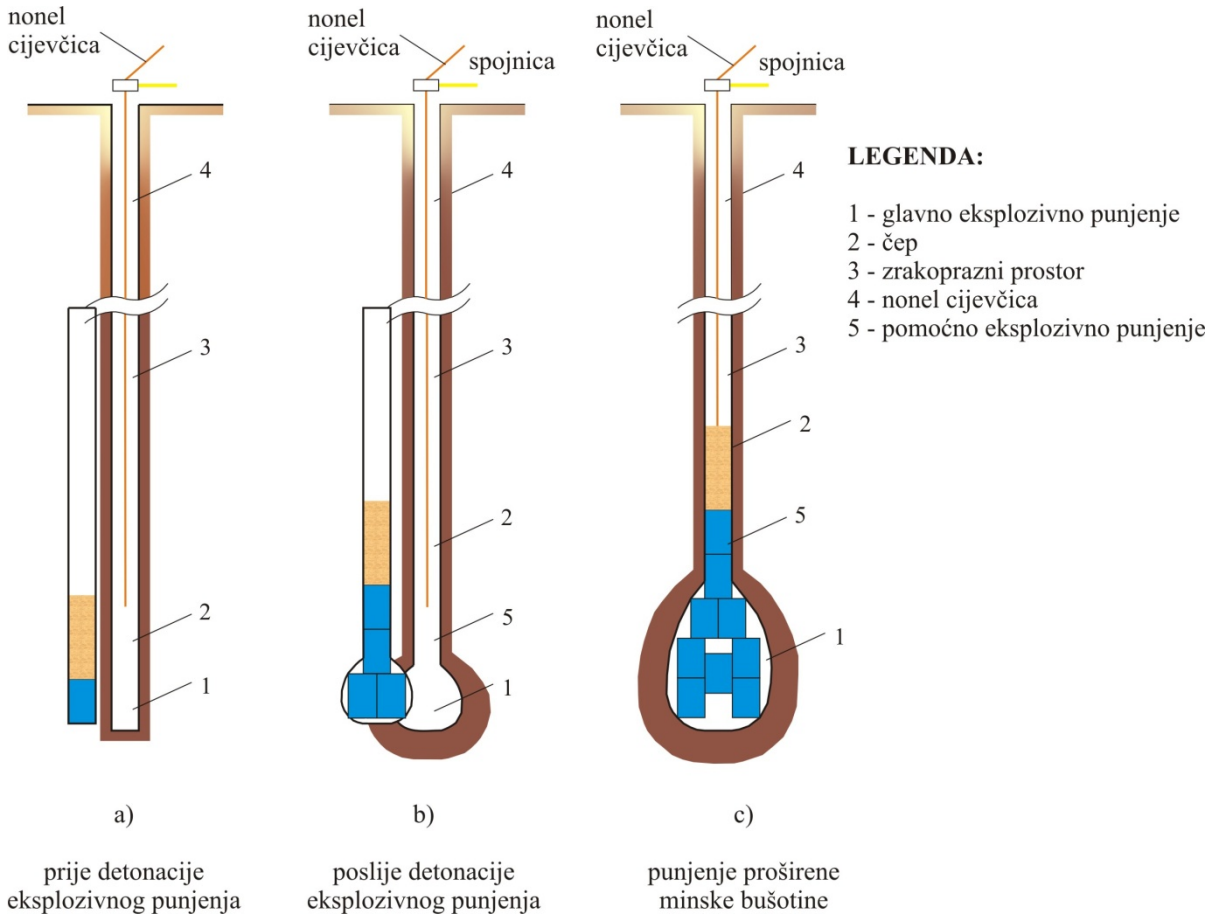
Tablica 4.4 Rezultati ispitivanja ANFO eksploziva komercijalnog imena Pakaex-a

PAKAEX				
Datum ispitivanja	**Gustoća eksploziva** ρ **[g/cm^3]**	**Prijenos detonacije** **D** **[cm]**	**Promjer patrone** Φ **[mm]**	**Srednja brzina detonacije** **v** **[m/s]**
30.11.2006.	0,882	67	40	2944
20.11.2007.	0,888	69	40	5869
14.11.2008.	0,876	69	40	2852
13.11.2009.	0,886	69	20	3691
28.01.2011.	0,873	69	20	3018
20.01.2012.	-	69	20	3201

5. KOTLOVSKA MINIRANJA

Pod pojmom *kotlovskih miniranja* podrazumijevamo u osnovi proširenje minske bušotine koje se postiže jednokratnim ili uzastopnim višekratnim otpucavanjem manjeg eksplozivnog punjenja smještenog pri dnu minske bušotine (Krsnik J., 1989). Prilikom detonacije eksplozivnog punjenja, stijena se pod djelovanjem visokog tlaka plinovitih produkata stlači, stvarajući *kotlovsko proširenje*.

Ako se jednim otpucavanjem ne postigne potrebni volumen proširenja, postupak se ponavlja uz povećanje eksplozivnog punjenja, sve dok se ne dobije potrebni volumen za smještaj eksplozivnog punjenja, kako je to prikazano na slici 5.1 (Krsnik J., 1989).



Slika 5.1 Faze kotlovskog miniranja (Krsnik J., 1989)

Prošireni se dio minske bušotine poslije prvog miniranja ili više miniranja očisti ispuhavanjem zrakom koji je pod tlakom ili posebno izvedenim priborom kojim se vadi odminirani materijal (Božić B., 1998).

Eksplozivno punjenje za proširenje minske bušotine određuje se prema izrazima:

$$Q_{kp} = \frac{Q_k}{k_p \cdot g_{ek}}, \qquad \text{[kg]} \qquad 5\text{-}1$$

gdje je: Q_{kp} - eksplozivno punjenje za proširenje minske bušotine, [kg],

Q_k - eksplozivno punjenje za glavno kotlovsko miniranje, [kg],

$k_p = \frac{V_{pr}}{Q_{kp}}$ - pokazatelj proširenja minske bušotine, [dm^3/kg],

V_{pr} - volumen proširenja minske bušotine, [dm^3],

g_{ek} - gustoća eksplozivnog punjenja, [kg/dm^3].

Eksplozivno punjenje proširene minske bušotine dano je izrazom:

$$Q_k = q_k \cdot a \cdot B \cdot H, \qquad \text{[kg]} \qquad 5\text{-}2$$

gdje je: q_k - specifična potrošnja eksploziva za kotlovsko miniranje, [kg/m^3],

$a \cdot B \cdot H$ - volumen odloma kotlovske minske bušotine, [m^3],

$a = (0{,}8 - 1{,}4) \cdot B$ - razmak minskih bušotina, [m],

B - linija najmanjeg otpora, [m],

H - visina etaže, [m].

Proračun eksplozivnog punjenja za glavno punjenje prema H.V. Meljnikovu glasi:

$$Q_k = q_k \cdot B^3 \cdot \left(\frac{B+1}{2 \cdot B}\right)^{3/2}, \qquad \text{[kg]} \qquad 5\text{-}3$$

gdje je: q_k - specifična potrošnja eksploziva za kotlovsko miniranje, [kg/m^3],

Linija najmanjeg otpora, B određuje se:

$$B = 0,8 \cdot H, \qquad [\mathrm{m}] \qquad 5\text{-}4$$

gdje je: H - visina etaže, [m].

Razmak kotlovskih bušotina, a glasi:

$$a = m_{kg} \cdot B, \qquad [\mathrm{m}] \qquad 5\text{-}5$$

gdje je: $m_{kg} = 0,9 - 1,4$ - koeficijent gustoće kotlovskih bušotina.

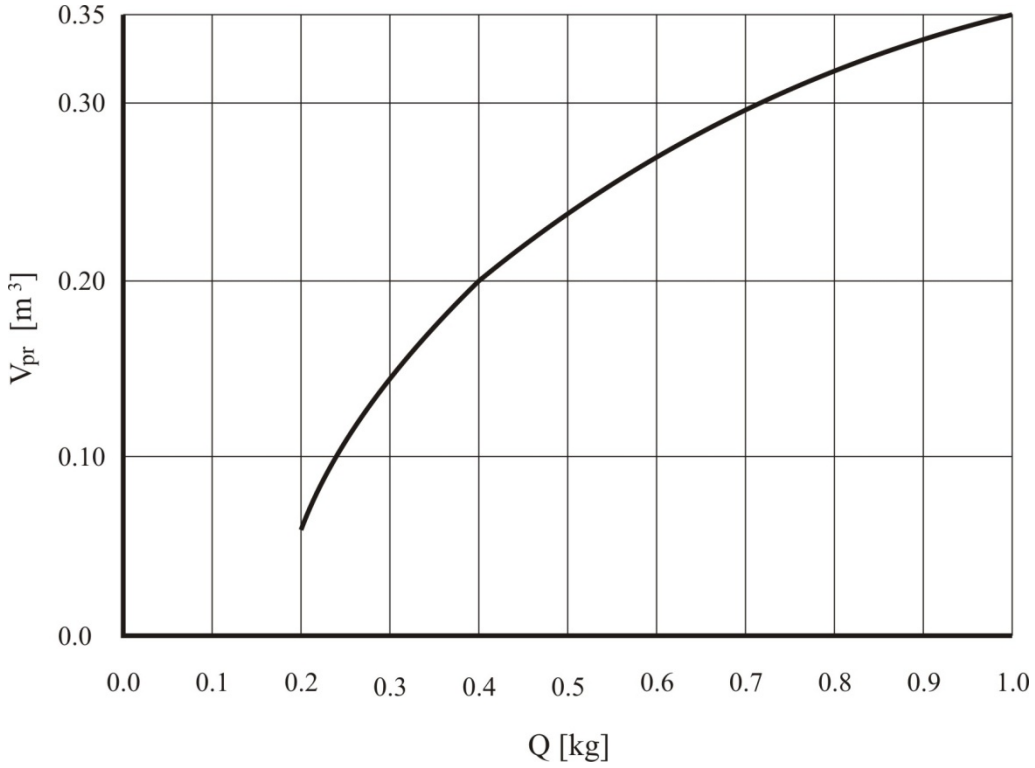
Razmak između redova kotlovskih bušotina, b:

$$b = 0,85 \cdot B, \qquad [\mathrm{m}] \qquad 5\text{-}6$$

Kotlovsko miniranje, zbog niza nedostatka na površinskim kopovima i kamenolomima, ima ograničenu primjenu (Božić B., 1998):

- granulacija odminirane kamene mase je neujednačena,
- miniranjem nastaju snažni seizmički efekti,
- na dnu etaže nastaju izražene pukotine,
- izrada proširenja bušotina zahtijeva složenu organizaciju rada na mjestu izvođenja miniranja.

Volumen kotlovskog proširenja ovisi o količini i vrsti eksploziva, te o geotehničkim karakteristikama tla. Na osnovi rezultata kotlovskih miniranja u glinama konstruiran je dijagram ovisnosti volumena kotlovskog proširenja o količini eksplozivnog punjenja, slika 5.2 (Krsnik J., 1989).



Slika 5.2 Dijagram ovisnosti volumena nastalog kotlovskog proširenja V_{pr} [m^3] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg] (Krsnik J., 1989)

5.1. DJELOVANJE EKSPLOZIJE U KOHERENTNIM TLIMA

Djelovanje eksplozije u koherentnim tlima, poglavito glinama, tumačili su u svojim radovima Vesić A.S., 1965; Kušnarev D.M. & Belikov M.P., 1972; Riđešić I., 1981; Afonin V.G. et al., 1982; Citovič N.A., 1983; Qingwen L. et al., 2015; Zhongqi W. & Yong L., 2003 i drugi.

Prema njihovim razmatranjima, pri detonaciji eksplozivnog punjenja unutar minske bušotine dolazi do stvaranja visokog tlaka plinova eksplozije koji se nalaze pod visokim tlakom, uslijed čega se stijena (tlo) koja je neposredno uz eksplozivno punjenje počinje kretati, a udaljeniji slojevi počinju se zbijati.

Proširenja nastala otpucavanjem kotlovskih punjenja različita su po obliku i veličini. Kod koherentnih tla u osnovi se formira proširenje u obliku kugle.

Pri detonaciji kotlovske mine djeluje visoki tlak plinova eksplozije (Qingwen L. et al., 2015). Uslijed toga se tlo neposredno u zoni eksplozije počinje gibati, a udaljeniji slojevi stlači (Zhongqi W. & Yong L., 2003). Pri tomu, tlačni val radijalno istiskuje slojeve tla koji

na taj način postaju kompaktniji i čvršći. U neposrednoj zoni eksplozije tlo se potpuno istisne, pri čemu se formira proširenje u obliku kugle. Slabljenjem kompresijskog vala od centra eksplozije, formiraju se zona zbijanja i zona oscilacija tla. Djelovanje eksplozije u mekanim stijenama prikazano je na slici 5.3.

Slika 5.3 Djelovanje eksplozije u mekanim stijenama

Polumjer proširenja, ili polumjer zone istiskivanja, *R* moguće je orijentacijski odrediti prema izrazu (Riđešić I., 1981.):

$$R_i = k \cdot \frac{\sqrt[3]{Q}}{18,7}, \qquad [\mathrm{m}] \qquad 5\text{-}7$$

gdje je: Q - masa eksploziva u minskoj bušotini, [kg],

k - koeficijent ovisan o vrsti mekane stijene u kojoj se izvodi kotlovsko miniranje, tablica 5.1.

Tablica 5.1 Ovisnost koeficijenta *k* o vrsti stijene

Vrsta stijene	Koeficijent *k*
Granit, mramor, čvrsti dolomit	1,0 - 2,0
Čvrsti vapnenac i škriljevac, lapor, dolomit	1,6 - 2,6
Vapnenac manje čvrstoće, gips, škriljevac, lapor, dolomit	1,8 - 3,2
Školjkasta i slabija kreda	3,8 - 4,6
Gline male plastičnosti, pjeskovite gline	4,8 - 6,6
Gline srednje i visoke plastičnosti	6,4 - 9,4

Za gline niske plastičnosti i pjeskovite gline, koeficijent k se kreće u granicama 4,8 do 6,6, dok za gline srednje i visoke plastičnosti koeficijent k iznosi 6,4 do 9,4.

Polumjer pukotinske zone određuje se orijentacijski iz izraza:

$$R_r = 1,13 \cdot \frac{Q}{k_0}, \qquad [\mathrm{m}] \qquad 5\text{-}8$$

gdje je: R_r - polumjer pukotinske zone, [m],

Q - masa eksploziva u minskoj bušotini, [kg],

k_0 - koeficijent otpora mekane stijene spram djelovanja eksplozije.

Kod žilavih i slojevitih čvrstih stijena nastalo proširenje je kruškastog ili cjevastog oblika.

U stijenama velike čvrstoće postignuto proširenje obično iznosi 30 do 50 mm, a u stijenama s manjom čvrstoćom 50 do 100 mm. U koherentnim tlima orijentacijski se može računati s dobivenim proširenjem veličine 300 do 600 mm.

Masa eksplozivnog punjenja koja se smješta u dno minske bušotine pri jednokratnom otpucavanju obično je relativno mala i proračunava se prema planiranom učinku. Ona iznosi od nekoliko desetaka grama do nekoliko kilograma.

5.2. PRIMJENA KOTLOVSKIH MINIRANJA

Kotlovska miniranja kojima se dobivaju proširenja različitih oblika i veličina, najčešće se koriste za sidrenje temeljnih i potpornih zidova, te za sidrenje podzemnih prostorija u manje čvrstim i mekanim stijenama (koherentnim glinenim tlima).

U žilavim i stijenama visoke čvrstoće kotlovska miniranja primjenjuju se vrlo rijetko. Naime, djelovanje eksplozivnog punjenja kotlovskih mina principijelno se razlikuje od djelovanja eksplozivnog punjenja u kontinuirano napunjenoj minskoj bušotini pri masovnim miniranjima. Detonacija kotlovske mine drobi i usitnjava stijenu u neposrednoj blizini aktiviranog eksploziva. Povećanjem udaljenosti od zone smještaja eksploziva granulacija razorene stijene sve je nepovoljnija, tako da je najudaljenije razoreni volumen izdrobljen na krupne komade koje treba naknadno usitniti.

Praktična primjena kotlovskih miniranja u geotehničkoj praksi kojima se dobivaju kuglasta proširenja ogleda se u:

- ugradnji konstruktivnih elemenata za sidrenje temeljnih i potpornih zidova,
- stabilizaciji glinenih pokosa trajnog karaktera,
- stabilizaciji različitih gospodarskih objekata kao npr. dalekovodnih stupova, tunela i slično.

6. PRIKAZ DOSADAŠNJIH REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Prikazani su rezultati dosadašnjih istraživanja koja su bila provedena na gliništima Cerje Tužno i Črет. Ispitivanja su provedena krajem osamdesetih i početkom devedesetih godina prošlog stoljeća.

6.1. OPIS LOKACIJA I KONCEPCIJA POKUSNIH KOTLOVSKIH MINIRANJA

Pokusna kotlovska miniranja u osamdesetim godinama prošlog stoljeća, izvođena su u koherentnim glinovitim tlima. Lokacije na kojima su se izvodila istraživanja bila su eksploatacijska polja gline, eksploatacijsko polje Črет i Cerje Tužno, slika 6.1.

Slika 6.1 Zemljovidni položaj eksploatacijskog polja Črет i Cerje Tužno

Provedena terenska istraživanja i dobiveni rezultati pokusnih kotlovskih miniranja iz osamdesetih godina prošlog stoljeća bili su usmjereni na:

- prethodno utvrđivanje osnovnih strukturnih i geotehničkih značajki: poroznosti, vlage, zapreminske mase, stišljivosti, kohezije i kuta unutrašnjeg trenja,
- utvrđivanje volumena proširenja koje nastaje pokusnim kotlovskim miniranjima u dvije osnovne vrste tla: glinama i pijescima. Pri tomu je promjer bušotina kod serije otpucavanja bio stalan, i iznosio je $\Phi 76$, $\Phi 116$ ili $\Phi 131$ mm. Duljina bušotina iznosila je od 1,0 m u glinama do maksimalno 7,0 m u pijesku. Kod izvođenja pokusa

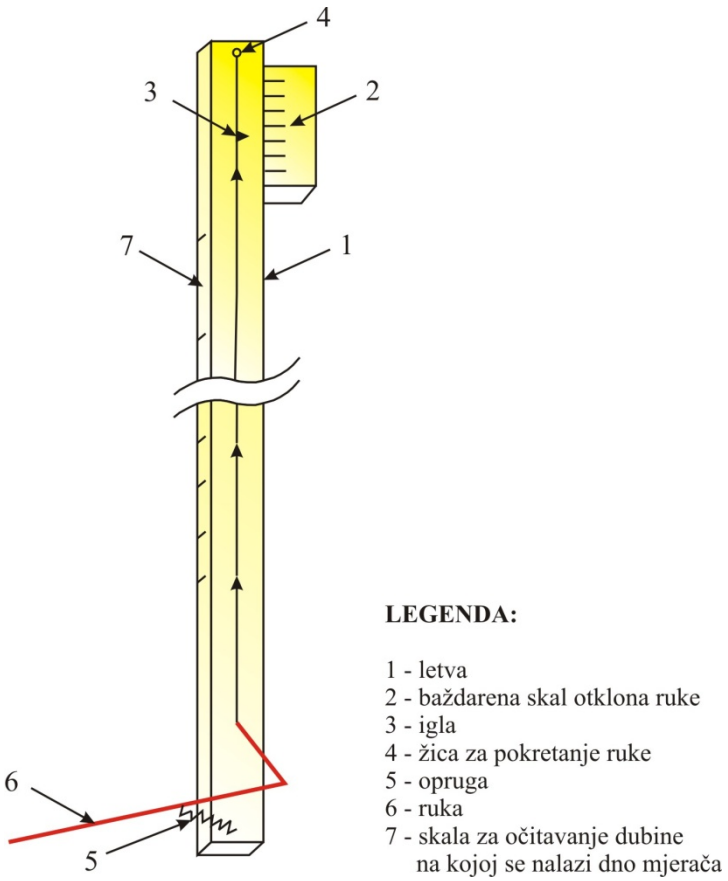
korištene su dvije vrste praškastih amonijsko-nitratnih eksploziva: amonal vodni, promjera patrona *Φ 28* i *Φ60* mm.

- analizu i interpretaciju rezultata pokusnih miniranja kojom se utvrđuju najznačajnije korelacije:
  - ovisnost mase eksplozivnog punjenja i volumena proširenja u predmetnom tlu,
  - te volumena proširenja i poroznosti.

Prilikom otpucavanja kotlovskih mina nastalo proširenje mjereno je:

- uporabom mehaničkog mjerača, slika 6.2,
- opreznim bagerskim iskopom predmetnog tla,
- nakon provedenih pokusnih izvlačenja sidara.

S obzirom da je razvoj dubinskih kamera i elektronskih mjerača (lasera), u osamdesetim godinama prošlog stoljeća bio tek u povojima, nisu provedena mjerenja nastalih proširenja nakon aktiviranja eksplozivnog punjenja istima. Mjerenja nastalih proširenja napravljena su, tada jedinom mogućom metodom uz pomoć mehaničkog mjerača (Simendić P., 1990).



Slika 6.2 Mehanički mjerač dimenzija proširenja (Simendić P., 1990)

Mjerenje proširenja izvodi se na slijedeći način:

Ruka mjerača (6) se postavi u vertikalni položaj, te se mjerač spusti na dno bušotine. Pridržavajući mjerač na određenoj dubini pritisne se žica (4) prema dolje, što izaziva otklon ruke mjerača do stjenke proširenja. Zatim se očita otklon na baždarenoj skali (2). Nakon toga povlačenjem žice prema gore ruka mjerača se ponovno dovodi u vertikalni položaj. Postupak mjerenja se ponavlja, ali na manjoj dubini. Mjerač se pri svakom mjerenju na određenoj dubini okreće za 90°, te nakon opisivanja punog kruga diže na manju dubinu. Paralelno sa očitavanjem otklona na skali ruke mjerača, potrebno je zabilježiti dubinu na kojoj se nalazi dno mjerača. Ta dubina se očitava na letvi mjerača (7).

Na osnovi četiri mjerenja u jednoj razini, dobiva se srednja vrijednost polumjera proširenja.

6.2. TERENSKA ISTRAŽIVANJA

Eksploatacijsko polje Cerje Tužno

Ležište gline u Cerju Tužnom nalazi se zapadno od ceste Ivanec - Varaždin. Iako je ovo ležište u eksploataciji od početka stoljeća, geološki istražni radovi izvršeni su tek 1973., 1974. i 1980. godine. Rezerve gline utvrđene su u količini od 3 900 000 m^3 i kategorijama A, B i C_1.

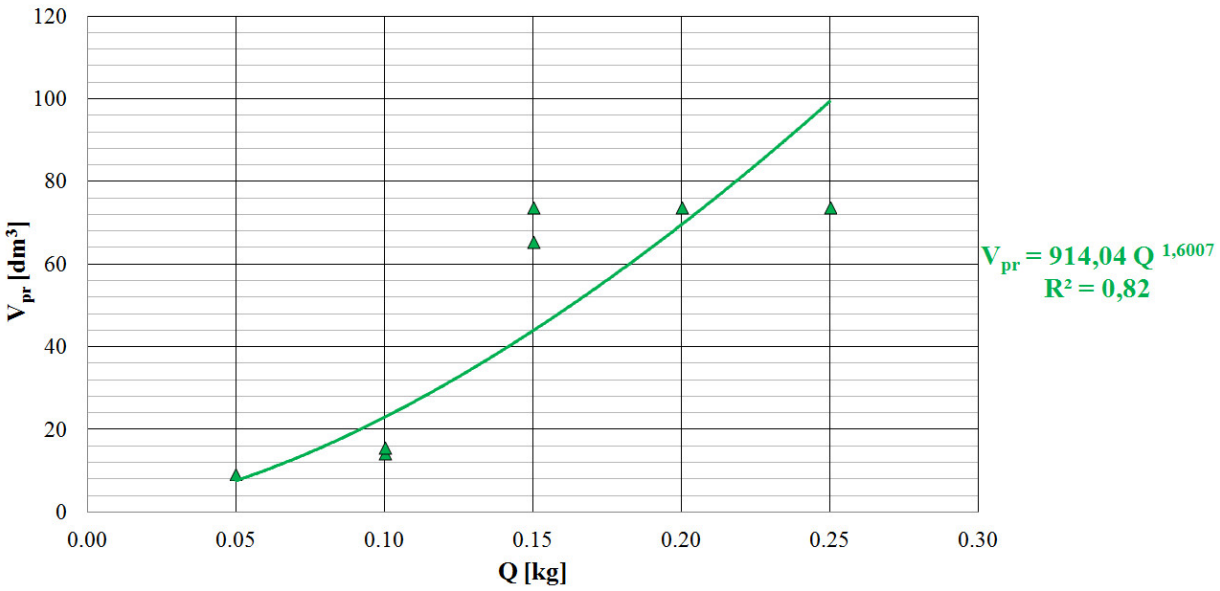
Glina iz ovog ležišta sadrži od 20 do 30 % kvarca, 25 do 30 % montmorilonita, te oko 20 % kaolinita. Limonitne komponente ima od 5 do 6 %. U gornjem dijelu glina je srednje plastična, dok u dubini poprima visokoplastične karakteristike. Koristi se za proizvodnju fasadne opeke u ciglani Cerje Tužno.

Na gliništu Cerje Tužno ukupno je otpucano 13 minskih bušotina. Od toga je za analizu i interpretaciju bilo iskorišteno 7 minskih bušotina, u kojima su izmjerena nastala proširenja nakon aktiviranja eksplozivnog punjenja, tablica 6.1. Razlog tako niskom postotku iskoristivosti pokusnih kotlovskih minskih bušotina je zarušavanje stijenki minskih bušotina nakon otpucavanja, pa prema tomu i nemogućnost mjerenja nastalih proširenja.

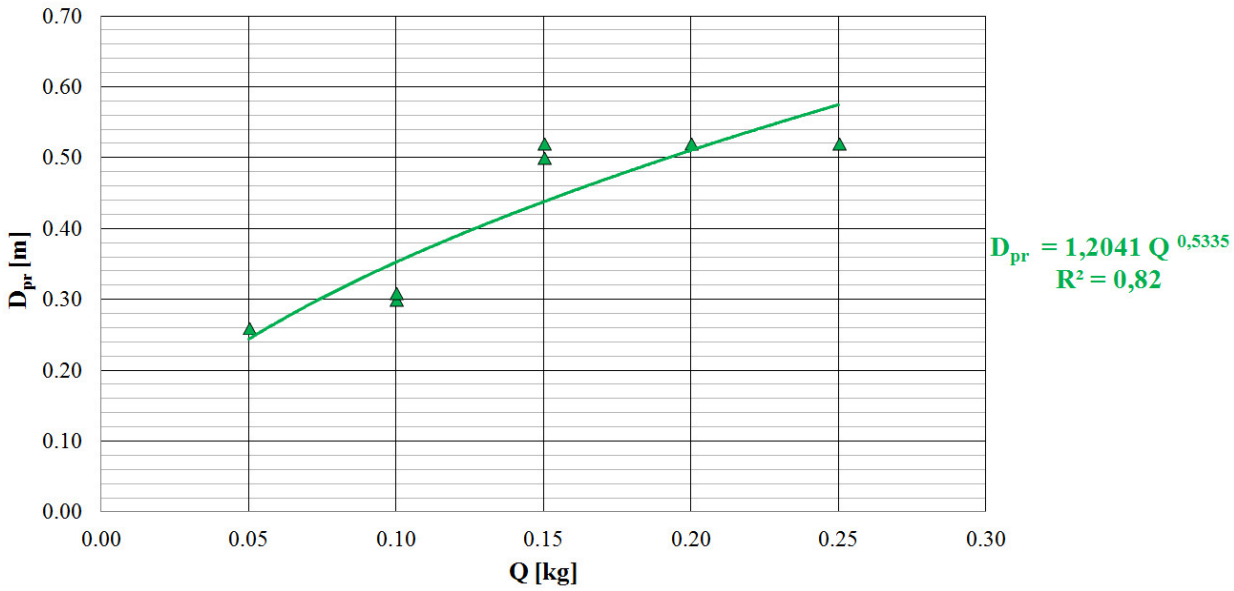
Tablica 6.1 Rezultati terenskih istraživanja na eksploatacijskom polju Cerje Tužno

Minska bušotina	Promjer minske bušotine D_{MB} [m]	Dubina minske bušotine H_{MB} [m]	Vrsta eksploziva	Masa eksploziva Q [kg]	Duljina čepa $L_Č$ [m]	Vrsta minskog čepa	Volumen nastalog proširenja V_{pr} [dm^3]	Promjer proširenja D_{pr} [m]
CT1	131	0,70	Amonal vodni	0,05	0,50	glina	9,20	0,2600
CT2	131	1,00	Amonal vodni	0,10	0,50	glina	14,10	0,3000
CT3	131	1,00	Amonal vodni	0,10	0,50	glina	15,60	0,3100
CT4	76	1,15	Amonal vodni	0,15	0,50	pijesak	65,40	0,5000
CT5	76	1,15	Amonal vodni	0,15	0,50	pijesak	73,60	0,5200
CT6	76	1,15	Amonal vodni	0,20	0,50	pijesak	73,60	0,5200
CT7	131	1,00	Amonal vodni	0,25	0,50	pijesak/ glina	73,60	0,5200

Također napravljena je usporedba ovisnosti volumena proširenja V_{pr} [dm^3] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg], slika 6.3 i ovisnost mase eksploziva Q [kg] i nastalog promjera proširenja D_{pr} [m], slika 6.4.



Slika 6.3 Ovisnost volumena proširenja V_{pr} [dm^3] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg]



Slika 6.4 Ovisnost nastalog promjera proširenja D_{pr} [m] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg]

Eksploatacijsko polje Čret

Ležite gline u Čretu nalazi se južno od ceste Lepoglava-Varaždin, oko 3 km udaljeno od Lepoglave. Ono je geološki istraživano 1969., te 1977. i 1978. godine. Utvrđene su rezerve gline od 350 000 m^3, kategorija A, B i C_1. Ove su gline nastale alteracijom neogenskih lapora, pod utjecajem atmosferilija. Od minerala glina zastupljeni su ilit, montmorilonit i kaolinit. Prisutni su još kvarc, kalcit, dolomit i tinjci. Glina je žute boje, srednje do visokoplastična.

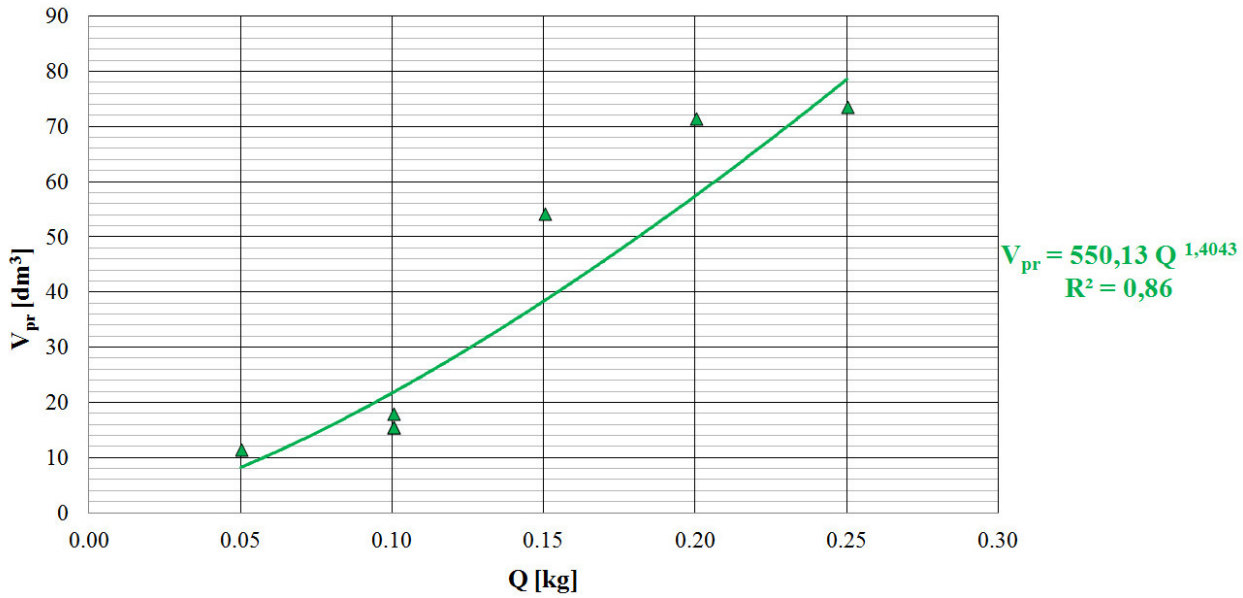
Na EP Čret ukupno je otpucano 14 bušotina. Od toga je za analizu i interpretaciju bilo iskorišteno 7 bušotina. Pri tomu su osnovne veličine, promjer minskih bušotina, vrsta eksploziva, vrsta i duljina čepa, bile istovjetne kod svih 7 pokusima uspjelih minskih bušotina, tablica 6.2.

Rezultati pokusa s eksplozivnim punjenjima ispod 50 grama nisu imali praktičnu vrijednost jer su proširenja nakon otpucavanja bila veoma mala. Jednako tako, pri otpucavanjima s eksplozivnim punjenjima iznad 250 grama po bušotini ne dobivaju se znatna proširenja, naprotiv, pokusne kotlovske mine se zarušavaju. Spomenuta opaska primjenjiva je i za otpucavanja na gliništu Cerje Tužno.

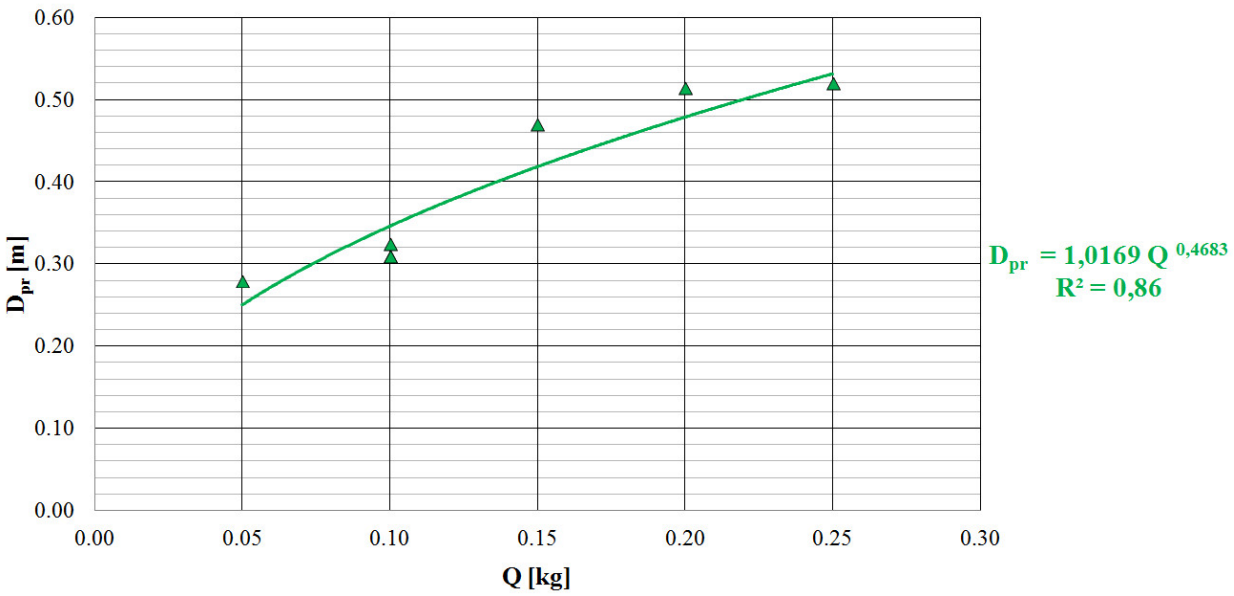
Tablica 6.2 Rezultati terenskih istraživanja na eksploatacijskom polju Čret

Minska bušotina	Promjer minske bušotine D_{MB} [m]	Dubina minske bušotine H_{MB} [m]	Vrsta eksploziva	Masa eksploziva Q [kg]	Duljina čepa $L_Č$ [m]	Vrsta minskog čepa	Volumen nastalog proširenja V_{pr} [dm^3]	Promjer proširenja D_{pr} [m]
Č 1	101	1,20	Amonal vodni	0,05	0,35	pijesak	11,50	0,2800
Č 2	101	1,20	Amonal vodni	0,10	0,35	pijesak	15,60	0,3100
Č 3	101	1,20	Amonal vodni	0,10	0,35	pijesak	15,60	0,3100
Č 4	101	1,20	Amonal vodni	0,10	0,35	pijesak	18,00	0,3250
Č 5	101	1,20	Amonal vodni	0,15	0,35	pijesak	54,40	0,4700
Č 6	101	1,20	Amonal vodni	0,20	0,35	pijesak	71,50	0,5150
Č 7	101	1,20	Amonal vodni	0,25	0,35	pijesak	73,60	0,5200

Također napravljena je usporedba ovisnosti volumena proširenja V_{pr} [dm^3] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg], slika 6.5 i ovisnost mase eksploziva Q [kg] i nastalog promjera proširenja D_{pr} [m], slika 6.6.



Slika 6.5 Ovisnost volumena proširenja V [dm^3] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg]



Slika 6.6 Ovisnost nastalog promjera proširenja D_{pr} [m] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg]

6.3. LABORATORIJSKA ISTRAŽIVANJA

Laboratorijskim ispitivanjima obuhvaćeno je određivanje fizikalno-mehaničkih svojstava gline niske do visoke plastičnosti u srednje plastičnom do polučvrstom konzistentnom stanju. Ispitivanja su izvođena prema tada važećim normama po JUS-u iz područja geomehaničkih ispitivanja.

Određivana je vlažnost tla, granulometrijski sastav, Atterber-gove granice konzistencije (granica tečenja i granica plastičnosti), vlažna i suha obujamska gustoća te gustoća čvrstih čestica tla. Iz vrijednosti vlažnosti tla i granica konzistentnih stanja izračunati su indeksni pokazatelji kao što su indeks plastičnosti i indeks konzistencije.

Mehaničke karakteristike tla određivane su pokusima u aparatima za izravni posmik, edometrima, aparatima za određivanje jednoosne tlačne čvrstoće i permeametrima. Na osnovu rezultata mjerenja, izračunata je vršna posmična čvrstoća iskazana kohezijom i kutom unutarnjeg trenja, moduli stišljivosti u rasponima vertikalnih opterećenja od 1,8 do 400 kN/m^2, tlačna čvrstoća pri slobodnom bočnom širenju i koeficijenti vodopropusnosti pri različitim koeficijentima pora postignutim u opsegu vertikalnih opterećenja od 50 do 400 kN/m^2.

Iz edometarskih pokusa određivan je i Young-ov modul elastičnosti, tlak bubrenja u stanju preplavljenosti tla vodom te pripadajući indeks bubrenja. Klasifikacija tla provedena je prema USC sustavu za koherentne materijale. Primijenjenim vrstama i metodama ispitivanja dobiven je kvalitetan uvid u aktualno stanje tla na predmetnim lokacijama.

Tijekom izvođenja terenskih istražnih radova na eksploatacijskim poljima Cerje Tužno i Čret, izvađene su jezgre poremećenih i neporemećenih uzoraka. Uzorci su dostavljeni u laboratorij na Geotehničkom fakultetu na daljnja ispitivanja. Dio rezultata ispitivanja dat je u tablicama 6.3 i 6.4.

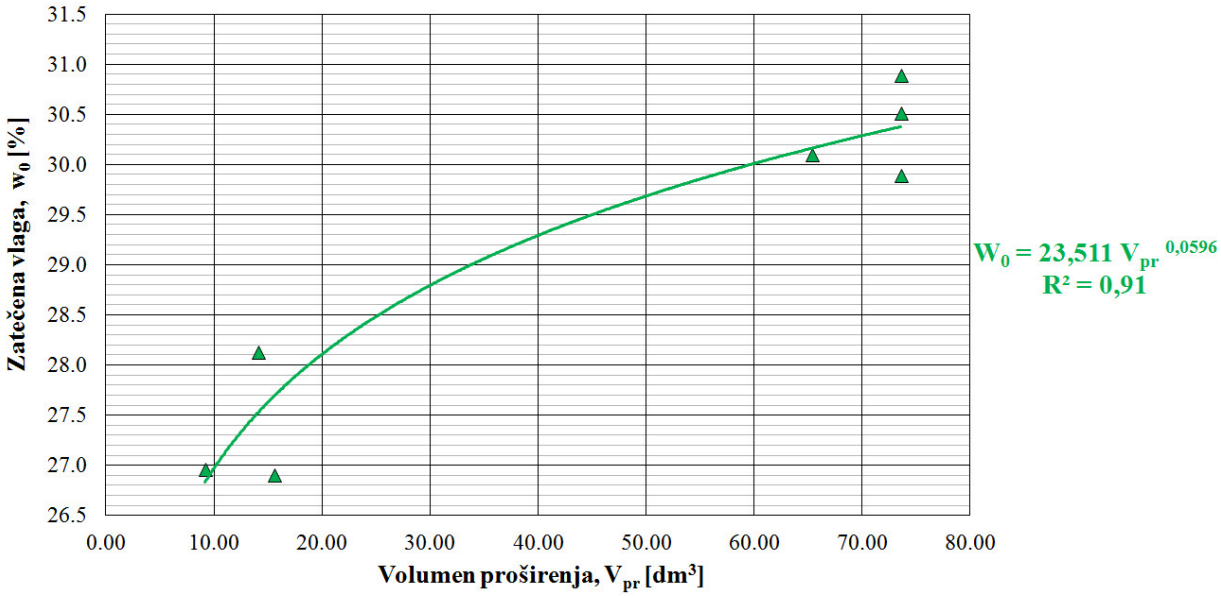
Tablica 6.3 Rezultati laboratorijskih ispitivanja na eksploatacijskom polju Cerje Tužno

UZORAK			VRSTA ISPITIVANJA					
Bušotina	**Dubina**	**Vrsta uzorka**	**Zatečena vlaga**	**Granica konzistencije**		**Indeksi**		**Gustoća specifična**
				Granica tečenja	**Granica plastičnosti**	**Indeks plastičnosti**	**Indeks konzistencije**	
	[m]	**PU / NU**	$w_0[\%]$	$w_L[\%]$	$w_P[\%]$	$I_P[\%]$	$I_C[\%]$	$\rho_S[g/cm^3]$
CT 1	3,00 - 3,15	NU	25,2	42,8	24,3	18,5	0,95	2,65
	6,00 - 6,20	NU	25,5	47,8	22,3	25,5	0,87	2,68
	9,00 - 9,30	NU	30,2	54,3	25,8	28,5	0,84	2,68
CT 2	3,00 - 3,15	NU	28,2	45,5	26,0	19,5	0,89	2,65
	6,00 - 6,20	NU	27,6	41,6	22,6	19,0	0,74	2,67
	10,00 - 10,20	NU	28,6	47,4	24,9	22,5	0,84	2,70
CT 3	3,00 - 3,20	NU	31,5	66,0	30,0	36,0	0,95	2,69
	6,00 - 6,15	NU	24,7	44,6	25,7	18,9	1,05	2,69
	9,00 - 9,30	PU	24,5	66,2	23,9	42,3	0,98	2,67

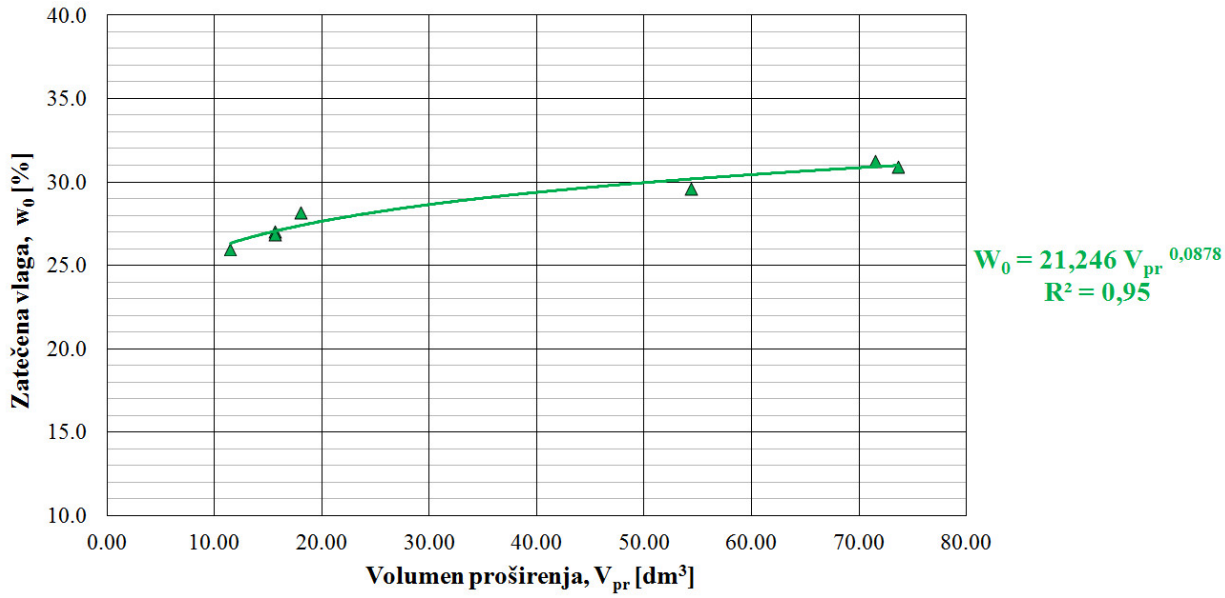
Tablica 6.4 Rezultati laboratorijskih ispitivanja na eksploatacijskom polju Čret

UZORAK			VRSTA ISPITIVANJA					
Bušotina	**Dubina**	**Vrsta uzorka**	**Zatečena vlaga**	**Granica konzistencije**		**Indeksi**		**Gustoća specifična**
				Granica tečenja	**Granica plastičnosti**	**Indeks plastičnosti**	**Indeks konzistencije**	
	[m]	**PU / NU**	$w_0[\%]$	$w_L[\%]$	$w_P[\%]$	$I_P[\%]$	$I_C[\%]$	$\rho_S[g/cm^3]$
Č 1	0,00 - 3,00	PU	24,2	41,2	20,1	21,1	-	2,66
	9,00 - 11,00	PU	26,7	33,5	17,6	15,9	-	2,69
	11,00 - 13,00	PU	26,9	37,9	19,2	18,7	-	2,70
Č 2	3,00 - 4,00	PU	27,1	55,5	24,8	30,7	-	2,72
	8,00 - 8,50	PU	29,2	43,5	17,6	25,9	-	2,68
	11,50 - 11,70	PU	26,9	44,0	18,8	25,2	-	2,67
	15,80 - 16,00	PU	24,8	31,1	16,9	14,2	-	2,66
Č 3	4,00 - 5,00	PU	24,8	38,6	18,1	18,5	-	2,67
	6,00 - 7,00	PU	25,9	41,2	17,4	23,8	-	2,70
	8,50 - 9,50	PU	29,7	40,6	19,2	21,4	-	2,67

Također, u sklopu ispitivanja iz osamdesetih godina prošlog stoljeća napravljena je analiza utjecaja nastalog volumena proširenja V_{pr} o zatečenoj vlazi w_0 u poremećenim i neporemećenim uzorcima, slika 6.7 i 6.8. Usporedba je napravljena na temelju ispitivanja na eksploatacijskim poljima Cerje Tužno i Čret.



Slika 6.7 Ovisnost zatečene vlage w_0 [%] o nastalom volumenu proširenja V_{pr} [dm^3] na eksploatacijskom polju Cerje Tužnom



Slika 6.8 Ovisnost zatečene vlage w_0 [%] o nastalom volumenu proširenja V_{pr} [dm^3] na eksploatacijskom polju Čret

7. RECENTNA TERENSKA I LABORATORIJSKA ISTRAŽIVANJA

U sklopu višegodišnjeg institucijskog financiranja znanstvene djelatnosti na javnim sveučilištima u 2014. godini, a temeljem Ugovora o namjenskom višegodišnjem institucijskom financiranju znanstvene djelatnosti u godinama 2014., 2015. i 2016., iskorištena je mogućnost prijave za kratkoročnu potporu znanstvenom istraživanju primjene eksploziva u koherentnim glinovitim tlima metodom kotlovskih miniranja.

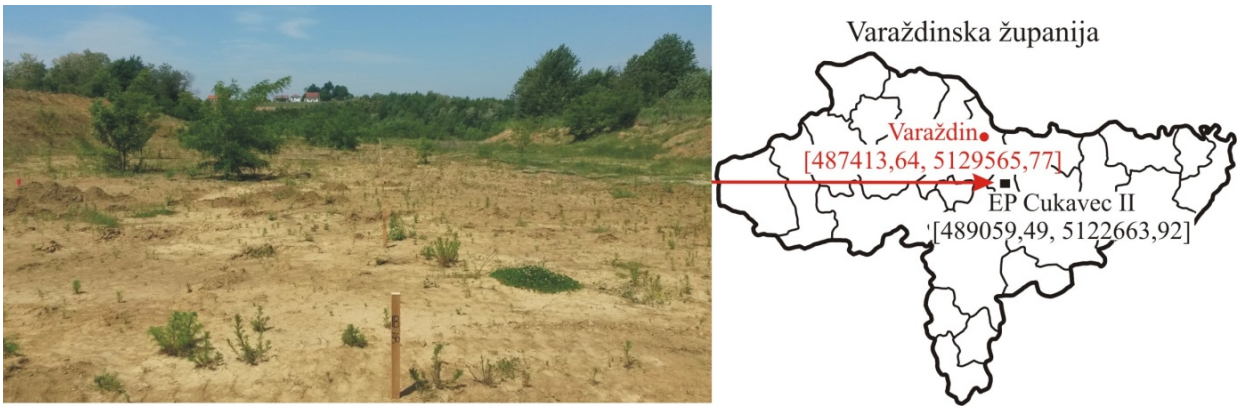
Koncepcijski je napravljen plan i metodologija terenskih istraživanja. Plan terenskih istraživanja podijeljen je na:

- lociranje minskih polja i iskolčenje minskih bušotina,
- terenska geotehnička istraživanja:
  - *geofizička istraživanja - višekanalna analiza površinskih valova (MASW) prije i poslije pokusnih miniranja svih mina na istražnom profilu,*
  - *bušenje minskih bušotina i uzimanje poremećenih i neporemećenih uzoraka,*
  - *laboratorijska ispitivanja, određivanje gustoće i zatečene vlage poremećenih i neporemećenih uzoraka,*
- pokusna miniranja i određivanje efektivnog raspona masa dviju različitih vrsta eksploziva kojima se dobiva kuglasto proširenje pri dnu minskih bušotina,
- mjerenje brzina oscilacija prilikom pokusnih miniranja,
- utvrđivanje nastalih kuglastih proširenja nakon aktiviranja eksplozivnog punjenja,

U okviru sveučilišne potpore, sva terenska geotehnička i geodetska istraživanja i mjerenja provedena su na eksploatacijskom polju Cukavec II, tijekom 2014., 2015. i 2016. godine.

Eksploatacijsko polje Cukavec II nalazi se u Varaždinskoj županiji, slika 7.1, u Općini Gornji Kneginec, smješteno na sjevernim padinama Varaždinsko-topličkog gorja koje na sjeveru postupno prelazi u prostranu ravnicu rijeke Drave i Plitvice. Polje je u vlasništvu tvrtke Leier Leitl d.o.o., Zagrebačka 89, 42 204 Turčin. Eksploatacijsko polje Cukavec II udaljeno je oko 6,0 km od Varaždina, 500 m južno od postojećih građevina ciglane u Turčinu, 250 m od naselja Tomaševec, 350 m južno od lokalne ceste LC 25077 koja se spaja na državne ceste DC3 Varaždin-Zagreb i DC510 Turčin-Varaždinske Toplice. Eksploatacija gline na spomenutom eksploatacijskom polju provodi se već desetljećima.

Kod provođenja istraživanja korištena je suvremena tehnika i tehnologija miniranja, instrumenti kojima se snimilo eksploatacijsko polje Cukavec II i kojima su se iskolčile minske bušotine, slika 7.1, te programska podrška kojom su se analizirali i interpretirali rezultati istraživanja (Mesec J. et al., 2015).

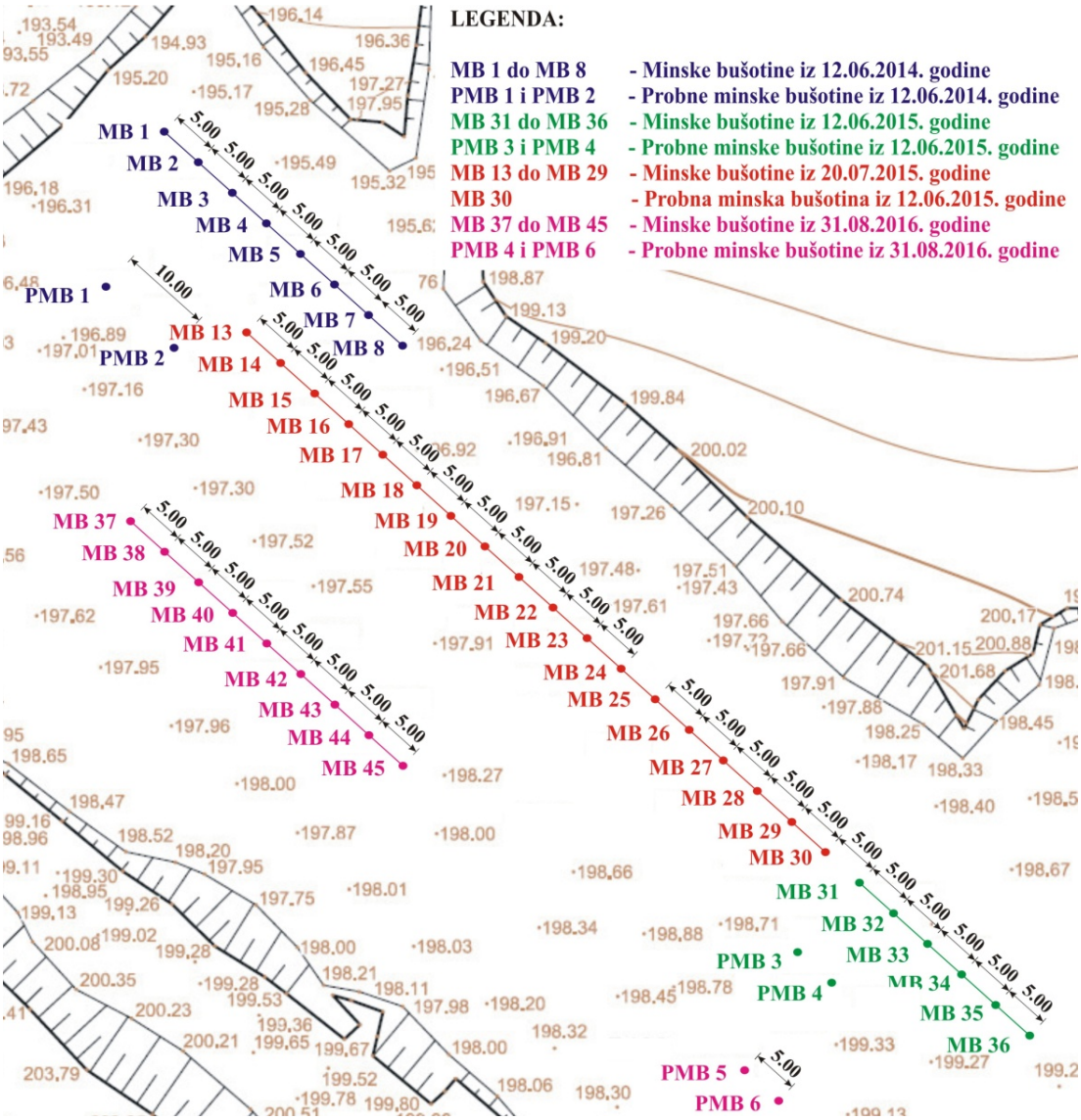


Slika 7.1 Smještaj eksploatacijskog polja Cukavec II i iskolčene minske bušotine

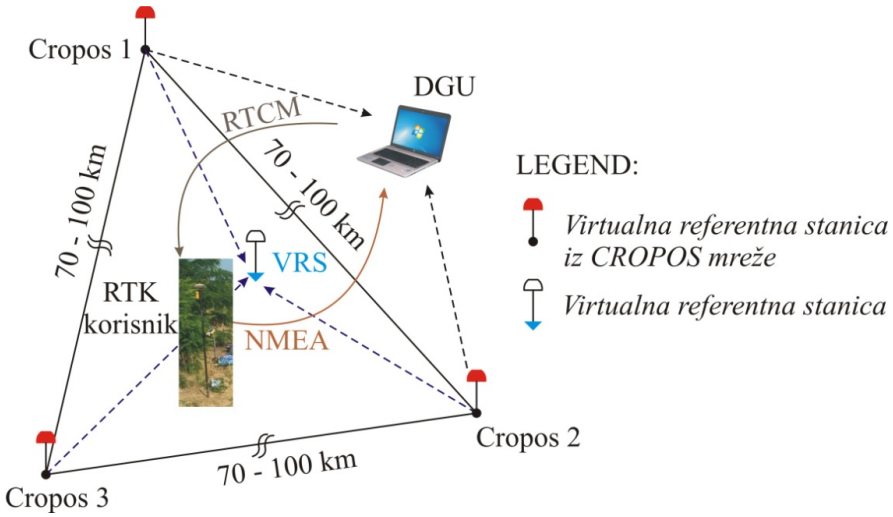
7.1. LOCIRANJE MINSKIH POLJA I ISKOLČENJE MINSKIH BUŠOTINA

Geodetska izmjera s ciljem određivanja koordinata položaja i visina minskih bušotina, tj. određivanje geodetskog profila, slika 7.2, izvedena je pomoću RTK GNSS metode, primjenom online transformacijskih parametara putem CROPOS (engl. *CROatian POsitioning System*) sustava.

*Kinematika u realnom vremenu (*engl. *real-time kinematic - RTK)* je postupak kojim se relativne koordinate nepoznate točke prema poznatoj određuju neposredno nakon postavljanja pokretnog prijamnika na istu. Kod RTK metode se svi potrebni podaci dobiveni na referentom prijamniku uz pomoć radio-veze šalju pokretnom prijamniku. Jedino ograničenje je udaljenost do koje funkcionira radio-veza. Ograničenja udaljenosti riješena su u CROPOS sustavu uvođenjem VRS-a, slika 7.3 (virtualnih referentnih stanica) (Pribičević B. & Medak D., 2003).



Slika 7.2 Eksploatacijsko polje Cukavec II i iskolčene minske bušotine



Slika 7.3 Princip Virtualnih Referentnih stanica

CROPOS sustav (Hrvatski pozicijski sustav) je državna mreža referentnih GNSS (engl. *Global Navigation Satellite System*) stanica Republike Hrvatske koji omogućava određivanje položaja u realnom vremenu, s točnošću od 2 cm u horizontalnom, te 4 cm u vertikalnom smislu na cijelom teritoriju Republike Hrvatske. U okviru CROPOS-a postavljene su 33 referentne GNSS stanice na međusobnoj udaljenosti od 70 km tako da ravnomjerno prekrivaju područje države i one prikupljaju podatke mjerenja i neprekidno ih šalju u kontrolni centar. U kontrolnom centru se prikupljeni podaci obrađuju, mjerenja se izjednačavaju i računaju korekcijski parametri. Korekcijski parametri su korisnicima na terenu dostupni u realnom vremenu putem mobilnog interneta i standardiziranog NTRIP protokola (Marjanović M., 2010).

Proceduru u CROPOS mreži sačinjavaju 4 koraka:

- podaci s referentnih stanica iz CROPOS mreže prenose se do centra za obradu i kontrolu sustava (središnji ured DGU),
- korisnik RTK metode šalje putem NMEA protokola približne koordinate,
- centar za obradu i kontrolu sustava određuje trokut omeđen referentnim stanicama unutar kojeg se nalazi korisnik RTK metode, računa virtualnu referentnu stanicu kao funkciju dobivenih približnih koordinata, i
- centar za obradu i kontrolu sustava šalje podatke VRS stanice prema korisniku u obliku RTCM 2.3 (3.0) korekcije (Medak D. et al., 2007).

Rover zatim prima i interpretira dobivene podatke kao da se odnose na stvarnu, fizičku referentnu stanicu odmah pokraj njega. Krajnji rezultat je dramatičan porast performansi RTK metode izmjere. Neke od prednosti VRS-a su:

- skraćeno vrijeme inicijalizacije uz povećanu točnost,
- nije potrebna lokalna bazna stanica,
- manji troškovi nabave opreme,
- neovisnost o dostupnosti lokalnih točaka,
- dovoljan jedan operater,
- svi korisnici koriste isti koordinatni okvir (Rezo M. & Bačić Ž., 2009).

Službeni položajni geodetski datum Republike Hrvatske od 4. kolovoza 2004. godine je Hrvatski terestrički referentni sustav za epohu 1995.55-skraćeno HTRS96, a službeni visinski datum Hrvatski visinski referentni sustav za epohu 1971.5-skraćeno HVRS71. Službeni

projekcijski koordinatni sustav Republike Hrvatske za područje katastra i detaljne državne topografske kartografije je koordinatni sustav poprečne Mercatorove projekcije - skraćeno HTRS96/TM, sa srednjim meridijanom 16°0' i linearnim mjerilom na srednjem meridijanu 0.9999. Sukladno navedenom sva geodetska mjerenja obavljena su u službenim položajnim i visinskim koordinatnim sustavima, te su koordinate mjerenja prikazane u kartografskoj HTRS96/TM projekciji (NN 110/2004, 114/2004).

RTK GNSS, tj. položaj minskih bušotina izvedena je pomoću GNSS prijamnika marke Topcon HiPer+, slika 7.4, čije glavne tehničke značajke omogućavaju točnost RTK horiznontalnih mjerenja H: 10mm+1ppm i RTK vertikalnih mjerenja V: 15mm + 1ppm, tablica 7.1.

Položaj geodetskog profila bušotina iskolčen je na terenu, a koordinate su određene u novom službenom referentnom koordinatnom sustavu HTRS96, odnosno iste su prikazane u novoj kartografskoj HTRS96/TM projekciji.

Slika 7.4 GNSS prijamnik Topcon HiPer+

Tablica 7.1 Tehničke karakteristike GNSS prijamnika marke Topcon HiPer+

PRAĆENJE	
Signal	GPS/GLONASS Ll/L2 CIA and P Code & Carrier WAAS/EGNOS
Kanal	40
TOČNOST	
Statična	3mm +.5ppm horizontalno, 5mm +.5ppm vertikalno
RTK/Kinematic	10mm + 1 ppm horizontalno, 15mm + 1 ppm vertikalno
MATERIJAL	
Materijal	Aluminij
Dimenzija	159 x 88x172 mm
Težina	1,65 kg
RADNA OKOLINA	
Radna temperatura	-30 to +60 ^{o}C
Temperatura skladištenja	-22 to +140 ^{o}C
Vlažnost	95 %

NAPAJANJE	
Unutarnja	Baterija Li-ion. 4000 mAh. 7.4V x 2 baterije
Vrijeme rada	14+ (10 TX) sati
Vanjska snaga	1 port (s)
Ulazni napon	6 to 28 V DC, 2 minimalno punjenje
Potrošnja energije	4,2 W
Vrijeme punjenja	8 sati
VEZA	
Bluetooth	1.1 comp.
USB	1.1 Version
Serijski port	AJD port, 460800, 230400, 115200, 57600, 38400, 19200, 9600, 4800, 2400, 1200, 600, 300
MEMORIJA	
Unutarnja i kapacitet	Memorija u kontroleru, 128 MB
Vrijeme zapisivanja	53 sati
KONEKCIJA	
Vanjska	Port 1 port(s), 5 pin ODU

7.1.1. Priprema, izvedba i usporedba geodetskih mjerenja

Miniranju je prethodilo snimanje karakterističnih točaka terena za potrebe izrade geodetskog situacijskog nacrta. Nakon izrade geodetskog situacijskog nacrta pristupilo se definiranju položaja minskih bušotina koje će se kasnije na terenu iskolčiti. Minske bušotine definirane su na međusobnoj udaljenosti od 5 metara, te je svaka istražna bušotina imenovana. Na taj način svaka bušotina je definirana svojom oznakom i E i N koordinatom. Sve minske bušotine izvezene su u posebnu datoteku u formatu: IME_BUŠOTINE, E_koordinata, N_koordinata, h_koordinata, pri čemu je h_koordinata za sve unose jednaka nuli (h=0,000).

Iduća radnja prije miniranja je iskolčenje koordinata bušotina na terenu prema prethodno opisanoj metodi, te nakon toga usporedba rezultata. Obrada podataka mjerenja obavljena je programskim paketom TopoSURV v.8.2. Dobiveni rezultati iskolčenja prikazani su u tablici 7.2. Iz navedene tablice vidljivo je da su iskolčene vrijednosti veoma bliske projektiranim vrijednostima. Sukladno rezultatima iskazanim u tablici 7.2 zaključuje se da su iskolčene točke na terenu zadovoljavajuće točnosti za potrebe istražnog miniranja, te se moglo pristupiti miniranju.

Tablica 7.2 Usporedba projektiranih i iskolčenih vrijednosti minskih bušotina

Minska bušotina	Projektirane vrijednosti		Iskolčene vrijednosti		Razlika iskolčene i projektirane vrijednosti		Godina
	E koordinata (HTRS96/TM) [m]	N koordinata (HTRS96/TM) [m]	E koordinata (HTRS96/TM) [m]	N koordinata (HTRS96/TM) [m]	ΔE [cm]	ΔN [cm]	
PMB1	489445,79	5122735,66	489445,79	5122735,62	0	4	2014
PMB2	489453,24	5122729,03	489453,24	5122729,04	0	-1	2014
PMB3	489127,98	5122573,54	489127,98	5122573,54	0	0	2015
PMB4	489133,55	5122568,55	489133,55	5122568,55	0	0	2015
PMB5	489126,59	5122555,03	489126,55	5122555,03	4	0	2016
PMB6	489130,32	5122551,69	489130,32	5122551,70	0	-1	2016
MB1	489450,00	5122751,77	489449,97	5122751,77	3	0	2014
MB2	489453,79	5122748,40	489453,83	5122748,38	-4	2	2014
MB3	489457,47	5122745,07	489457,46	5122745,05	1	2	2014
MB4	489461,22	5122741,75	489461,23	5122741,75	-1	0	2014
MB5	489464,88	5122738,43	489464,83	5122738,44	5	-1	2014
MB6	489468,61	5122735,08	489468,57	5122735,08	4	0	2014
MB7	489472,40	5122731,76	489472,41	5122731,77	-1	-1	2014
MB8	489476,12	5122728,26	489476,14	5122728,24	-2	2	2014
MB13	489075,02	5122634,35	489075,01	5122634,34	-1	-1	2015
MB14	489078,74	5122631,02	489078,74	5122631,02	0	1	2015
MB15	489082,47	5122627,68	489082,45	5122627,68	-2	-1	2015
MB16	489086,20	5122624,35	489086,21	5122624,35	2	0	2015
MB17	489089,92	5122621,01	489089,93	5122621,01	1	-1	2015
MB18	489093,65	5122617,68	489093,64	5122617,65	-1	-3	2015
MB19	489097,37	5122614,35	489097,39	5122614,36	1	1	2015
MB20	489101,10	5122611,01	489101,10	5122611,00	0	-1	2015
MB21	489104,83	5122607,68	489104,82	5122607,66	-1	-2	2015
MB22	489108,55	5122604,34	489108,54	5122604,32	-1	-2	2015
MB23	489112,28	5122601,01	489112,28	5122601,01	0	1	2015
MB24	489116,00	5122597,68	489116,00	5122597,67	-1	0	2015
MB25	489119,73	5122594,34	489119,76	5122594,34	3	0	2015
MB26	489123,46	5122591,01	489123,46	5122590,98	0	-2	2015
MB27	489127,18	5122587,67	489127,18	5122587,67	0	0	2015
MB28	489130,91	5122584,34	489130,90	5122584,32	-1	-2	2015
MB29	489134,63	5122581,00	489134,66	5122580,99	2	-1	2015
MB30	489138,36	5122577,67	489138,35	5122577,65	-1	-2	2015
MB31	489142,09	5122574,34	489142,09	5122574,35	0	1	2015
MB32	489145,81	5122571,00	489145,81	5122570,99	0	-1	2015
MB33	489149,54	5122567,67	489149,53	5122567,63	-1	-3	2015
MB34	489153,26	5122564,33	489153,27	5122564,36	0	3	2015
MB35	489156,99	5122561,00	489156,98	5122560,99	-1	-1	2015
MB36	489160,72	5122557,67	489160,70	5122557,69	-2	3	2015
MB37	489059,52	5122615,04	489059,52	5122615,00	0	4	2016
MB38	489063,25	5122611,71	489063,24	5122611,74	1	-3	2016
MB39	489066,98	5122608,37	489066,97	5122608,38	1	-1	2016
MB40	489070,70	5122605,04	489070,71	5122605,03	-1	1	2016
MB41	489074,43	5122601,71	489074,43	5122601,75	0	-4	2016
MB42	489078,16	5122598,37	489078,13	5122598,39	3	-2	2016
MB43	489081,88	5122595,04	489081,86	5122595,05	2	-1	2016
MB44	489085,61	5122591,70	489085,61	5122591,71	0	-1	2016
MB45	489089,33	5122588,37	489089,30	5122588,35	3	2	2016

7.2. TERENSKA GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA

Na eksploatacijskom polju Cukavec II izvedena su terenska geotehnička istraživanja u 2014., 2015. i 2016. godini. Geotehnička istraživanja obuhvatila su geofizička istraživanja, laboratorijska ispitivanja, pokusna miniranja i određivanje efektivnog raspona masa dvaju vrsta eksploziva, utvrđivanje nastalih kuglastih proširenja nakon aktiviranja eksplozivnog punjenja i mjerenje brzina oscilacija u koherentnom glinovitom tlu.

7.2.1. Geofizička istraživanja

Cilj geofizičkih istraživanja bilo je utvrđivanje podataka o općim i mehaničkim svojstvima prirodnih slojeva tla po dubini, te određivanje promjena dinamičkih svojstava tla uzrokovanih aktiviranjem eksplozivnih punjenja različitih vrsta i masa.

Određivanje dinamičkih svojstava tla je zahtjevna, ali iznimno važna zadaća u geotehničkom inženjerstvu, posebno s aspekta protupotresnog djelovanja i dimenzioniranja temeljnih konstrukcija. Na dinamička svojstva tla uvelike su određena modulom posmika, posebno promjenama njegove vrijednosti i varijacijama prigušenja pri cikličkim deformacijama. Općenito, modul posmika je u geotehnici jedan od najvažnijih parametara tla, kojim se definira posmična čvrstoća tla i dimenzioniraju dopuštena naprezanja i deformacije. Terenska istraživanja i rezultati in situ ispitivanja dinamičkih svojstava tla mjerenjem brzina posmičnih valova pri malim deformacijama uglavnom imaju značajnu ulogu u procjenjivanju modula posmika.

Postoje različite vrste geofizičkih metoda, a razlikuju se po tome što opažaju različita fizička svojstva stijena, koja su povezana s geološkim i petrološkim svojstvima (elasticitet, magnetni susceptibilitet i remanentni magnetizam, električna otpornost, električna polarizacija, prirodna radioaktivnost i dr.). Pojedine geofizičke metode temelje se na opažanju tih fizičkih svojstava pa se razlikuju: seizmičke, električne, elektromagnetne, gravimetrijske, magnetometrijske i druge metode (Šumanovac F., 2012).

Publikacija *Applied Geophysics* (Telford W.M. et al., 1990) ističe seizmičke geofizičke metode kao najvažnije geofizičke metode, jer se njihovim istraživanjem i primjenom bavi najviše geofizičara i u njih se ulaže najviše financijskih sredstava. Osobito značenje seizmičkim metodama daje njihova vrlo široka primjena u istraživanju ugljikovodika

(Šumanovac F., 2012). Seizmičke metode temelje se na mjerenju vremena dolaska i amplituda elastičnih valova na putu kroz stijene, iz čega se izračunavaju seizmičke brzine. Obzirom na navedeno, seizmičke metode svrstavaju se u dinamičke geofizičke metode.

Refleksijska seizmička metoda temeljna je geofizička metoda u istraživanju ležišta ugljikovodika zbog najveće razlučivosti, dok su refrakcijske metode usmjerene prema inženjersko-geološkim, hidrogeološkim i geotehničkim istraživanjima. Seizmička refleksija i refrakcija uglavnom koriste longitudinalne, *P* valove, jer ih je najlakše generirati i registrirati (Sheriff R.E. & Geldart L.P., 1995).

Međutim, kod geotehničkih i seizmoloških istraživanja potrebno je poznavati brzinu kretanja posmičnih S valova, V_S, jer je pomoću te veličine moguće odrediti modul smicanja, G i Young-ov modul, E stijene koja se istražuje (Suto K., 2007) formula 7-1 i 7-2, a isti se koriste pri projektiranju konstrukcija.

$$G = \rho \cdot V_s^2, \qquad [\mathrm{kN/m^2}] \qquad 7\text{-}1$$

$$E = \rho \cdot V_s^2 \cdot \frac{3\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 4}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}, \qquad [\mathrm{kN/m^2}] \qquad 7\text{-}2$$

gdje je: G - modul smicanja, [kN/m^2],

ρ - gustoća, [kg],

V_S - brzina kretanja posmičnih *S* valova, [m/s],

E - Young-ov modul, [kN/m^2],

V_P - brzina kretanja longitudinalnih *P* valova, [m/s].

Brzina S valova blizu površine terena može se utvrditi refrakcijskim seizmičkim istraživanjima, uz korištenje horizontalnih geofona i posebnog načina generiranja posmičnih valova. Ako na terenu postoje već gotove bušotine, brzina S valova može se odrediti mjerenjima u jednoj bušotini (engl. *down-hole* i engl. *up-hole* metode) ili mjerenjem u dvije bušotine (engl. *ross-hole* metoda). Seizmičke refrakcijske metode s mjerenjem S valova su teške i dugotrajne, a za mjerenja u bušotinama treba i skupo bušenje.

Zato se već cijeli niz godina razvijaju nove seizmičke metode koje se bave analizom površinskih valova, a imaju brojne prednosti u odnosu na ustaljene seizmičke metode. Tu se ističu spektralna analiza površinskih valova (engl. *Spectral Analysis of Surface Waves-SASW*) i višekanalna analiza površinskih valova (engl. *Multi-Channel Analysis of Surface Waves-MASW*). Upotreba rezultata analize površinskih valova može se, osim u geotehnici, iskoristiti i u području seizmologije. Seizmička mikrozonacija je područje u kojemu se najviše koriste brzine posmičnih valova do nekoliko desetaka metara dubine, pa je iz tog područja u Europi prihvaćen europski standard za klasifikaciju tla Eurokod 8 (EC8), koji se bavi projektiranjem konstrukcija otpornih na potres.

Uzdužni P valovi su longitudinalni kao i valovi zvuka, dok su S valovi transverzalni i polarizirani kao elektromagnetski valovi. P valovi izazivaju progresivna i regresivna titranja supstance na pravcu širenja, opisuju promjenu volumena medija. Imaju najveću brzinu širenja i posebno su značajni za seizmička istraživanja, tablica 7.3. *S* valovi nastoje promijeniti oblik strukture medija kroz koji se šire, djelujući posmično. Analizom P i S valova mogu se odrediti dinamičke konstante elastičnosti, ali se također može uspostaviti i vrlo oštra i određena distinkcija između različitih geo-materijala, koji imaju iste ili slične brzine uzdužnih valova, tablica 7.4.

Tablica 7.3 Brzine P valova u nekim geomedijima

Autor	**Koloski, 1987**	**Anon, 1995**	**Parasnis, 1997**	**Ostali**
Geomedij	**Brzine kompresijskih P valova [m/s]**			
Površinski materijali	-	-	-	*100 – 600
Pijesak	300 – 1200	400 – 1000	200 – 1000	300 – 800
Pijesak, saturiran vodom	1100 – 1800	-	1500 – 2000	1500 – 2700
Šljunak	500 – 1500	-	300 – 2000	300 – 800
Šljunak, saturiran vodom	1500 – 2200	-	1500 – 2000	1500 – 2700
Glina i prah	-	*300 – 1800	*1000 – 2500	*1100 – 2500
Glina, saturirana vodom	-	-	*1500 – 2500	-
Lapor	-	-	-	1800 – 2500
Vapnenac	-	500 – 6700	3500 – 6500	2000 – 6100
Dolomit	-	-	3500 – 6500	-

*Geomedij po seizmičkim svojstvima sličan formacijama na eksploatacijskom polju Cukavec II

Tablica 7.4 Prosječne brzine P i S valova i gustoće nekih geomedija

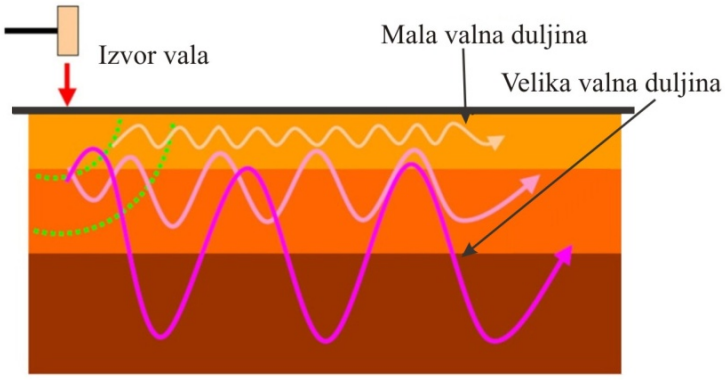
Geomedij	Brzina, P vala [m/s]	Brzina, S vala [m/s]	Gustoća, D [Mg/m^3]
Čista voda	1450 –1510	-	1.00
Riječna i jezerska voda	1430 – 1680	-	-
Morska voda	1460 – 1530	-	-
Površinski materijal	*300 – 600	*100 – 300	-
Pješčenjak	1800 – 4000	915 – 3000	2.45
Šejl	2500 – 4250	1000 – 3000	2.60
Vapnenac	2000 – 6100	1800 – 3800	2.65
Glina i prah	*1100 – 2500	*580	*1.40
Pijesak, šljunak	300 – 800	100 – 500	1.70
Pijesak, šljunak (mokri)	1500 – 2700	900 – 1600	1.93

*Geomedij po seizmičkim svojstvima sličan formacijama na eksploatacijskom polju Cukavec II

1. Površinski valovi

Izazivanjem seizmičkih valova u beskonačnom, homogenom, izotropnom mediju javljaju se samo P i S ili prostorni valovi. Kada se medij ne prostire homogeno i izotropno u beskonačnost u svim smjerovima, mogu se izazvati i druge vrste valova. Ti se valovi nazivaju površinski valovi jer se šire po površini zemlje (ili u neposrednoj blizini površine), dok se prostorni valovi šire kroz cijelo tijelo zemlje. Općenito, površinski valovi mogu nastati jedino u mediju sa slobodnom površinom.

Važno svojstvo koje imaju površinski valovi naziva se disperzija. Disperzija znači da valovi različite valne duljine imaju različitu dubinu prodiranja i prema tome različitu brzinu širenja, slika 7.5. Brzina pri pojedinoj frekvenciji naziva se fazna brzina. Valovi velike valne duljine (male frekvencije) se šire brže, a valovi male valne duljine (velike frekvencije) se šire sporije. Krivulja koja prikazuje faznu brzinu u ovisnosti o frekvenciji naziva se krivulja fazne brzine ili disperzijska krivulja. Prostorni valovi nemaju ovo svojstvo.



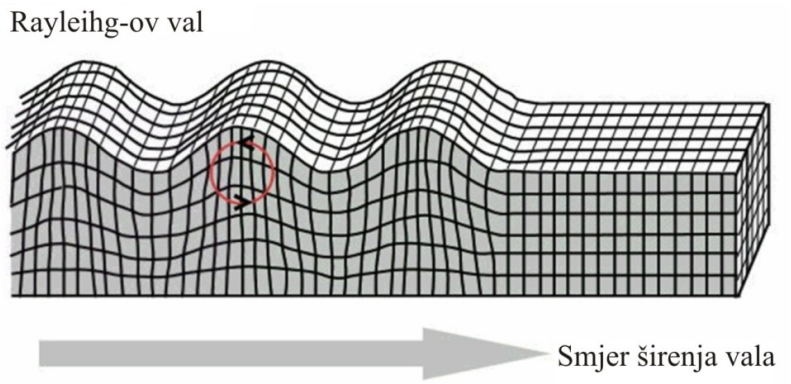
Slika 7.5 Disperzija površinskih valova (prerađeno prema Hayashi K., 2003).

Energiju generiranu iz vertikalnih izvora u najvećoj mjeri preuzimaju površinski valovi i to više od 2/3 energije (67%). Dakle generiranje i snimanje površinskih valova je najlakše između svih vrsta seizmičkih valova. Karakteristike površinskih valova jesu :

- fazna brzina je ovisna o brzini S valova,
- fazna brzina je 0,88-0,95 brzine S valova,
- razlika u valnoj duljini uzrokuje različitu dubinu promatranja,
- povećana učinkovitost energije izvora:
  - *površinski valovi: 67%,*
  - *S valovi: 26%,*
  - *P valovi: 7%,*
- jednostavni su za promatranje,
- moguće je promatrati sloj niže brzine ispod sloja veće brzine.

2. Rayleigh-evi površinski valovi

Ako se za izazivanje seizmičkih valova koriste vertikalni izvori poput čekića ili pada utega (engl. *drop-weight*) nastaje vrsta površinskih valova koji se nazivaju Rayleigh-evi valovi. Oni se često nazivaju i valjanje tla (engl. *ground roll*) radi geometrije njihova kretanja. Kretanje Rayleigh-evih valova sastoji se od longitudinalnog i transverzalnog kretanja sa međusobnim odnosom u fazi. Kretanje čestica je ograničeno na vertikalnu os, koja uključuje smjer širenja vala. Tijekom prolaska vala, čestica prelazi eliptičku putanju kojoj je velika poluos vertikalna (kada je val blizu površine). Smjer kretanja čestica po elipsi se naziva retrogradan jer je suprotan kretanju čestica na površini vode, slika 7.6.

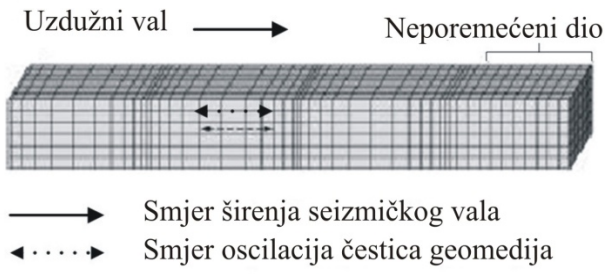


Slika 7.6 Smjer kretanja Rayleigh-evog vala (prerađeno prema https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=Rayleigh%20wave)

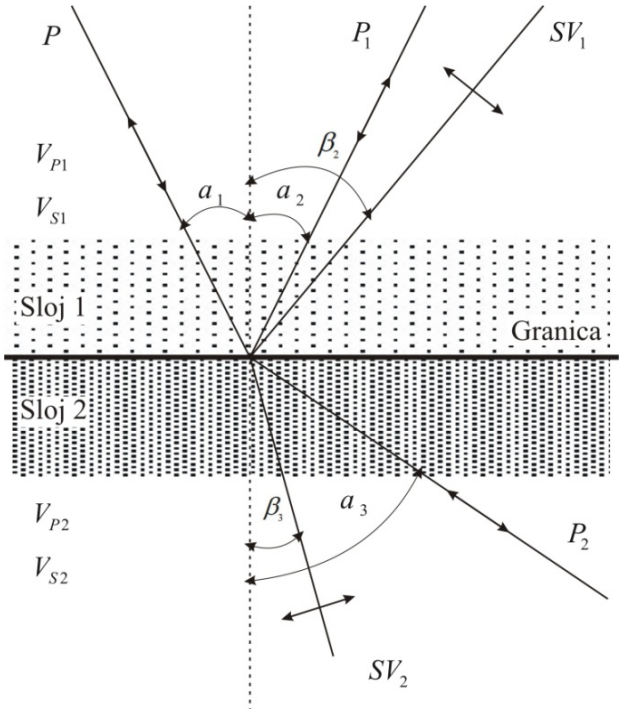
Brzina širenja Rayleigh-evih valova, V_R, ili fazna brzina, najviše ovisi o brzini V_S posmičnih valova (S) u mediju, a u skoro neznatnoj mjeri o brzini (V_P) kompresijskih valova (P), gustoći medija (ρ) i Poisson-ovom koeficijentu (ν). Prema tome, brzina širenja Rayleigh-evih valova dobar je pokazatelj brzine posmičnih valova (V_S). Brzina Rayleigh-evih valova (V_R) nešto je manja od brzine posmičnih valova (V_S), a njihov odnos ovisi o Poisson-ovom koeficijentu (ν). Za $\nu = 0,25$ pretpostavlja se da brzina Rayleigh-evih valova (V_R) iznosi 0,92 V_S ili 92 % brzine posmičnih valova (Stokoe II K.H. et al., 1994), a za cijeli raspon Poisson-ovog koeficijenta (0-0,5) taj odnos se mijenja od 0,88 do 0,95.

3. Seizmička refrakcija

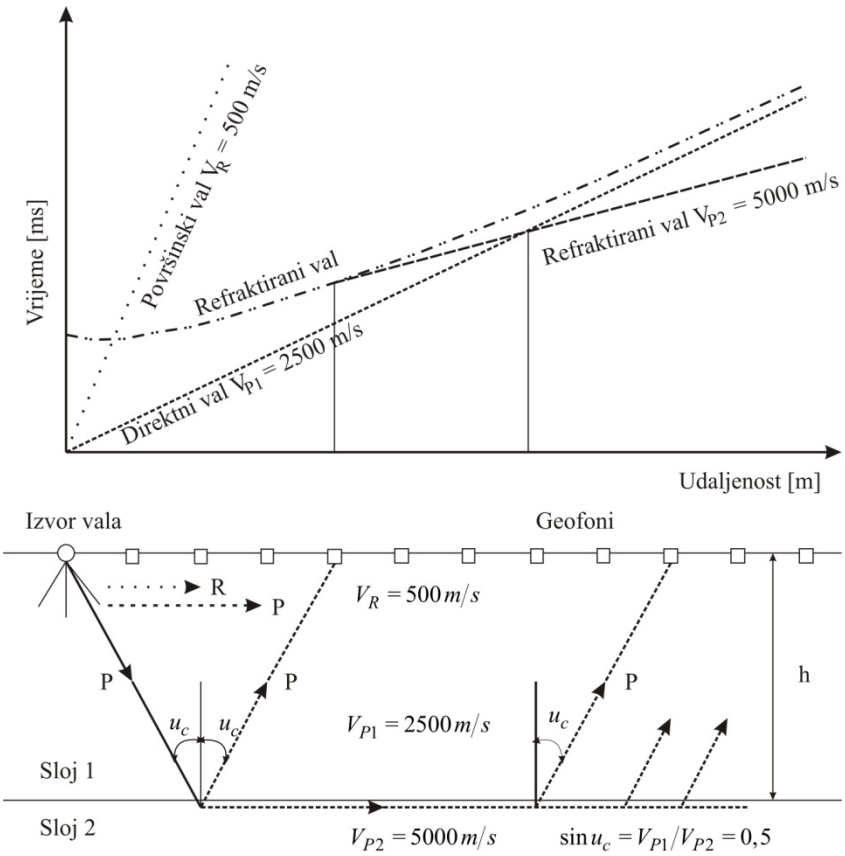
Seizmička refrakcija je geofizička metoda koja omogućuje određivanje brzina elastičnih valova u uslojenoj stijeni kao funkcije dubine. Naime, seizmički valovi se šire od izvora koji se nalazi na površini, te se refraktiraju na granicama slojeva različitih seizmičkih brzina, slika 7.8, i vraćaju se na površinu do niza geofona, koji su raspoređeni na određenim razmacima duž orijentiranog pravca-refrakcijskog profila. Postoji nekoliko tipova seizmičke refrakcije, a koji će se tip primijeniti ovisi o ciljevima istraživanja. Najčešće korišteni tip zasniva se na prvim nailascima uzdužnih kompresijskih ili primarnih valova (P-valovi), slika 7.7. Detekcija nailazaka prvih poremećaja na nizu postavljenih geofona se uvijek odnosi na direktan val ili na refraktirani val. Ta činjenica usmjerava pažnju istraživanja samo na zapažanje prvih nailazaka seizmičke energije, pa se odnos udaljenosti izvor-geofon i vremena nailazaka može iskoristiti za interpretaciju dubine refraktorskih slojeva, slika 7.9. Digitalna oprema za mjerenje s vremenom postaje sve kompaktnija, te nudi mogućnost višekanalnog snimanja. Tehnika obrade podataka snimljenih na terenu postala je automatizirana i vrši se pomoću različitih računalnih programa.



Slika 7.7 Uzdužni kompresijski ili primarni *P* val (Foti S., 2000)



Slika 7.8 *P* valovi na granici dvaju medija (Das B.M., 1983)



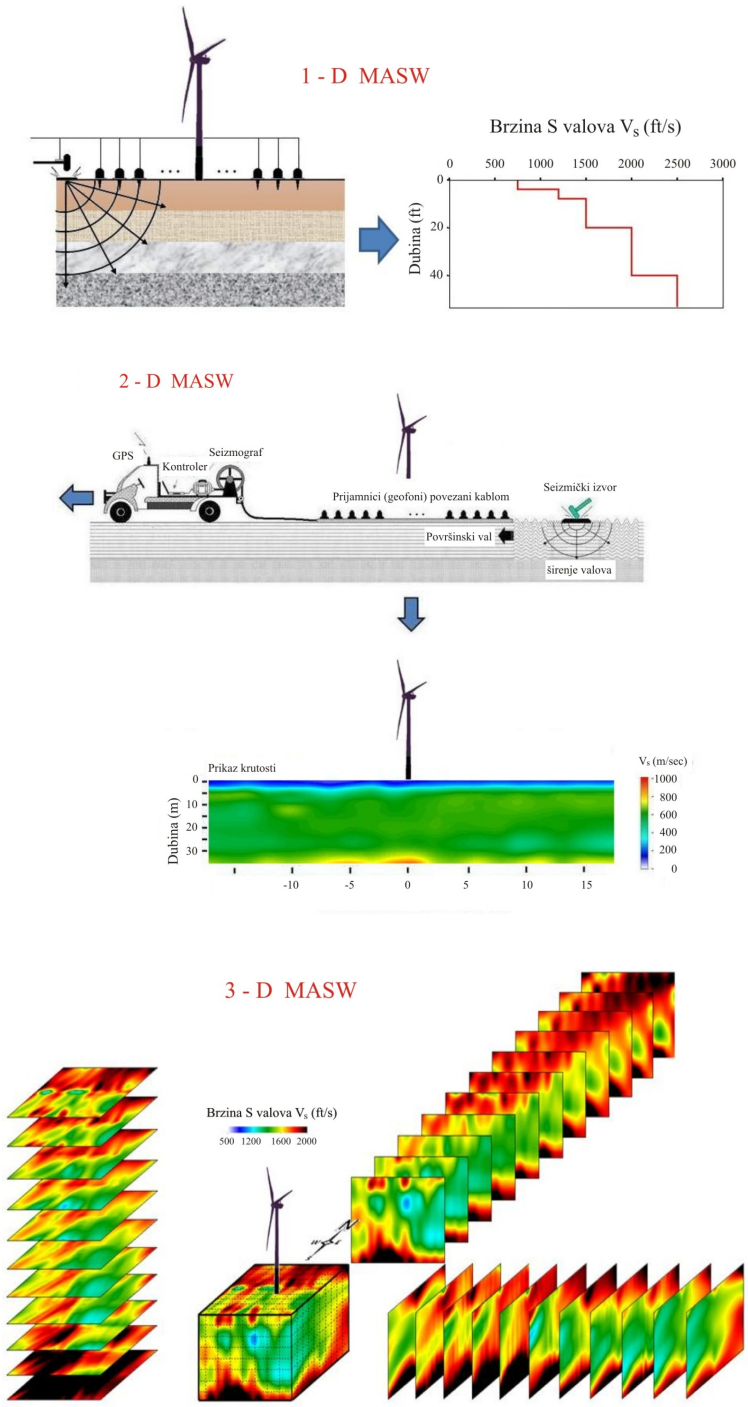
Slika 7.9 Princip geofizičkog istraživanja seizmičkim valovima (Gazdek M., 2003)

Seizmička refrakcija primjenjuje se kod istraživanja lokacija na kojima brzina P-valova raste sa dubinom. Takva situacija obično je na lokacijama koje su izgrađene od stijenskog materijala, pa se može koristiti kod karakterizacije stijenske mase koja se nalazi u podlozi cesta ili nasipa, te u tunelogradnji. Kao rezultat istraživanja metodom seizmičke refrakcije determinira se litologija, čvrstoća stijene, gustoća pukotina, stupanj trošenja ili metamorfoze i lokacije raspucanih zona. Metoda nije primjenjiva u slučaju pojave inverzije brzine (brzina P-valova pada sa dubinom) ili ako su na lokaciji prisutni slojevi vrlo male debljine (skriveni slojevi).

Seizmička refrakcija koristi se za istraživanja do dubine nekoliko desetaka metara, pri čemu se koristi 12 ili 24 geofona s međusobnim razmakom od 3 do 10 m, a za plića istraživanja razmak može biti i manji od 3 m (Takahashi T., 2004). Kao izvor seizmičkih valova najbolje može poslužiti eksploziv, pogotovo za duboka istraživanja, no eksploziv treba koristiti oprezno kako ne bi došlo do štete i povrede sigurnosti. Kao alternativa eksplozivu, u novije vrijeme koriste se snažni mehanički uređaji koji seizmičke valove generiraju padom utega (engl. *drop-weight*), a za plića istraživanja (do 20 m) može se koristiti čekić. Kako bi se rezultat poboljšao, moguće je više puta udarati čekićem, pri čemu se signali zbrajaju (engl. *stack*).

4. Višekanalna analiza površinskih valova (MASW)

MASW ili višekanalna analiza površinskih valova je seizmička geofizička metoda čiji rezultati omogućuju procjenu krutosti tla, a ista je direktno povezana s posmičnim modulom, koji je jedan od najvažnijih inženjerskih parametara. Ova metoda je uvedena u geofizička istraživanja u kasnim devedesetim godinama prošlog stoljeća (Park C.B. et al., 1999) i od tada je postala predmet istraživanja mnogih geofizičara i drugih znanstvenika, te je našla primjenu u mnogim granama znanosti. MASW se može koristiti u raznim oblicima, ovisno o problemu kojeg treba riješiti, i to: u jednoj dimenziji (1D) ili sondiranje, na vrhu slike 7.10; dvije dimenzije (2D) ili tomografija u sredini na slici 7.10 i u tri dimenzije (3D) ili modeliranje stvarnosti na vrhu slike 7.10.



Slika 7.10 Primjeri 1D, 2D i 3D MASW istraživanja (Park C.B. et al., 1999)

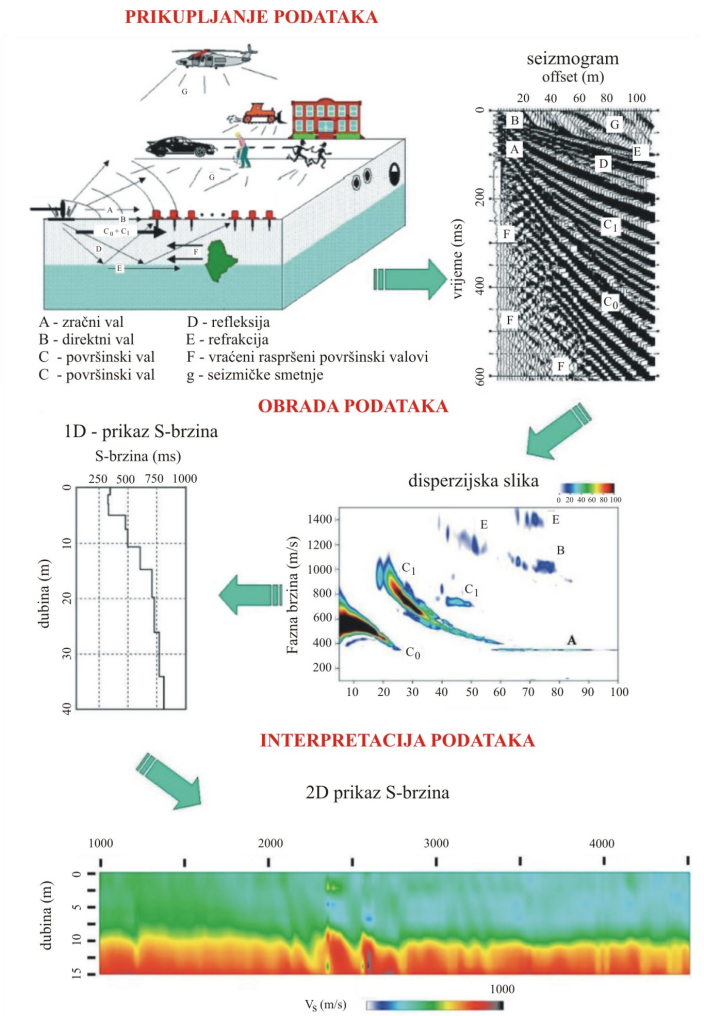
MASW metoda koristi površinske valove niskih frekvencija (1-30 Hz) koji imaju svojstvo disperzije, a dubina istraživanja je od nekoliko metara, pa do nekoliko desetaka metara. U osnovi je to inženjerska seizmička metoda čiji je radni frekventni raspon od nekoliko Hz pa do nekoliko desetaka Hz (3-30 Hz), snimanje vrši pomoću više kanala (24 ili više), a raspored geofona može biti postavljen tako da je razmak između njih od nekoliko metara pa do nekoliko stotina metara (2-200 m).

Najveća prednost MASW-a je u tome što u obzir uzima složenu prirodu seizmičkih valova koji uvijek sadrže smetnje i šumove (neželjeni viši modovi površinskih valova, raštrkani valovi, valovi nastali pod utjecajem prometa i sl.), kao i površinski valovi iz osnovnog moda, slika 7.11. Ti valovi mogu često utjecati jedni na druge prilikom analize njihovih disperzijskih svojstava, ako nisu pravilno obračunavani. Višekanalnim pristupom disperzijska svojstva svih vrsta valova su snimljena pomoću metode transformacije valnog polja, koja izravno pretvara višekanalnu snimku u sliku, u kojoj se može prepoznati specifičan raspršeni uzorak u transformiranoj distribuciji energije, slika 7.11. Zatim se neophodno disperzijsko svojstvo (poput onoga iz osnovnog moda) izvlači iz identificiranog uzorka. Svi drugi reflektirani/rasuti valovi obično se automatski uklanjaju tijekom transformacije.

Proces generiranja profila brzina posmičnih valova MASW metodom obično se sastoji do tri glavna koraka, slika 7.11:

- prikupljanje podataka površinskih valova na terenu,
- obrada podataka da se dobije disperzijska krivulja (iz svake snimke po jedna krivulja),
- inverzija disperzijske krivulje da se dobije 1D profil brzine širenja posmičnih valova po dubini (iz svake krivulje po jedan profil).

Nakon toga, smještanjem svakog jednodimenzionalnog profila brzina posmičnih valova na odgovarajuću lokaciju na površini terena, može se konstruirati 2D (duljina i dubina) prikaz V_s brzina pomoću odgovarajuće interpolacijske sheme.



Slika 7.11 Prikaz mjerenja i analize podataka sa aktivnom MASW metodom (Park C.B. et al., 1999)

5. Aktivna i pasivna metoda

Pasivna metoda MASW istraživanja omogućuje veću dubinu ispitivanja, koristi pasivne izvore površinskih valova (npr. promet) i sl., no istraživanje aktivnom metodom češći je tip MASW istraživanja koje daje 2D V_S profile i zastupljeniji je u inženjerskim projektima od pasivne metode. Zato će u nastavku ovog rada biti više riječi o aktivnoj MASW metodi, te će detaljnije biti objašnjen postupak provođenja istraživanja na terenu i koracima u obradi snimljenih podataka.

Aktivna MASW metoda predstavljena 1999. godine (Park C.B. et al., 1999) prikazana je na slici 7.11. Ovo je najčešći tip MASW istraživanja koje daje 2D V_S profile. Usvaja konvencionalni način istraživanja pomoću aktivnog seizmičkog izvora (npr. ručni čekić ili

čekić na vodilici) i polja linearnih prijemnika (geofona), prikupljajući tako podatke u *roll-along* modu. Koristi površinske valove koji se horizontalno šire po površini mjerenja, izravno od izvora do prijemnika. Daje informacije o V_S brzinama u formatima 1D (dubina) ili 2D (dubina i površina) na ekonomičan i vremenski učinkovit način. Maksimalna dubina istraživanja (Z_{max}) uglavnom je u rasponu od 10 do 30 m, ali to može varirati ovisno o vrsti korištenog aktivnog seizmičkog izvora.

Kako metode koje koriste površinske valne sustave postaju popularnije među inženjerima i geofizičarima, tako također raste potražnja za većom dubinom istraživanja. Međutim, količina aktivne energije koja je potrebna za dobivanje još nekoliko Hz na niskom frekvencijskom kraju disperzijske krivulje (npr. 5-7 Hz) i time poveća dubinu istraživanja za nekoliko desetaka metara, često se povećava nekoliko redova veličine, pa korištenje aktivnog izvora postaje nepraktično i neekonomično. Pasivni površinski valovi koji nastaju od prirodnih (npr. plima i oseka) i umjetnih (npr. promet) izvora uglavnom niskih frekvencija (1-30 Hz) s valnim duljinama od maksimalno nekoliko km (prirodni izvori) do minimalno nekoliko desetaka metara (umjetni izvori), nude mogućnost velikog raspona penetracijskih dubina.

Primjena pasivnih izvora počela je prije pedesetak godina u Japanu i nazvana je metoda mikrotremora. Ta metoda izvorno je imala ograničeni broj (manje od 10) prijemnika (kanala) za prikupljanje podataka. Pošto MASW metoda koristi više kanala (24 ili više), nastala je pasivna MASW metoda čiji je cilj bio iskoristiti prednosti višekanalnog snimanja i obrade. MASW ima veću logističku fleksibilnost na terenu i povećanu robusnost kod obrade podataka, s povećanom rezolucijom kod analize modalnog karaktera i azimutalnih svojstava površinskih valova. Pasivna MASW metoda dijeli se na dva različita tipa, ovisno o terenskoj logistici i vrsti V_S profila (1D ili 2D), pa tako postoje pasivna daljinska MASW ispitivanja i pasivna MASW ispitivanja uz cestu.

6. Prikupljanje podataka kod istraživanja aktivnom MASW metodom

Već po samome nazivu ove metode može se zaključiti da se kao izvor seizmičkog vala koristi neki aktivni izvor, najčešće čekić. Maksimalna dubina istraživanja (Z_{max}) ovisi o vrsti izvora seizmičkog vala te se kreće u rasponu od 10-30 m. Površinske valove najbolje je generirati na ravnome terenu unutar duljine barem jednoga geofonskoga rasporeda (D). Ako imamo ovakav slučaj na terenu, njegova topografija ne bi smjela utjecati na kompletan profil

istraživanja. Kao što je vidljivo na slici 7.12, problem u generiranju površinskih valova mogu predstavljati promjene dimenzija reljefa veće od 10 % duljine geofonskog rasporeda (D).

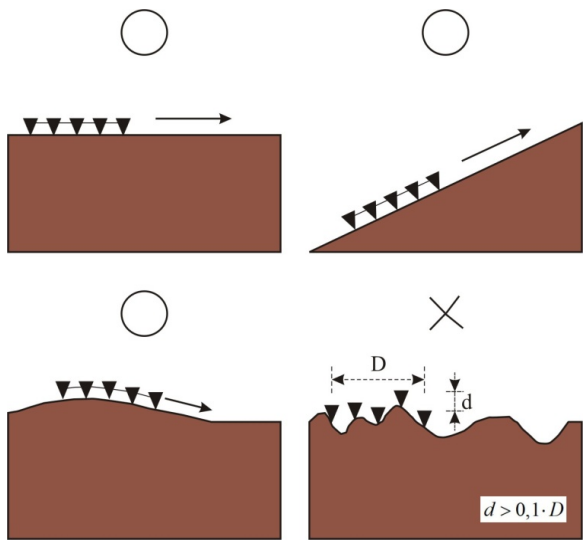
Najveća dubina istraživanja (Z_{max}) ovisi o najvećoj valnoj duljini generiranih površinskih valova (λ_{max}). Relacija između ova dva parametra data je formulom 7-3. Najveća valna duljina (λ_{max}) pak ovisi o udarnoj snazi seizmičkog izvora. U aktivnoj metodi je to već prije spomenuti udar čekićem dok u pasivnoj metodi to može biti prijelaz automobila preko neravnine na cesti. Uglavnom, sa većom udarnom snagom izvora postižu se veće valne duljine, a time se povećava maksimalna moguća dubina istraživanja.

$$Z_{max} \approx 0,5 \cdot \lambda_{max}, \qquad \text{[m]} \qquad 7\text{-}3$$

gdje je: Z_{max} - najveća dubina istraživanja,

λ_{max} - najveća valna duljina generiranih površinskih valova, dozvoljeno naprezanje.

Za neka jednostavnija istraživanja čekić od desetak kilograma može predstavljati dobar izbor. Ako su za istraživanje potrebne niže frekvencije (veće valne duljine) kao izvor seizmičkog vala može se koristiti pad utega (engl. *drop-weight*). On ima veću snagu od čekića ali je ujedno i skuplji, te je potrebno pripremiti pristup na teren pošto se najčešće nalazi u sklopu nekog teretnog vozila.



Slika 7.12 Prikaz ravnih i blagih istražnih lokacija, te složene topografije (www.kgs.ku.edu)

Sljedeća točka u generiranju površinskih valova je ploča preko koje se prenosi udarac u tlo. Koliko ona utječe na generiranje površinskih valova nije detaljnije istraživano. Najčešće se koriste metalne ploče, ali se pokazalo da i ploče koje nisu metalne (npr. od tvrde gume) mogu proizvesti veću energiju površinskih valova na nižim frekvencijama (npr. < 10 Hz).

Preporučuje se stekiranje podataka ili slaganje podataka na stog sa više udaraca da bi se smanjio utjecaj smetnji, poglavito ako se radi u urbanom području. Optimalni broj stekiranja će se odrediti iz seizmičke snimke i to kada se više ne vidi promjena u odnosu signal-smetnja (engl. *signal-to-noise ratio-S/N*). Najčešće se koristi 3-5 stekiranja. Taj broj bi se trebao povećati ako se radi u bučnoj okolici ili ako se povećava duljina geofonskog rasporeda.

U MASW metodi mogu se koristiti samo vertikalni geofoni. Preporuča se korištenje geofona sa niskom frekvencijom (npr. 4.5 Hz). U nastavku je nekoliko navoda važnih za frekvenciju geofona (f_G):

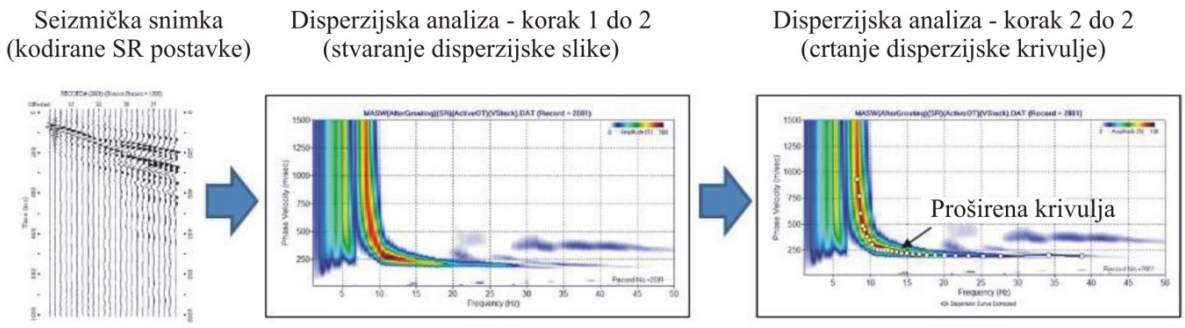
- f_G determinira najnižu mjerljivu frekvenciju (f_{min}), tako što je $f_{min} \approx f_G$.
- f_{min} determinira najveću mjerljivu valnu duljinu (λ_{max}):
- $\lambda_{max} = V_{max} / f_{min} \approx V_{max} / f_G$ (V_{max} je maksimalna izmjerena vrijednost fazne brzine).
- f_G determinira maksimalnu dubinu (Z_{max}) MASW istraživanja:
  - $Z_{max} = \sqrt{\lambda_{max}} \approx \sqrt{V_{max} / f_G}$.

7. Disperzijska analiza

Disperzijska analiza je prvi korak obrade podataka kod većine metoda koje koriste površinske valove. Cilj je dobiti jednu ili više disperzijskih krivulja koje omogućuju sljedeći korak obrade podataka procesom inverzije, kojim se pokušava pronaći odgovarajući model slojeva na temelju brzina posmičnih valova (V_S). Teorijska disperzijska krivulja modela slojeva tla mora se poklapati s rezultatima mjerenja, koliko god je to moguće.

Sama disperzijska analiza sastoji se od dva koraka, kako je prikazano na slici 7.13. Prvi korak stvara disperzijsku sliku iz snimke seizmičkog rasporeda koji ima postavke odnosa između izvora i prijemnika (SR), a kodira se pomoću 2D (vrijeme i prostor) metode transformacije valnog polja (npr. metoda faznog pomaka). U drugom korake se sa disperzijske slike ekstrahira krivulja disperzije osnovnog moda ($M0$). Ova izvučena

(iscrtana) krivulja naziva se izmjerena disperzijska krivulja i ulazni je podatak za sljedeći korak analize podataka (Inverziju).



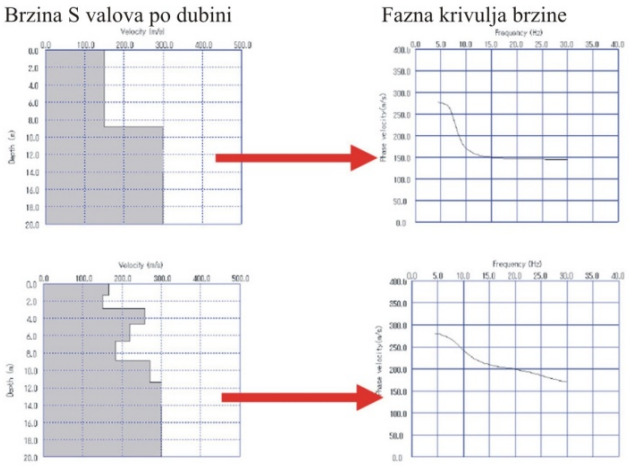
Slika 7.13 Prikaz disperzijske analize u dva koraka (prerađeno prema www.masw.com)

Disperzijska krivulja je dijagram koji prikazuje odnos podataka frekvencija i faznih brzina. Određivanje točne disperzijske krivulje najvažniji je dio disperzijske analize jer iz nje proizlazi profil širenja posmičnih valova. Karakteristike disperzijske krivulje jesu:

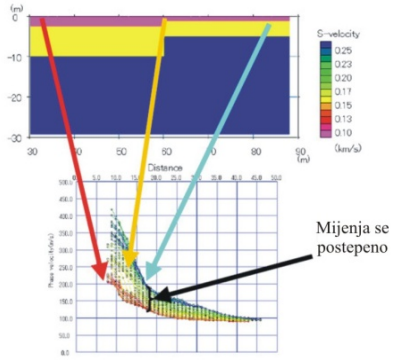
- disperzijska krivulja mora biti glatka zakrivljena linija ili ravna linija, slika 7.14a,
- prikazuje prosječnu brzinu modela ispod geofonskog rasporeda, ne može imati skokove, slika 7.14b,
- može uključivati više modova, no ne moraju se svi koristiti za analizu, slika 7.14c,
- domet frekvencija ograničen je najmanjim razmakom između dva geofona i duljinom cijelog geofonskog rasporeda, slika 7.14.

Već je spomenuto kako se kod disperzijske analize višekanalna seizmička snimka iz domene vrijeme (t)-prostor (x) konvertira u domenu frekvencija (f)-prostorna frekvencija valova (K_X) (engl. w*avenumber*) ili domenu frekvencija (f)-fazna brzina (C_f). Tradicionalna *f-k metoda* je stariji tip, dok je metoda faznog pomaka (Park C.B. et al., 1998) novijeg datuma. Općenito je poznato da *f-k metoda* postiže nisku razlučivost u snimanju, dok metoda faznog pomaka postiže puno veću razlučivost (Park C.B. et al., 1998; Moro D.G. et al., 2003).

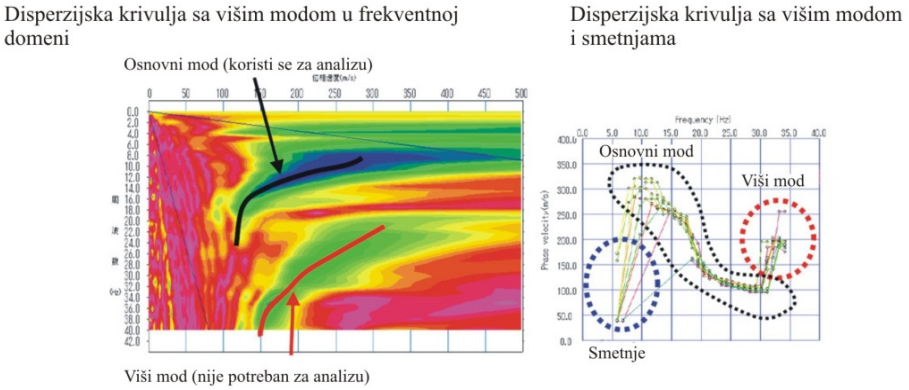
a) Primjer glatkih disperzijskih krivulja



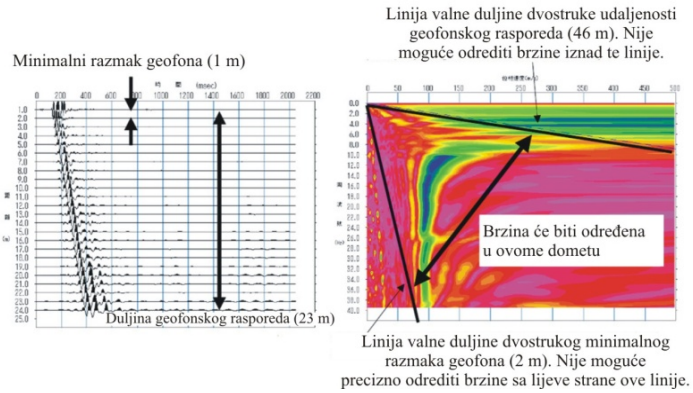
b) Postepeno mijenjanje disperzijske krivulje



c) Disperzijska slika sa višim modovima



d) Ograničenje frekvencija na disperzijskoj krivulji



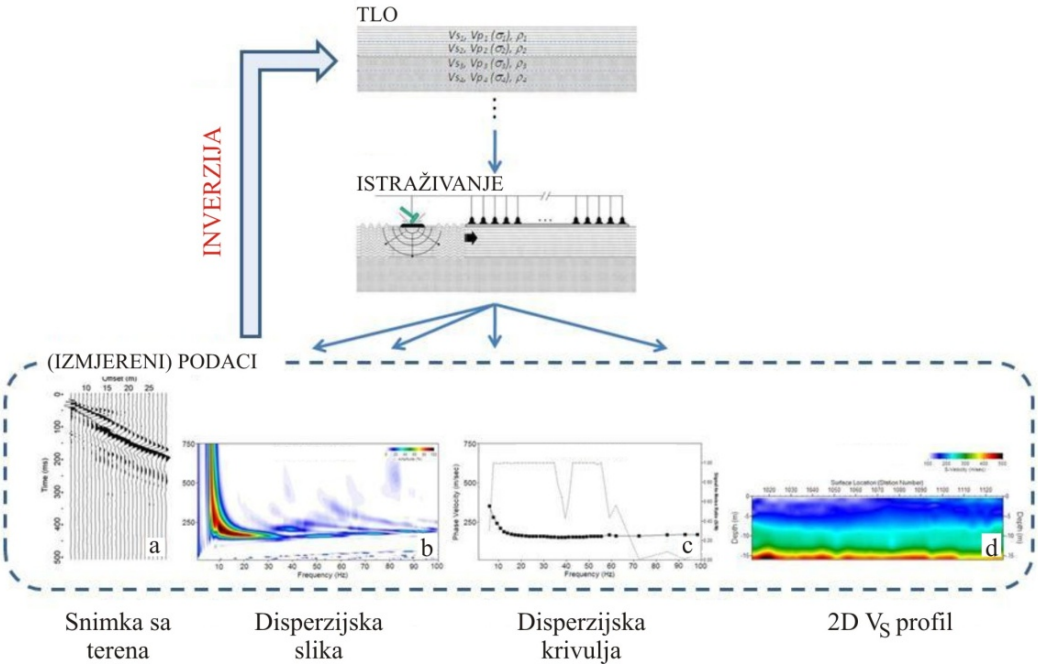
Slika 7.14 Karakteristike disperzijske krivulje (prerađeno prema Hayashi K., 2003)

8. Inverzija

U znanosti inverzija općenito predstavlja traženje uzroka za neki rezultat, kada je isti već poznat. Predviđanje rezultata iz nekih uzroka često se naziva modeliranje, što je pojam suprotan inverziji. Proces inverzije najčešće uključuje i nekoliko koraka modeliranja da bi se otkrili potencijalni kandidati za uzroke. Inverzija može biti jedinstvena ili nejedinstvena. U prvom slučaju postoji samo jedno rješenje, a u drugom više rješenja. Ako je odnos između uzroka i rezultata linearan tj. ako mala promjena uzroka stvara i male promjene rezultata, onda je inverzija linearna. Ako mala promjena uzroka može dovesti do velike promjene rezultata, onda je inverzija nelinearna.

Gledajući kroz povijest, inverzija površinskih valova podrazumijevala je procjenu elastičnih svojstava tla iz podataka mjerenja površinskih valova, slika 7.15. Pri procjeni mogu se koristiti različiti podaci: od valne snimke sa terena, disperzijske slike, disperzijske krivulje, pa do preliminarnih 2D profila brzina posmičnih valova (V_S). Odabir zavisi o izabranoj metodi inverzije. Bez obzira koji izvor podataka se koristio, inverzija površinskih valova ne može se direktno riješiti, već je potrebno koristiti neku od tehnika optimizacije, kako bi se došlo do najvjerojatnijeg rješenja iz beskonačnog broja mogućih rješenja. Te tehnike mogu imati deterministički ili slučajni pristup, ili pak njihovu kombinaciju. Modeliranje fenomena površinskih valova najčešće je jedinstven proces.

Elastična svojstva tla najčešće se prikazuju pomoću nekoliko neovisnih parametara koji se nazivaju moduli elastičnosti (npr. Young-ov modul, modul smicanja, modul kompresije, itd.). U praksi se oni prikazuju pomoću lakše mjerljivih fizičkih osobina tla, kao što su brzine P i S valova (V_P i V_S) i gustoća (ρ). Kada se općenito govori o V_P, V_S i ρ kao svojstvima tla, misli se na uslojeni model tla koji se koristi i kod ostalih seizmičkih metoda. Već prethodno poglavlje pokazuje kako je glavni princip u obradi podataka površinskih valova traženje teorijske krivulje osnovnog moda ($M0$), a sa time i strukture brzina posmičnih valova u tlu. Brzina posmičnih valova vrlo je važan parametar, pogotovo u geotehničkom inženjerstvu gdje se direktno povezuje s Youngovim modulom i modulom smicanja, koji se koriste za određivanje krutosti i nosivosti tla.



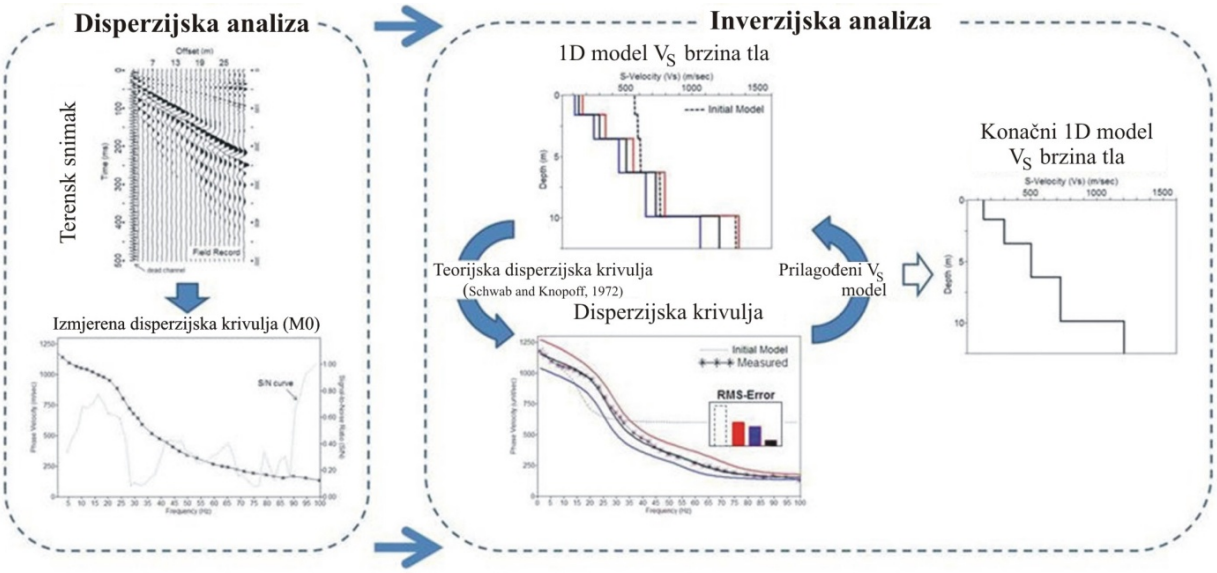
Slika 7.15 Procjena elastičnih svojstava tla iz podataka mjerenja površinskih valova (preuzeto sa www.masw.com)

Metoda inverzije koja se bazira na osnovnom modu ($M0$), s ciljem dobivanja 1D profila V_S brzina, najčešće je korištena metoda inverzije kod MASW istraživanja. Postoje i ostale metode koje se koriste i istražuju, no one koriste i druge vrste podataka a ne samo krivulju osnovnog moda ($M0$). One su:

- Više-modalna inverzija (engl. *Multimodal Inversion*),
- Inverzija disperzijske slike (engl. *Dispersion Image Inversion*),
- Inverzija neobrađenih podataka (engl. *Raw Data Inversion*),
- 2D V_S inverzija (engl. *2D* V_S *Inversion*).

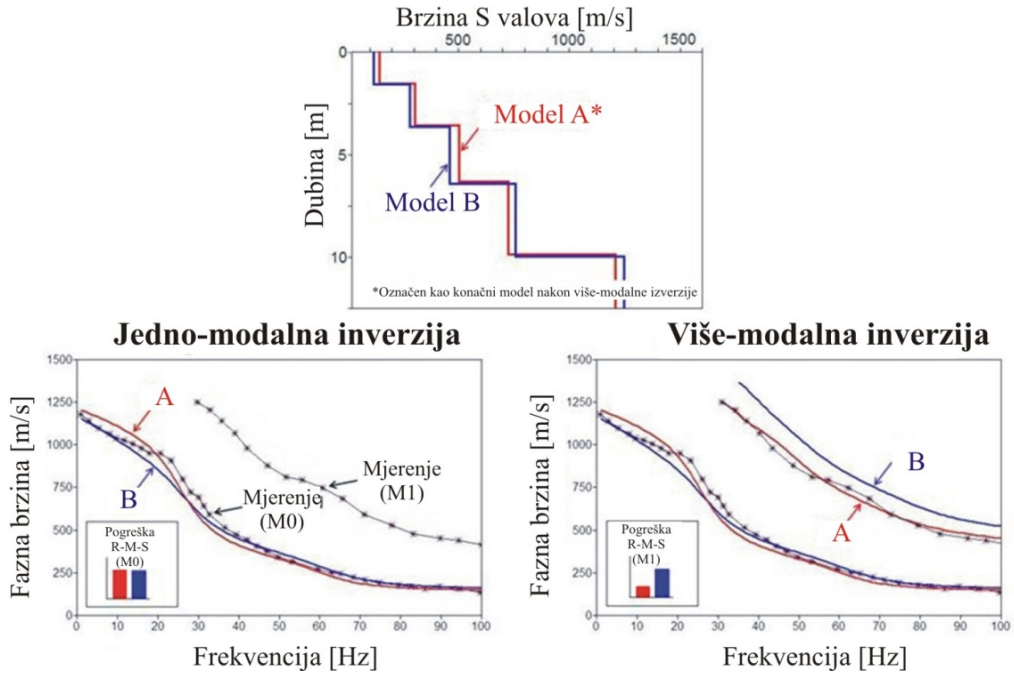
Već je rečeno da je metoda inverzije koja se bazira na osnovnom modu najčešće korištena metoda inverzije kod MASW istraživanja. Prije same inverzije, ključni dio obrade terenskih podataka je što točnije određivanje disperzijske krivulje osnovnog moda ($M0$). Teorijske krivulje osnovnog moda mogu se izračunati za različite modele tla korištenjem odgovarajuće sheme modeliranja. Najpoznatija metoda izračuna disperzijske krivulje Rayleigh-evih valova je metoda koju su osmislili Schwab F. i Knopoff L. (1972). Tek nakon toga ona može biti uspoređena s izmjerenom (eksperimentalnom) krivuljom, slika 7.16. Ova metoda inverzije pretpostavlja da izmjerena disperzijska krivulja predstavlja osnovni mod ($M0$), na koji ne

utječu drugi modovi površinskih valova. Glavni problem ove metode inverzije je naći optimalnu tehniku najvjerojatnijeg modela tla među svim ostalim modelima. Bliskost dvije krivulje (teorijske i izmjerene) pokazuje RMSE faktor (engl. *root-mean-square error-RMS error*), te će konačno rješenje za 1D V_S profil odabrati prema njegovoj (najmanjoj) vrijednosti. Za optimizaciju krivulje mogu se koristiti različite metode, i to deterministička metoda najmanjih kvadrata (Xia J. et al., 1999) ili metoda slučajnog odabira (Socco L.V. & Boiero D., 2008). Nedostatak prve metode je mogućnost pronalaženja lokalnog umjesto globalnog minimuma, dok je glavni nedostatak druge metode veći utrošak vremena. Nedostatak obje metode, i općenito bilo koje vrste inverzije, je rizik pojavljivanja numeričkih artefakata. Prema tome, rješenje s manjom vrijednošću RMS-a je numerički točnije, ali ne mora predstavljati najrealističnije rješenje.



Slika 7.16 Shematski prikaz inverzije izmjerene disperzijske krivulje (preuzeto sa www.masw.com)

Više-modalna inverzija (engl. *Multimodal Inversion*) uz osnovni mod ($M0$) za inverziju koristi i više modove, slika 7.17. Cilj je povećati točnost (razlučivost) rezultata smanjivanjem mogućnosti rješenja 1D V_S profila. Općenito, ova metoda pokušava umanjiti nejedinstvenost inverzije. Doduše, mnogi istraživači upozoravaju da bi dodavanje još jedne ili više varijabli u sustav inverzije i povećavanje stupnja slobode moglo imati nepovoljan utjecaj na rezultat.



Slika 7.17 Usporedba jedno-modalne i više-modalne inverzije (preuzeto sa www.masw.com)

7.2.2. Istražno bušenje

Bušenje je postupak prodiranja bušaćeg pribora u tlo ili stijenu do određene dubine. Dubina bušenja treba dosegnuti zonu tla u kojoj se ne očekuju znatnije promjene naprezanja i pojave deformacija izgradnjom objekta, ako se rade istraživanja za temeljenje objekta. Izvođenje bušenja za potrebe građenja podrazumijeva uzimanje poremećenih i neporemećenih uzoraka za laboratorijska ispitivanja i izvođenje terenskih ispitivanja u bušotinama. Na taj način dobivaju se informacije o rasporedu i svojstvima pojedinih slojeva tla i stijena.

Tijekom postupka bušenja potrebno je registrirati razinu podzemne vode u svim koracima bušenja. Nakon svih terenskih ispitivanja mogu se u bušotine ugraditi pijezometri za kasnije praćenje razina podzemnih voda koje mogu utjecati na uvjete izvođenja građevinskih radova, ponašanje tla ili na objekt koji se gradi.

Postoji niz metoda za izvođenje bušotina u tlu i stijeni, od bušenja ručnim alatima do dubine od nekoliko metara u tlu, do složenih i teških strojeva za bušenje u stijeni do dubine od nekoliko kilometara. Prema principu rada bušaćeg pribora istražno bušenje se izvodi udarnom, rotacijskom ili kombiniranom metodom.

Metode za izvođenje bušotina u tlu i stijeni su:

- ručno bušenje,
- udarno bušenje,
- rotacijsko bušenje:
  - bušenje spiralnim svrdlima,
  - bušenje s jezgrovanjem,
  - bušenje bez jezgrovanja.

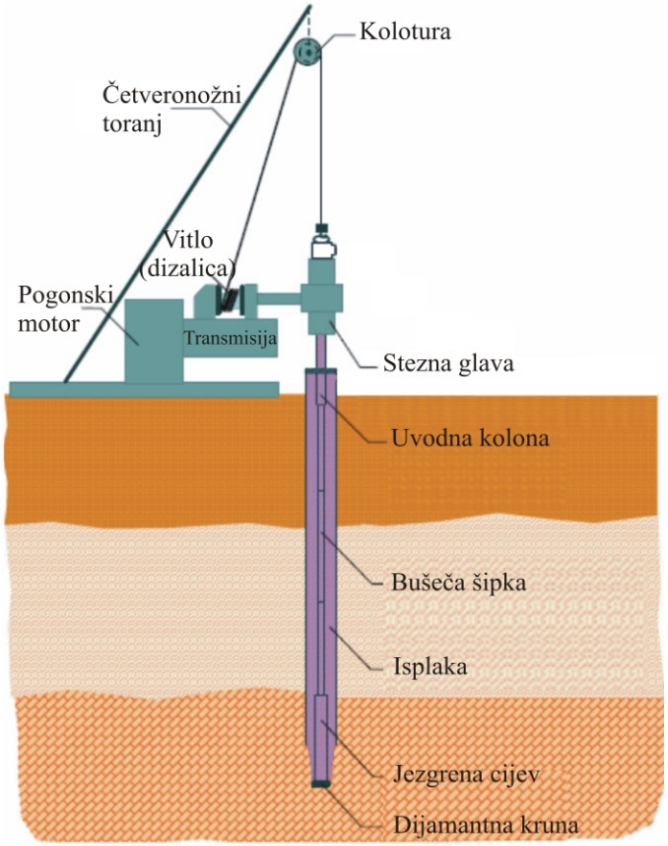
Za potrebe izrade doktorske disertacije korištena je metoda rotacijskog bušenja s jezgrovanjem.

Rotacijsko bušenje s jezgrovanjem

Prvotno je ova metoda bila namijenjena za bušenje u stijeni, ali je sve češća njena primjena i u bušenju tla, slika 7.18. Bušači alat, koji je pričvršćen na niz šupljih bušaćih šipki, strojno rotira i hidraulički utiskuje s površine terena.

Na dnu šipki pričvršćena je posebna sržna cijev na čijem je dnu šuplja bušača glava s krunom. Kruna je nazubljeni alat, čiji su zubi izrađeni od posebno obrađenog čelika (vidija) ili industrijskih dijamanata koji su otporni na habanje. Kroz bušaće šipke i jezgrenu cijev utiskuje se kod dubokih bušotina voda koja hladi pribor ugrijan od rada, a iznosi strugotine ispod krune kroz bušotinu do površine terena, slika 7.19.

Slika 7.18 Pribor za bušenja s jezgrovanjem



Slika 7.19 Prikaz rotacijskog bušenja s jezgrovanjem

Kao i kod drugih metoda bušenja, bušotina se može zaštititi zaštitnom cijevi (kolonom) od urušavanja kada prolazi kroz pijesak ili šljunak, ili od istiskivanja kada prolazi kroz slojeve meke gline.

Uzimanje uzoraka

Prilikom istražnih bušenja s bušaćom garniturom Clivio RAP-0, na eksploatacijskom polju Cukavec II, slika 7.20, vađeni su poremećeni i neporemećeni uzorci gline, slika 7.21. Uzorci su vađeni iz karakterističnih minskih bušotina, na određenim dubinama, slika 7.22, te su poslani u Geotehnički laboratorij na daljnja ispitivanja. Tehničke karakteristike bušaće garniture date su u tablici 7.5.

Tablica 7.5 Tehničke karakteristike bušaće garniture Clivio RAP-0

BUŠAĆA GARNITURA CLIVIO RAP 0	
Motor	WM - dvo cilindrični, zrakom hlađeni
Snaga motora	10 kW/14 KS
Okretni moment	120 Nm
Bušaća garnitura	maksimalno do 50 m, jezgrene cijevi Φ 143
Bušaće šipke	Φ 50
Područje rada	koherentna i nekoherentna tla, čvrste i meke stijene
Udar	1750 mm
Sila napajanja	1400 daN
Sila povlačenja	2100 daN
Radna brzina	0 - 25 cm/sec
Težina	1550 kg

Slika 7.20 Istražna bušenja na eksploatacijskom polju Cukavec II

Slika 7.21 Poremećeni uzorak

Slika 7.22 Izvađena jezgra na određenoj dubini

Eurokod 7 definira pet kategorija kvalitete uzorka za laboratorijsko ispitivanje pojedinih parametara tla. Krutost i čvrstoću moguće je ispitivati samo iz uzoraka najbolje klase kvalitete koja karakterizira neporemećeni uzorak. Neka druga svojstva, koja su manje osjetljiva na poremećaje, mogu se određivati i iz uzoraka niže klase kvalitete. Pojedine klase kvalitete mogu postići samo određeni postupci uzorkovanja iz bušotine.

Posebna europska norma klasificira tri klase uzorkovanja *(A, B i C)*. Vezu između klasa uzorkovanja, klasa uzoraka i parametra koji se iz njih mogu odrediti pouzdano prikazuje tablica 7.6.

Tablica 7.6 Potrebne klase kvalitete uzoraka za laboratorijsko ispitivanje tla i odgovarajuće klase uzorkovanja (prema EN 1997-2: 2006)

Svojstva tla / klasa kvalitete		1	2	3	4	5
Nepromijenjeno svojstvo	Veličina čestica	■	■	■	■	
	Vlažnost	■	■	■		
	Gustoća, indeks gustoće, vodopropusnost	■	■			
	Krutost, čvrstoća	■				
In situ svojstva koja se mogu utvrditi	Redoslijed slojeva	■	■	■	■	■
	Granice slojeva - grubo	■	■	■	■	
	Granice slojeva - fino	■	■			
	Granice konzistencije, gustoća čestica, sadržaj organske tvari	■	■	■	■	
	Vlažnost	■	■	■		
	Gustoća, indeks gustoće, koeficijent pora, vodopropusnost	■	■			
	Krutost, čvrstoća	■				
Kategorija uzorkovanja prema EN ISO 22475-1 (primjeri za tlo: A - tankostijeni uzorkivač, B - sržna cijev ili SPT, C - bušenje ispiranjem)		A				
				B		
						C

Iz bušotina se neporemećeni uzorci vade posebnim priborom. On se sastoji od noža koji prodire u tlo, dvodijelne cijevi dužine *0,5 m* u koji ulazi uzorak i spojnog dijela između bušaćih šipki i cijevi za uzorak. Ovaj spojni dio posebno je izrađen da bi kroz njega mogla iz cijevi izaći voda i zrak, a da se eventualno može stvoriti vakuum da bi se osiguralo da uzorak ne ispadne prilikom vađenja. Postoje i razni dodaci koji su umetnuti u cijev, odmah iza noža, a koji sprečavaju ispadanje uzorka. Za posebne potrebe postoje tankostijeni cilindri za vađenje uzoraka i višecijevni cilindri.

Istraživanja su pokazala da je poremećaj uzorka to manji što cijev uzorkivača (cilindar) ima tanje stijenke (ili veći promjer), što je oštriji kut noža na dnu cijevi i ako se stabilnost dna bušotine tijekom utiskivanja uzorkivača može osigurati s pridržanim klipom, čije je pomicanje spriječeno tijekom utiskivanja tankostijenog cilindra.

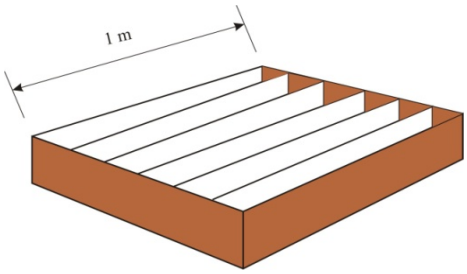
Bitno je kod svih ovih naprava da se uzorak uzima isključivo utiskivanjem noža i cijevi u tlo bez rotacije. Pritom pribor mora biti takav da se tlo koje čini uzorak što manje poremeti. Već sam manevar zabijanja noža djelomično poremeti vrh i dno uzorka. Stoga je za precizna ispitivanja poželjno koristiti srednjih *30 cm* uzorka.

Unutar cijevi može biti smještena plastična košuljica koja odmah štiti uzorak po plaštu. Košuljica je najčešće rasječena po izvodnici radi lakšeg vađenja uzorka u laboratoriju. Nakon vađenja iz tla uzorak se parafinom štiti od isušivanja, ovija ljepljivom trakom, označi i odmah šalje u laboratorij na čuvanje u vlažnu komoru. Uzorke je potrebno vrlo pažljivo prevoziti naročito ako nisu u cilindrima ili drvenim sanducima. Nužno je da do ugrađivanja u laboratorijske uređaje stignu zaista neporemećeni.

Kako bi se smanjilo moguće oštećenje jezgre, do kojeg dolazi rotacijom jezgrene (sržne) cijevi i prolaskom vode za hlađenje i ispiranje, razvijen je alat s dvostrukom jezgrenom cijevi. Unutarnja jezgrena cijev slobodna je od vanjske pa pridržava jezgru i uglavnom je oslobađa trenja od rotacije vanjske cijevi. Tekućina za hlađenje i ispiranje prolazi između vanjske i unutarnje jezgrene cijevi, pa je jezgra time dodatno zaštićena.

Odlaganje jezgre iz jezgrene cijevi

Jezgra iz jezgrene cijevi odlaže se u posebne drvene ili plastične sanduke radi daljnjeg pregleda i uzimanja uzoraka za ispitivanje u laboratoriju, slika 7.23, te se izrađuje fotodokumentacija, slika 7.24. Dobiveni uzorci tla, čak i u slučaju s dvostrukom jezgrenom cijevi, smatraju se poremećenima za potrebe ispitivanja krutosti i čvrstoće tla, ali ako su odmah po vađenju iz tla zaštićeni i poslani u laboratorij, vrlo dobro mogu poslužiti za izvođenje onih laboratorijskih pokusa koji nisu ovisni o pregnječenju (prirodna vlažnost, Atterbergove granice, granulometrijski sastav, Proctorov pokus…). Uzorci stijene dobiveni jezgrovanjem služe za klasifikaciju stijenske mase, te također za laboratorijska ispitivanja.

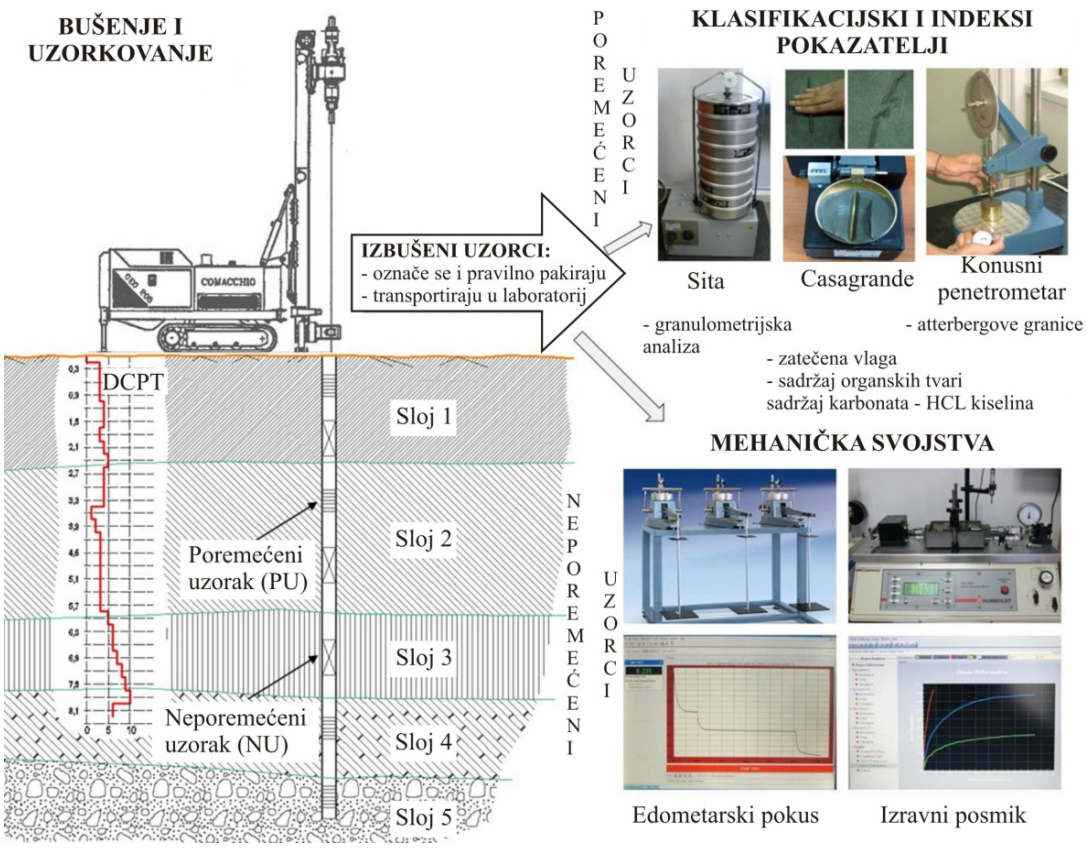


Slika 7.23 Drveni sanduk za odlaganje jezgre iz jezgrene cijevi

Slika 7.24 Izvađena jezgra glinenog tla iz jezgrene cijevi na EP Cukavec II

Metode uzimanja uzoraka

Većina tala, pa i stijena, mijenja svoja mehanička svojstva deformiranjem, promjenama naprezanja, vlažnosti i temperature. Zbog elastoplastičnog ponašanja tla, promjena ovih svojstava uglavnom je nepovratna. U svakoj fazi uzorkovanja može doći do poremećaja tla, znači do promjene njegovih svojstava. S druge strane, ispitivanje krutosti i čvrstoće tla moguće je samo na neporemećenim uzorcima, slika 7.25.



Slika 7.25 Klasična metoda ispitivanja parametara tla

7.2.3. Laboratorijska ispitivanja

Početna geomehanička laboratorijska ispitivanja poremećenih i neporemećenih uzoraka predmetnog glinenog tla izvedena su u akreditiranom laboratoriju na Geotehničkom fakultetu prema međunarodnoj normi HRN EN ISO/IEC 17025:2007.

Nakon provedenih geodetskih i geofizičkih seizmičkih mjerenja i istraživanja, izvedena su istražna bušenja. Prilikom istražnih bušenja izvađeni su poremećeni i neporemećeni uzorci predmetnog tla, koji su dostavljeni u laboratorij na daljnju analizu.

Za potrebe istraživanja i izrade doktorske disertacije ciljano se utvrđuju opća i posebna fizikalna svojstva glinenog tla iz ležišta Cukavec II, kao što su vlažnost, vodopropusnost i gustoća, te zbijenost i čvrstoća tla prije i nakon miniranja.

Sva laboratorijska ispitivanja izvode se prema metodama i postupcima sadržanim u normama iz odgovarajućeg područja ispitivanja. Danas se u RH u geomehaničkim ispitivanjima tla i stijene najviše koriste europske norme koje su prihvaćene kao nacionalne norme. Uz njih, u primjeni su i američke norme (ASTM), britanske norme (BS), njemačke norme (DIN) te švicarske, švedske i francuske norme. Njima se uglavnom pokrivaju područja ispitivanja koja nisu obuhvaćena europskim normama. Europske norme donosi jedna od tri europske organizacije za normizaciju:

- Europski odbor za normizaciju (CEN),
- Europski odbor za elektrotehničku normizaciju (CENELEC),
- Europski institut za telekomunikacijske norme (ETSI).

Vjerodostojnost rezultata laboratorijskih ispitivanja osigurana je u laboratorijima akreditiranim prema normi HRN EN ISO/IEC 17025. Akreditaciju laboratorija u RH provodi Hrvatska akreditacijska agencija (HAA). Geotehnički laboratorij Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu akreditiran je prema normi HRN EN ISO/IEC 17025 za geomehaničko ispitivanje tla s 9 ispitnih metoda od ukupno 20 koliko ih se koristi u laboratoriju, tablica 7.7.

Tablica 7.7 Vrste ispitivanja i standardi koje koristi Geotehnički laboratorij

Rb.	VRSTA ISPITIVANJA	STANDARDI
1.	*Određivanje sadržaja vode(vlažnosti) tla i stijene u odnosu na masu	ASTM D2216*
2.	*Određivanje gustoće tla metodom mjerenja dimenzija uzorka	BS 1377; Part 2; 7.2*
3.	*Određivanje gustoće čvrstih čestica tla pomoću piknometra	ASTM D854*
4.	*Određivanje granice tečenja pomoću konusnog penetrometra metodom jedne točke	BS 1377; Part 2; 4.4*
5.	*Određivanje granice plastičnosti i indeksa plastičnosti	BS 1377; Part 2; 5*
6.	*Ispitivanje granulometrijskog sastava	HRN EN ISO 17892-4* ASTM D422
7.	Određivanje jednoosne tlačne čvrstoće tla sa slobodnim bočnim širenjem	ASTM D2166
8.	*Određivanje posmične čvrstoće tla izravnim posmikom u maloj ćeliji	BS 1377: Part 7; 4*
9.	Određivanje posmične čvrstoće troosnim ispitivanjem tla (UU, CU i CD test)	BS 1377: part 8; 4, 5, 6, 7 BS 1377: Part 7; 8
10.	Određivanje nedrenirane kohezije laboratorijskom krilnom sondom	BS 1377: Part 7; 3
11.	Određivanje nedrenirane kohezije padajućim šiljkom	HRS CEN ISO/TS 17892-6
12.	*Određivanje svojstava tla pri jednodimenzionalnoj konsolidaciji	BS 1377: Part 5; 3*
13.	Određivanje vodopropusnosti u velikoj ćeliji permeametra (CH metoda)	BS 1377: Part 5; 5
14.	Određivanje vodopropusnosti u edometarskoj ćeliji (FH metoda)	HRS CEN ISO/TS 17892-11
15.	*Zbijanje tla - Standardni Proctor	ASTM D698 HRN EN 13286-2*
16.	*Zbijanje tla - Modificirani Proctor	ASTM D1557*
17.	Određivanje CBR-a i bubrenje nakon 96 sati	ASTM D1883 HRN EN 13286-47
18.	Sadržaj organskih tvari	BS 1377: Part 3; 4
19.	Određivanje tlačne čvrstoće džepnim penetrometrom	SN 670 350: 1992

*Akreditirane metode

Ispitivanja se izvode na poremećenim i neporemećenim uzorcima tla, prema preporukama sadržanim u dokumentu oznake HRN ENV 1997-2:2012. U njemu je između ostalog navedeno koja se ispitivanja mogu izvoditi na uzorcima određene kvalitete, zavisne od načina uzorkovanja pri izvođenju terenskih istražnih radova.

Od fizikalnih svojstava tla, u laboratoriju se određuje vlažnost, vlažna i suha obujamska gustoća i gustoća čvrstih čestica tla.

Vlažnost se određuje sušenjem uzorka na temperaturi 105 do 110 °C do stalne mase, ili ukoliko se radi o materijalu koji sadrži organske primjese, na temperaturi 60 do 65 °C, zavisno o normi ispitivanja. Vlažna obujamska gustoća određuje se najčešće mjerenjem dimenzija i vaganjem mase uzoraka tla, dok se suha obujamska gustoća izračunava iz vlažnosti tla.

Gustoća čvrstih čestica tla određuje se pomoću piknometara, najčešće tipa Gay-Lisac, a na prethodno osušenom i usitnjenom materijalu. Za uklanjanje zraka iz vode koristi se metoda kuhanja ili vakumiranja. Obujam usitnjenih čestica tla određuje se pomoću Arhimedovog

zakona. Ovom metodom ispitivanja određuje se relativna gustoća čvrstih čestica tla u odnosu na gustoću vode pri referentnoj temperaturi 20 °C.

Iz osnovnih fizikalnih svojstava tla moguće je izračunati i njegova druga svojstva kao što su porozitet, koeficijent pora i stupanj saturacije.

Klasifikacijska ispitivanja sadrže određivanje granulometrijskog sastava tla metodom sijanja i/ili areometriranja te određivanje Atterberg-ovih granica konzistencije, poglavito granice tečenja i granice plastičnosti. U postupku sijanja uzorci se prvo suše do stalne mase na temperaturi 105 do 110 °C, a zatim se ispiru kroz sito otvora oka 0,063 mm (otvor sita zavisi o normi ispitivanja). Ponovnim sušenjem uzoraka do stalne mase utvrđuje se količina čestica praha i gline. Materijal s česticama tla većim od praha i gline prosijava se kroz set normiranih sita. Na temelju vaganja, određuje se postotak masenog sadržaja pojedinih frakcija materijala i njihov postotni sadržaj u ukupnoj masi uzorka. U postupku areometriranja, uzorci se prvo moče u prirodno vlažnom stanju 24 sata, a zatim ispiraju kroz sito otvora oka određenog normom ispitivanja. Suspenziji ispranog materijala dodaje se antikoagulans, najčešće natrij-heksametafosfat radi postizanja potpune disperzije čestica tla. Nakon miješanja, suspenzija se ulijeva u menzuru i pomoću areometra mjeri promjena gustoće u određenim vremenskim intervalima. Promjer čestica tla koje još lebde u suspenziji u trenutku mjerenja gustoće izračunava se primjenom Stokes-ovog zakona, a njihova količina u odnosu na početnu masu uzorka izračunava se određenim matematičkim algoritmom. Rezultati ispitivanja prikazuju se granulometrijskom krivuljom.

Za određivanje granice tečenja koherentnog tla koristi se metoda pomoću Casagrande-ovog aparata ili padajućeg šiljka. Metodu padajućeg šiljka preferira europska norma ispitivanja. Ovim ispitivanjem se određuje dubina prodiranja šiljka mase 80 g, zašiljenog pod kutom 30 °, za vrijeme od 5 sekundi. Granicu tečenja predstavlja ona vlažnost tla kod koje šiljak za 5 sekundi utone u tlo 20 mm. Postoji metoda određivanja granice tečenja pomoću jedne točke ili 3 i više točaka. Ako se koristi metoda s 3 ili više točaka, rezultat ispitivanja izračunava se interpolacijom regresijskog pravca metodom najmanje razlike kvadrata između točaka mjerenja. Granica plastičnosti određuje se određivanjem vlažnosti valjčića tla koji pri debljini od 3 mm moraju dobiti po svom oplošju sitne pukotine uzrokovane gubitkom vode iz materijala.

Jednoosna tlačna čvrstoća pri slobodnom bočnom širenju određuje se na uzorcima valjkastog oblika i odnosa visine i promjera 2:1. Na uzorak se nanosi aksijalna sila do sloma uz mjerenje relativne uzdužne deformacije. Ispitivanje se izvodi u nekonsolidiranom i nedreniranom stanju uzorka tla. Mjerenjem se izračunava tlačna čvrstoća tla uz korekciju zbog povećanja poprečnog presjeka uzorka s porastom deformacije.

Posmična čvrstoća tla određuje se različitim ispitnim metodama, zavisno o traženim uvjetima izvođenja pokusa. Ispitivanje može biti u nedreniranim i dreniranim uvjetima, s prethodnom konsolidacijom uzoraka ili bez nje. Najčešće se koristi metoda izravnog posmika u kutijastom aparatu s kontroliranom deformacijom ili troosno ispitivanje tipa UU, CU i CD. Zavisno o metodi ispitivanja, vršna posmična čvrstoća iskazuje se kao nedrenirana (UU troosno ispitivanje), nedrenirana u konsolidiranom stanju tla (CU troosno ispitivanje) te drenirana u konsolidiranom stanju tla (CD troosno ispitivanje i izravni posmik). Za određivanje rezidualne posmične čvrstoće tla postoje posebne metode ispitivanja kao na primjer reversni ili rotacijski posmik.

Deformabilnost tla određuju se ispitivanjima u edometru. Uzorak se ispituje u uvjetima spriječenog bočnog širenja, uz mjerenje vertikalne deformacije pod djelovanjem nametnutog vertikalnog opterećenja. Uzorak se opterećuje i rasterećuje stupnjevito, najčešće u intervalima 1-50-100-200-400-800 kN/m^2 i obratno. Iz mjerenja se izračunava modul stišljivosti, uglavnom pomoću promjene koeficijenta pora u određenom rasponu vertikalnih naprezanja. Iz ispitivanja u edometru moguće je izračunavati široki spektar deformacijskih parametara tla.

Za određivanje koeficijenta vodopropusnosti koriste se indirektne i direktne metode. Direktne metode mjerenja u laboratoriju izvode se u različitim tipovima permeametara. Slabo propusni materijali kao što su prah i glina ispituju se u permeametrima s opadajućim hidrostatskim tlakom, dok se pijesak i sitni šljunak ispituju u permeametrima sa stalnim hidrostatskim tlakom. Na osnovu količine vode protekle kroz određeni volumen uzorka u nekom vremenskom intervalu, izračuna se koeficijent vodopropusnosti pri određenoj temperaturi vode. U naprednije metode mjerenja vodopropusnosti spadaju mjerenja s kontroliranom protokom.

Sadržaj gorivih i organskih tvari u tlu određuje se pomoću više metoda. Rastapanjem organskih primjesa u nekoj masi tla određuje se količina organskih tvari u odnosu na suhu

masu uzorka, dok se žarenjem uzoraka na temperaturi 440 ili 800° C određuje sadržaj i organskih i gorivih tvari zajedno.

Optimalna vlažnost i najveća suha gustoća tla određuju se u laboratoriju prema metodi Proctor-a. Uzorak tla se pri nekoj vlažnosti zbija zadanom energijom zbijanja i određuje mu se pripadajuća suha obujamska gustoća. Vlažnost kod koje se postigne uz zadanu energiju zbijanja najveća suha gustoća usvaja se kao optimalna vlažnost. Standardna energija zbijanja po Proctor-u iznosi približno 600 kNm/m^3 dok modificirana energija zbijanja iznosi približno 2700 kNm/m^3. Nakon određivanja optimalne vlažnosti, može se odrediti i CBR vrijednost, utiskivanjem klipa promjera 5 cm u zbijeni uzorak, brzinom propisanom u normi (postoji razlika u brzini utiskivanja između primjerice američkih i europskih normi). Na osnovu otpora prodiranja klipa u tlo do određene dubine, izračunava se CBR vrijednost. Ona se koristi u cestogradnji, za projektiranje nosivosti kolovoznih konstrukcija.

Postoji još cijeli niz laboratorijskih metoda ispitivanja tla koje se neće detaljnije opisivati jer se rjeđe koriste, a među njih uz ostale spadaju određivanje pH vrijednosti, određivanje sadržaja kalcij-karbonata i fosfata, određivanje indeksa rastrožbe laporovitih tala, Pin-hole test i mnoge druge.

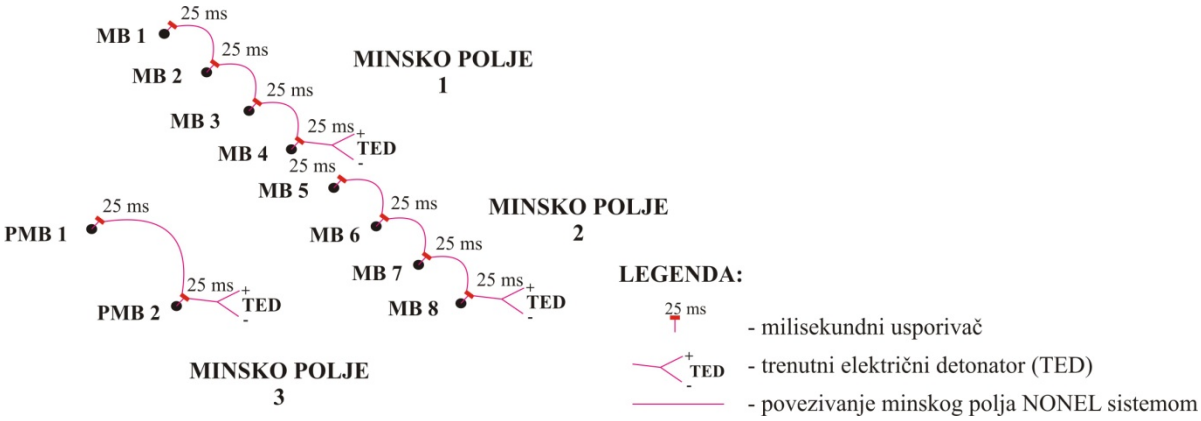
7.3. POKUSNA MINIRANJA I ODREĐIVANJE EFEKTIVNOG RASPONA MASA DVIJU VRSTA EKSPLOZIVA KOJIMA SE DOBIVA KUGLASTO PROŠIRENJE PRI DNU MINSKIH BUŠOTINA

Terenskim istražnim radovima u 2014., 2015. i 2016. godini, mjereni su i utvrđeni rasponi masa dviju različitih vrsta eksplozivnog punjenja, kojima se ostvaruje kuglasto proširenje u glinovitom koherentnom tlu provođenjem pokusnih miniranja, slika 7.26. Pokusna miniranja izvedena su na ukupno 48 minskih bušotina, a od čega je bilo 6 probnih minskih bušotina.

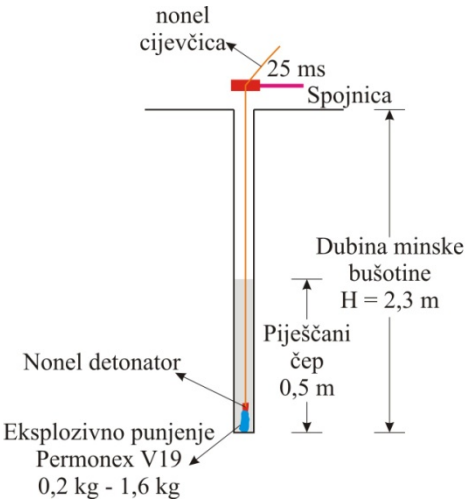
Slika 7.26 Pokusna miniranja na eksploatacijskom polju Cukavec II

Proširenja nastala otpucavanjem kotlovskih mina bila su različita po obliku i veličini. Kod homogenih glinenih tla u osnovi se formira proširenje u obliku kugle (Araya K. et al., 1993). Pokusnim miniranjima utvrđeni su efektivni rasponi masa dviju različitih vrsta eksploziva kojima se ostvaruje kuglasto proširenje u glinovitom koherentnom tlu provođenjem pokusnih miniranja. Utvrđeno je da je kuglasto proširenje za zadani promjer minske bušotine od 131 mm i dubinu minskih bušotina od 2,00 - 3,00 m, moguće ostvariti uporabljenim eksplozivima tipa Permonex V19 i Pakaex, slika 7.27, u rasponu od 0,2 do 1,6 kg. Detonacijska brzina kao najznačajnija minersko-tehnička značajka eksploziva tipa Permonex V19 utvrđena je u akreditiranom *Laboratoriju za eksplozivne tvari* na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu sukladno zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025:2007 (Ester Z., 2005). Eksploziv Permonex V19 ima deklariranu brzinu detonacije 4500 m/s, dok ona kod eksploziva Pakaex iznosi 2950 m/s. Aktiviranje eksplozivnog punjenja izvedeno je NONEL sistemom preko trenutnih električnih detonatora (TED), slika 7.28. Prilikom pokusnih miniranja idealnom se pokazala veličina pješčanog čepa od 0,5 metara, granulacije 0/4 mm. Na slici 7.29 prikazana je konstrukcija punjenja minske bušotine. Trenutak aktiviranja eksplozivnog punjenja Permonex V19 prikazan je na slici 7.30 i shematski prikaz nastalog kuglastog proširenja na slici 7.31.

Slika 7.27 Eksplozivna punjenja Permonex V19 i Pakaex

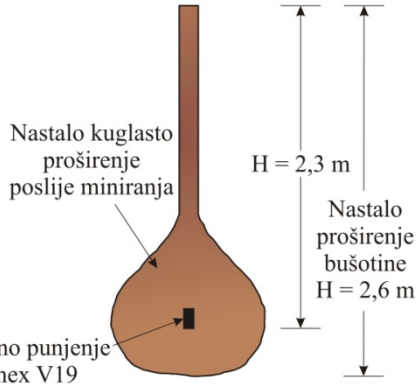


Slika 7.28 Shema minskog polja minskih bušotina iz 2014. godine



Slika 7.29 Konstrukcija punjenja minske bušotine

Slika 7.30 Trenutak aktiviranja eksplozivnog punjenja



Slika 7.31 Nastalo kuglasto proširenje

Prije izvođenja pokusnih miniranja na eksploatacijskom polju Cukavec II napravljen je detaljan plan izvođenja, tablica 7.8, 7.9, 7.10 i 7.11. Iz prikazanih tablica vidljivo je da je svaka minska bušotina određena na terenu sa svojim koordinatama, te je za svaku minsku bušotinu određena vrsta i duljina minskog čepa. Također, svaka minska bušotina imala je određenu vrstu i masu eksplozivnog punjenja.

Tablica 7.8 Pokusna miniranja 12. lipnja 2014. godine

Minska bušotina	Promjer minske bušotine D_{MB} [m]	Koordinate minskih bušotina				Dubina minske bušotine H_{MB} [m]	Vrsta eksploziva	Masa eksploziva Q [kg]	Duljina čepa $L_Č$ [m]	Vrsta minskog čepa
		Y [m]	X [m]	H_{vrh} [m]	H_{dno} [m]					
PMB1	0,131	489445,79	5122735,66	196,53	194,50	2,03	Permonex	1,25	1,00	pijesak
PMB2	0,131	489453,24	5122729,03	196,74	194,65	2,09	Permonex	0,50	1,00	pijesak
MB1	0,131	489450,00	5122751,77	195,49	193,48	2,01	Pakaex (rinfuza)	1,00	0,5/ 0,5	pijesak/ glina
MB2	0,131	489453,79	5122748,40	195,65	193,67	1,98	Pakaex (rinfuza)	0,80	0,5/ 0,5	pijesak/ glina
MB3	0,131	489457,47	5122745,07	195,85	193,78	2,07	Pakaex (rinfuza)	0,60	0,5/ 0,5	pijesak/ glina
MB4	0,131	489461,22	5122741,75	195,82	193,88	1,94	Pakaex (rinfuza)	0,40	0,5/ 0,5	pijesak/ glina
MB5	0,131	489464,88	5122738,43	195,8	193,82	1,98	Permonex	0,40	0,5/ 0,5	pijesak/ glina
MB6	0,131	489468,61	5122735,08	195,94	194,00	1,94	Permonex	0,60	0,5/ 0,5	pijesak/ glina
MB7	0,131	489472,40	5122731,76	195,99	194,05	1,94	Permonex	0,80	0,5/ 0,5	pijesak/ glina
MB8	0,131	489476,12	5122728,26	196,24	194,22	2,02	Permonex	1,00	0,5/ 0,5	pijesak/ glina

Tablica 7.9 Pokusna miniranja 12. lipnja 2015. godine

Minska bušotina	Promjer minske bušotine D_{MB} [m]	Koordinate minskih bušotina				Dubina minske bušotine H_{MB} [m]	Vrsta eksploziva	Masa eksploziva Q [kg]	Duljina čepa $L_Č$ [m]	Vrsta minskog čepa
		Y [m]	X [m]	H_{vrh} [m]	H_{dno} [m]					
PMB3	0,131	489127,98	5122573,54	198,43	195,36	3,07	Pakaex (rinfuza)	1,60	1,00	pijesak
PMB4	0,131	489133,55	5122568,55	198,45	195,55	2,90	Permonex	RAZORENA		
MB31	0,131	489142,09	5122574,35	198,49	195,45	3,04	Permonex V19	0,20	0,30	pijesak
MB32	0,131	489145,81	5122570,99	198,71	195,66	3,05	Pakaex (rinfuza)	0,40	0,30	pijesak
MB33	0,131	489149,53	5122567,63	198,82	195,78	3,04	Pakaex (rinfuza)	RAZORENA		
MB34	0,131	489153,27	5122564,36	198,97	196,10	2,87	Pakaex (rinfuza)	0,80	0,50	pijesak
MB35	0,131	489156,98	5122560,99	198,95	196,15	2,80	Pakaex (rinfuza)	0,60	0,50	pijesak
MB36	0,131	489160,70	5122557,69	199,13	196,06	3,07	Permonex V19	0,40	0,50	pijesak

Tablica 7.10 Pokusna miniranja 20. srpnja 2015. godine

Minska bušotina	Promjer minske bušotine D_{MB} [m]	Koordinate minskih bušotina				Dubina minske bušotine H_{MB} [m]	Vrsta eksploziva	Masa eksploziva Q [kg]	Duljina čepa $L_Č$ [m]	Vrsta minskog čepa
		Y [m]	X [m]	H_{vrh} [m]	H_{dno} [m]					
MB13	0,131	489075,21	5122634,06	196,25	193,81	2,44	Pakaex (rinfuza)	0,20	0,50	pijesak
MB14	0,131	489078,87	5122631,08	196,34	193,82	2,52	Pakaex (rinfuza)	0,20	0,50	pijesak
MB15	0,131	489082,48	5122627,57	196,36	193,89	2,47	Pakaex (rinfuza)	0,40	0,50	pijesak
MB16	0,131	489086,37	5122624,19	196,17	193,64	2,53	Pakaex (rinfuza)	0,40	0,50	pijesak
MB17	0,131	489090,09	5122620,77	196,65	194,14	2,51	Pakaex (rinfuza)	0,60	0,50	pijesak
MB18	0,131	489093,58	5122617,65	196,90	194,72	2,18	Pakaex (rinfuza)	0,80	0,50	pijesak
MB19	0,131	489097,38	5122614,18	197,00	194,80	2,20	Pakaex (rinfuza)	0,80	0,50	pijesak
MB20	0,131	489101,15	5122610,96	197,13	194,59	2,54	Pakaex (rinfuza)	1,00	0,50	pijesak
MB21	0,131	489104,97	5122607,56	197,29	194,77	2,52	Permonex V19	0,40	0,50	pijesak
MB22	0,131	489108,63	5122604,32	197,44	195,54	1,90	Permonex V19	0,20	0,50	pijesak
MB23	0,131	489112,26	5122600,88	197,56	195,34	2,22	Permonex V19	0,60	0,50	pijesak
MB24	0,131	489116,60	5122597,48	197,65	195,39	2,26	Permonex V19	0,80	0,50	pijesak
MB25	0,131	489119,66	5122594,27	197,74	195,43	2,31	Permonex V19	0,60	0,50	pijesak
MB26	0,131	489123,49	5122591,12	197,84	195,50	2,34	Permonex V19	0,80	0,50	pijesak
MB27	0,131	489127,42	5122587,92	197,79	195,60	2,19	Permonex V19	0,40	0,50	pijesak
MB28	0,131	489130,99	5122584,43	198,07	195,89	2,18	Permonex V19	0,20	0,50	pijesak
MB29	0,131	489134,65	5122581,02	198,20	196,19	2,01	Pakaex (rinfuza)	0,20	0,50	pijesak
MB30	0,131	489138,53	5122577,81	198,28			Permonex V19	RAZORENA		

Aktiviranjem masa većih od 1,6 kg minske bušotine potpuno su bile razorene, jer je nakon miniranja istih formiran krater (pogotovo se to odnosi na jaču vrstu eksploziva Permonex V19), slika 7.32.

Slika 7.32 Neželjeni lijevak u obliku kratera

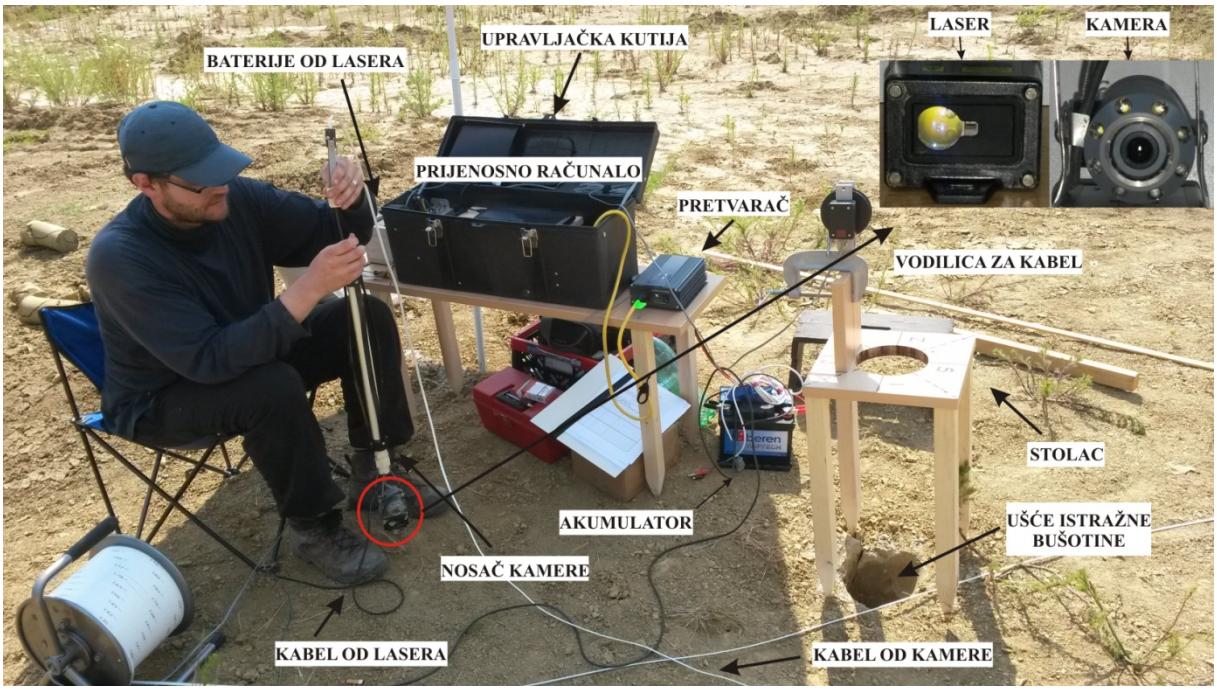
Tablica 7.11 Pokusna miniranja 31. kolovoza 2016. godine

Minska bušotina	Promjer minske bušotine D_{MB} [m]	Koordinate minskih bušotina				Dubina minske bušotine H_{MB} [m]	Vrsta eksploziva	Masa eksploziva Q [kg]	Duljina čepa $L_Č$ [m]	Vrsta minskog čepa
		Y [m]	X [m]	H_{vrh} [m]	H_{dno} [m]					
MB37	0,131	489059,52	5122615,00	197,34	195,29	2,05	Pakaex (rinfuza)	0,20	0,50	pijesak
MB38	0,131	489063,24	5122611,74	197,45	195,35	2,10	Pakaex (rinfuza)	0,40	0,50	pijesak
MB39	0,131	489066,97	5122608,38	197,54	195,44	2,10	Pakaex (rinfuza)	0,60	0,50	pijesak
MB40	0,131	489070,71	5122605,03	197,58	195,48	2,10	Pakaex (rinfuza)	0,80	0,50	pijesak
MB41	0,131	489074,43	5122601,75	197,54	195,44	2,10	Pakaex (rinfuza)	1,00	0,50	pijesak
MB42	0,131	489078,13	5122598,39	197,63	195,53	2,10	Permonex V19	0,20	0,50	pijesak
MB43	0,131	489081,86	5122595,05	197,80	195,70	2,10	Permonex V19	0,40	0,50	pijesak
MB44	0,131	489085,61	5122591,71	197,90	195,80	2,10	Permonex V19	0,60	0,32	pijesak
MB45	0,131	489089,30	5122588,35	198,07	195,97	2,10	Permonex V19	0,80	0,50	pijesak
PMB5	0,131	489126,55	5122555,03	198,66	196,56	2,10	Permonex V19	0,80	0,50	pijesak
PMB6	0,131	489130,32	5122551,70	198,61	196,51	2,10	Permonex V19	0,60	0,50	pijesak

7.4. UTVRĐIVANJE NASTALIH KUGLASTIH PROŠIRENJA NAKON AKTIVIRANJA EKSPLOZIVNOG PUNJENJA

Prilikom istraživanja, najvažnije je bilo odrediti oblik i volumen nastalih kuglastih proširenja, koje su nastale nakon otpucavanja eksplozivnog punjenja, koji je smješten u cilindričnoj bušotini promjera 131 mm.

Određivanje oblika i volumena proširenja, bio je glavni razlog za razvoj jedinstvene metode opažanja. U tu svrhu je na Geotehničkom fakultetu u Varaždinu, osmišljen i razvijen takav jedinstveni sustav, slika 7.33. Taj sustav predstavlja integraciju RTK GNSS metode, primjenom online transformacijskih parametara putem CROPOS sustava (NN 110/2004, 114/2004; Pribičević B. & Medak D., 2003; Marjanović M., 2010), dubinske kamere, *Heavy Duty GeoVision Borehole Camera* (http://www.geovision.org/) i lasera, EDS-C (https://dimetix.com/en/?product=eds-c).



Slika 7.33 Razvijen integrirani sustav dubinska kamera-laser

Tehničke karakteristike dubinske kamere, *Heavy Duty GeoVision Borehole Camera*, date su u tablici 7.12, a lasera, EDS-C u tablici 7.13.

Tablica 7.12 Tehničke karakteristike dubinske kamere

Heavy Duty GeoVision Borehole Camera	
Mogućnost snimanja	Crno-bijelo
Materijal kućišta	Plastika, CPVC
Leća kamere	Staklo
Maksimalna dubina snimanja. Maksimalna duljina kabela i mogućnost snimanja pod vodom	300 m
Težina	141,7 g
Objektiv sa staklenim elementom	2,9mm
Rezolucija vodoravnih linija	420
Maksimalna radna temperatura	43 ^{o}C
Minimalna radna temperatura	0 ^{o}C
Dimenzije	
Promjer u mm na najdubljoj točki	44,45 mm
Dužina [mm]	88,9 mm
Mogućnosti snimanja	
Minimalni promjer bušotine za prolaz	47,625 mm
Minimalna preporučena veličina bušotine za dobru sliku	50,8 mm
Minimalna preporučena veličina bušotine za dobru sliku	152,4 cm
Maksimalan promjer bušotine kada gledate dolje u dobrim uvjetima za dobru sliku	762,00 cm
Udaljenost fokusa	
Minimalna udaljenost do objekta za izvrstan fokus	50,8 mm
Maksimalna udaljenost u inčima do objekta za izvrstan fokus	914,40 mm
Minimalna udaljenost do objekta za korištenje fokusa	38,1 mm
Maksimalna udaljenost do objekta za korištenje fokusa	beskonačno
Rasvjeta	
Broj LED svjetala visoke svjetlosti u kameri	8

Tablica 7.13 Tehničke karakteristike lasera

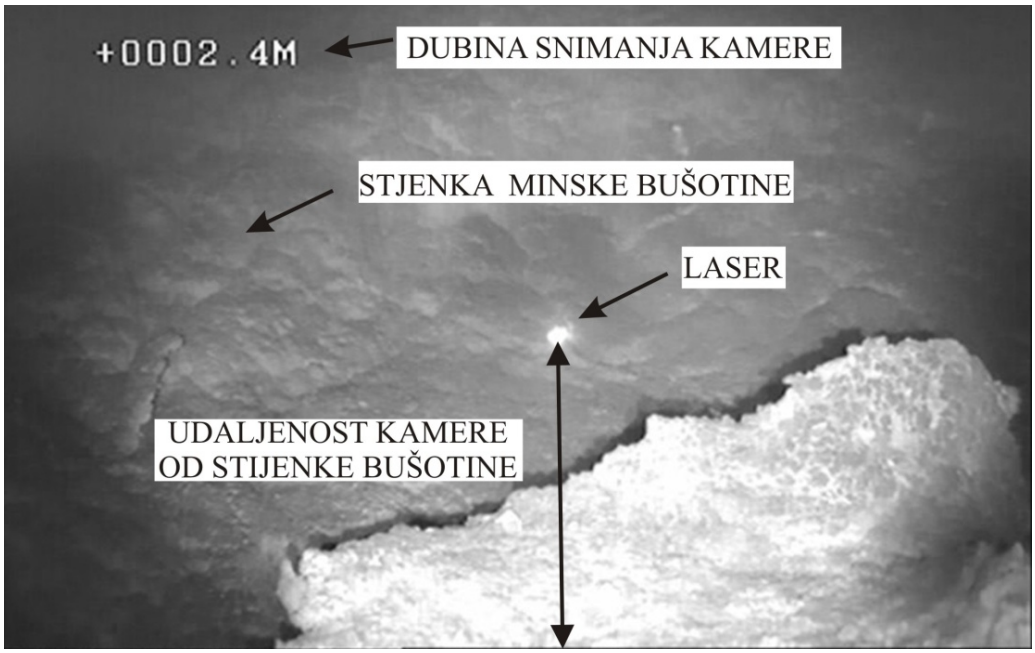
Laser EDS-C 30	
Točnost mjerenja	± 3,0 mm
Tipična mogućnost ponavljanja	cca. 1,5 mm
Mjerni raspon (na prirodnim površinama)	0,05 do 30 m (tamne površine do oko 20 m)
Vrijeme mjerenja	od 0,4 do približno 4 s
Izvor svjetlosti	Laserska dioda vidljiva 620-690 nm (crveno) IEC 60825-1: 2001; Klasa 2 FDA21CFR 1040,10 i 1040,11 Divergencija zrake : 0,16 x 0,6 mrad Trajanje pulsa: $0{,}45 \times 10^{-9}$ s Maksimalna radijacijska snaga: 0,95 mW
ESD	IEC 61000-4-2: 1995 + A1 + A2
EMC	EN 61000-6-4; EN 61000-6-2
Napajanje	24V DC +/- 10%, maks. 0,1 A
Dimenzije	106 x 62 x 45 mm
Radna temperatura	-10 ° C do + 50 ° C
Temperatura skladištenja	od -40 ° C do +70 ° C
Radna sredina	vlažnost 0...80% bez kondenzacije; nema agresivnih para
Stupanj zaštite	P65; IEC60529
Težina	280g
Sučelje	1 RS-232 sučelje za konfiguriranje senzora 1, analogni izlaz 0/4...20mA

7.4.1. Postupak mjerenja sustavom dubinska kamera-laser

Sustav se sastoji od dubinske kamere, lasera, upravljačke kutije, prijenosnog računala, akumulatora, pretvarača (invertera), dvije 12 V prijenosne baterije za laser i kablova.

Dubinska kamera, spojena sa kablom, pričvršćuje se na nosač dubinske kamere koji se sa kablom spaja na upravljačku kutiju. Laser se uz pomoć nosača pričvršćuje na dno dubinske kamere i zajedno sa kablom spaja na upravljačku kutiju. Posebnim kablom laser se spaja na dvije 12 V baterije koje omogućuju pokretanje lasera, a s posebnim konverterom spaja se na prijenosno računalo. Upravljačka kutija se uz pomoć kabla i preko pretvarača spoji na akumulator od 55Ah. Na upravljačku kutiju spaja se prijenosno računalo koje sa svojim programom za snimanje i pohranu snimka omogućuje početak samog mjerenja. Tako spojena dubinska kamera i laser se zajedno sa nosačem kamere i kablom postavljaju u vodilicu za kabel preko kružnog otvora na stolcu i spuštaju u minsku bušotinu. Dubinska kamera okreće se u smjeru kazaljke na satu za 360° na karakterističnim dubinama snimanja u intervalu od 45°. Na taj način dobiva se zatvorena ploha. Budući da je laser pričvršćen na dubinsku kameru, snimaju se udaljenosti dubinske kamere od stijenki minskih bušotina u svakoj sekundi (Mesec J. et al., 2015).

Koristeći prijenosno računalo, laser i program kamere i lasera na ekranu prijenosnog računala snima se video zapis cijele minske bušotine zajedno sa udaljenostima kamere od stijenki bušotina, slika 7.34.



Slika 7.34 Snimak nastalog proširenja dubinskom kamerom

7.5. MJERENJE BRZINA OSCILACIJA U KOHERENTNOM GLINOVITOM TLU

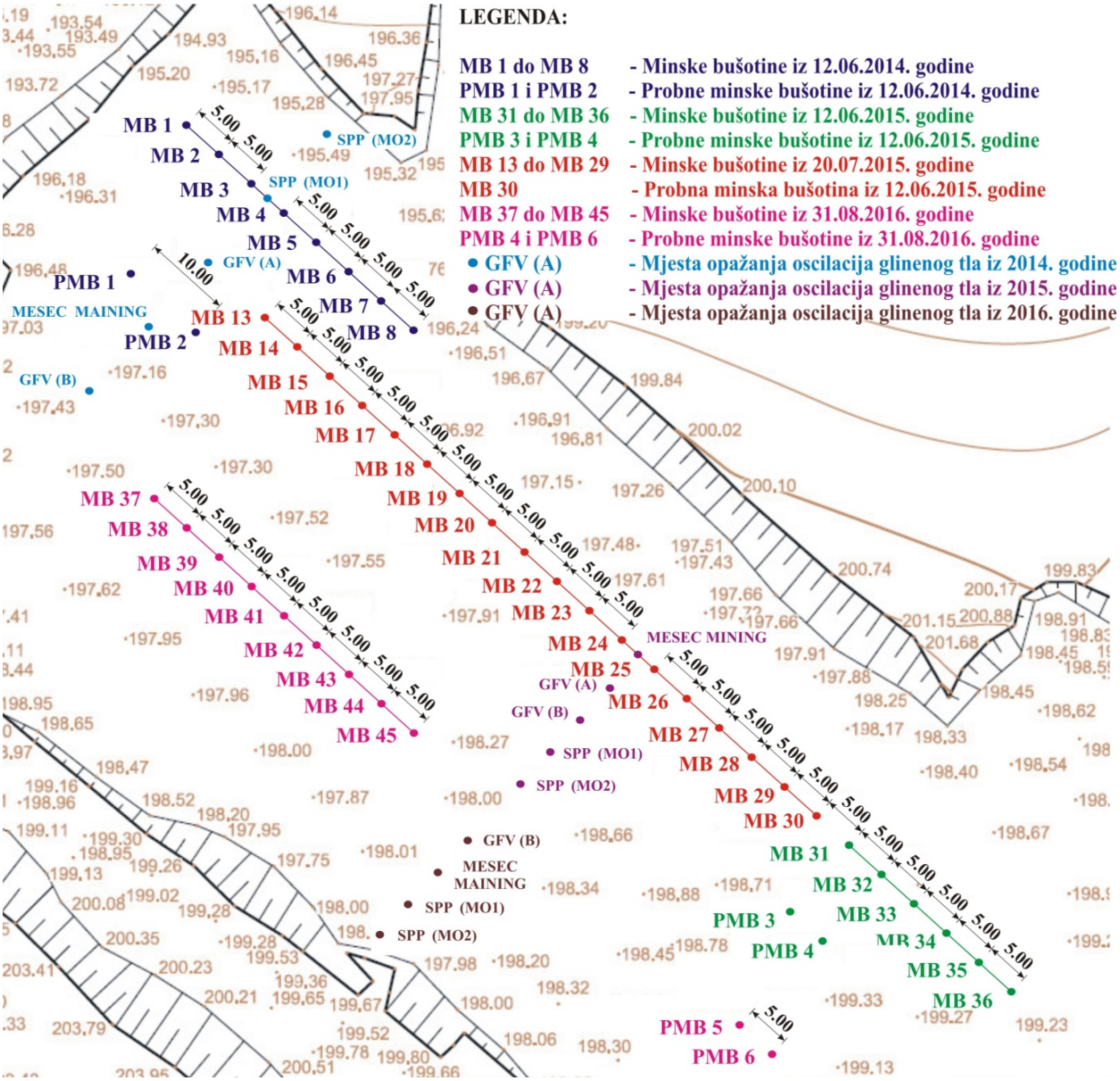
Prilikom pokusnih miniranja na eksploatacijskom polju Cukavec II, mjerene su i brzine oscilacija u okolici istražnih profila. Spomenuta mjerenja izvedena su ponajviše radi dobivanja podataka o intenzitetu oscilacija pri budućim kotlovskim miniranjima, koja će se eventualno izvoditi u svrhu stabilizacije različitih objekata sidrenjem blizu ili u urbanim sredinama. Rezultati tih mjerenja daju preliminarna saznanja o mogućim štetnim utjecajima miniranja u glinenim tlima koja se ogledaju i u znatno većem intenzitetu seizmičkih oscilacija u odnosu na čvrste stijenske mase.

Pokusna miniranja uz mjerenja brzine oscilacija izvedena su:

- 12. lipnja 2014. godine,
- 12. lipnja i 20. srpnja 2015. godine i
- 31. kolovoza 2016. godine.

Na slici 7.35 situacijskom kartom prikazana je pozicija minskih bušotina i mjesta opažanja.

Prilikom proizvodnih miniranja korisni dio oslobođene energije eksplozivnoga punjenja utroši se na razaranje i drobljenje stijene, odnosno u ovom slučaju na stvaranje kuglastog proširenja i okolnog poboljšanja koherentnog glinenog tla. Dio oslobođene energije eksplozivnog punjenja koji se nije utrošio na razaranje i drobljenje stijene, odnosno stvaranja kuglastog proširenja, pretvara se u kinetičku energiju različitih tipova elastičnih valova koji se međusobno razlikuju u brzini širenja, intenzitetu i obliku deformacije (Krsnik J.,1989).



Slika 7.35 Pozicija pokusnih minskih bušotina i mjesta opažanja

Eksplozivno punjenje minske bušotine može se smatrati epicentrom umjetno izazvanog potresa. Oscilacije se prenose elastičnim valovima od epicentra radijalno kroz smjensku masu ili tlo u svim smjerovima. Prolazom kroz stjensku masu ili tlo, energija se troši, a amplitude

oscilacija (pomak, brzina i akceleracija) prigušuju se eksponencijalno udaljavanjem od epicentra (Škrlec V., 2015). Dozvoljeni intenzitet seizmičkih oscilacija reguliran je zakonskim normama. Poznato je nekoliko najčešće korištenih normi čije se dozvoljene veličine međusobno razlikuju. Svaka norma ima nekoliko različitih granica kojima se određuju veličine dopuštenih oscilacija za pojedine tipove građevina. Za novije i kvalitetnije izgrađene objekte raste i dozvoljena brzina oscilacija. Najčešće korištene norme su (Stanković S., 2011):

- USBM RI8507 and OSMRE,
- ISO 4866:1990,
- DIN 4150,
- British Standard 7385 i
- Švedska norma.

Većina normi zasniva se na ovisnosti brzine oscilacija tla v [mm/s] i frekvencije f [Hz].

7.5.1. Seizmografi

Seizmografi su uređaji za praćenje valnih pojava u stjenskoj masi i tlu. Pojedine vrste uređaja primjenjuju se za detekciju, praćenje i mjerenje valova prirodnih potresa, za mjerenja brzina seizmičkih valova istražnim geofizičkim metodama ili za praćenje utjecaja miniranja na okolnu stjensku masu, tlo i građevine (Škrlec V., 2015).

U slučaju provedenih mjerenja, brzina oscilacija korištena je kao veličina za ocjenu smanjenja udarnog djelovanja eksplozivnog punjenja. S druge strane veličina brzina oscilacija parametar je ocjene potencijalno štetnog utjecaja miniranja na okolinu. (Škrlec V., 2015).

Za mjerenje brzina oscilacija na gliništu Cukavec II korišteni su seizmografi opremljeni trokomponentnim geofonima Instantel (MiniMate Plus), slika 7.36, koji posjeduju ISO certifikat 9001. Tehničke karakteristike Instantela MiniMate Plus date su u tablici 7.14. Na mjernim mjestima registrirana je brzina osciliranja materijalne čestice. Mjerenje je obavljeno pokretnim seizmografima opremljenim s trokomponentnim geofonima, pri čemu svaki od njih registrira brzine triju komponenata oscilacija tla. Brzina oscilacija mjerena je kontinuirano u određenom vremenskom intervalu, a mjerni zapis pokazuje trajektoriju brzina oscilacija.

Slika 7.36 Seizmograf Instantel MiniMate Plus

Tablica 7.14 Tehničke karakteristike seizmografa Instantel MiniMate Plus

Seizmograf Instantel MiniMate Plus	
Trokomponentni	
Seizmički kanali x 3	1024-16,384 uzoraka/s/kanal
Maksimalan raspon	254 mm/s
Rezolucija	0,0159 mm/s
Akceleracija i pomak	proračun računalnom obradom
Pomak	0,00023-3,5 cm
Buka i zračni udar x 1	1024-16,384 uzoraka/s/kanal
Raspon	88-148 dB (linearni), 50-110 dB («A»)
Rezolucija	0,25 Pa (linearni), 0,1 dB(«A»)
Obrada podataka	programski paket Instantel MiniMate Plus

Trokomponentni geofon sastoji se od tri geofona postavljena u tri prostorne, međusobno okomite osi i mehanički spojene u jednu cjelinu na slijedeći način:

- dva geofona postavljena u horizontalnoj ravnini, jedan u pravcu točke detonacije (za registraciju longitudinalne komponente oscilacija, označen s 1 na slici 7.37), drugi okomito na prethodni (za registraciju transverzalne komponente oscilacija, označen s 2 na slici 7.37);
- treći geofon smješten okomito na horizontalnu ravninu (za registraciju vertikalne komponente oscilacija, označen s 3 na slici 7.37).

Svaki geofon nakon detonacije registrira po jednu nepravilnu krivulju koja se dobije na snimci (seizmogramu) nastalog seizmičkog poremećaja (potresa). Iz tako dobivenih snimaka računaju se brzine pojedinih komponenata oscilacija. Rezultantna brzina oscilacija tla (V_R)

jednaka je vektorskom zbroju brzina pojedinih komponenata oscilacija, koje se uzimaju iz seizmograma u trenutku najvećeg poremećaja (t):

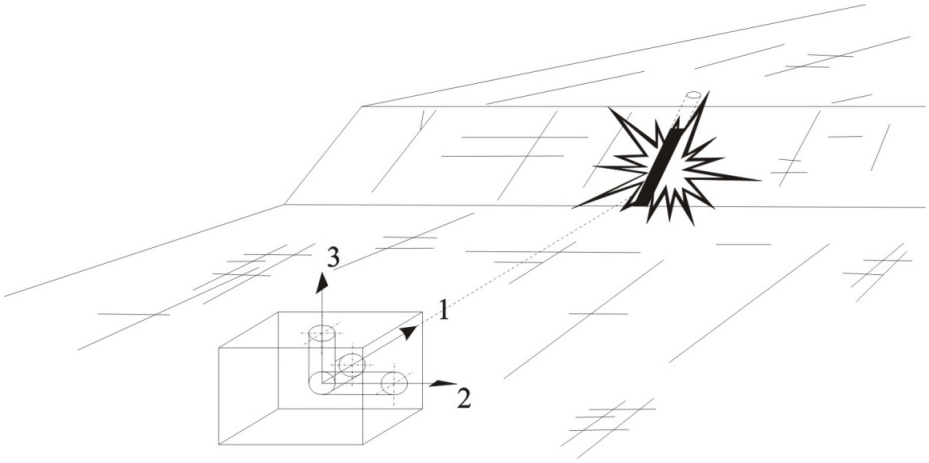
$$V_R = \sqrt{V_T^2 + V_V^2 + V_L^2}\,, \qquad \text{[cm/s]} \qquad 7\text{-}4$$

gdje je: V_R - rezultantna brzina oscilacija tla, [cm/s],

V_L - brzina longitudinalne komponente oscilacija, [cm/s],

V_T - brzina transverzalne komponente oscilacija, [cm/s],

V_V - brzina vertikalne komponente oscilacija, [cm/s].



Slika 7.37 Usmjerenje geofona u odnosu na točku detonacije

Karakteristični snimak trajektorija komponentnih brzina oscilacija prikazan je na slici 7.38.

Instantel

Event Report

Date/Time	Vert at 09:38:02 June 11, 2015	**Serial Number**	BE6667 V 8.12-8.0 MiniMate Plus
Trigger Source	Geo: 0.710 mm/s	**Battery Level**	6.4 Volts
Range	Geo :254 mm/s	**Calibration**	March 26, 2013 by Instantel Inc.
Record Time	3.0 sec at 1024 sps	**File Name**	H667FVXM.RE0
Job Number:	1		

Notes
Lokacija:
Narucitelj:
Izvoditelj mjerenja: SPP d.o.o., Varazdin
Mjerio:

Opis:

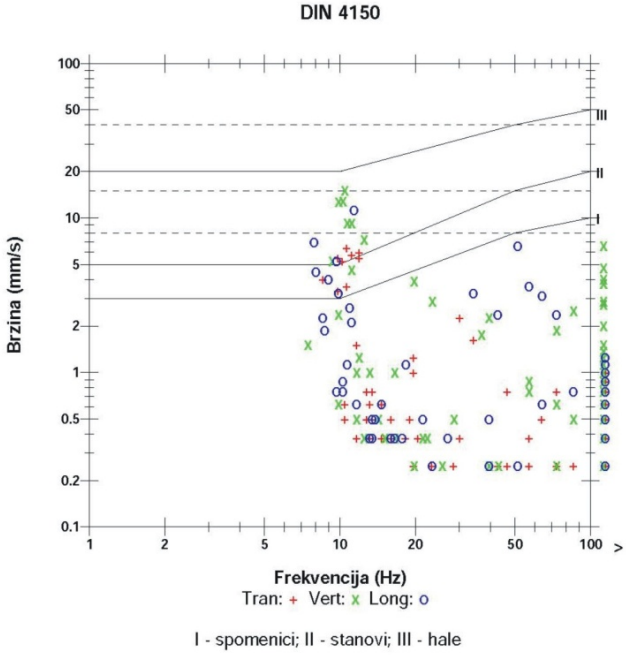
Post Event Notes

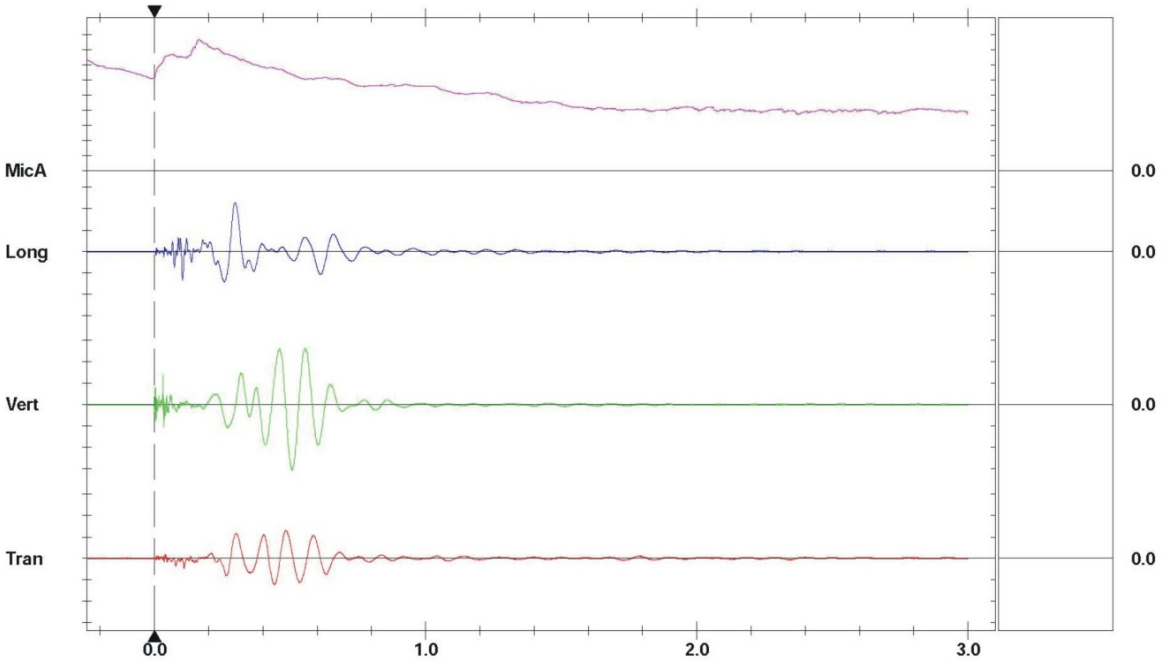
Microphone	'A' Weight
PSPL	86.8 dB(A) at 0.163 sec
ZC Freq	N/A
Channel Test	Disabled

	Tran	Vert	Long	
PPV	6.48	15.2	11.4	mm/s
ZC Freq	11	10	11	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.484	0.508	0.296	sec
Peak Acceleration	0.0795	0.663	0.212	g
Peak Displacement	0.0972	0.235	0.156	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	

Peak Vector Sum 15.4 mm/s at 0.508 sec

N/A: Not Applicable





Time Scale: 0.20 sec/div **Amplitude Scale:** Geo: 5.00 mm/s/div Mic: 10.00 dB(A)/div Sensorcheck
Trigger = ▶—— ——◀

Printed: June 23, 2015 (V 8.01 - 8.01) Format Copyrighted 1996-2004 Instantel Inc.

Slika 7.38 Karakteristični snimak brzina oscilacija mjereni 11. srpnja 2015. godine

8. ANALIZA I INTERPRETACIJA PODATAKA DOBIVENIH TERENSKIM I LABORATORIJSKIM ISTRAŽIVANJIMA

Tijekom provedenih istraživanja postignuti su ohrabrujući terenski rezultati. Proširila su se saznanja o djelovanju eksplozivnog punjenja u glinovitom tlu i spoznaja o mogućnostima korištenja određene vrste eksploziva u geotehničkoj praksi. Naročito se to odnosi na miniranja u mekanim stijenama na različitim dubinama ispod površine tla aktiviranjem određene vrste i mase eksploziva kojima se oblikuju kuglastog proširenja. Provedena terenska istraživanja i inovativnost u obradi terenskih podataka dovela su do dovoljne količine kvalitetnih podataka.

Suvremena istražna miniranja nezamisliva su bez integracije s RTK GNSS mjerenjima. Razvoj CROPOS sustava u Republici Hrvatskoj doveo je do snažnog razvoja aplikacija koje koriste GNSS podatke budući da se sada do njih dolazi nezamislivo brzo i precizno. Usporedbom projektiranih vrijednosti i terenskih mjerenja dolazimo do zaključka da GNSS podatke možemo koristiti za potrebe određivanja koordinata kotlovskih miniranja. *Heavy Duty GeoVision Borehole Camera* i *EDS-c* laser je sustav koji predstavlja integraciju sa podatcima GNSS mjerenja. Takav sustav uz pripadajuću aplikaciju predstavlja najnapredniji sustav modeliranja kotlovskih miniranja.

Koncept i mogućnosti rada aplikacije u tehničkom području predstavlja inovativnost. Osim što aplikacija računa nastalo proširenje, aplikacija iscrtava 2D i 3D modele nastalog proširenja. Spoznaja da je moguće izmjeriti i izračunati volumen nastalog proširenja, uvelike će omogućiti konstruktorima i geotehničarima znatno ekonomičnije projektiranje i izvođenje nadzemnih i podzemnih objekata.

8.1. OPIS APLIKACIJE ZA UTVRĐIVANJE VOLUMENA NASTALIH KUGLASTIH PROŠIRENJA

Aplikacija je razvijena radi izračunavanja koordinata minskih bušotina na temelju poznatih E i N koordinata (dobivenih GPS-uređajem) i visine H (u konkretnom slučaju dubine bušotina) dobivene upotrebom dubinske kamere. Kako bi se mogle izračunati sve koordinate minskih bušotina na određenoj dubini snimanja postavljen je i laser pomoću kojeg se dobivaju udaljenosti između dubinske kamere i stijenki minskih bušotina. Na taj način dobiveni su

ulazni podaci za aplikaciju kojom su izračunate koordinate, nacrtani karakteristični presjeci i na kraju izračunat volumen nastalog kuglastog proširenja svake minske bušotine.

Pomoću aplikacije se dobivaju zatvorene plohe približno kružnog oblika na pojedinim razinama dubine, za koje je moguće izračunati površine. Nakon toga aplikacija na temelju dobivenih površina i poznatih dubina karakterističnih kružnih ploha izračunava volumen cijele minske bušotine i nastalog kuglastog proširenja. Na kraju aplikacija daje i mogućnost crtanja cijele minske bušotine, kao i nastalog proširenja u 2D i 3D prikazu. Radi provjere i detaljnijeg 3D prikaza je napravljena kompatibilnost sa *AutoCad Civil 3D 2017* (https://knowledge.autodesk.com/support/autocad-civil-3d/getting-started?sort=score).

Kako je u tehničkoj praksi *AutoCad Civil 3D* najvažnija aplikacija za crtanje i projektiranje različitih tehničkih problema, aplikacija je definirana na način da nudi i izvoz koordinata presjeka bušotine u *AutoCad Civil 3D*. Na taj način se mogla testirati točnost aplikacije sa *AutoCad Civil 3D* alatima. Na 48 minskih bušotina određena je točnost aplikacije, kroz niz empirijskih izračuna i provjera, te se došlo do konstante, $coef_B$, koja za aplikaciju iznosi 0,05, a čijom primjenom se postižu najtočniji podaci aproksimacije. Uz mogućnost koja je dana za integraciju podataka mjerenja, *Autocad Civil 3D* alata i osmišljene aplikacije, dobiven je točniji 3D prikaz nastalih proširenja, odnosno prikaz cijele minske bušotine.

8.1.1. Arhitektura sustava

Web aplikacija "Bušotine" je izrađena u višeslojnoj arhitekturi temeljnoj na Java EE 7.0 standardu (http://docs.oracle.com/javase/7/docs/). Cjelokupna logika sustava pohranjena je u poslovnom sloju koji je izrađen prema specifikaciji *EJB 3.1*.

Aplikacija koristi objektno relacijsko mapiranje, konkretno *Hibernate* (http://hibernate.org/orm/documentation/5.2/), za komunikaciju s podatkovnim slojem odnosno bazom podataka, od koje je aplikacija nezavisna. Trenutna verzija aplikacije implementirana je na *PostgreSQL 9.4* bazi podataka, ali ne postoji ni jedan razlog da se ne koristi neka druga baza podataka.

Za prezentacijski sloj koriste se moderne i bogate serverske komponente okvira *Primefaces 5.2* (https://www.primefaces.org/), koje se temelje na dugogodišnjem javainom *JSF*

standardu. Za izradu izvješća koristi se *Jasper reports* (https://community.jaspersoft.com /documentation?version=36816) 5.2.0 verzija.

Aplikacija se može pokrenuti na bilo kojem, korisnički odabranom, aplikacijskom serveru koji podržava *JavaEE* specifikaciju. Testna verzija aplikacije vrti se na *Apache TomEE 1.7.1* (http://tomee.apache.org/documentation.html) aplikacijskom serveru.

Korištenjem ovog tehnološkog stoga, aplikacija je skalabilna i otvorena prema različitim sučeljima vanjskih sustava. Sama skalabilnost može biti vertikalna kroz jače strojeve ili horizontalna u *clusteru*. Otvorenost prema drugim sustavima može se postići preko web servisa, komunikacije preko baze podataka ili datoteka, MQ kanala, drugih *messaging servisa*, itd.

Aplikacija koristi sigurnosne mehanizme *Java EE* okvira, konkretno *JAAS* (https://docs.oracle.com/javase/8/docs/technotes/guides/security/jaas/JAASRefGuide.html) specifikaciju, kako bi omogućila ovjeravanje autentičnosti i autorizaciju na razini rola aplikacije. U testnoj verziji aplikacije, ovjeravanje autentičnosti izvodi se preko konfiguracije u datoteci aplikacijskog servera. Ipak, u produkcijskom modu rada ovo može biti *Active directory*, *ldap*, biometrijski sustav zaštite, ili nešto treće. Što se tiče rola testne aplikacije, postoje dvije osnovne role, *admin* i *user*, na kojima je moguće definirati različitu razinu pristupa pojedinim opcijama aplikacije odnosno definirati autorizacijska pravila.

8.1.2. Funkcionalna specifikacija

Aplikacija podržava niz funkcionalnosti vezanih za izračune i prikaz modela minskih bušotina nakon aktiviranja eksplozivnog punjenja.

Funkcionalnosti koje aplikacija podržava su:

- opisivanje lokacije minskih bušotina,
- unos koordinata pojedinih slojeva minskih bušotina (RTK GNSS metoda mjerenja),
- izračun koordinata karakterističnih točaka minskih bušotina raslojenih po dubinama,
- izračun volumena cijele minske bušotine i nastalog proširenja nakon aktiviranja eksplozivnog punjenja.

Sve ovo je podržano iscrtavanjem pojedinog sloja minske bušotine u 2D modelu, kao i nastalog proširenja i cijele minske bušotine u 3D modelu. U nastavku su dani opisi algoritama koji su se koristili za pojedine funkcionalnosti u sustavu.

Za izračun koordinata pojedinog presjeka minske bušotine, prvo se po karakterističnim stranama svijeta izračunava prosjek dviju dobivenih vrijednosti udaljenosti, koje je prikupio mjerni uređaj (laser-EDS-c) prilikom izvođenja terenskih istražnih radova. Formula koja se koristi je ona za standardnu, nevaganu aritmetičku sredinu (formula 8-1). Isto tako izračunava se visina minske bušotine, kao razlika visine vrha i dubine minske bušotine (formula 8-2).

Izračun aritmetičke sredine udaljenost:

$$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N}, \qquad [\mathrm{m}] \qquad 8\text{-}1$$

gdje je: $\overline{x}$ - standardna, nevagana aritmetička sredina, [m].

Izračun visine vrha minske bušotine ili nastalog proširenja:

$$\Delta v = v_{top} - d_{bušotine}, \qquad [\mathrm{m}] \qquad 8\text{-}2$$

gdje je: Δv - visina vrha minske bušotine, [m],

v_{top} - visina terena, [m],

$d_{bušotine}$ - dubina minske bušotine, [m].

Nakon toga izračunavaju se horizontalna koordinata E i vertikalna koordinata N prema formulama 8-3 i 8-4. Horizontalni pomak, ΔE izračunava se kao umnožak prosječne, izmjerene udaljenosti, $\overline{l}$ i sinusa kuta karakteristične strane svijeta, α. Vertikalni pomak, ΔN izračunava se kao umnožak prosječne izmjerene udaljenosti, $\overline{l}$ i kosinusa kuta karakteristične strane svijeta, α.

Izračun horizontalne koordinate *E*:

$$\Delta E = \overline{l} \cdot \sin\alpha, \quad [\mathrm{m}] \qquad 8\text{-}3$$

gdje je: ΔE - horizontalni pomak koordinate *E*, [m],

$\overline{l}$ - prosječna izmjerena udaljenost, [m],

α - karakteristični kut za određenu stranu svijeta snimanja, [^{O}].

Izračun vertikalne koordinate *N*:

$$\Delta N = \overline{l} \cdot \cos\alpha, \quad [\mathrm{m}] \qquad 8\text{-}4$$

gdje je: ΔN - vertikalni pomak koordinate E, [m].

Konačna koordinata dobiva se na način da se na početnu horizontalnu koordinatu, E_0 koja je dobivena preko GPS-a položaja minske bušotine dodaje horizontalni pomak, ΔE, a na početnu vertikalnu koordinatu, N_0 dodaje vertikalni pomak, ΔN. Ovaj izračun može se vidjeti u formuli 8-5 i 8-6.

Izračun konačne koordinate:

$$E = E_0 + \Delta E, \quad [\mathrm{m}] \qquad 8\text{-}5$$

$$N = N_0 + \Delta N, \quad [\mathrm{m}] \qquad 8\text{-}6$$

gdje je: E_0 - početna horizontalna koordinata, [m],

N_0 - početna vertikalna koordinata, [m].

Aplikacija kod unosa podataka za presjek minske bušotine predviđa dva predloška. Prvi predložak je onaj s četiri osnovne strane svijeta: *S* (0°), *Z* (270°), *J* (180°) i *I* (90°). Drugi predložak je onaj s osam dvoslovnih oznaka svijeta: *S* (0°), *SZ* (315°), *Z* (270°), *JZ* (225°), *J* (180°), *JI* (135°), *I* (90°) i *SI* (45°).

Spremanje u bazu podataka ide u model podataka, koji je opisan u sljedećem poglavlju. Korisnik može unijeti novi zapis, može dohvatiti i mijenjati postojeći zapis ili obrisati zapis koji više nije potreban u sustavu. Prije svake od opisanih akcija postoji validacija koja

provjerava da su uneseni svi obavezni podaci i da dolaze iz predviđenih skupova podataka. Prije same pohrane podataka, još jednom se okida izračun koordinata, tako da nema potrebe prije pohrane okidati akciju izračuna.

Aplikacija omogućava i ispis podataka i izračunatih rezultata u vidu predefiniranog izvješća, koje se može vidjeti u odlomku korisničkih uputa ili u vidu dva različita izvoza. Prvi je jednostavan i sastoji se od rednog broja, horizontalne koordinate, vertikalne koordinate i visine minske bušotine za sve kutove odabranog presjeka minske bušotine. Primjer takvog izvoza dan je u nastavku teksta, slika 8.1.

1	489127.9337	5122573.4937	194.9600
2	489127.9800	5122573.6055	194.9600
3	489128.0263	5122573.5863	194.9600
4	489127.9337	5122573.5863	194.9600
5	489128.0455	5122573.5400	194.9600
6	489127.9145	5122573.5400	194.9600
7	489127.9800	5122573.4745	194.9600
8	489128.0263	5122573.4937	194.9600

Slika 8.1 Ispis horizontalne i vertikalne koordinate i visine minske bušotine

Drugi izvoz je složeniji i radi se o formatu DXF, "Drawing Interchange Format", (https://www.autodesk.com/techpubs/autocad/acadr14/dxf/dxf_reference.htm; https://help.autodesk.com/view/OARX/2018/ENU/?guid=GUID-235B22E0-A567-4CF6-92D3-38A2306D73F3), koji se može učitati u *AutoCad civil 3D* aplikaciju ili specifičan čitač tog formata. Budući da se radi o povećoj datoteci, u nastavku teksta dan je samo pregled prvih nekoliko redova izvoda za jedan presjek minske bušotine, slika 8.2.

```
LINE
  5
18
330
11
100
AcDbEntity
  8
0
  6
ByBlock
100
AcDbLine
 10
489127.9337
 20
5122573.4937
 30
194.96
 11
489127.9337
 21
5122573.4937
 31
194.96
  0
LINE
  5
19
330
11
100
AcDbEntity
  8
0
  6
ByBlock
100
AcDbLine
 10
489127.9337
 20
5122573.4937
 30
194.96
 11
489127.9337
 21
5122573.4937
 31
194.96
  0
ENDBLK
  5
1A
330
11
100
AcDbEntity
```

Slika 8.2 Prikaz prvih nekoliko redova izvoda za jedan presjek minske bušotine ili nastalog proširenja

Nakon odabira određenog presjeka minske bušotine, korisniku se odmah iscrtava normirani 2D model. Prvo se prolazi po skupu izračunatih koordinata, te se pronalaze minimalna i maksimalna vrijednost po dvije koordinate. Nakon toga se svaka koordinata normira između vrijednosti minimalne i maksimalne vrijednosti (formula 8-7 i 8-8). Važnost normiranja je u preglednosti modela. Bez normiranja pregled je inicijalno ili premalen ili prevelik.

Normiranje vrijednosti koordinata za prikaz u 2D modelu:

$$E = \frac{E - \min E}{\max E - \min E}, \qquad [\mathrm{m}] \qquad 8\text{-}7$$

$$N = \frac{N - \min N}{\max N - \min N}, \qquad [\mathrm{m}] \qquad 8\text{-}8$$

Dodatno se dobivene koordinate množe s ponderima, koji ovise o rezoluciji ekrana, kako bi slika bila unutar početnog okvira slike. Svaka tako dobivena koordinata povezuje se ravnom crtom između dva susjedna vrha. Ovime se dobiva približan izgled presjeka minske bušotine i nastalog proširenja pri čemu se ignoriraju nepravilne linije između dva susjedna vrha.

Kod odabira minske bušotine ili nastalog proširenja, u drugoj opciji, automatski se za svaki presjek izračunava približna površina svakog pojedinog presjeka (formula 8-9, 8-10, 8-11 i 8-12), te volumen cijele minske bušotine ili nastalog proširenja (formula 8-13).

Površina presjeka minske bušotine ili površina nastalog proširenja računa se kao površina trokuta između dvije susjedne koordinate presjeka, gdje je treći vrh sredina minske bušotine ili nastalog proširenja po kojoj je puštan mjerni instrument (dubinska kamera i laser). Nakon toga se za taj isti par računa površina polu-elipse iznad same baze trokuta koju čine dva susjedna vrha, kako bi se aproksimirala nepravilna krivulja koja spaja dva vrha. Površinu polu-elipse izračunamo tako da se prvo izračuna promjer osi *a*, iz koje se dijeljenjem s dva dobiva polu-osovina *a*. Polu-osovina *b* se aproksimira u odnosu na polu-osovinu, a na način da se polu-osovina *a* množi s konstantom 0,05 i tako se dobiva koeficijent za polu-osovinu *b*.

Kroz niz empirijskih izračuna i provjera preko *AutoCad Civil 3D* alata i terenskih istražnih radova, došlo se do konstante 0,05 čijom primjenom se postižu najtočniji podaci aproksimacije. Konačno dobiva se površina elipse kao umnožak polu osovine *a*, koeficijenta *b* i matematičke konstante, $coef_B$. Površina polu-elipse je površina podijeljena s dva. Sumom svih trokuta i pripadajućih polu-elipsi dobiva se ukupna površina presjeka minske bušotine ili nastalog proširenja.

Izračun površine pojedinog presjeka:

$$P_{surface} = \sum \left(P_{triangle} + P_{semi-ellipse} \right), \qquad [\mathrm{m}^2] \qquad 8\text{-}9$$

$$P_{triangle} = \frac{E_S \cdot (N_A - N_B) + E_A \cdot (N_B - N_S) + E_B \cdot (N_S - N_A)}{2}, \qquad [\mathrm{m}^2] \qquad 8\text{-}10$$

$$e_A = \frac{\sqrt{(E_B - E_A)^2 + (N_B - N_A)^2}}{2}, \qquad [\mathrm{m}^2] \qquad 8\text{-}11$$

$$P_{semi-ellipse} = a_A \cdot (e_A \cdot \cos f_B) \cdot coef_B, \qquad [\mathrm{m}^2] \qquad 8\text{-}12$$

Volumen cijele minske bušotine ili nastalog proširenja dobiva se na jednostavan način. Uzima se aritmetička sredina sume površina dviju susjednih presjeka te se množe s visinom između ta dva presjeka.

Izračun volumena cijele minske bušotine ili nastalog proširenja:

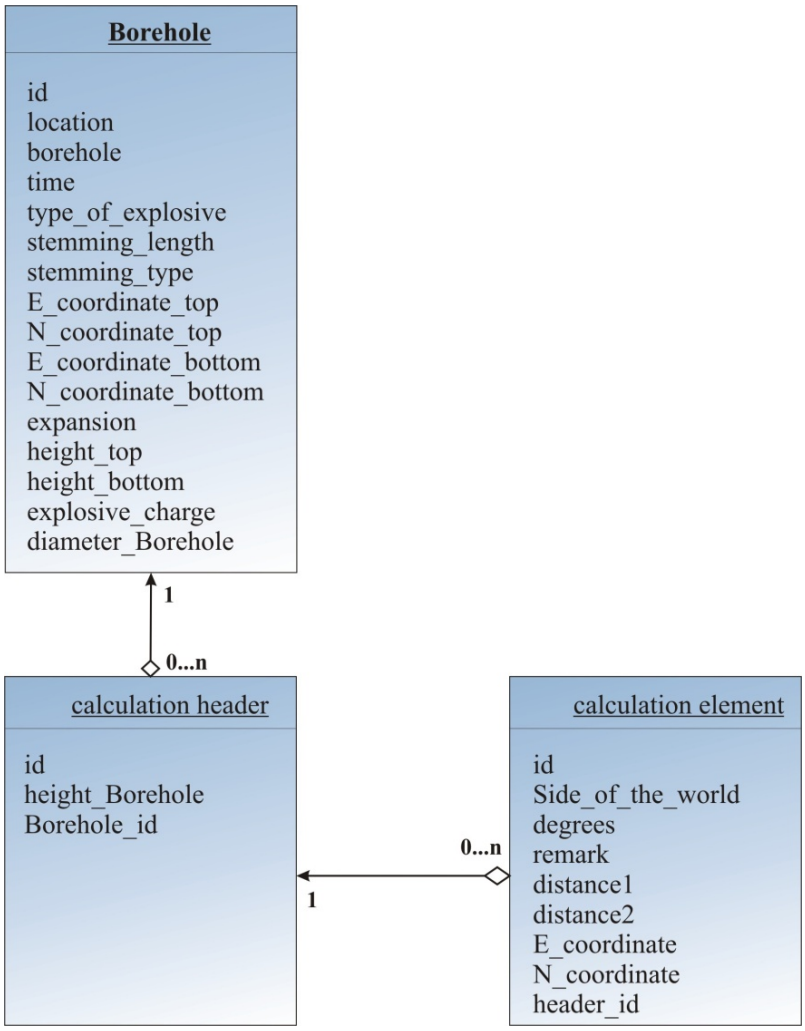
$$V = \sum \left(\frac{P_A + P_B}{2} \cdot \Delta v \right), \qquad [\mathrm{m}^3] \qquad 8\text{-}13$$

Aplikacija nadalje daje ponovno mogućnost jednostavnog i složenog (*DXF*) izvoza koordinata, ali ovaj put za cijelu minsku bušotinu ili nastalog proširenja. Isto tako omogućeno je iscrtavanje 3D modela na sličan način kao i 2D modela. Prvo se za cijelu minsku bušotinu, po svim presjecima, vrši normizacija koordinata. Nakon toga se iscrtava specifična 3D geometrija koja omogućuje dva 3D modela, točkasti i linijski. Također isti princip iscrtavanja 3D prikaza koristi se i za nastalo proširenje.

8.1.3. Tehnička specifikacija

U ovom odlomku dan je pregled tehnologija koje su se koristile za pojedine funkcionalnosti aplikacije. Kako su podaci pohranjeni u bazi podataka, koji algoritmi i vanjske biblioteke koriste za izračune i crtanje 2D i 3D modela. Sami izračuni koriste osnovne matematičke operacije (množenje, dijeljenje, zbrajanje, oduzimanje, trigonometriju, korjenovanje i potenciranje), koje su ugrađene u osnovnim bibliotekama programskog jezika java. U nastavku je dan pregled specifičnosti koje nisu podržane samim JDK-om te model baze podataka.

Model baze podataka, slika 8.3, je jednostavan i sastoji se od tri tablice. Podaci koji su vezani za minsku bušotinu ili nastalo proširenje, pohranjeni su u tablici *borehole* i u njoj se čuvaju podaci o lokaciji, vremenu istraživanja, vrsti eksploziva, masi eksploziva, itd. Svaka minska bušotina i svako nastalo proširenje se mjerilo na različitim dubinama, te se za svaku dubinu pohranjuju podaci o koordinatama presjeka. Kako bi ovo bilo moguće, potrebno je definirati tablicu *calulation_header* koja sadrži podatke o dubini mjerenja. Svaka minska bušotina i svako nastalo proširenje može imati *0* ili više mjerenih dubina. Opet svaka dubina mjerenja ima *0* ili više koordinata, ovisno o koordinatnom modelu koji je odabran, a ti podaci se pohranjuju u tablici *calculation_element*.



Slika 8.3 Model baze podataka

Za crtanje 3D modela potrebno je korištenje vanjskih biblioteka i to redom. *Java 3D utils* (https://mvnrepository.com/artifact/org.scijava/j3dutils) verzija 1.6.0., koja omogućava definiranje vlastite geometrije za crtanje 3D objekata. Nakon toga *GlueGen* (https://mvnrepository.com/artifact/net.java.dev.gluegen/gluegen-rt) verzija 1.0, koja se koristi za pozive nativnih funkcionalnosti iz *C* biblioteka koje su nužan preduvjet za korištenje *AWT* kontejnera u kojemu se iscrtavaju 3D modeli. Konačno zadnji dio biblioteka za 3D model je *JOGL* (https://mvnrepository.com/artifact/org.jogamp.jogl/jogl-all) verzija 1.0, koja omogućuje korištenje *OpenGL® API-a* preko Java biblioteka, a što se dalje koristi za hardversku podršku za crtanje 3D modela aplikacija koje su pisane u java programskom jeziku.

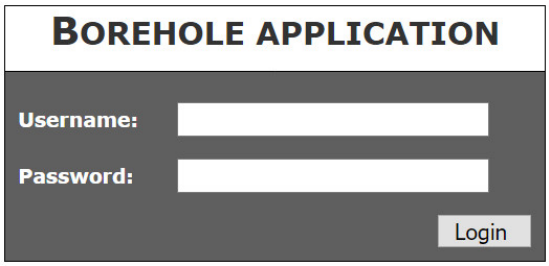
Za izvoz podataka u *DFX* formatu koristi se prilagođena verzija biblioteke *Ycad* (https://mvnrepository.com/artifact/ycad/ycad/1.0.2). Ova biblioteka omogućuje čitanje,

pregled i generiranje *DXF* formata koji se dalje može koristiti u drugim alatima, poput *AutoCada Civil 3D*, a koji podržavaju *DXF* format.

8.1.4. Korisničke upute

Ovaj odlomak daje korisničke upute polazeći od samih ekrana aplikacije, te objašnjava kako koristiti pojedine opcije aplikacije.

Aplikacija ima konfiguriran sigurnosni mehanizam ovjeravanja autentičnosti korisnika. Ovo znači da korisnik koji nije prijavljen u sustav kroz korisničko ime i lozinku, nema pristup aplikaciji. "Ekran prijave", slika 8.4, daje mogućnost prijave korisniku, na način da upiše svoje korisničko ime i lozinku. Ukoliko se ime i lozinka potvrde od strane sustava ovjeravanja autentičnosti, korisnik se propušta u aplikaciju.



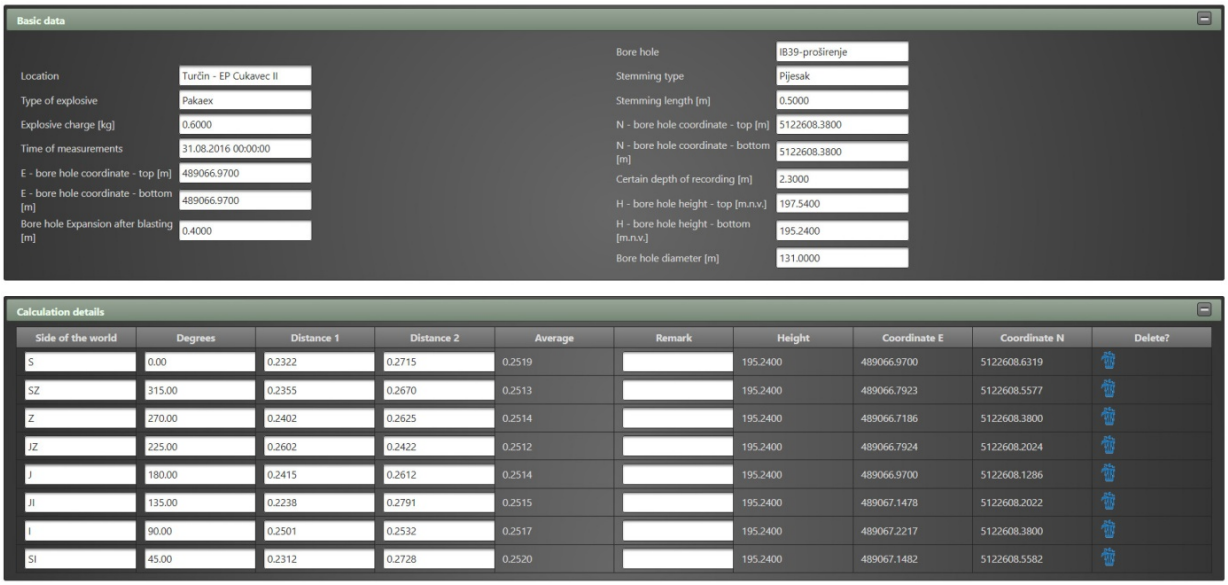
Slika 8.4 Ekran prijave u sustav

Početni ekran aplikacije, slika 8.5, u zaglavlju aplikacije daje izbornik koji se može filtrirati preko sustava autorizacije po rolama, te akciju odjave iz sustava. Kada se otvori izbornik, korisnik može birati između dvije opcije. Izračuna koordinata minskih bušotina ili nastalog proširenja, s 2D slikom presjeka sloja minske bušotine ("Izračun") ili izračuna volumena i prikaza 3D modela ("Površina").

Slika 8.5 Početni ekran aplikacije

Prva opcija aplikacije sastoji se od nekoliko dijelova. Podaci jednog presjeka minske bušotine ili nastalog proširenja, zajedno s udaljenostima po odabranom sustavu koordinata vidljivi su na slika 8.6. Korisnik unosi osnovne podatke o minskoj bušotini, poput lokacije,

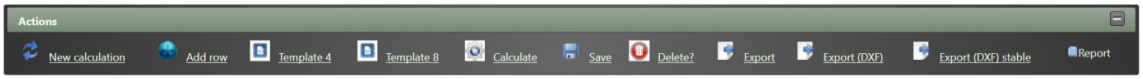
vrsti eksploziva, masi eksploziva, itd. Nakon toga, za određeni presjek koji se definira dubinom mjerenja definiraju se dvije izmjerene udaljenosti po koordinatama koje mogu biti 4 osnovne koordinate ili 8 dvoslovnih koordinata svijeta. Aplikacija izračunava prosječnu udaljenost dobivenu od mjernog uređaja (laser, EDS-c) i tu udaljenost koristi u formulama opisanima u "Funkcionalnim specifikacijama", kako bi došla do koordinata minske bušotine.



Slika 8.6 Unos podataka bušotine i udaljenosti po stranama svijeta

Na slici 8.7 mogu se vidjeti akcije koje korisnik može okinuti nad unesenim podacima presjeka minske bušotine ili nastalog proširenja. Akcija "Novi izračun" otvara praznu formu koja je spremna za unos svježih podataka novog presjeka minske bušotine. "Dodavanje reda" je akcija manualnog dodavanja reda na kraju liste koordinata. Aplikacija podržava bilo koji broj koordinata, a postoje predlošci za 4 osnovne koordinate svijeta (akcija "Predložak 4"), te 8 dvoslovnih koordinata svijeta ("Predložak 8"). Akcija "Izračun" je najvažnija akcija, koja omogućava izračun koordinata pojedinih točaka presjeka minske bušotine ili nastalog proširenja, te ih prikaže na ekranu, ali iste vrijednosti ne sprema u bazu podataka. Ovime je moguće dobiti simulaciju izračuna nad unesenim podacima. Akcija "Spremi" pohranjuje unesene podatke i još jednom izračunava koordinate. Akcija se koristi za prvu pohranu podataka, kao i za naknadne promjene nad dohvaćenim podacima iz baze podataka. Akcija "Obriši" briše određeni zapis presjeka minske bušotine ili nastalog proširenja iz baze podataka. Slijede tri akcije za izvoz koordinata presjeka minske bušotine ili nastalog presjeka, koje se mogu koristiti za uvoz u druge aplikacije, poput *CAD* alata. Posljednja opcija

"Izvješće", slika 8.8, daje pregled osnovnih podataka presjeka minske bušotine ili nastalog proširenja, prema predlošku korisničke specifikacije.



Slika 8.7 Akcije kod izračuna koordinata

CAMERA MEASUREMENT LOG

		E	N	H
BORE HOLE COORDINATE	**TOP**	489059.52	5122615.00	197.34
	BOTTOM	489059.52	5122615.00	195.17

BOREHOLE DEPTH	2.05 m	
BORE HOLE EXPANSION AFTER BLASTING	METER	0.25 m
	CAMERA	0.25 m
BOREHOLE DEPTH AFTER BLASTING	2.3 m	

RECORDING LOG

CAMERA	**DEPTH**	**DISTANCE (laser) [m]**		**REMARK**
N	1.8	0.2783	0.2793	
NW	1.8	0.2797	0.2726	
W	1.8	0.2808	0.2772	
SW	1.8	0.2609	0.2855	
S	1.8	0.2709	0.2758	
SE	1.8	0.2679	0.2848	
E	1.8	0.2792	0.2763	
NE	1.8	0.2693	0.2839	

TYPE OF EXPLOSIVE	Pakaex
EXPLOSIVE CHARGE	0.6 kg
STEMMING TYPE	Sand
STEMMING LENGTH	0.5 m

Slika 8.8 Primjer izvješća presjeka bušotine

Svi uneseni presjeci minskih bušotina ili nastalih proširenja, slika 8.9, pohranjeni su u bazi podataka. U tablici su prikazani osnovni podaci iz zaglavlja presjeka. Do detalja pojedinog presjeka dolazi se klikom na željeni red, kojim se pune podaci, unosne forme i omogućavaju promjenu i/ili brisanje zapisa iz baze podataka.

Saved calculations

ID	Location	Bore hole	Type of explosive	Explosive charge [kg]	E - bore hole coordinate - top [m]	N - bore hole coordinate - top [m]	Stemming length [m]	Certain depth of recording [m]	H - bore hole height - top [m.n.v.]	H - bore hole height - bottom [m.n.v.]
803	Turčin - EP Cukavec II	IB39-proširenje	Pakaex	0.6000	489066.9700	5122608.3800	0.50	2.3000	197.5400	195.2400
802	Turčin - EP Cukavec II	IB39	Pakaex	0.6000	489066.9700	5122608.3800	0.50	2.3000	197.5400	195.2400
801	Turčin - EP Cukavec II	IB38-proširenje	Pakaex	0.4000	489063.2400	5122611.7400	0.50	2.2500	197.4500	195.2000
800	Turčin - EP Cukavec II	IB38	Pakaex	0.4000	489063.2400	5122611.7400	0.50	2.2500	197.4500	195.2000
799	Turčin - EP Cukavec II	IB25-proširenje	Permonex	0.6000	489119.6600	5122594.2700	0.50	1.7000	197.7400	196.0400
798	Turčin - EP Cukavec II	IB25	Permonex	0.6000	489119.6600	5122594.2700	0.50	1.7000	197.7400	196.0400
797	Turčin - EP Cukavec II	IB22-proširenje	Permonex	0.2000	489108.6300	5122604.3200	0.50	1.9000	197.4400	195.5400
796	Turčin - EP Cukavec II	IB22	Permonex	0.2000	489108.6300	5122604.3200	0.50	1.9000	197.4400	195.5400
795	Turčin - EP Cukavec II	IB36	Permonex	0.4000	489160.7000	5122557.6900	0.50	3.2500	199.1300	195.8800
794	Turčin - EP Cukavec II	IB36	Permonex	0.4000	489160.7000	5122557.6900	0.50	3.2450	199.1300	195.8850
793	Turčin - EP Cukavec II	IB31-proširenje	Permonex	0.2000	489142.0900	5122574.3500	0.30	3.2000	198.4900	195.2900
792	Turčin - EP Cukavec II	IB31	Permonex	0.2000	489142.0900	5122574.3500	0.30	3.2000	198.4900	195.2900
791	Turčin - EP Cukavec II	IB45-proširenje	Permonex	0.8000	489089.3000	5122588.3500	0.50	2.5000	198.0700	195.5700
790	Turčin - EP Cukavec II	IB45-proširenje	Permonex	0.8000	489089.3000	5122588.3500	0.50	2.4950	198.0700	195.5750
789	Turčin - EP Cukavec II	IB45-proširenje	Permonex	0.8000	489089.3000	5122588.3500	0.50	2.2000	198.0700	195.8700

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Slika 8.9 Pregled slojeva bušotine

Odabirom reda odmah se crta i 2D model presjeka bušotine, slika 8.10. U 2D prostoru pozicioniraju se normirane koordinate, kako bi presjek bio pregledan te se pojedine točke presjeka spajaju ravnim linijama. Ovime se dobiva približan izgled presjeka minske bušotine ili nastalog proširenja.

Slika 8.10 Slika presjeka sloja bušotine u 2D prostoru

Druga opcija sastoji se od pregleda minskih bušotina ili nastalog proširenja, slika 8.11, te mogućnosti izračuna volumena cijele bušotine ili nastalog proširenja, te 3D prikaza same

minske bušotine ili nastalog proširenja u točkastom (koordinate) i linijskom (spojene koordinate) dijagramu. Također početni ekran druge opcije daje pregled svih bušotina u sustavu. Klikom na pojedini red odabire se željena istražna bušotina ili nastalo proširenje, te se pune preostali paneli forme.

Bore holes

Bore hole	Location	Type of explosive	Stemming type	Stemming length [m]	Explosive charge [kg]
PB3-proširenje	Turčin - EP Cukavec II	Pakaex	Pijesak	1.00	1.6000
PB3	Turčin - EP Cukavec II	Pakaex	Pijesak	1.00	1.6000
IB45-proširenje	Turčin - EP Cukavec II	Permonex	Pijesak	0.50	0.8000
IB45	Turčin - EP Cukavec II	Permonex	Pijesak	0.50	0.8000
IB44-proširenje	Turčin - EP Cukavec II	Permonex	Pijesak	0.32	0.6000
IB44	Turčin - EP Cukavec II	Permonex	Pijesak	0.32	0.6000
IB43-proširenje	Turčin - EP Cukavec II	Permonex	Pijesak	0.50	0.4000
IB43	Turčin - EP Cukavec II	Permonex	Pijesak	0.50	0.4000
IB42-proširenje	Turčin - EP Cukavec II	Permonex	Pijesak	0.50	0.2000
IB42	Turčin - EP Cukavec II	Permonex	Pijesak	0.50	0.2000
IB41-proširenje	Turčin - EP Cukavec II	Pakaex	Pijesak	0.50	1.0000
IB41	Turčin - EP Cukavec II	Pakaex	Pijesak	0.50	1.0000
IB40-proširenje	Turčin - EP Cukavec II	Pakaex	Pijesak	0.50	0.8000
IB40	Turčin - EP Cukavec II	Pakaex	Pijesak	0.50	0.8000
IB39-proširenje	Turčin - EP Cukavec II	Pakaex	Pijesak	0.50	0.6000

1 2 3 4

Slika 8.11 Popis bušotina

Aplikacija daje mogućnosti računanja volumena u kubnim metrima, decimetrima i centimetrima, slika 8.12. Ovdje postoje i opcije iscrtavanja 3D modela same bušotine ili nastalog proširenja. Aplikacija uzima sve koordinate po različitim visinama presjeka te crta 3D model na tri različita načina. Isto tako aplikacija omogućava ponovno izvoz koordinata u različitim formatima koji se mogu uvesti u druge alate tipa *AutoCad Civil 3D*.

Volume

Volume [m^3]	Volume [dm^3]	Volume [cm^3]
0.7983	798.3364	798336.4100

3D model (linear) | 3D model (dotted) | 3D model (triangulation) | Export | Export (DXF) | Export (DXF) stable

Slika 8.12 Izračun volumena i akcije u drugoj opciji

Isto tako odabirom reda minske bušotine ili nastalog proširenja popunjava se panel svih presjeka minske bušotine ili nastalih proširenja, po koordinatama, te se izračunava površina pojedinog presjeka koja se može vidjeti u podnožju pojedine tablice presjeka. U zaglavlju tablice ispisuju se osnovni podaci samog presjeka bušotine, slika 8.13.

Bore hole specification

ID	Side of the world	Degrees	Distance 1	Distance 2	E coordinate	N coordinate
Stemming length [m] 2.3000 ~ ID 649 ~ E - bore hole coordinate - top [m] 489127.9800 ~ N - bore hole coordinate - top [m] 5122573.5400 ~ E - bore hole coordinate - bottom [m] 489127.9800 ~ N - bore hole coordinate - bottom [m] 5122573.5400 ~ H - bore hole height - top [m.n.v.] 198.4300 ~ H - bore hole height - bottom [m.n.v.] 196.1300						
649	S	0.0000	0.1645	0.1671	489127.9800	5122573.7058
649	SZ	315.0000	0.1653	0.1585	489127.8655	5122573.6545
649	Z	270.0000	0.1605	0.1722	489127.8136	5122573.5400
649	JZ	225.0000	0.1548	0.1719	489127.8645	5122573.4245
649	J	180.0000	0.1639	0.1667	489127.9800	5122573.3747
649	JI	135.0000	0.1402	0.1834	489128.0944	5122573.4256
649	I	90.0000	0.1369	0.1909	489128.1439	5122573.5400
649	SI	45.0000	0.1505	0.1860	489128.0990	5122573.6590
Surface	0.07911597					
Stemming length [m] 2.5000 ~ ID 650 ~ E - bore hole coordinate - top [m] 489127.9800 ~ N - bore hole coordinate - top [m] 5122573.5400 ~ E - bore hole coordinate - bottom [m] 489127.9800 ~ N - bore hole coordinate - bottom [m] 5122573.5400 ~ H - bore hole height - top [m.n.v.] 198.4300 ~ H - bore hole height - bottom [m.n.v.] 195.9300						
650	S	0.0000	0.5272	0.5272	489127.9800	5122574.0672
650	SZ	315.0000	0.5327	0.5227	489127.6069	5122573.9131
650	Z	270.0000	0.5313	0.5213	489127.4537	5122573.5400
650	JZ	225.0000	0.5504	0.5004	489127.6085	5122573.1685
650	J	180.0000	0.5336	0.5236	489127.9800	5122573.0114
650	JI	135.0000	0.5498	0.4998	489128.3511	5122573.1689
650	I	90.0000	0.5391	0.5101	489128.5046	5122573.5400
650	SI	45.0000	0.5466	0.5066	489128.3524	5122573.9124
Surface	0.80924213					
Stemming length [m] 2.8000 ~ ID 651 ~ E - bore hole coordinate - top [m] 489127.9800 ~ N - bore hole coordinate - top [m] 5122573.5400 ~ E - bore hole coordinate - bottom [m] 489127.9800 ~ N - bore hole coordinate - bottom [m] 5122573.5400 ~ H - bore hole height - top [m.n.v.] 198.4300 ~ H - bore hole height - bottom [m.n.v.] 195.6300						

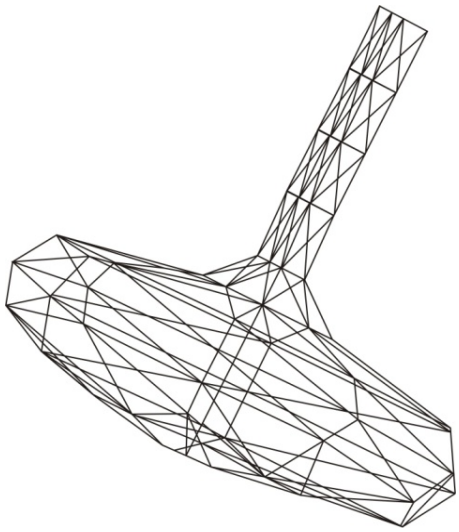
Slika 8.13 Pojedini slojevi koji pripadaju određenoj bušotini

Prvi 3D model je točkasti i on se može dobiti ako se okine opcija "3D model (točkasti)". Ovaj model prikazuje 3D prikaz minske bušotine, slika 8.14 ili nastalog proširenja, slika 8.15, po slojevima na način da plavom bojom označava koordinate u prostoru. Koristi se normiranje kako bi prikaz bio pregledan. Upravljanje ekranom radi se mišem na sljedeći način. Ukoliko se na ekranu pritisne lijeva tipka miša, te se rade pokreti u bilo kojem smjeru tada se model rotira oko zamišljene središnje osi u smjeru pokreta mišem. Ukoliko se drži srednja tipka miša, te se rade pokreti prema dolje ili desno tada se model povećava (engl. *zoom in*), a ukoliko se rade pokreti prema gore ili lijevo tada se model smanjuje (engl. *zoom out*). Pritiskom na desni gumb miša i pomicanjem u bilo koji smjer, model se translatira po toj ravnini u smjeru koji je korisnik odabrao.

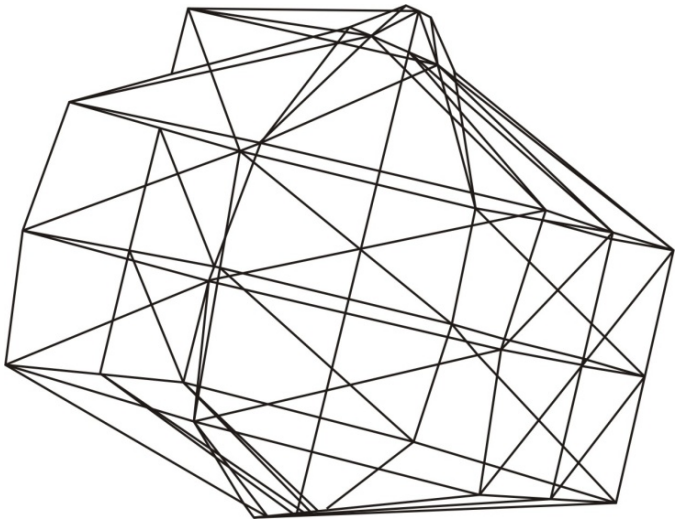
Slika 8.14 Točkasti 3D model minske bušotine

Slika 8.15 Točkasti 3D model nastalog proširenja

Drugi 3D model koji zadovoljavajuće prikazuje istražnu bušotinu, slika 8.16 ili nastalo proširenje, slika 8.17, prikazuje iste u linijskom modelu. Pojedine koordinate u prostoru povezuju se linijama kako bi se dobio 3D model. Upravljanje prikazom jednako je kao i na točkastom modelu. Model se može dobiti na način da se okine akcija "3D model (linijski)".



Slika 8.16 Linijski 3D model minske bušotine



Slika 8.17 Linijski 3D model nastalog proširenja

8.1.5. Korištenje aplikacije na konkretnim primjerima u geotehničkoj praksi

Zahvaljujući dobro postavljenom planu istraživanja, dobiveni su ohrabrujući rezultati nastalog kuglastog proširenja terenskim istraživanjima, a daljnjom obradom točnije su izračunati volumeni nastalog kuglastog proširenja. Također prošireno je saznanja o djelovanju eksplozivnog punjenja u glinenom tlu i poznavanju mogućnosti korištenja određenog tipa eksploziva u geotehničkoj praksi. Posebno se to odnosi na miniranja u glinovitom tlu na različitim dubinama ispod površine tla aktiviranjem određene vrste i mase eksplozivnog punjenja kojima se oblikuju kuglastog proširenja.

U današnje vrijeme osnovno je u geotehničkoj praksi, poznavanje rada *AutoCad Civil 3D* alata. Zbog te činjenice, aplikacija "Bušotina" definirana je tako da nudi izvoz koordinata minskih bušotina u *AutoCad Civil 3D*. Na taj način mogla se testirati točnost aplikacije pomoću alata *AutoCad Civil 3D*. Za utvrđivanje točnosti aplikacije korišteno je 48 minskih bušotina, kroz niz empirijskih izračuna i provjera, te se došlo do konstante $coef_B$ koja iznosi 0,05, a čijom se primjenom postižu najtočniji podaci aproksimacije. Uz mogućnost koja je dana za integraciju podataka mjerenja, *Autocad Civil 3D* alata i osmišljene aplikacije, dobiven je točniji izračun nastalog volumena kuglastog proširenja i 3D prikaz istog. Terenska istraživanja i inovacije u obradi terenskih podataka rezultirala su dovoljnom količinom kvalitetnih podataka koji su omogućili razvoj ove vrste aplikacija.

Značaj i doprinos aplikacije "Bušotina" odražava se s jedne strane u korištenju *Open source* tehnologija, a s druge strane u kompatibilnosti s komercijalnim alatima i mogućnošću povezivanja s drugim sustavima kroz niz sučelja. Dodatnu vrijednost aplikacija postiže u korištenju web tehnologija čime je omogućena sigurna prijava u sustav s bilo kojeg računala, tableta, mobitela ili drugog sličnog uređaja spojenog na internet. Svi podaci koje korisnici prikupe i unesu u sustav, odmah su dostupni svim preostalim sudionicima procesa.

Koncept i mogućnosti rada aplikacije u tehničkom području predstavlja inovativnost. Osim što aplikacija računa nastalo proširenje, aplikacija iscrtava 2D i 3D modele nastalog proširenja. Također kompatibilnost aplikacije sa drugim *CAD* alatima uvelike će doprinijeti provjeri i detaljnijem 3D modelu nastalog proširenja.

Spoznaja da je moguće izmjeriti i izračunati volumen nastalog proširenja, uvelike će omogućiti konstruktorima i geotehničarima znatno ekonomičnije projektiranje i izvođenje nadzemnih i podzemnih objekata.

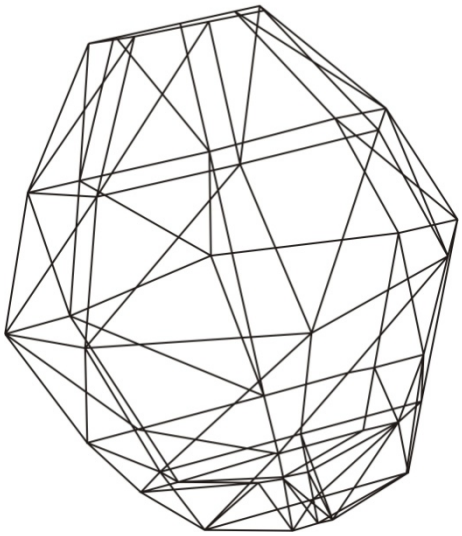
Najvažnija praktična primjena rezultata istraživanja u geotehničkoj praksi kojima se dobivaju kuglasta proširenja ogleda se u ugradnji konstruktivnih elemenata za sidrenje temeljnih i potpornih zidova, stabilizaciji glinenih pokosa trajnog karaktera i stabilizaciji različitih gospodarskih objekata kao npr. dalekovodnih stupova, tunela i slično.

U nastavku su dati primjeri mjerenih kuglastih proširenja nakon aktivacije eksplozivnog punjenja na eksploatacijskom polju Cukavec II u 2014., 2015. i 2016. godini, uz integraciju RTK GNSS mjerenja (koordinata *E*, *N* i *H*), kamere i lasera. Primjeri su također prikaz točnosti izračuna volumena kuglastog proširenja uz pomoć aplikacije i *AutoCad Civil 3D* alata. Na slikama 8.18 i 8.19, dat je primjer iz 2014. godine. Slike 8.20, 8.21, 8.22 i 8.23 prikazuju primjere iz 2015. godine, a na slikama 8.24 i 8.25 su primjeri iz 2016. godine.

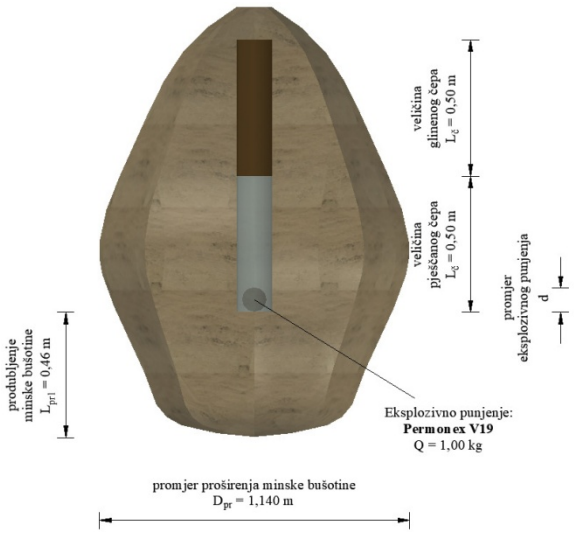
Ostale usporedbe date su u prilozima 1., 2., 3. i 4.

Primjer nastalog kuglastog proširenja u 2014. godini:

Minska bušotina MB 8 $\left(E\,489476{,}12,\ N\,5122728{,}26,\ H\,196{,}24\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $1{,}00\ kg$, Duljina čepa $1{,}0\ m$ ($0{,}5\ m$ pijesak i $0{,}5\ m$ glina). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 842{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 828{,}95\ dm^3$.
Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 13{,}05\ dm^3$.



Slika 8.18 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 8, aplikacija

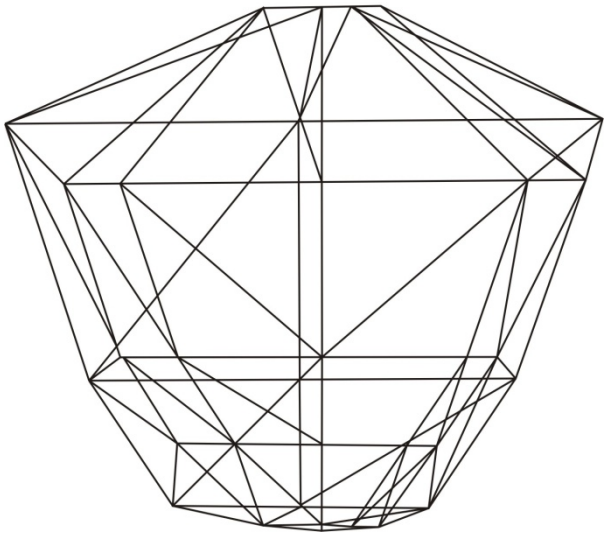


Slika 8.19 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 8, *AutoCad Civil 3D*

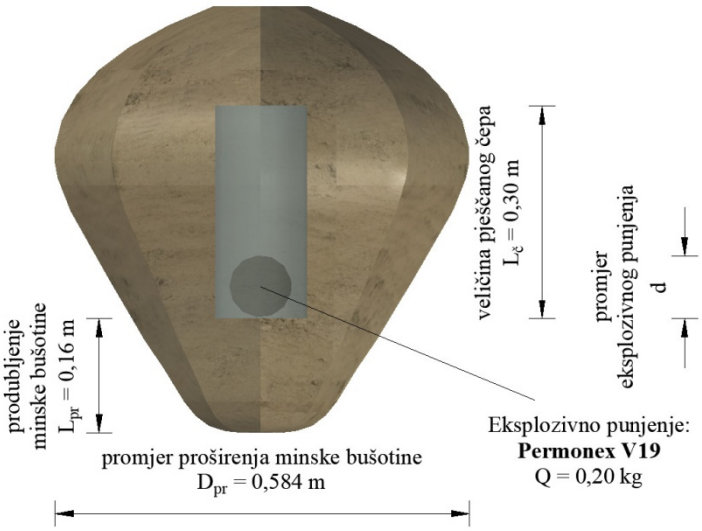
Primjer nastalog kuglastog proširenja iz 12. lipnja 2015. godini:

Minska bušotina MB 31 $\left(E\ 489142{,}09\ \ N\ 5122574{,}35\ \ H\ 198{,}49\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}20\ kg$, Duljina čepa $0{,}3\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 81{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 77{,}00\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 4{,}00\ dm^3$.



Slika 8.20 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 31, aplikacija

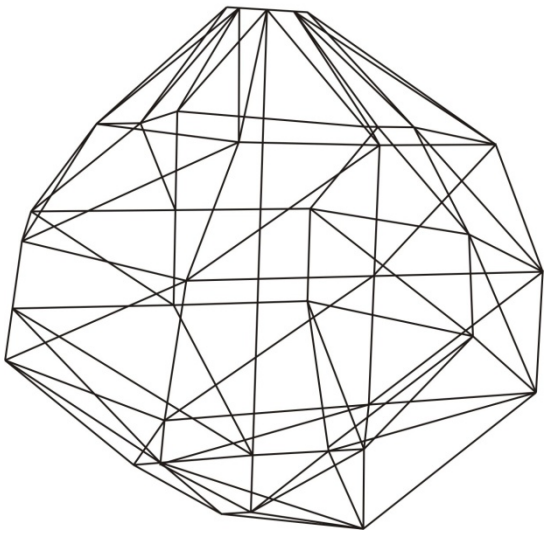


Slika 8.21 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 31, *AutoCad Civil 3D*

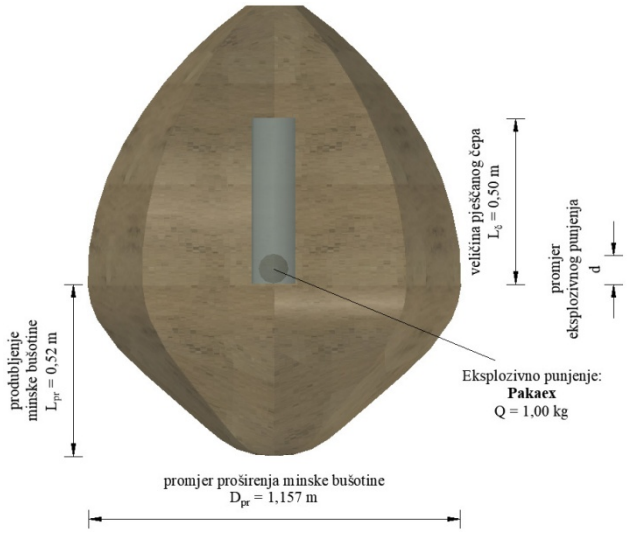
Primjer nastalog kuglastog proširenja iz 20. srpnja 2015. godini:

Minska bušotina MB 20 $\left(E\,489101{,}15,\ N\,5122610{,}96,\ H\,197{,}13\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $1{,}0\,kg$, Duljina čepa $0{,}5\,m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 710{,}00\,dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 705{,}00\,dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 5{,}00\,dm^3$.



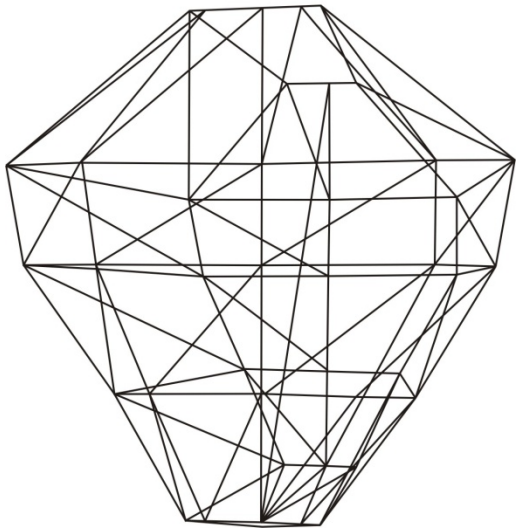
Slika 8.22 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 20, aplikacija



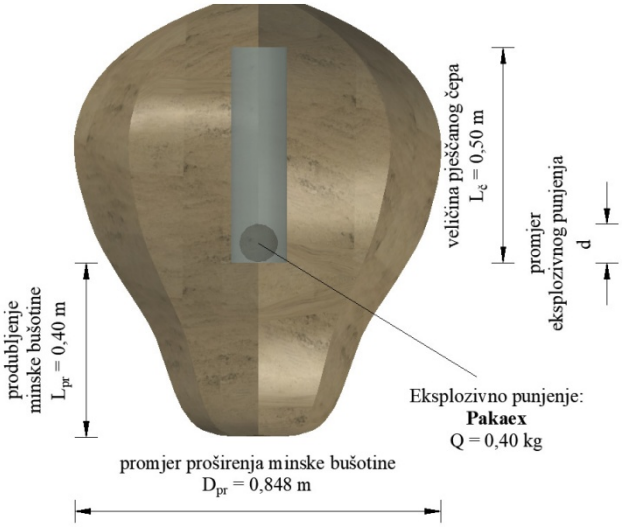
Slika 8.23 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 20, *AutoCad Civil 3D*

Primjer nastalog kuglastog proširenja u 2016. godini:

Minska bušotina MB 38 $(E\,489063{,}24,\ N\,5122611{,}74,\ H\,197{,}45)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}40\,kg$, Duljina čepa $0{,}5\,m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 304{,}00\,dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 292{,}10\,dm^3$.
Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 11{,}90\,dm^3$.



Slika 8.24 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 38, aplikacija



Slika 8.25 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 38, *AutoCad Civil 3D*

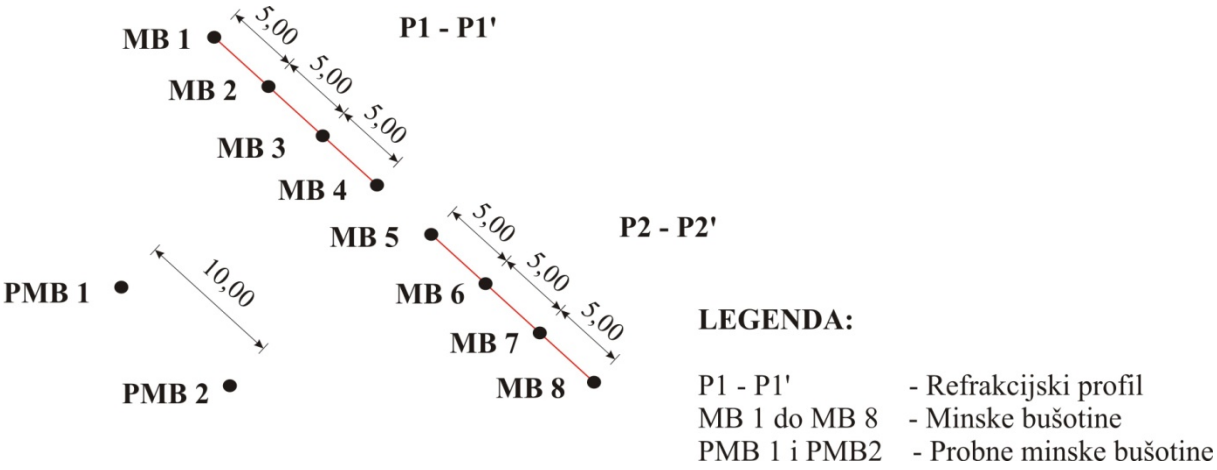
8.2. OBRADA GEOFIZIČKIH REZULTATA MJERENJA DOBIVENIH REFRAKCIJSKOM SEIZMIKOM I MASW

Za primjer obrade seizmičkih podataka mjerenja i procjenu dinamičkih svojstava tla, odabrani su profil 2 i profil 3 iz 2015. godine, te su analizirani prije i poslije miniranja. Analizirani seizmički profili bili su postavljeni u liniji preko ušća minskih bušotina, a mjerenja su obavljena metodom višekanalne analize površinskih valova (MASW).

8.2.1. Seizmička terenska ispitivanja u 2014. godini

U 2014. godini istraživanje je koncipirano na način da su izvedena 2 refrakcijska profila postavljena na ušćima minskih bušotina MB 1 do MB 8. Minske bušotine ujedno su i predmetno minsko polje. Na minskim bušotinama mjerena su vremena prvih nailazaka

seizmičkih valova na geofone postavljene u nizu, slika 8.26, odnosno pikiranje i korespondencija vremena.



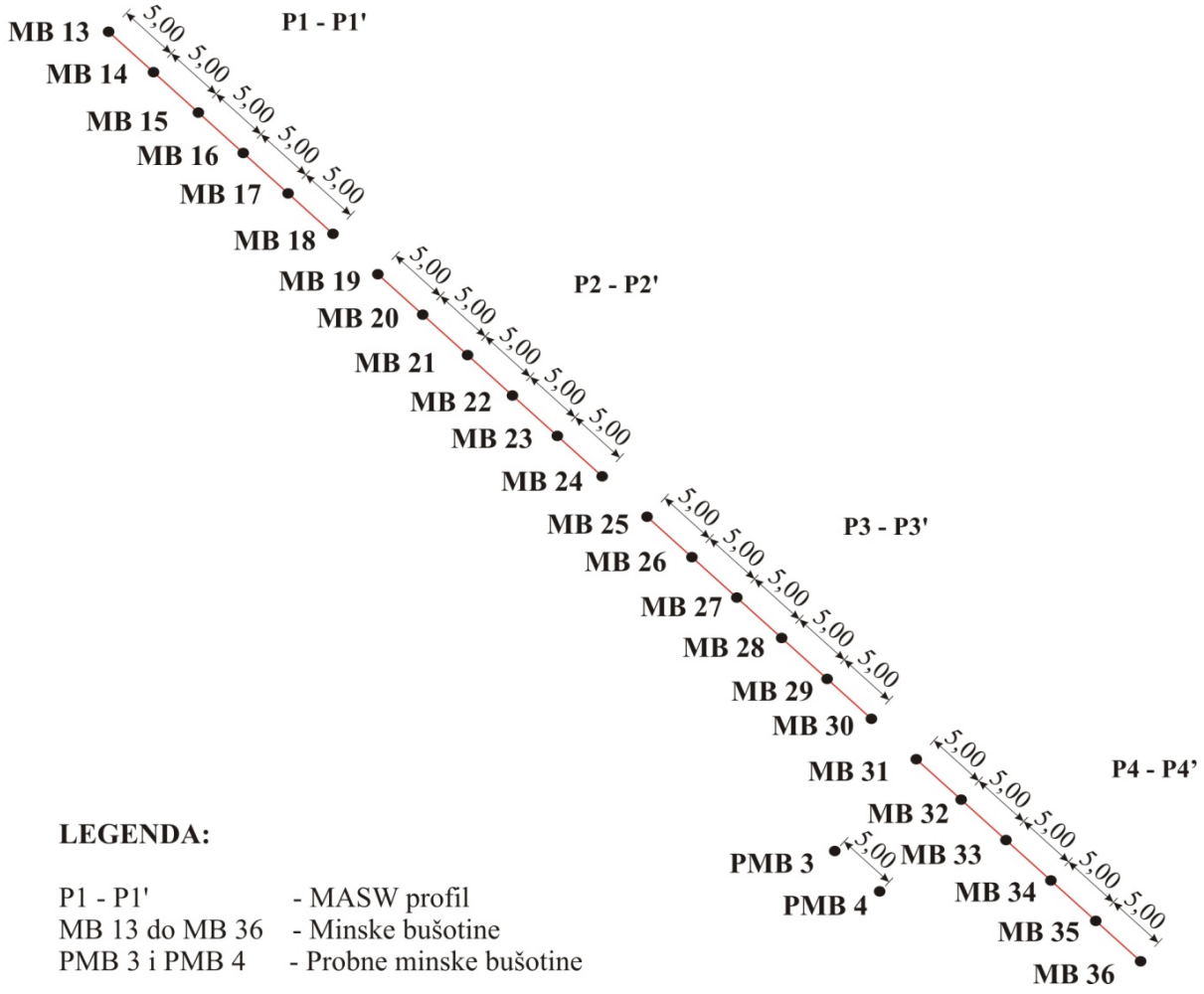
Slika 8.26 Raspored profila-minskih i probnih bušotina u 2014. godini

Svaki profil je obuhvatio 4 minske bušotine prosječne dubine 2 metra na međusobnom razmaku od 5 metara. U blizini tih profila izvedene su dvije probne minske bušotine PMB 1 i PMB 2 dubine 2 metra. Prvi profil obuhvatio je minske bušotine MB1 do MB4. Minske bušotine napunjene su eksplozivnim punjenjem Pakaex, masama 0,40 kg do 1,00 kg. Drugi profil obuhvatio je minske bušotine MB 5 do MB 8, koje su napunjene eksplozivnim punjenjem Permonex V19, masama 0,40 kg do 1,00 kg.

Refrakcijska seizmika nije se pokazala kao pogodna za predmetno istraživanje, te se stoga 2015. godine uporabila MASW metoda koja kao rezultat daje brzine *S* valova, koji su puno bolji za procjenu dinamičkih svojstava tla (krutosti).

8.2.2. Seizmička terenska ispitivanja u 2015. godini

U 2015. godini seizmička istraživanja obuhvatila su minsko polje MB 13 do MB 36, slika 8.27. Za procjenu dinamičkih svojstava glinenog tla korištena je MASW metoda.



Slika 8.27 Raspored profila-minskih i probnih bušotina u 2015. godini

Tijekom terenskih seizmičkih istraživanja metodom MASW u 2015. godini bila su izvedena ukupno 4 seizmička profila. Profili su postavljeni u liniji preko ušća minskih bušotina, te je svaki profil obuhvatio 6 minskih bušotina prosječne dubine 2,5 metra, na međusobnom razmaku od 5 metara. U blizini tih profila izvedene su dvije probne minske bušotine PMB 3 i PMB 4 dubine 2,5 metra.

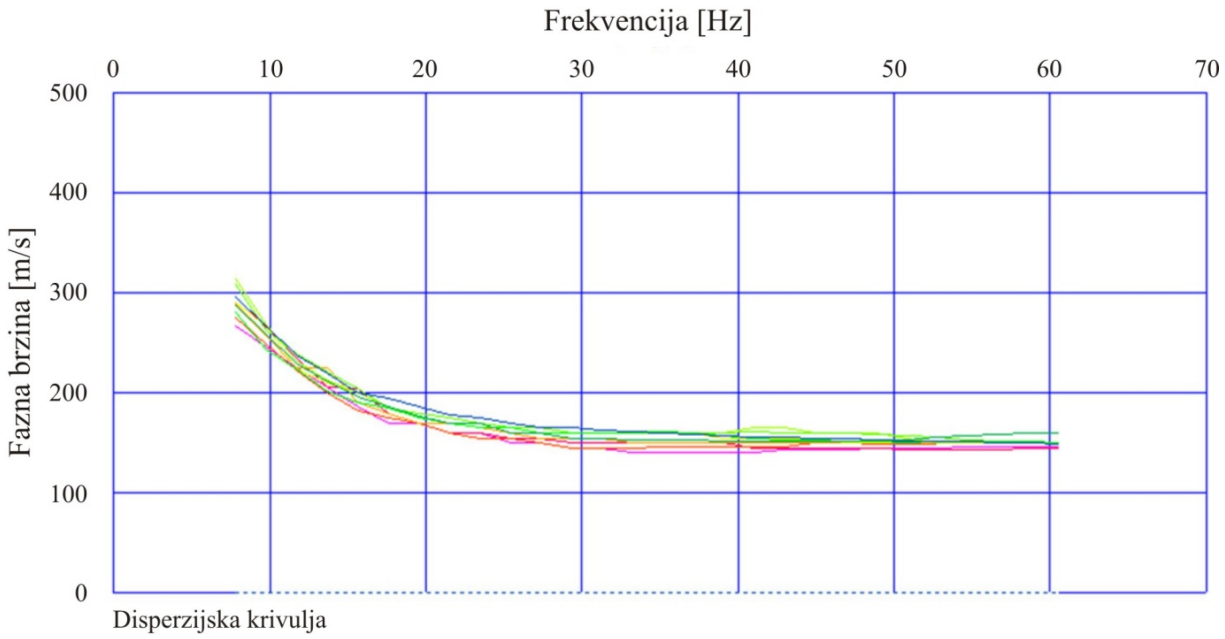
Prvi profil obuhvatio je minske bušotine MB 13 do MB 18. Minske bušotine napunjene su eksplozivnim punjenjem Pakaex, masama od 0,20 kg do 0,80 kg.

Drugi profil obuhvatio je minske bušotine MB 19 do MB 24, koje su napunjene eksplozivnim punjenjem Pakaex i Permonex V19. Minska bušotina MB 19 napunjena je eksplozivnim punjenjem Pakaex, masom 0,80 kg, a minska bušotina MB 20 napunjena je Pakaex-om, masom od 1,00 kg. Minske bušotine MB 21 do MB 24 napunjene su sa Permonex-om V19 od 0,20 kg do 0,80 kg.

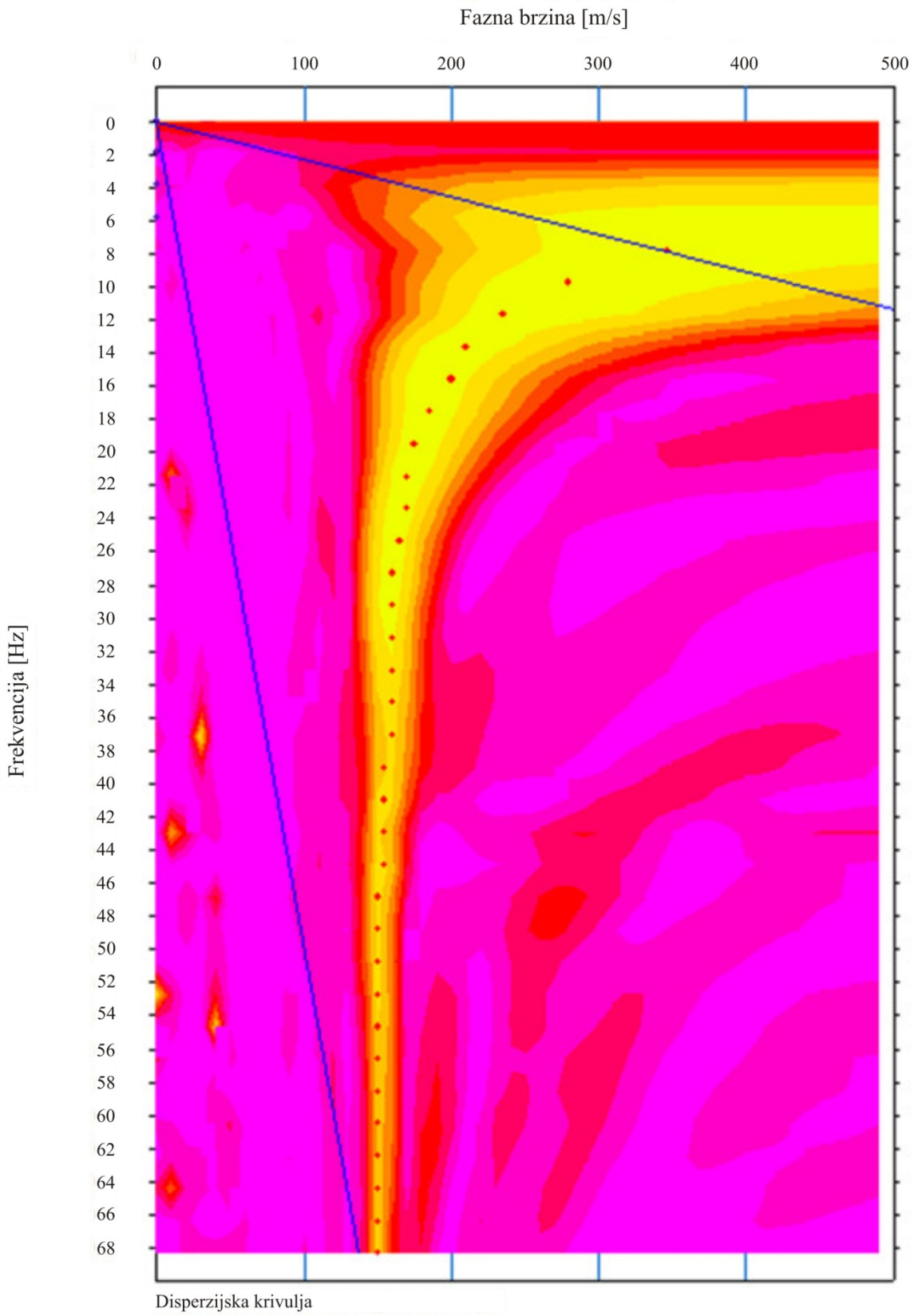
Treći profil obuhvaća minske bušotine MB 25 do MB 30, napunjene eksplozivnim punjenjem Permonex V19, masama od 0,20 kg do 1,60 kg.

Četvrtim profilom obuhvaćene su minske bušotine MB 31 do MB 36, koje su napunjene eksplozivnim punjenjem Pakaex i Permonex V19. Minska bušotina MB 31 napunjena je eksplozivnim punjenjem Permonex V19, masom od 0,20 kg. Minske bušotine MB 33 i MB 36 napunjene su Permonex-om V19 i to masama od 0,40 kg. Minske bušotine MB 32, MB 34 i MB 35 napunjene su Pakaex-om i to masama od 0,40 kg do 0,80 kg.

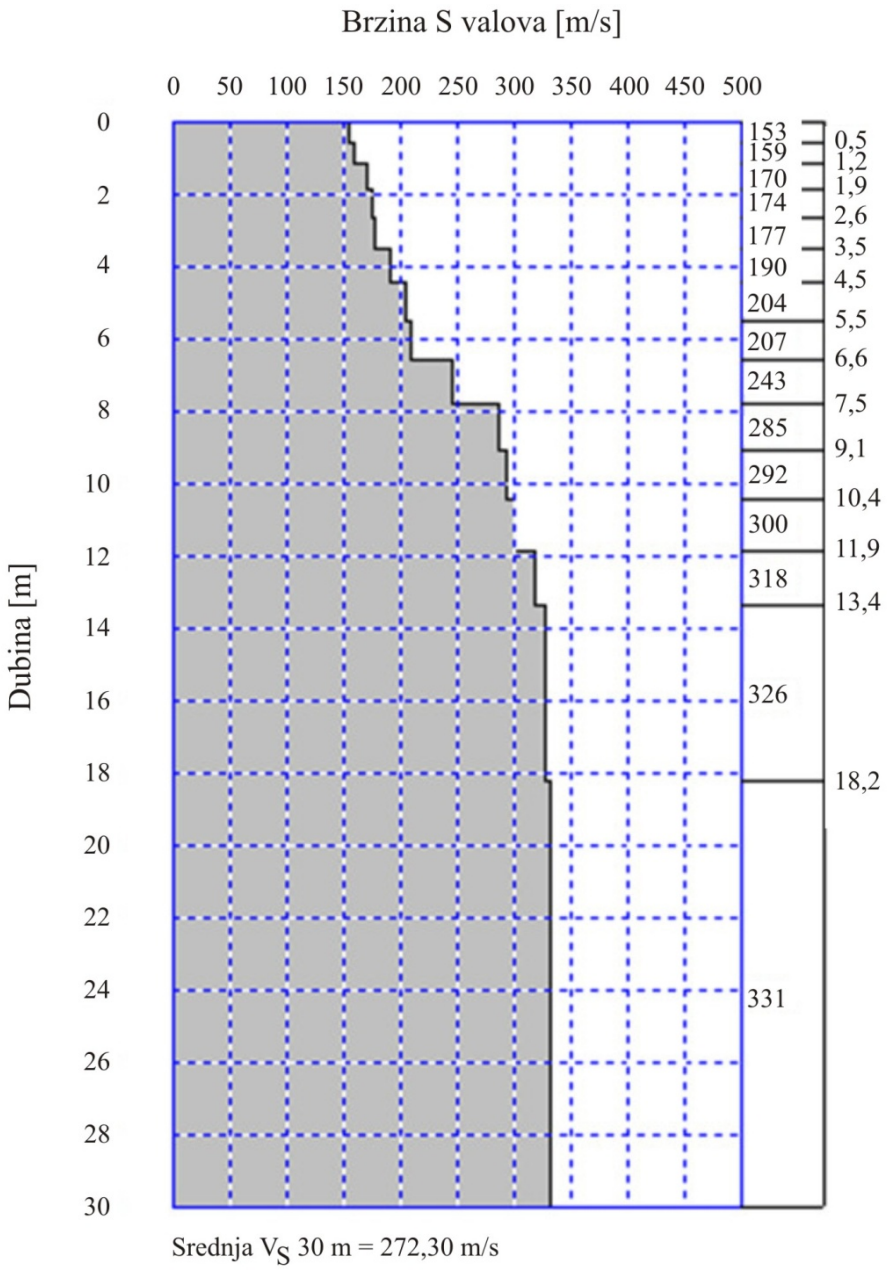
Na slikama 8.28, 8.29, 8.30 i 8.31, za procjenu dinamičkih svojstava tla, prikazani su rezultati MASW istraživanja na profilu 2 prije miniranja.



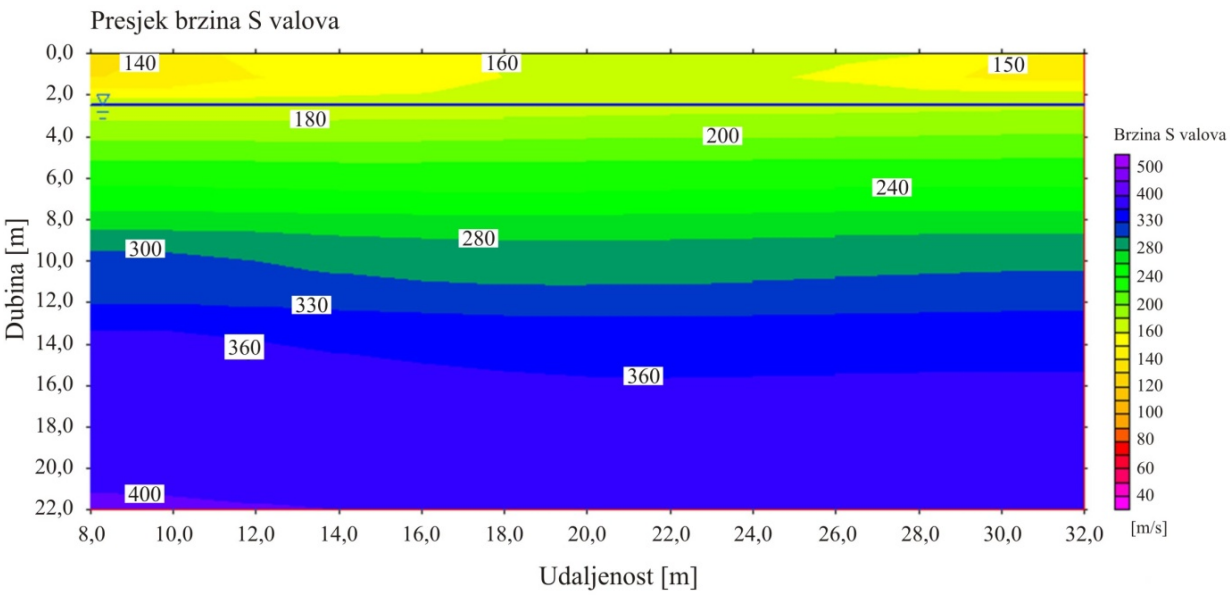
Slika 8.28 Fazna krivulja promjene brzine S valova za sredinu profila 2 prije miniranja



Slika 8.29 Disperzijska krivulja promjene brzine S valova po dubini za sredinu profila 2 prije miniranja

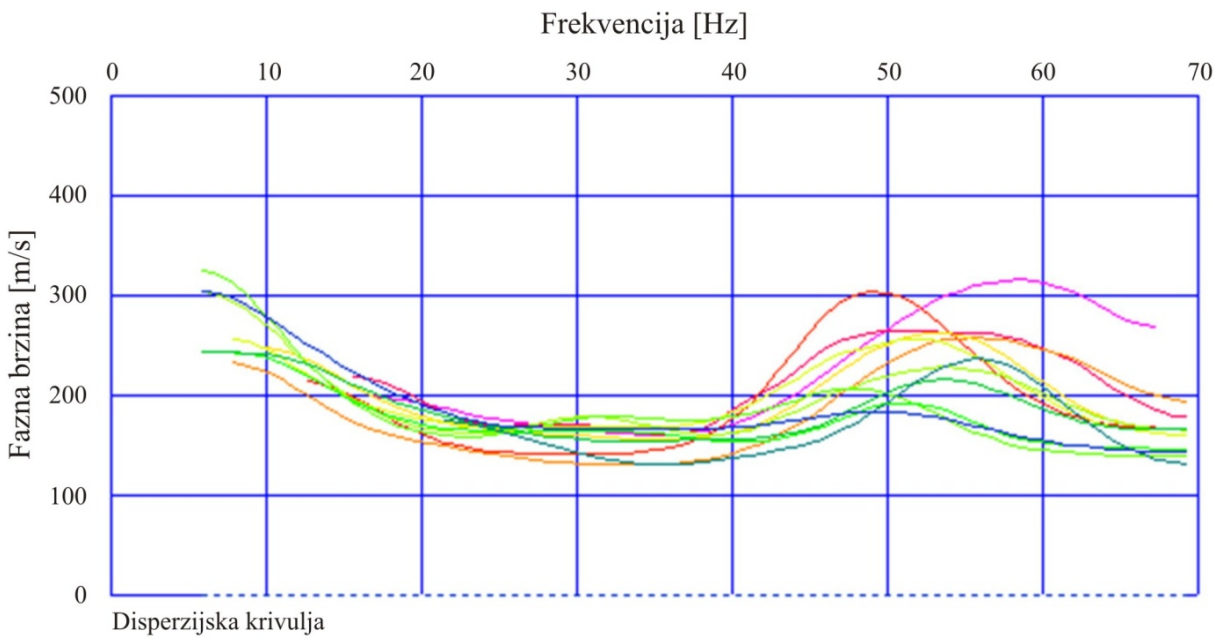


Slika 8.30 Promjene brzina S valova po dubini za sredinu profila 2 prije miniranja

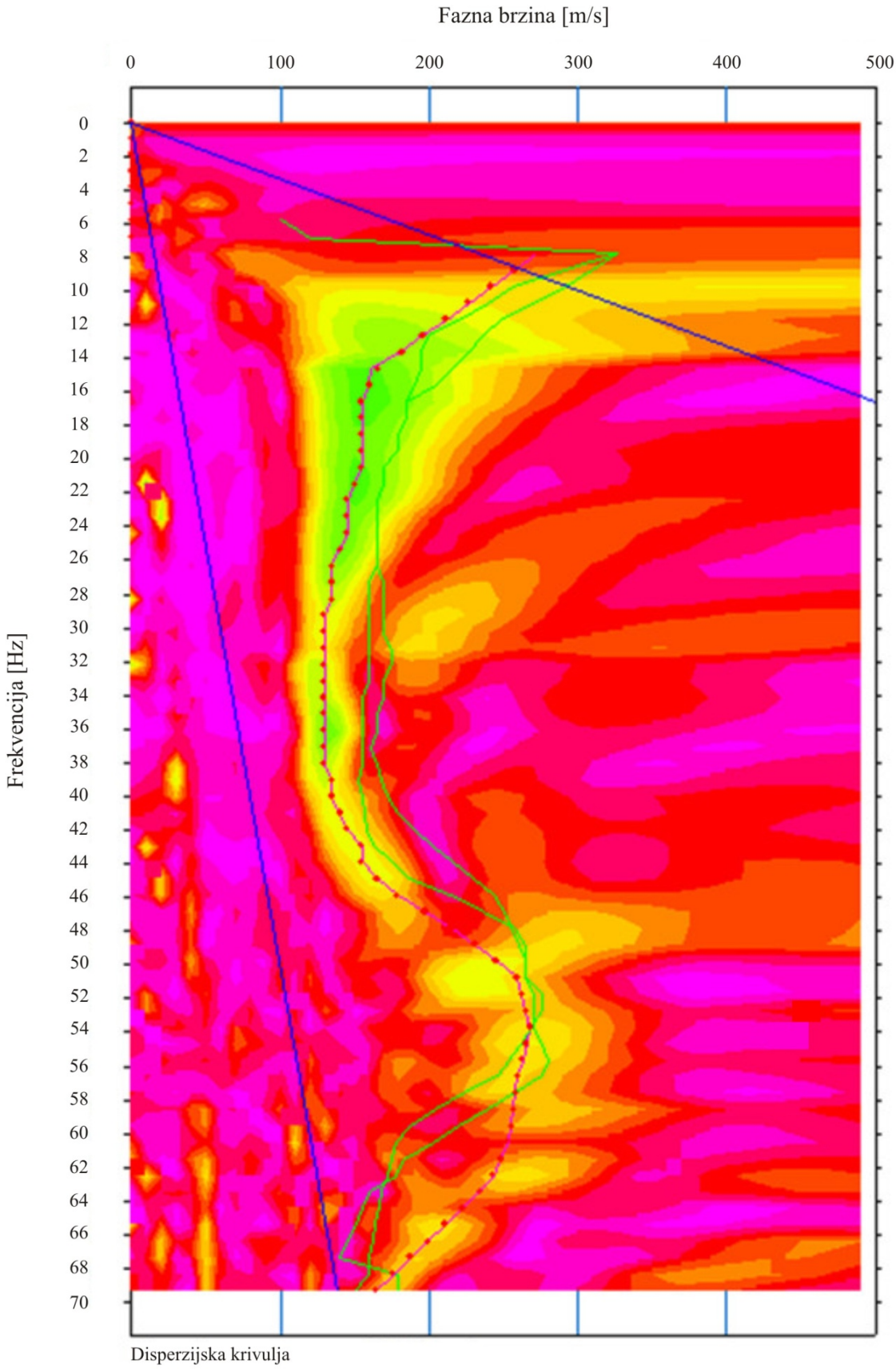


Slika 8.31 Tomografski prikaz brzina S valova na profilu 2 prije miniranja

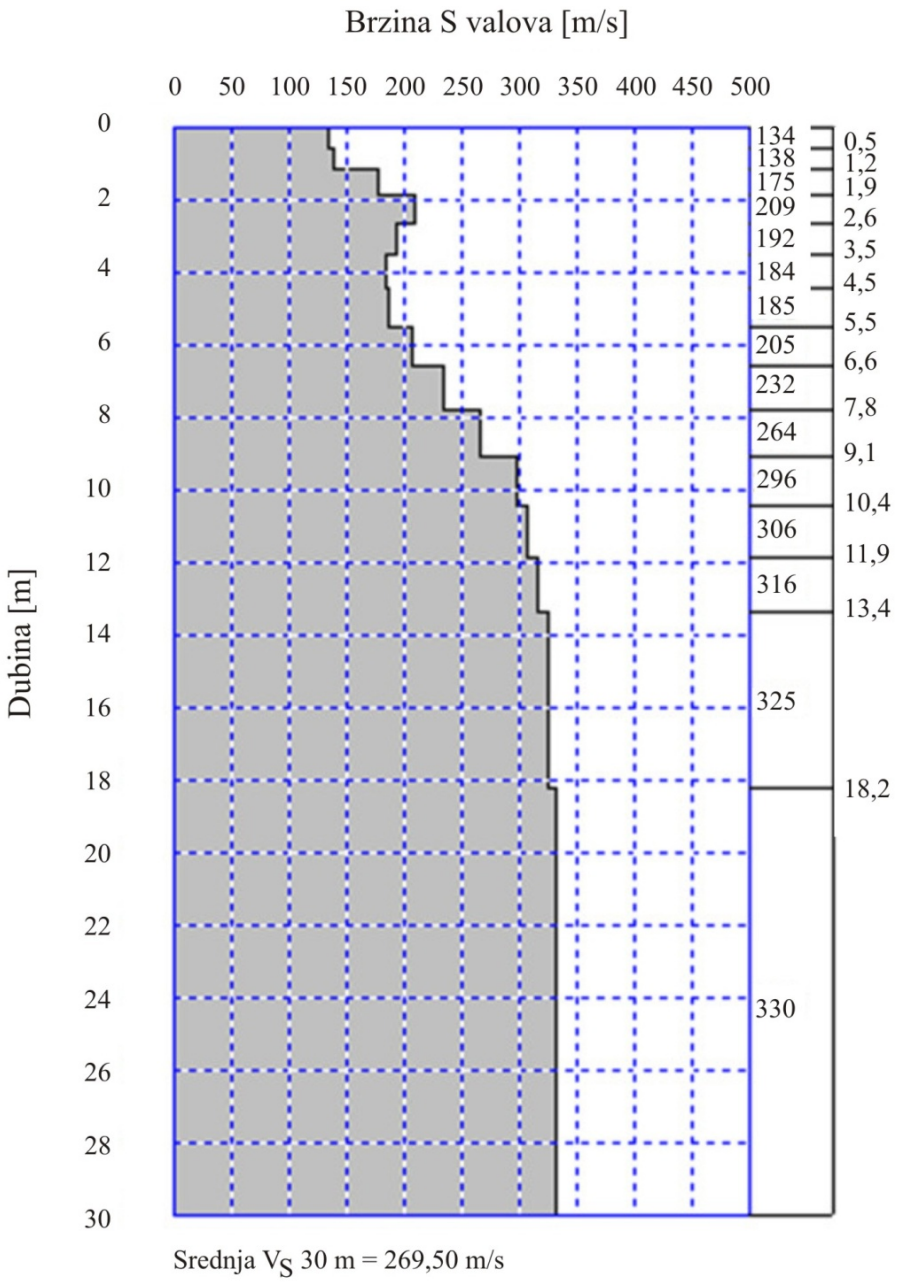
Na slikama 8.32, 8.33, 8.34 i 8.35, prikazani su rezultati MASW istraživanja na profilu 2 poslije miniranja.



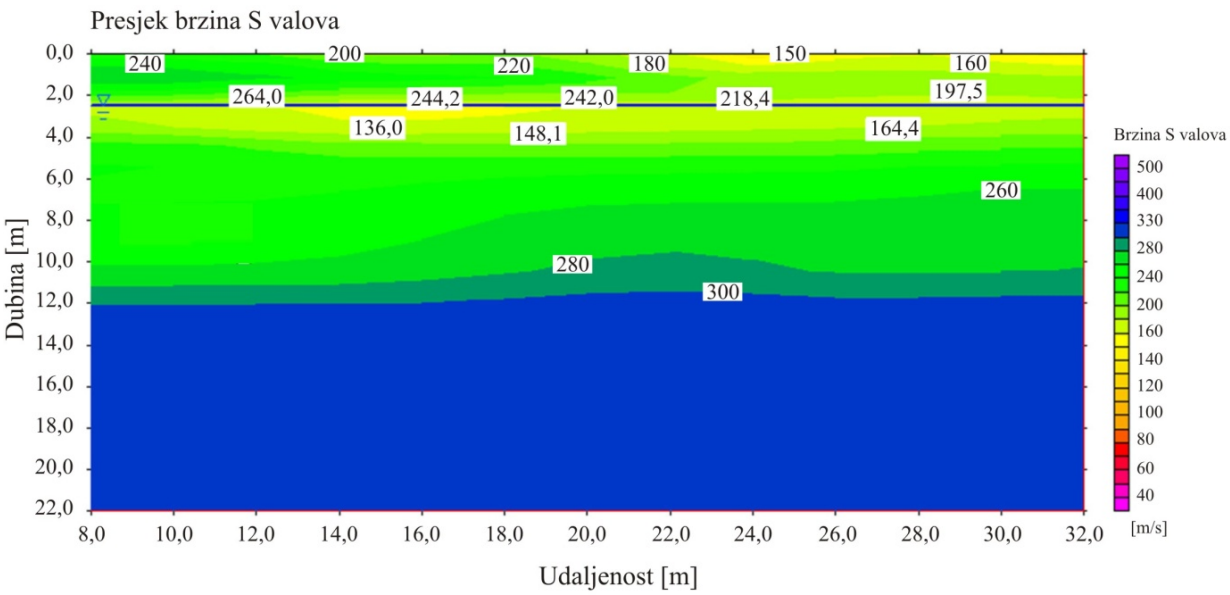
Slika 8.32 Fazna krivulja promjene brzine S valova za sredinu profila 2 poslije miniranja



Slika 8.33 Disperzijska krivulja promjene brzine S valova po dubini za sredinu profila 2 poslije miniranja

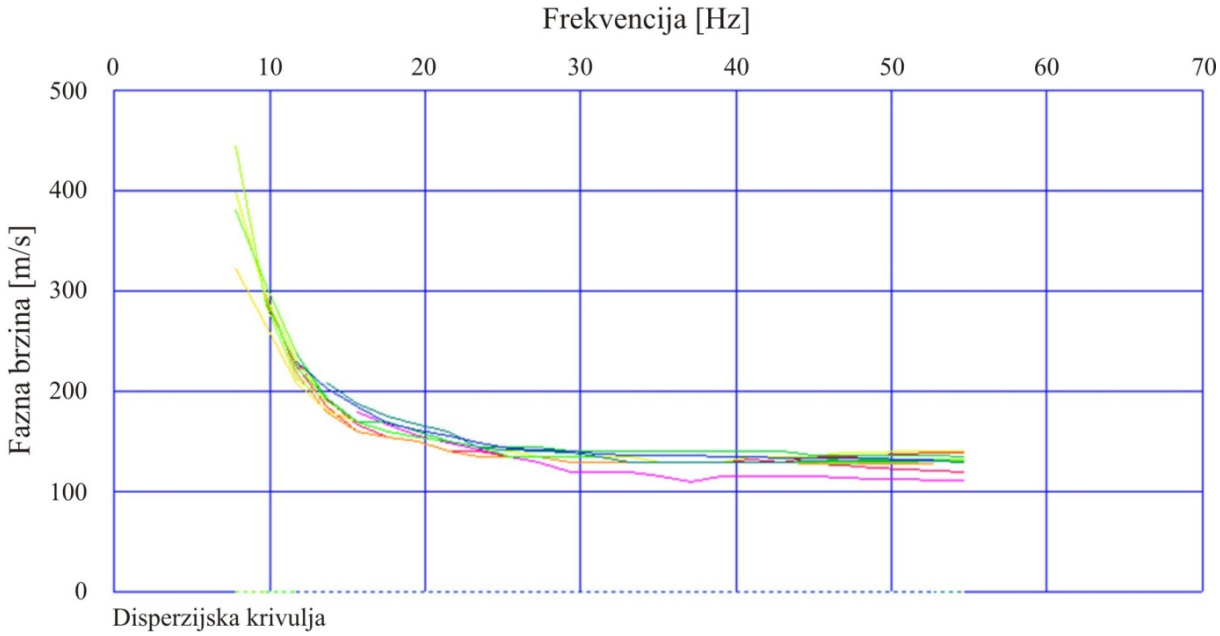


Slika 8.34 Promjene brzina S valova po dubini za sredinu profila 2 poslije miniranja

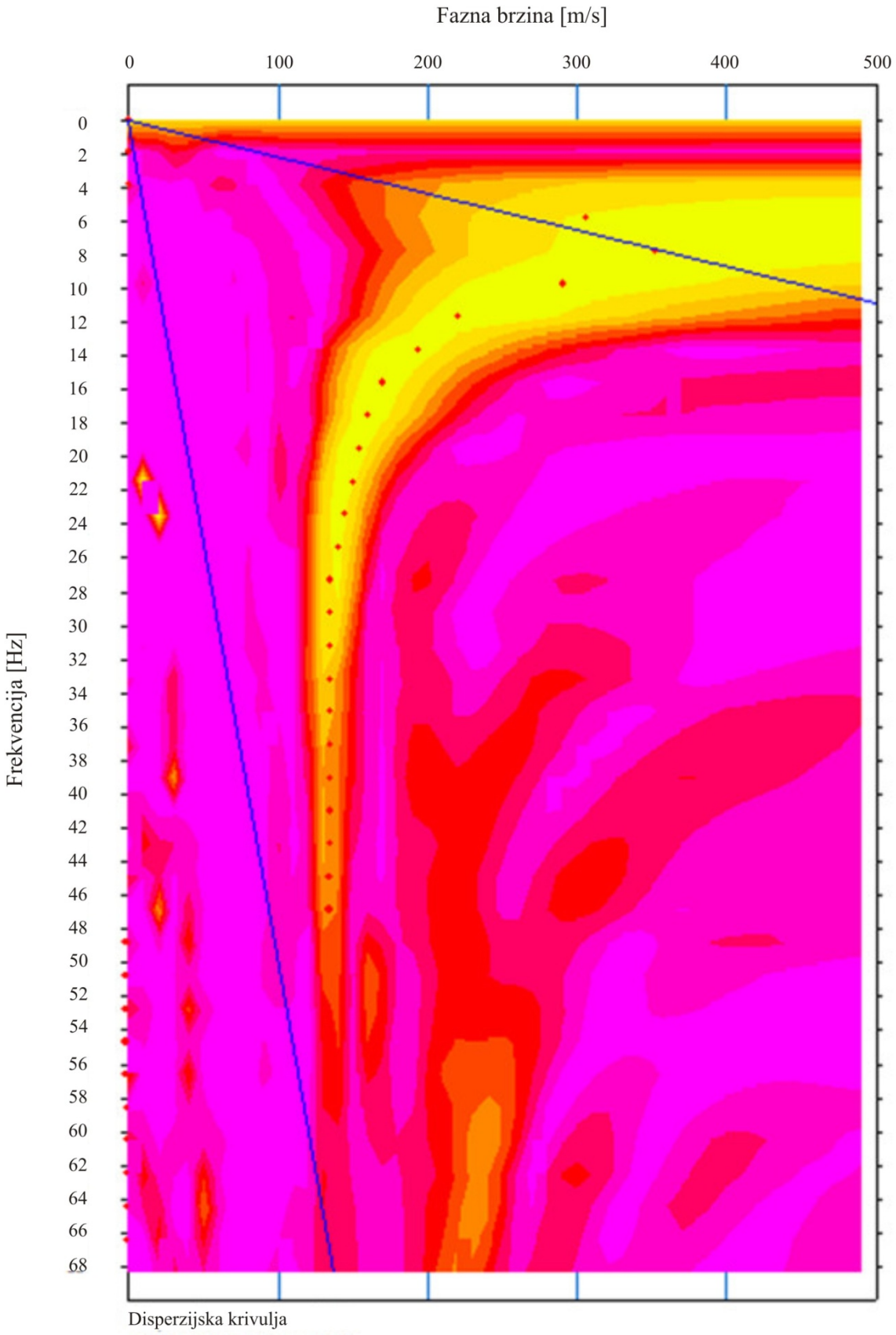


Slika 8.35 Tomografski prikaz brzina S valova na profilu 2 poslije miniranja

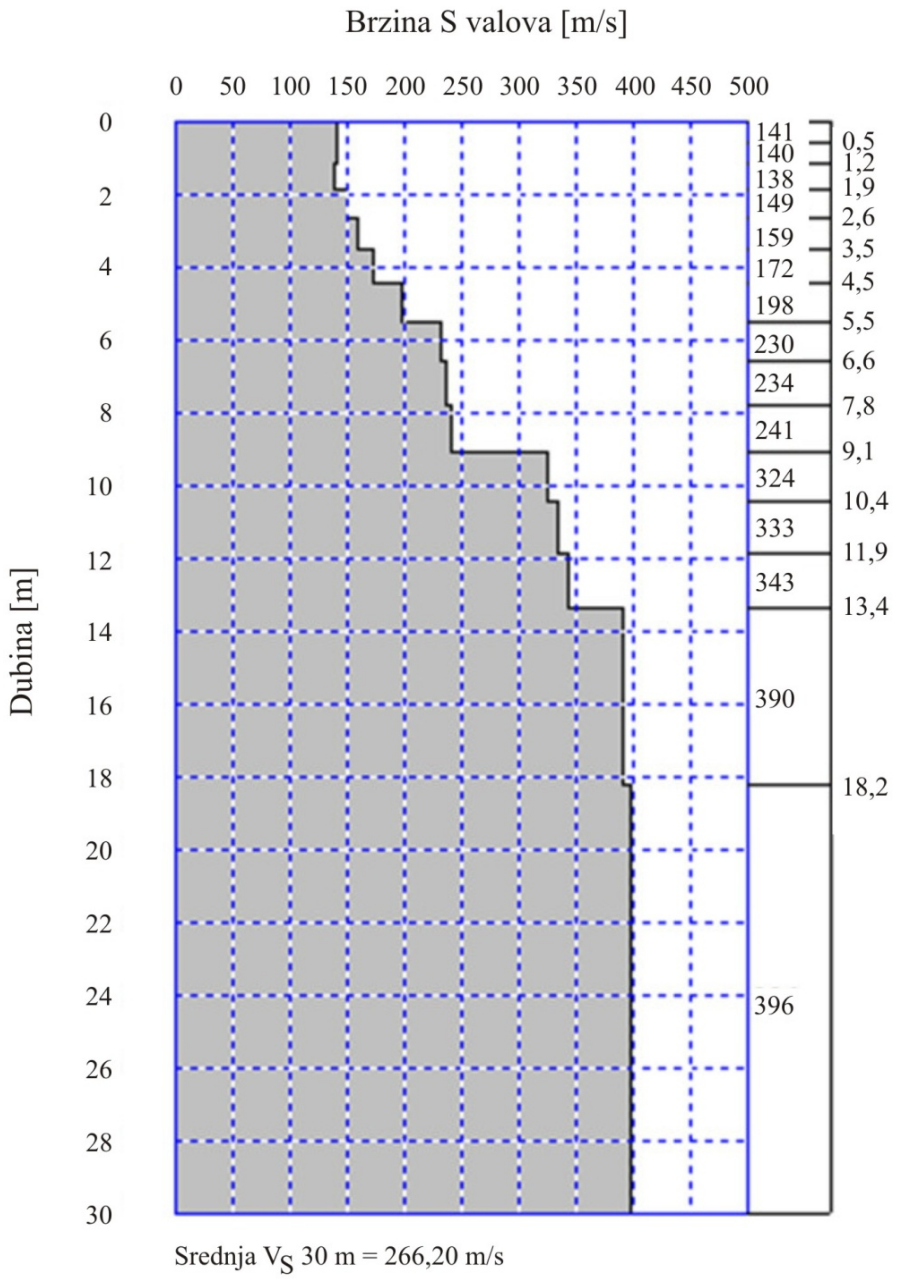
Na slikama 8.36, 8.37, 8.38 i 8.39, prikazani su rezultati MASW istraživanja na profilu 3 prije miniranja.



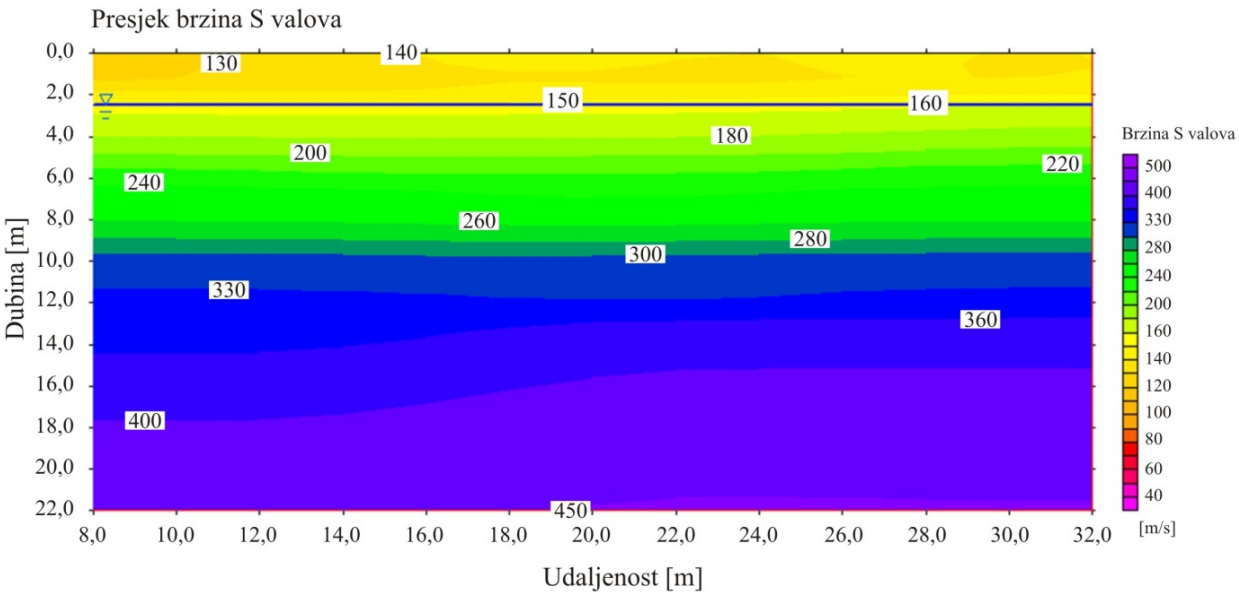
Slika 8.36 Fazna krivulja promjene brzine S valova za sredinu profila 3 prije miniranja



Slika 8.37 Disperzijska krivulja promjene brzine S valova po dubini za sredinu profila 3 prije miniranja

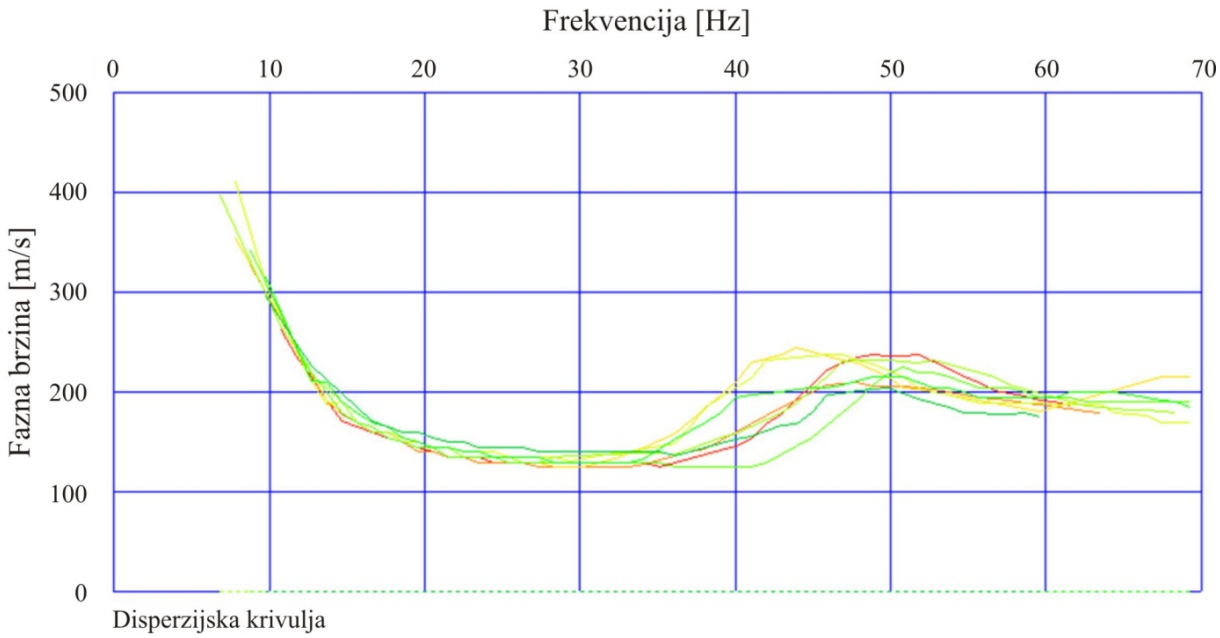


Slika 8.38 Promjene brzina S valova po dubini za sredinu profila 3 prije miniranja

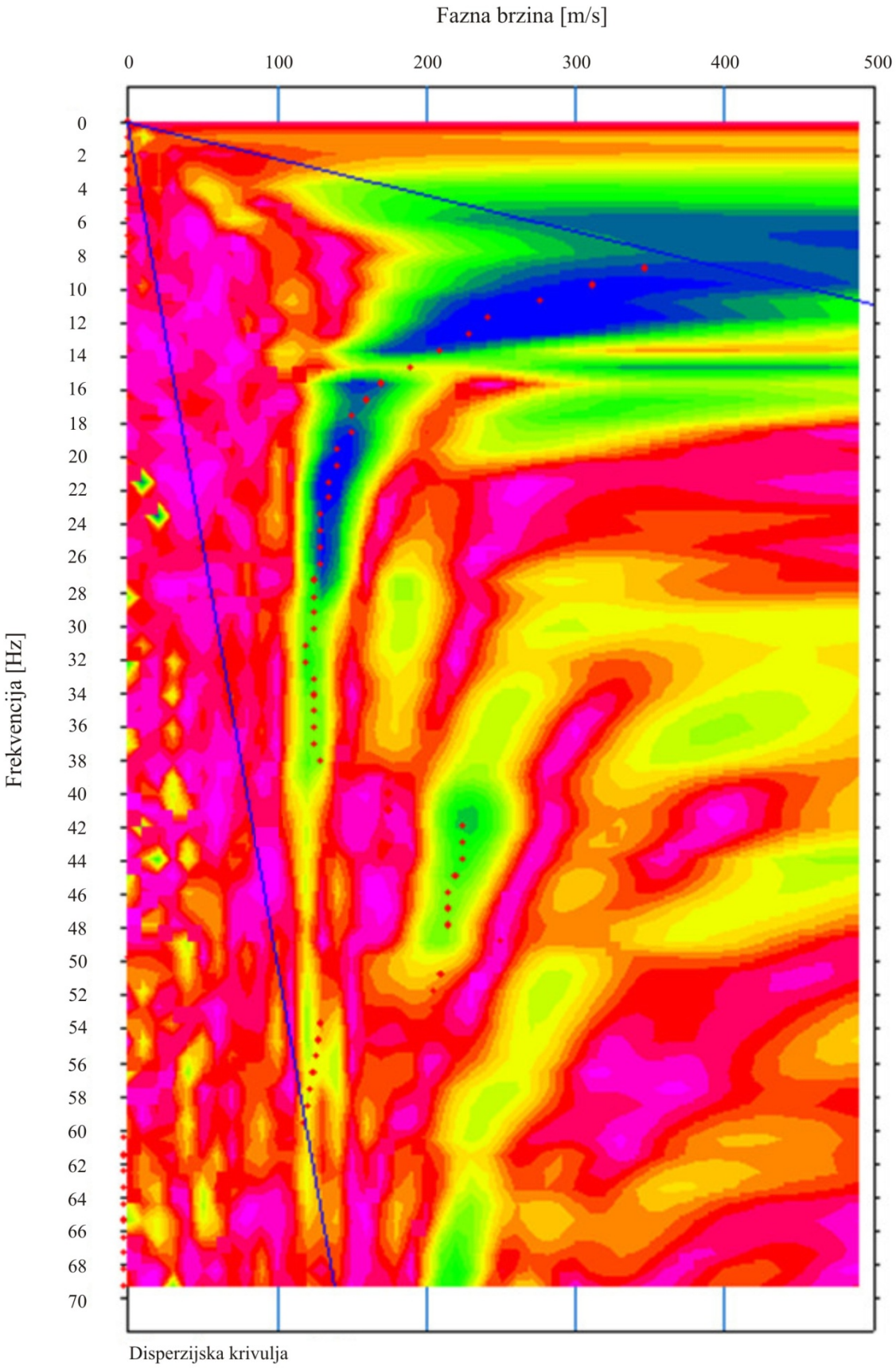


Slika 8.39 Tomografski prikaz brzina S valova na profilu 3 prije miniranja

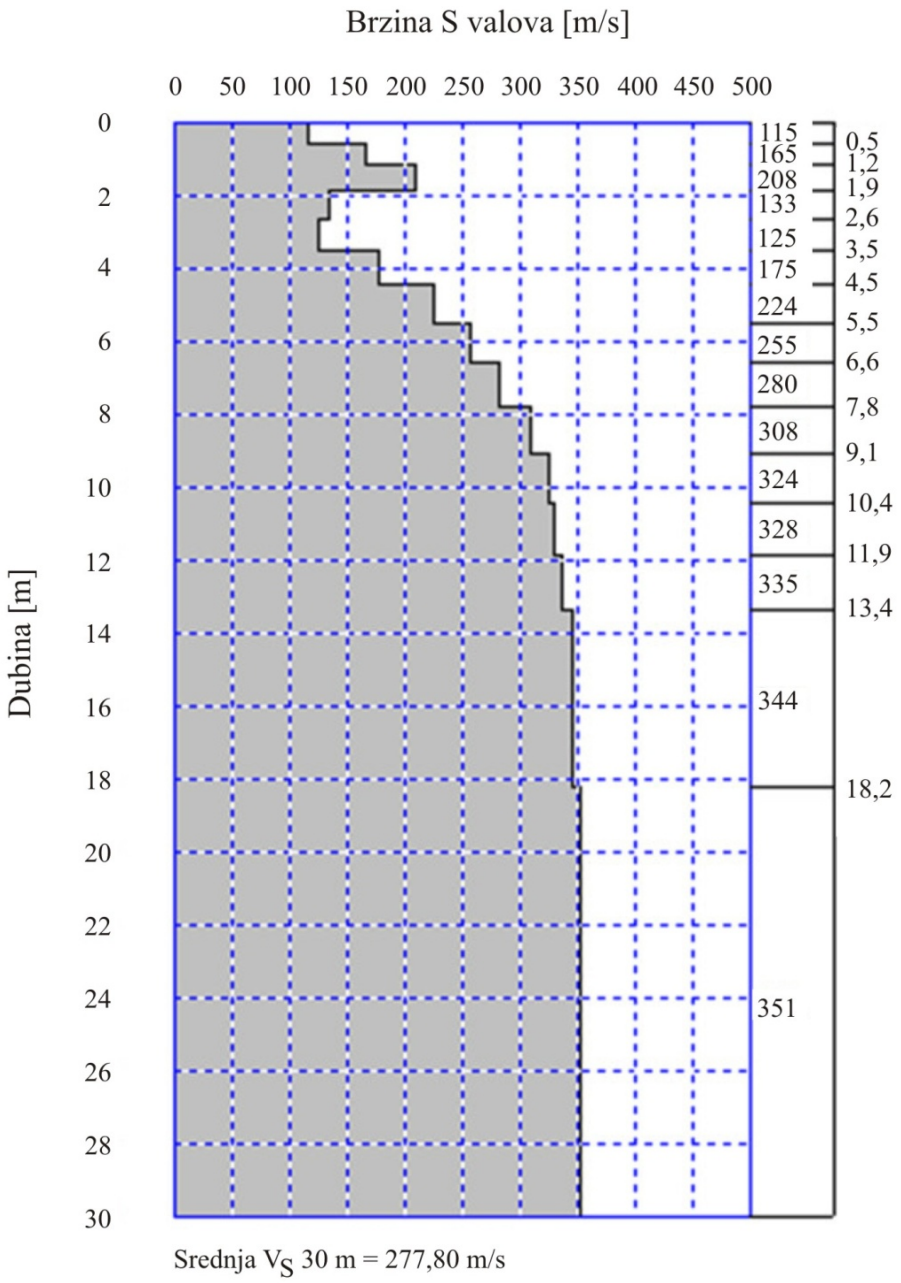
Na slikama 8.40, 8.41, 8.42 i 8.43, prikazane su brzine S valova na profilu 3 poslije miniranja.



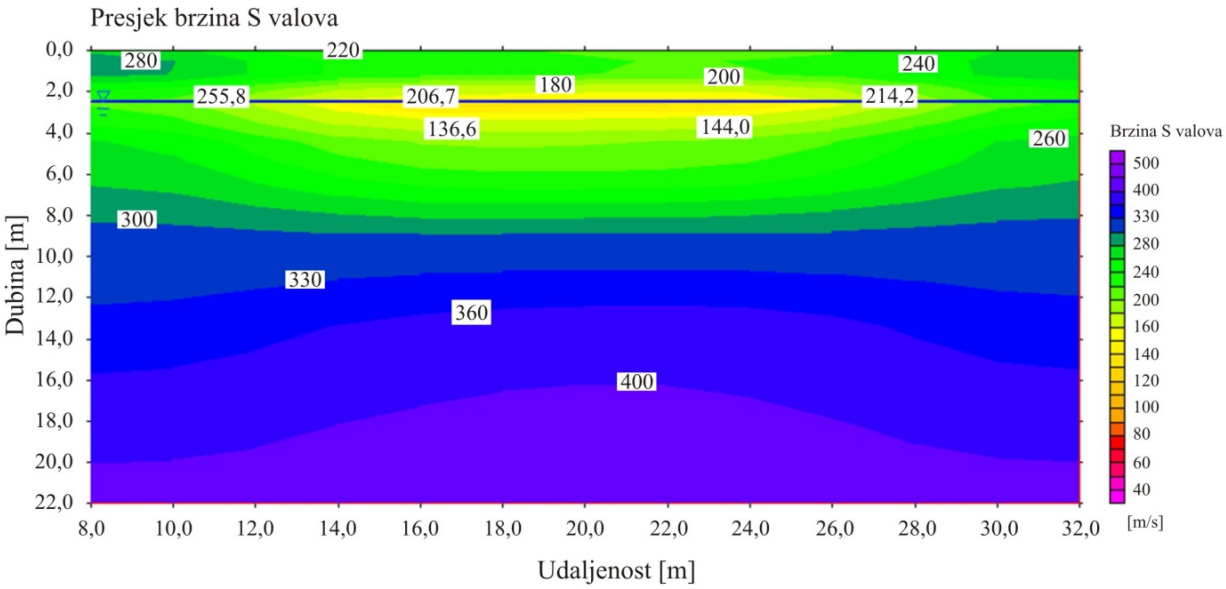
Slika 8.40 Fazna krivulja promjene brzine S valova za sredinu profila 3 poslije miniranja



Slika 8.41 Disperzijska krivulja promjene brzine S valova po dubini za sredinu profila 3 poslije miniranja



Slika 8.42 Promjene brzina S valova po dubini za sredinu profila 3 poslije miniranja



Slika 8.43 Tomografski prikaz brzina S valova na profilu 3 poslije miniranja

Na temelju gore prikazanih slika, usporedbom 1D i 2D prikaza brzina *S* valova, prije i poslije miniranja, vidljivo je kako je aktiviranjem eksplozivnih punjenja došlo do povećanja brzina *S* valova na prosječnoj dubini od 2,0 m do 3,0 m, te se može zaključiti da je došlo i do poboljšanja dinamičkih svojstava okolnog tla miniranjem.

8.2.2.1. Prikaz koeficijenta poboljšanja tla dobivenog MASW metodom

Analiza mjerenja površinskih valova provedena je na autohtonom i na poboljšanom dijelu tla. Poboljšanje tla izvedeno je kotlovskim miniranjem. Mjerenje površinskih valova MASW metodom izvedeno je kroz ušća minskih bušotina prije miniranja i nakon aktiviranja eksplozivnog punjenja.

Za određivanje stupnja poboljšanja tla rađene su usporedbe posmičnog modula (G), prije i poslije miniranja, kod malih deformacija koji je u izravnoj vezi sa posmičnom brzinom (V_S) preko izraza:

$$G = \rho_{gt} \cdot V_s^2, \qquad [\text{kN/m}^2] \qquad 8\text{-}14$$

gdje je: ρ_{gt} - gustoća glinenog tla, [g/cm^3],

V_s - posmična brzina, [m/s].

Kod analize stupnja poboljšanja glinenog tla miniranjem uzete su određene dubine mjerenja. Raspon dubina koje su se analizirale su: 0-1 m, 1-2 m i 2-3 m. Raspon promatranih dubina mjerenja uzet je zbog smještaja eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini, koji se u prosjeku kretao oko 2,0 m. Rezultati stupnja poboljšanja tla prikazani su u tablici 8.1 i 8.2.

Tablica 8.1 Prikaz raspona dobivenih parametara tla i koeficijenta poboljšanja glinenog tla za profil 2

Dubina	PRIJE MINIRANJA			POSLIJE MINIRANJA			Koeficijent poboljšanja
[m]	Gustoća glinenog tla ρ [g/cm^3]	Posmična brzina V_S [m/s]	Posmični modul G_{prije} [kPa]	Gustoća glinenog tla ρ_{gt} [g/cm^3]	Posmična brzina V_S [m/s]	Posmični modul $G_{poslije}$ [kPa]	$K = G_{poslije}/G_{prije}$
0 - 1	1,84	155	44206	1,89	136	34958	0,79
1 - 2	1,89	160	48384	1,92	175	58800	**1,22**
2 - 3	1,93	174	59106	1,96	209	85615	**1,45**

Prosječni koeficijent poboljšanja glinenog tla iz tablice 8.1 za profil 2 iznosi 1,34.

Tablica 8.2 Prikaz raspona dobivenih parametara tla i koeficijenta poboljšanja glinenog tla za profil 3

Dubina	PRIJE MINIRANJA			POSLIJE MINIRANJA			Koeficijent poboljšanja
[m]	Gustoća glinenog tla ρ [g/cm^3]	Posmična brzina V_S [m/s]	Posmični modul G_{prije} [kPa]	Gustoća glinenog tla ρ_{gt} [g/cm^3]	Posmična brzina V_S [m/s]	Posmični modul $G_{poslije}$ [kPa]	$K = G_{poslije}/G_{prije}$
0 - 1	1,84	140	36064	1,89	140	37044	1,02
1 - 2	1,89	140	37044	1,92	200	76800	**2,07**
2 - 3	1,93	150	43425	1,96	180	63504	**1,46**

Prosječni koeficijent poboljšanja glinenog tla iz tablice 8.1 za profil 3 iznosi 1,77.

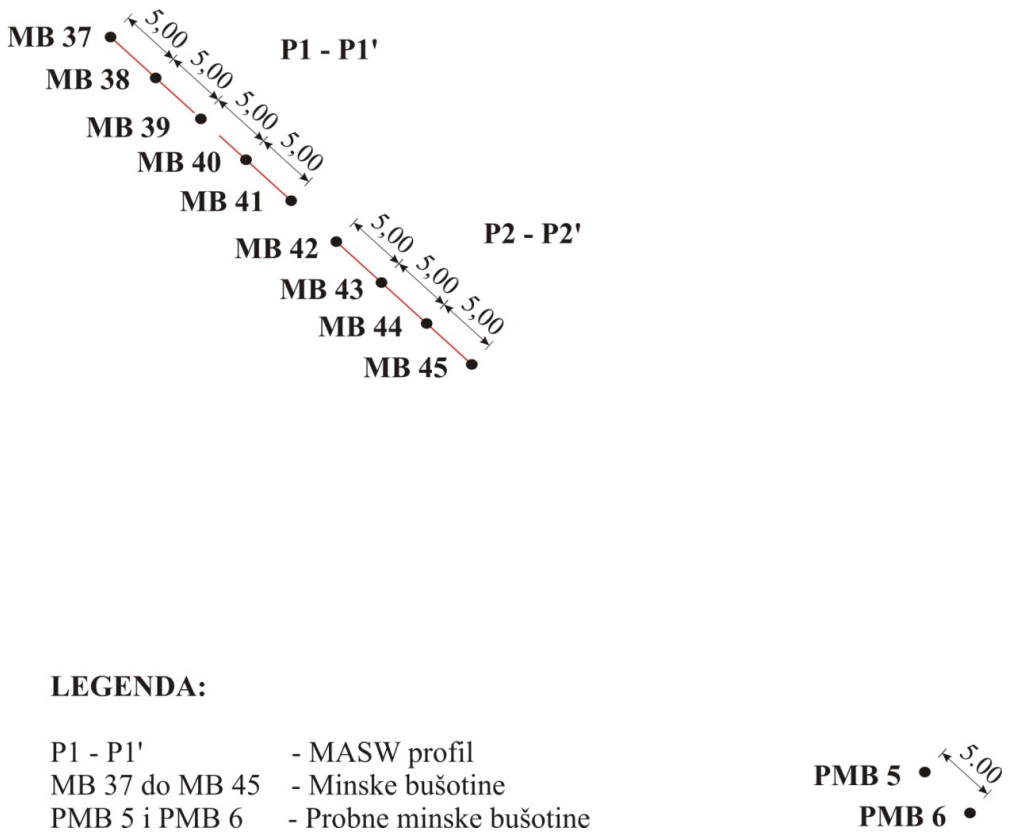
Iz dobivenih koeficijenata poboljšanja glinenog tla, na profilu 2 od 1,34 i na profilu 3 od 1,77, može se zaključiti, a što je i u skladu sa očekivanim rezultatima, da je do poboljšanja glinenog tla došlo na dubinama od 1 m do 2 m i od 2 m do 3 m.

8.2.3. Seizmička terenska ispitivanja u 2016. godini

Tijekom terenskih seizmičkih istraživanja metodom MASW u 2016. godini bila su izvedena 2 seizmička profila, slika 8.44. Profili su postavljeni kroz ušća minskih bušotina, te je svaki profil obuhvatio 5 minskih bušotina prosječne dubine 2,0 metra na međusobnom razmaku od 5 metara. U blizini tih profila aktivirane su dvije probne minske bušotine PMB 5 i PMB 6 dubine 2,0 metra.

Prvi profil obuhvatio je minske bušotine MB 37 do MB 41. Minske bušotine napunjene su eksplozivnim punjenjem Pakaex, masama 0,20 kg do 1,00 kg.

Drugi profil obuhvaća minske bušotine MB 42 do MB 45, napunjene eksplozivnim punjenjem Permonex V19, masama od 0,20 kg do 0,80 kg.



Slika 8.44 Raspored profila - minskih i probnih bušotina u 2016. godini

Snimanje glinenog tla MASW metodom, izvedeno je na isti način kao i 2015. godine, prije i poslije miniranja. Nakon interpretacije izmjerenih podataka, dobiveni su slični rezultati kakvi su već prikazani na slikama 8.28 do 8.43 i tablicama 8.1 i 8.2, čime je potvrđeno da se aktiviranjem eksplozivnih punjenja dobiva poboljšanje okolnog glinenog tla.

8.3. OBRADA LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA

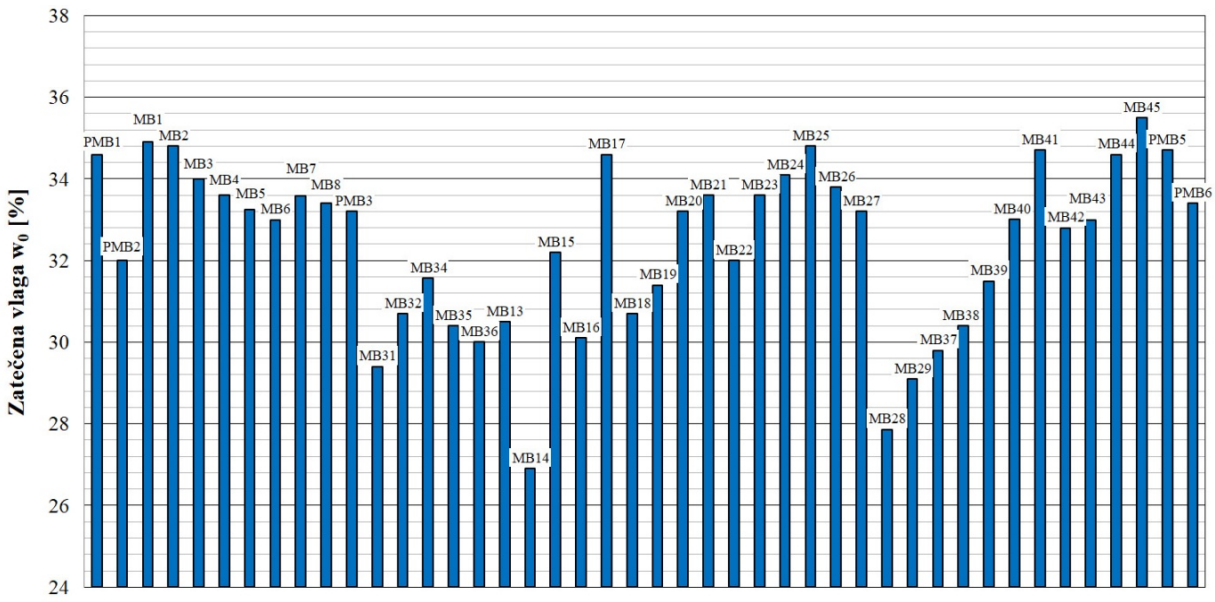
Kako su istraživanjima pokazala da je vlažnost glinenog tla najznačajniji parametar koji izravno utječe na volumen nastalog proširenja nabušeni uzorci su odmah nakon istražnog bušenja, dopremani u laboratorij na daljnju obradu, tablica 8.3 i slika 8.45.

Prema očekivanju i potpuno u skladu s teorijom posmične čvrstoće tla, s povećanjem vlažnosti smanjuje se posmična otpornost glinenog tla, u ovom slučaju iskazana kao nedrenirana čvrstoća tla odnosno nedrenirana kohezija uz prihvaćanje teoretskog uvjeta da je kut unutrašnjeg trenja jednak nuli. Trend smanjenja nedrenirane posmične čvrstoće s povećanjem vlažnosti glinenog tla i obratno, jasno je izražen na svim prikazanim dijagramima koji su tako koncipirani da krivulja povećanja ili smanjenja vlažnosti prati smanjenje odnosno povećanje nedrenirane posmične čvrstoće. Za primjer su uzete i obrađene karakteristične minske bušotine, MB 15, MB 21, MB 28 i MB 34. Slike 8.46, 8.47, 8.48 i 8.49 prikazuju trend smanjenja nedrenirane posmične čvrstoće s povećanjem vlažnosti glinenog tla i obratno. Probna minska bušotina PMB 4 i minska bušotina MB 33 su uništene radom mehanizacije.

Tablica 8.3 Određena zatečena vlaga u minskim bušotinama

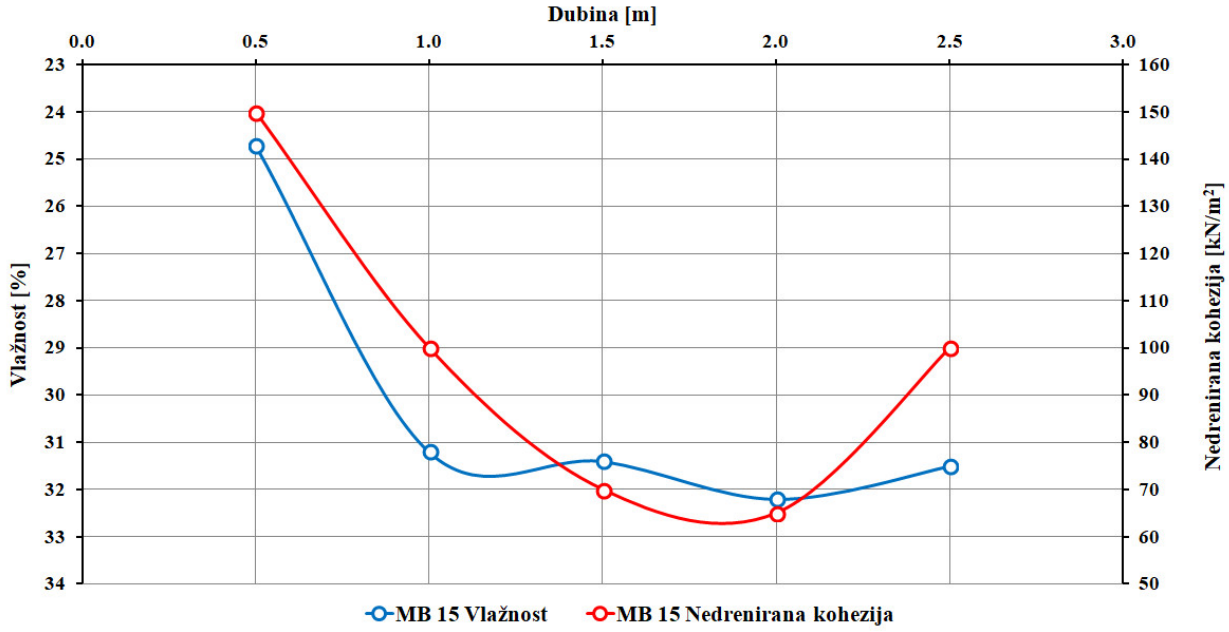
Minska bušotina	Promjer minske bušotine D_{MB} [m]	Dubina minske bušotine poslije miniranja H_{MBnm} [m]	Vrsta eksploziva	Masa eksploziva Q [kg]	Duljina čepa $L_Č$ [m]	Vrsta minskog čepa	Određena vlažnost W_0 [%]	Volumen nastalog proširenja V_{pr} [dm^3]
PMB1	0,131	2,43	Permonex V19	1,25	1,00	pijesak	34,60	872,20
PMB2	0,131	2,27	Permonex V19	0,50	1,00	pijesak	32,00	371,65
PMB3	0,131	3,50	Pakaex	1,60	1,00	pijesak	33,20	807,00
PMB5	0,131	2,52	Permonex V19	0,80	0,50	pijesak	34,70	722,70
PMB6	0,131	2,45	Permonex V19	0,60	0,50	pijesak	33,40	615,05
MB1	0,131	2,44	Pakaex	1,00	0,5/0,5	pijesak/ glina	34,90	751,65
MB2	0,131	2,38	Pakaex	0,80	0,5/0,5	pijesak/ glina	34,80	574,70
MB3	0,131	2,41	Pakaex	0,60	0,5/0,5	pijesak/ glina	34,00	507,10
MB4	0,131	2,23	Pakaex	0,40	0,5/0,5	pijesak/ glina	33,60	461,55
MB5	0,131	2,14	Permonex V19	0,40	0,5/0,5	pijesak/ glina	33,25	323,00
MB6	0,131	2,14	Permonex V19	0,60	0,5/0,5	pijesak/ glina	33,00	436,96
MB7	0,131	2,36	Permonex V19	0,80	0,5/0,5	pijesak/ glina	33,58	656,95

Minska bušotina	Promjer minske bušotine D_{MB} [m]	Dubina minske bušotine poslije miniranja H_{MBnm} [m]	Vrsta eksploziva	Masa eksploziva Q [kg]	Duljina čepa $L_Č$ [m]	Vrsta minskog čepa	Određena vlažnost W_0 [%]	Volumen nastalog proširenja V_{pr} [dm^3]
MB8	0,131	2,48	Permonex V19	1,00	0,5/0,5	pijesak/ glina	33,40	835,50
MB13	0,131	2,62	Pakaex	0,20	0,50	pijesak	30,50	100,50
MB14	0,131	2,74	Pakaex	0,20	0,50	pijesak	26,90	64,50
MB15	0,131	2,78	Pakaex	0,40	0,50	pijesak	32,20	244,50
MB16	0,131	2,83	Pakaex	0,40	0,50	pijesak	30,10	194,50
MB17	0,131	2,85	Pakaex	0,60	0,50	pijesak	34,60	616,00
MB18	0,131	2,64	Pakaex	0,80	0,50	pijesak	30,70	344,00
MB19	0,131	2,68	Pakaex	0,80	0,50	pijesak	31,40	362,60
MB20	0,131	3,06	Pakaex	1,00	0,50	pijesak	33,20	710,00
MB21	0,131	2,72	Permonex V19	0,40	0,50	pijesak	33,60	292,50
MB22	0,131	2,16	Permonex V19	0,20	0,50	pijesak	32,00	82,50
MB23	0,131	2,59	Permonex V19	0,60	0,50	pijesak	33,60	527,60
MB24	0,131	2,50	Permonex V19	0,80	0,50	pijesak	34,10	618,40
MB25	0,131	2,60	Permonex V19	0,60	0,50	pijesak	34,80	633,00
MB26	0,131	2,70	Permonex V19	0,80	0,50	pijesak	33,80	569,00
MB27	0,131	2,51	Permonex V19	0,40	0,50	pijesak	33,20	216,00
MB28	0,131	2,40	Permonex V19	0,20	0,50	pijesak	27,86	70,00
MB29	0,131	2,25	Pakaex	0,20	0,50	pijesak	29,10	98,00
MB31	0,131	3,20	Permonex V19	0,20	0,30	pijesak	29,40	80,50
MB32	0,131	3,28	Pakaex	0,40	0,30	pijesak	30,70	154,50
MB34	0,131	3,10	Pakaex	0,80	0,50	pijesak	31,57	393,50
MB35	0,131	3,05	Pakaex	0,60	0,50	pijesak	30,40	255,50
MB36	0,131	3,25	Permonex V19	0,40	0,50	pijesak	30,00	113,50
MB37	0,131	2,30	Pakaex	0,20	0,50	pijesak	29,80	117,50
MB38	0,131	2,50	Pakaex	0,40	0,50	pijesak	30,40	298,00
MB39	0,131	2,50	Pakaex	0,60	0,50	pijesak	31,50	378,50
MB40	0,131	2,50	Pakaex	0,80	0,50	pijesak	33,01	519,00
MB41	0,131	2,70	Pakaex	1,00	0,50	pijesak	34,70	809,50
MB42	0,131	2,30	Permonex V19	0,20	0,50	pijesak	32,80	148,00
MB43	0,131	2,45	Permonex V19	0,40	0,50	pijesak	33,00	281,50
MB44	0,131	2,55	Permonex V19	0,60	0,32	pijesak	34,60	769,50
MB45	0,131	2,50	Permonex V19	0,80	0,50	pijesak	35,50	740,50

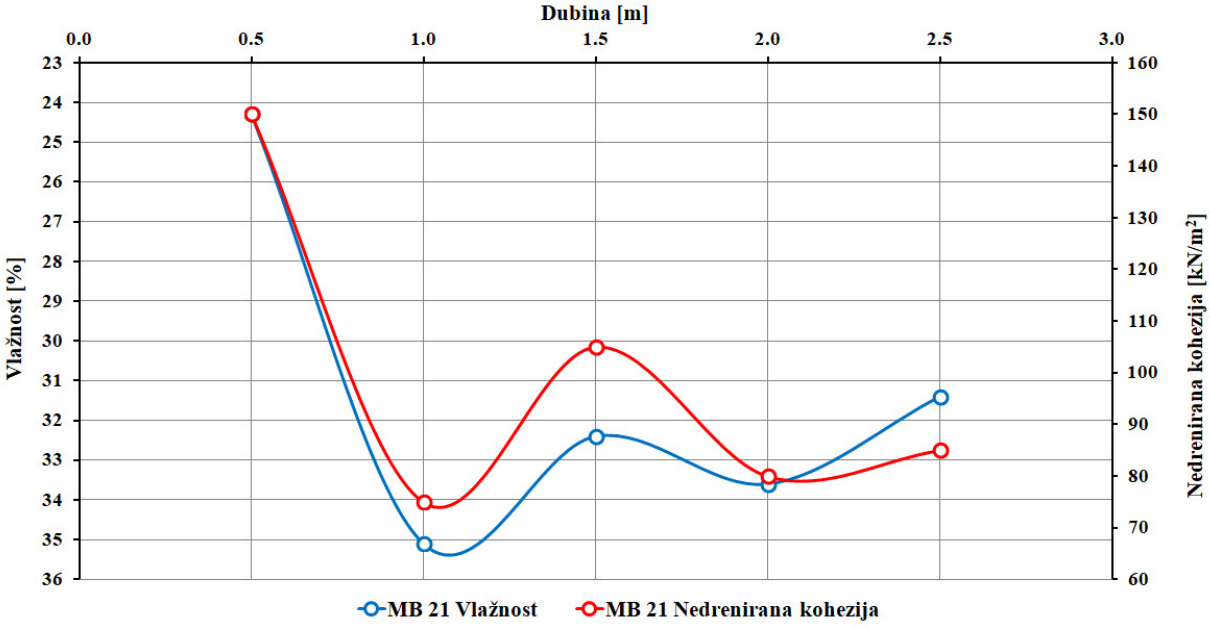


Slika 8.45 Zatečena vlaga w_0 [%] u minskim bušotinama

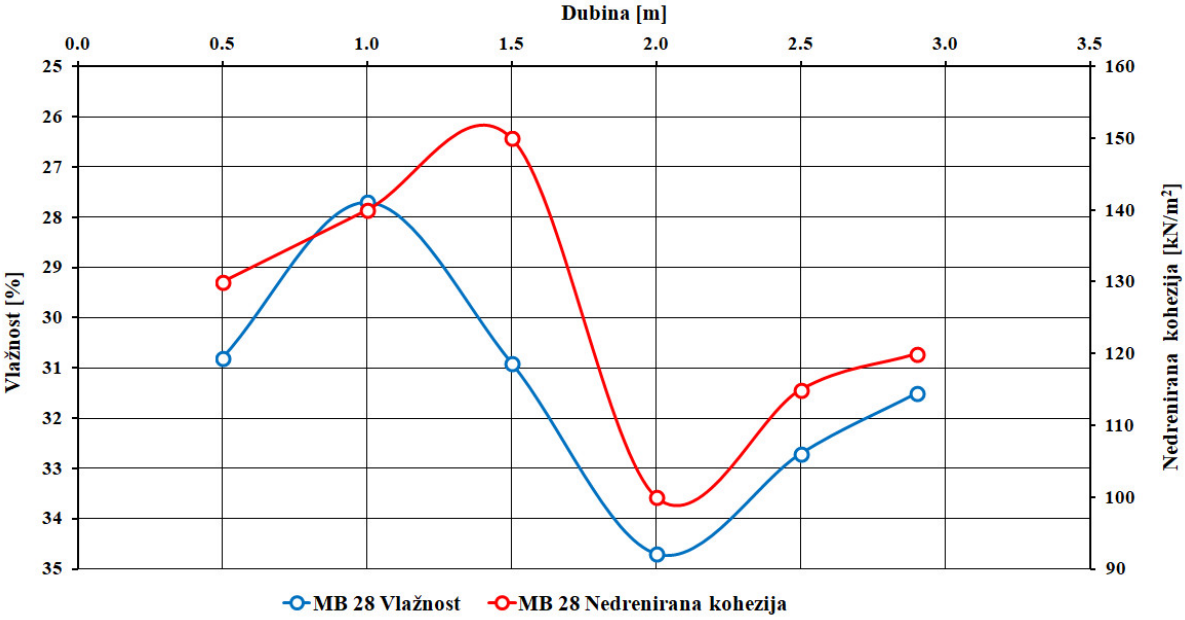
Nedrenirana posmična čvrstoća određena je indirektnom metodom pomoću džepnog penetrometra prema normi SN 670 350. Tlačna čvrstoća je određivana penetrometrom neposredno prije uzimanja uzorka za određivanje vlažnosti pa se dobivene vrijednosti mogu u potpunosti međusobno vezati.



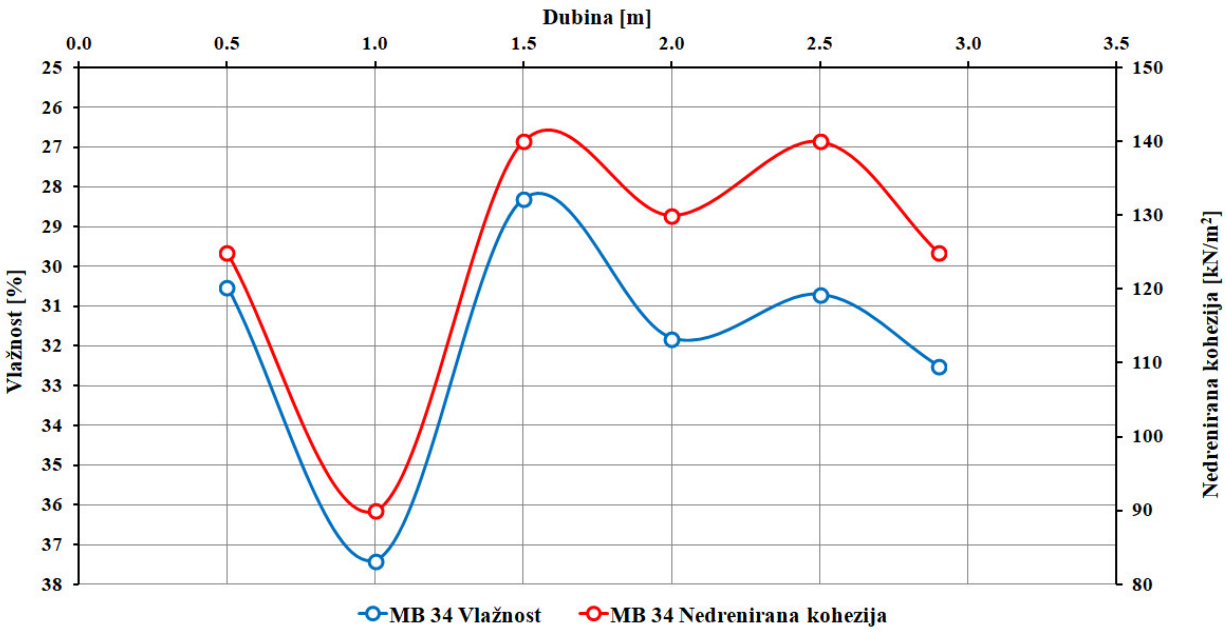
Slika 8.46 Povećanje ili smanjenje nedrenirane posmične čvrstoće s povećanjem ili smanjenjem vlažnosti glinenog tla u minskoj bušotini MB 15



Slika 8.47 Povećanje ili smanjenje nedrenirane posmične čvrstoće s povećanjem ili smanjenjem vlažnosti glinenog tla u minskoj bušotini MB 21

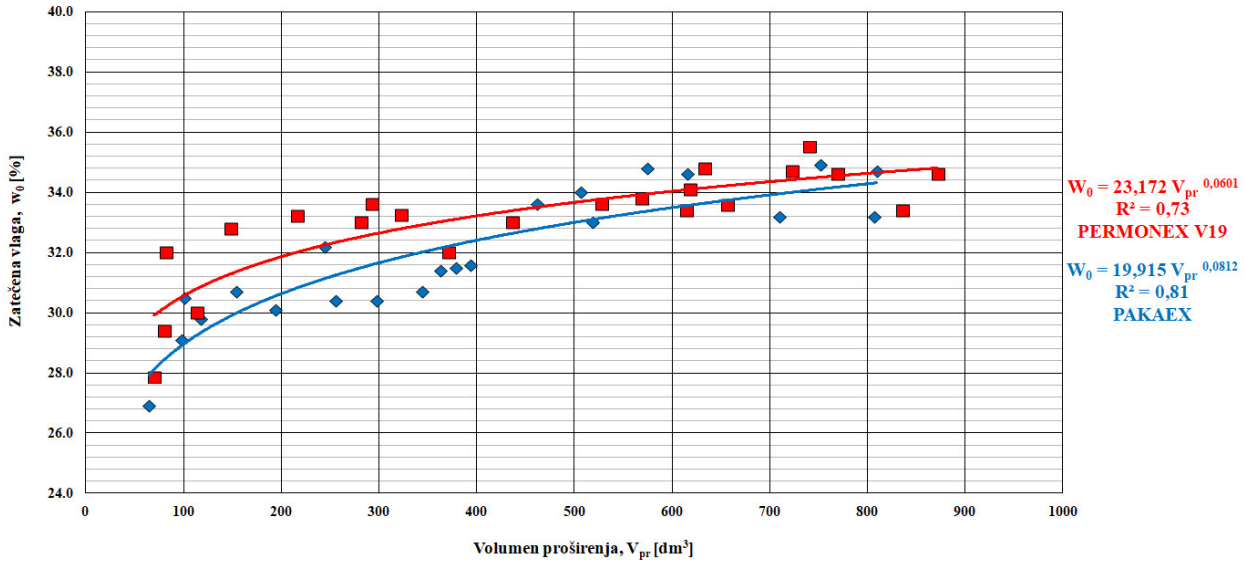


Slika 8.48 Povećanje ili smanjenje nedrenirane posmične čvrstoće s povećanjem ili smanjenjem vlažnosti glinenog tla u minskoj bušotini MB 28



Slika 8.49 Povećanje ili smanjenje nedrenirane posmične čvrstoće s povećanjem ili smanjenjem vlažnosti glinenog tla u minskoj bušotini MB 34

Radi obrade i određivanja nastalog volumena kuglastog proširenja, bilo je potrebno odrediti ovisnost volumena nastalog proširenja o zatečenoj vlazi u minskim bušotinama. Dokazano je da promjena vlažnosti ima izravan utjecaj na efekte miniranja. Naime, pri povećanoj vlažnosti tlačni val eksplozije ima jači utjecaj na nastalo kuglasto proširenje, slika 8.50. Iz slike 8.50 vidljiv je direktan utjecaj zatečene vlage u minskim bušotinama. Prilikom veće vlažnosti nastaju veća kuglasta proširenja, a time i veći volumen proširenja.



Slika 8.50 Dijagram ovisnosti zatečene vlage w_0 [%] o nastalom volumenu proširenja V_{pr} [dm^3]

8.4. OVISNOST BRZINE OSCILACIJE TLA O REDUCIRANOJ UDALJENOSTI

Prilikom izvođenja pokusnih miniranja na eksploatacijskom polju Cukavec II, mjerene su i brzine oscilacija tla kako je to već navedeno u radu, tablice 8.4, 8.5, 8.6 i 8.7. Rezultati opažanja ovisnosti brzina oscilacija PVS [mm/s] o reduciranim udaljenostima SD [m/kg^2] u 2014., 2015. i 2016. godini, prikazan je dijagramom na slici 8.51. Izmjerene brzine oscilacija koherentnog glinovitog tla daleko su veće nego kod čvrstih stijena. To je dokazano brojnim mjerenjima i usporedbama intenziteta oscilacija u čvrstim i slabijim stijenama (Mesec J., 2005; Mesec J. et al., 2009; Mesec J. et al., 2010), slika 8.52.

Tablica 8.4 Rezultati opažanja ovisnosti brzina oscilacija PVS [mm/s] o reduciranim udaljenostima SD [m/kg^2], 12. lipnja 2014. godine

Minsko polje **MP**	**Mjesto opažanja (seizmograf)** **MO**	**Brzina oscilacije tla** **PVS [mm/s]**	**Udaljenost** **D [m]**	**Maksimalno eksplozivno punjenje po minskoj bušotini** **CW [kg]**	**Reducirana udaljenost** **SD [m/kg^2]**	**Glavna frekvencija** **f [Hz]**
lipanj 2014. godine - Probno miniranje (12 minskih bušotina, dubina minskih bušotina = 1,94 m - 2,9 m, promjer minskih bušotina = 0,131 m, razmak između minskih bušotina = 5,0 m)						
1	MO1	18,17	27,03	0,50	34,06	15
	MO2	29,11	15,77	0,50	19,88	18
	MO3	-	4,36	0,50	5,49	19
	MO4	28,20	15,44	0,50	19,45	15
	MO5	16,95	29,67	0,50	37,38	30
2	MO1	23,77	26,65	1,25	24,74	13
	MO2	-	15,65	1,25	14,53	12
	MO3	-	5,68	1,25	5,27	15
	MO4	49,66	16,48	1,25	15,30	12
	MO5	25,87	30,46	1,25	28,28	11
3	MO1	-	12,24	1,00	12,24	11
	MO2	-	4,88	1,00	4,88	23
	MO3	-	16,28	1,00	16,28	12
	MO4	23,50	30,62	1,00	30,62	11
	MO5	18,44	44,97	1,00	44,97	11
4	MO1	36,77	19,70	1,00	19,70	13
	MO2	-	15,12	1,00	15,12	19
	MO3	34,10	20,88	1,00	20,88	16
	MO4	19,21	32,69	1,00	32,69	11
	MO5	14,51	46,10	1,00	46,10	11
5	MO1	20,32	37,76	1,00	37,76	13
	MO2	20,07	35,12	1,00	35,12	14
	MO3	17,08	37,51	1,00	37,51	16
	MO4	13,62	44,72	1,00	44,72	14
	MO5	11,24	55,02	1,00	55,02	13

Tablica 8.5 Rezultati opažanja ovisnosti brzina oscilacija PVS [mm/s] o reduciranim udaljenostima SD [m/kg^2], 12. lipnja 2015. godine

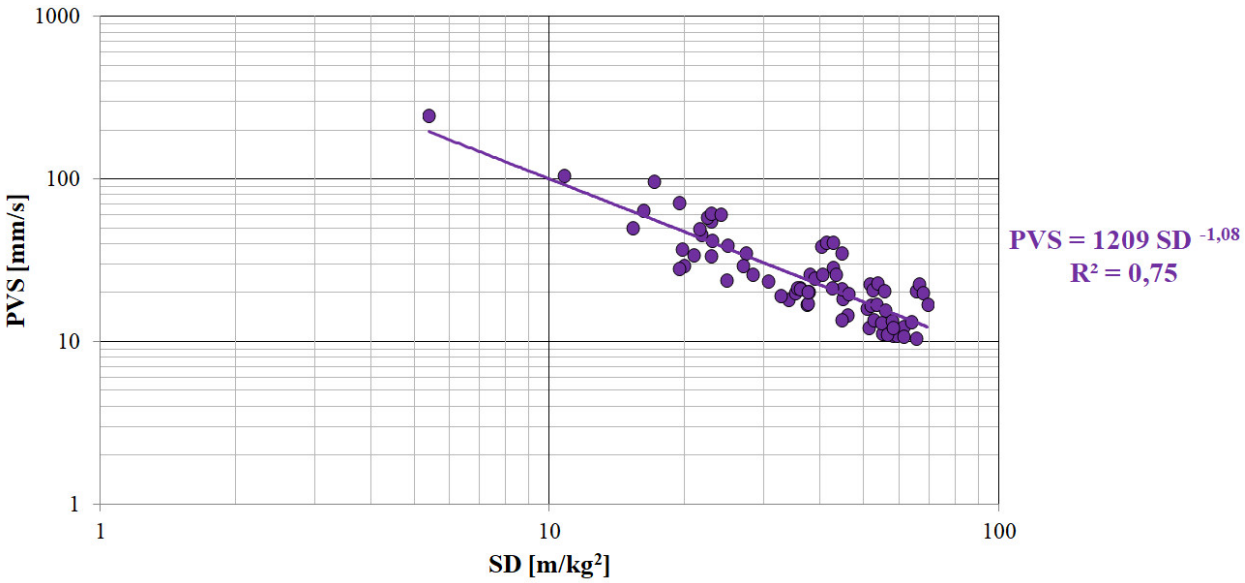
Minsko polje **MP**	**Mjesto opažanja (seizmograf)** **MO**	**Brzina oscilacije tla** **PVS [mm/s]**	**Udaljenost** **D [m]**	**Maksimalno eksplozivno punjenje po minskoj bušotini** **CW [kg]**	**Reducirana udaljenost** **SD [m/kg^2]**	**Glavna frekvencija** **f [Hz]**
lipanj 2015, godine - Probno miniranje (8 minskih bušotina, dubina minskih bušotina = 2,5 m - 3,0 m, promjer minskih bušotina = 0,131 m, razmak između minskih bušotina = 5,0 m)						
1	MO1	-	-	-	-	-
	MO2	54,88	26,73	1,60	22,86	10
	MO3	58,30	26,26	1,60	22,45	11
	MO4	61,48	26,73	1,60	22,85	11
	MO5	60,56	28,10	1,60	24,02	12
2	MO1	-	-	-	-	-
	MO2	21,29	30,41	0,60	36,06	12
	MO3	21,41	30,00	0,60	35,57	12
	MO4	20,97	30,41	0,60	36,06	12
	MO5	20,13	31,62	0,60	37,49	12
3	MO1	-	-	-	-	-
	MO2	20,36	55,23	0,60	65,48	11
	MO3	22,56	55,90	0,60	66,28	10
	MO4	20,07	57,01	0,60	67,59	10
	MO5	16,83	58,52	0,60	69,39	10
4	MO1	-	-	-	-	-
	MO2	16,01	42,79	0,60	50,74	15
	MO3	16,60	43,66	0,60	51,77	11
	MO4	16,90	45,07	0,60	53,44	11
	MO5	15,60	46,97	0,60	55,69	12
5	MO1	-	-	-	-	-
	MO2	10,83	42,79	0,40	58,08	13
	MO3	10,84	43,66	0,40	59,26	12
	MO4	12,33	45,07	0,40	61,17	13
	MO5	13,13	46,97	0,40	63,75	15
6	MO1	-	-	-	-	-
	MO2	12,19	37,83	0,40	51,35	14
	MO3	13,66	38,81	0,40	52,67	15
	MO4	12,95	40,39	0,40	54,82	15
	MO5	13,47	42,50	0,40	57,68	15
7	MO1	-	-	-	-	-
	MO2	11,08	32,88	0,20	56,23	15
	MO3	12,14	34,00	0,20	58,15	13
	MO4	10,82	35,79	0,20	61,21	14
	MO5	10,39	38,16	0,20	65,25	16
8	MO1	-	-	-	-	-
	MO2	22,60	47,76	0,80	51,45	10
	MO3	20,74	48,54	0,80	52,29	10
	MO4	22,87	49,81	0,80	53,66	10
	MO5	20,48	51,54	0,80	55,52	10

Tablica 8.6 Rezultati opažanja ovisnosti brzina oscilacija PVS [mm/s] o reduciranim udaljenostima SD [m/kg^2], 20. srpnja 2015. godine

Minsko polje MP	Mjesto opažanja (seizmograf) MO	Brzina oscilacije tla PVS [mm/s]	Udaljenost D [m]	Maksimalno eksplozivno punjenje po minskoj bušotini CW [kg]	Reducirana udaljenost SD [m/kg^2]	Glavna frekvencija f [Hz]
srpanj 2015. godine - Probno miniranje (18 minskih bušotina, dubina minskih bušotina = 2,0 m - 2,5 m, promjer minskih bušotina = 0,131 m, razmak između minskih bušotina = 5,0 m)						
1	MO1	-	-	-	-	-
	MO2	45,28	25,50	1,60	21,80	12
	MO3	41,83	26,93	1,60	23,02	11
	MO4	38,87	29,15	1,60	24,92	10
	MO5	34,76	32,02	1,60	27,38	10
2	MO1	-	-	-	-	-
	MO2	245,50	5,00	0,80	5,39	47
	MO3	105,32	10,00	0,80	10,77	57
	MO4	63,69	15,00	0,80	16,16	85
	MO5	49,51	20,00	0,80	21,54	23
3	MO1	-	-	-	-	-
	MO2	38,32	40,31	1,00	40,31	13
	MO3	40,58	41,23	1,00	41,23	12
	MO4	40,62	42,72	1,00	42,72	12
	MO5	34,77	44,72	1,00	44,72	12

Tablica 8.7 Rezultati opažanja ovisnosti brzina oscilacija PVS [mm/s] o reduciranim udaljenostima SD [m/kg^2], 31. kolovoz 2016. godine

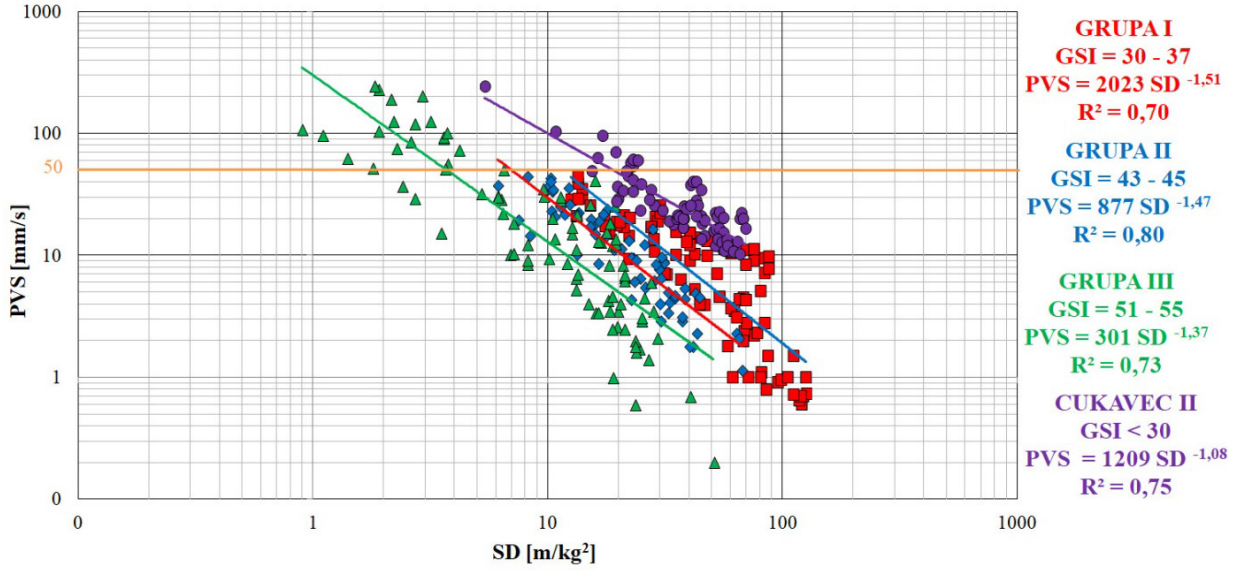
Minsko polje MP	Mjesto opažanja (seizmograf) MO	Brzina oscilacije tla PVS [mm/s]	Udaljenost D [m]	Maksimalno eksplozivno punjenje po minskoj bušotini CW [kg]	Reducirana udaljenost SD [m/kg^2]	Glavna frekvencija f [Hz]
kolovoz 2016. godine - Probno miniranje (11 minskih bušotina, dubina minskih bušotina = 2,05 m - 2,1 m, promjer minskih bušotina = 0,131 m, razmak između minskih bušotina = 5,0 m)						
1	MO1	-	-	-	-	-
	MO2	28,45	45,27	1,20	42,60	12
	MO3	25,92	46,09	1,20	43,37	11
	MO4	21,11	47,43	1,20	44,63	10
	MO5	19,70	49,24	1,20	46,34	10
2	MO1	-	-	-	-	-
	MO2	25,70	37,84	1,00	37,84	47
	MO3	24,53	38,82	1,00	38,82	57
	MO4	26,00	40,40	1,00	40,40	85
	MO5	21,28	42,51	1,00	42,51	23
3	MO1	-	-	-	-	-
	MO2	96,92	15,82	0,80	17,04	13
	MO3	71,21	18,03	0,80	19,42	12
	MO4	33,53	21,22	0,80	22,86	12
	MO5	29,09	25,00	0,80	26,93	12



Slika 8.51 Ovisnost brzine oscilacija PVS [mm/s] o reduciranoj udaljenosti SD [m/kg^2], 2014., 2015. i 2016. godina

Na slici 8.52 prikazani su usporedni dijagrami ovisnosti brzina oscilacija PVS [mm/s] o reduciranim udaljenostima SD [m/kg^2], koji su dobiveni prilikom istraživanja u čvrstim stijenama (Mesec J., 2005), (Grupa I, Grupa II i Grupa III), te dijagram koji je dobiven istraživanjima na lokalitetu Cukavec II iz 2014., 2015. i 2016. godine.

Usporedni rezultati tih istraživanja daju preliminarna saznanja o mogućim štetnim utjecajima miniranja u glinenim tlima koja se ogledaju i u znatno većem intenzitetu seizmičkih oscilacija u odnosu na čvrste stijenske mase.



Slika 8.52 Usporedni dijagrami ovisnosti brzina oscilacija PVS [mm/s] o reduciranim udaljenostima SD [m/kg^2] u različitim inženjersko-geološkim formacijama

8.5. OBRADA I PRIKAZ VOLUMENA NASTALOG KUGLASTOG PROŠIRENJA NAKON AKTIVIRANJA EKSPLOZIVNOG PUNJENJA

Pri utvrđivanju volumena kuglastih proširenja koristila se, u tu svrhu osmišljena i opisana aplikacija. Nakon svakog pokusnog miniranja mjerile su se dubine nastalog produbljenja minskih bušotina (trometrom), koje su u kasnijim mjerenjima provjerene sa dubinskom kamerom.

Nakon unosa poznatih podataka u aplikaciju ista na temelju niza empirijskih korelacija, opisano u poglavlju 6, izračunava površinu karakterističnih kružnih presjeka i volumen nastalog proširenja.

Ulazni podaci za aplikaciju:

- koordinate minskih bušotina (dobiveni GNSS metodom mjerenja),
- dubine karakterističnih presjeka dobiveni dubinskom kamerom,
- udaljenosti određene uz pomoć lasera EDS-c i
- mase i vrste eksploziva korištene prilikom pokusnih miniranja.

Pokusna miniranja bila su podijeljena u 4 faze, jedno u 2014. godini, dva u 2015. godini i jedno u 2016. godini. Izmjerene i izračunate vrijednosti, nastalog volumena proširenja,

nastalog produbljenja i proširenja minskih bušotina date su u tablicama 8.8, 8.9, 8.10 i 8.11. Dobiveni dijagrami obrade svih podataka nastalih produbljenja, proširenja i volumena zbirno, za eksplozivno punjenje Permonex V19 i Pakaex, za 2014., 2015. i 2016. godinu kada su izvođena pokusna miniranja prikazani su na slikama od 8.53 do 8.55.

Tablica 8.8 Izmjerene i izračunate vrijednosti, nastalog volumena proširenja, nastalog produbljenja i proširenja prilikom pokusnih miniranja u 2014. godini.

Minska bušotina	Promjer minske bušotine	Dubina minske bušotine		Eksploziv		Čep		Nastalo		Volumen nastalog kuglastog proširenja
		prije miniranja	nakon miniranja	Vrsta	Masa	Duljina	Vrsta	produbljenje	promjer proširenja	
	D_{MB} [mm]	H_{MB} [m]	H_{MBnm} [m]		Q [kg]	$L_Č$ [m]		L_{pr} [m]	D_{pr} [m]	V_{pr} [dm^3]
PMB1	0,131	2,03	2,43	Permonex V19	1,25	1,00	pijesak	0,400	1,193	872,20
PMB2	0,131	2,09	2,27	Permonex V19	0,50	1,00	pijesak	0,180	1,006	371,65
MB1	0,131	2,01	2,44	Pakaex (rinfuza)	1,00	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	0,430	1,254	751,65
MB2	0,131	1,98	2,38	Pakaex (rinfuza)	0,80	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	0,400	1,169	574,70
MB3	0,131	2,07	2,41	Pakaex (rinfuza)	0,60	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	0,340	1,153	507,10
MB4	0,131	1,94	2,23	Pakaex (rinfuza)	0,40	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	0,260	1,145	461,55
MB5	0,131	1,98	2,14	Permonex V19	0,40	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	0,160	0,881	307,65
MB6	0,131	1,94	2,14	Permonex V19	0,60	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	0,200	1,196	396,60
MB7	0,131	1,94	2,36	Permonex V19	0,80	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	0,420	1,129	656,95
MB8	0,131	2,02	2,48	Permonex V19	1,00	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	0,460	1,140	835,50

Tablica 8.9 Izmjerene i izračunate vrijednosti, nastalog volumena proširenja, nastalog produbljenja i proširenja prilikom pokusnih miniranja 12. lipnja 2015. godine

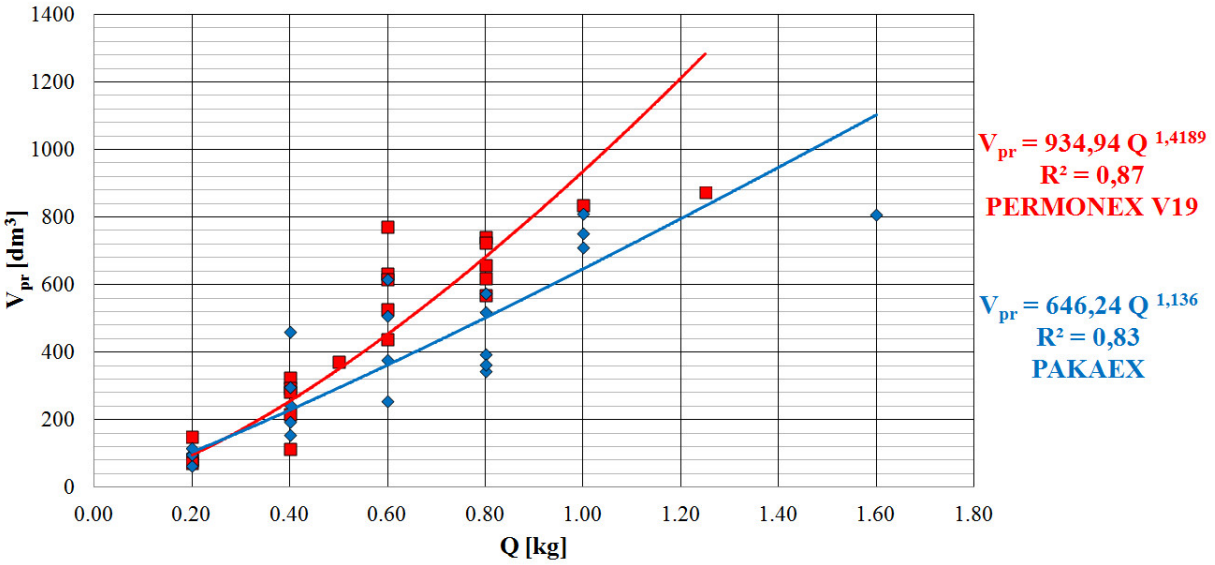
Minska bušotina	Promjer minske bušotine	Dubina minske bušotine		Eksploziv		Čep		Nastalo		Volumen nastalog kuglastog proširenja
		prije miniranja	nakon miniranja	Vrsta	Masa	Duljina	Vrsta	produbljenje	promjer proširenja	
	D_{MB} [mm]	H_{MB} [m]	H_{MBnm} [m]		Q [kg]	$L_Č$ [m]		L_{pr} [m]	D_{pr} [m]	V_{pr} [dm^3]
PMB3	0,131	3,07	**3,50**	Pakaex (rinfuza)	**1,60**	**1,00**	pijesak	**0,430**	**1,169**	**807,00**
PMB4	0,131	2,90	/	Permonex V19	**0,60**	**1,00**	pijesak	/	/	/
PMB4	0,131	1,20	/	Permonex V19	**0,60**	**0,5**	pijesak	/	/	/
MB31	0,131	3,04	**3,20**	Permonex V19	**0,20**	**0,30**	pijesak	**0,160**	**0,584**	**80,50**
MB32	0,131	3,05	**3,28**	Pakaex (rinfuza)	**0,40**	**0,30**	pijesak	**0,230**	**0,670**	**154,50**
MB33	0,131	3,04	/	Pakaex (rinfuza)	**0,60**	**0,3**	pijesak	/	/	/
MB33	0,131	1,63	/	Permonex V19	**0,40**	**0,3**	pijesak	/	/	/
MB34	0,131	2,87	**3,10**	Pakaex (rinfuza)	**0,80**	**0,50**	pijesak	**0,230**	**0,953**	**371,00**
MB35	0,131	2,80	**3,05**	Pakaex (rinfuza)	**0,60**	**0,50**	pijesak	**0,250**	**0,783**	**255,50**
MB36	0,131	3,07	**3,25**	Permonex V19	**0,40**	**0,50**	pijesak	**0,180**	**0,693**	**113,50**

Tablica 8.10 Izmjerene i izračunate vrijednosti, nastalog volumena proširenja, nastalog produbljenja i proširenja prilikom pokusnih miniranja 20. srpnja 2015. godine

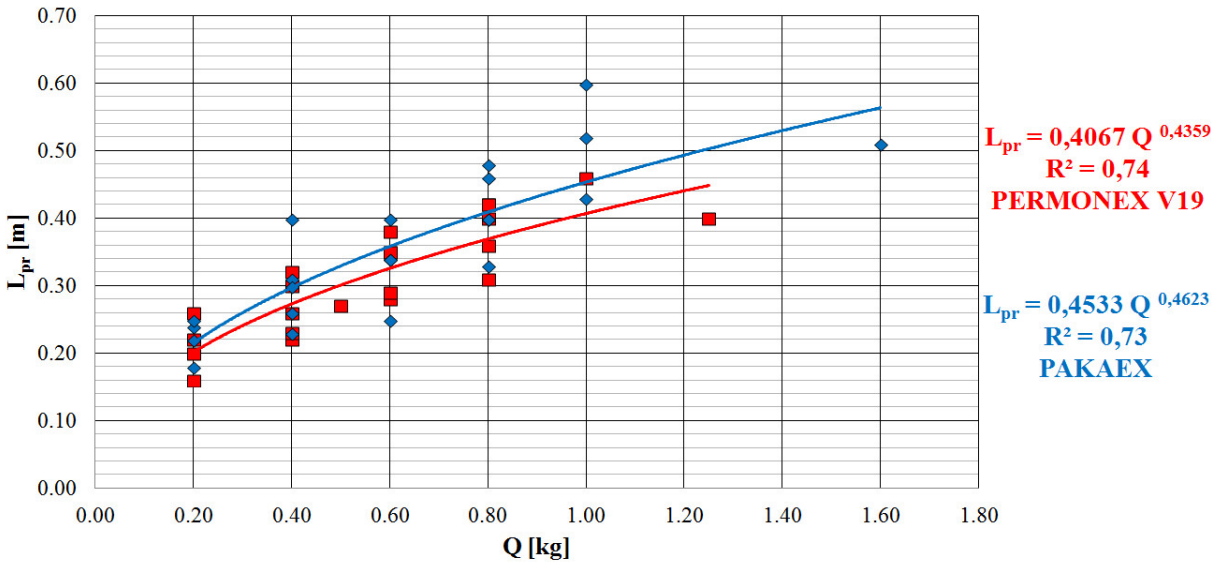
Minska bušotina	Promjer minske bušotine	Dubina minske bušotine		Eksploziv		Čep		Nastalo		Volumen nastalog kuglastog proširenja
		prije miniranja	nakon miniranja	Vrsta	Masa	Duljina	Vrsta	produbljenje	promjer proširenja	
	D_{MB} [mm]	H_{MB} [m]	H_{MBnm} [m]		Q [kg]	$L_Č$ [m]		L_{pr} [m]	D_{pr} [m]	V_{pr} [dm^3]
MB13	0,131	**2,44**	**2,62**	Pakaex (rinfuza)	**0,20**	0,50	pijesak	**0,18**	**0,5760**	**100,50**
MB14	0,131	**2,52**	**2,74**	Pakaex (rinfuza)	**0,20**	0,50	pijesak	**0,22**	**0,5770**	**64,50**
MB15	0,131	**2,47**	**2,78**	Pakaex (rinfuza)	**0,40**	0,50	pijesak	**0,31**	**0,6980**	**244,50**
MB16	0,131	**2,53**	**2,83**	Pakaex (rinfuza)	**0,40**	0,50	pijesak	**0,30**	**0,7870**	**194,50**
MB17	0,131	**2,51**	**2,85**	Pakaex (rinfuza)	**0,60**	0,50	pijesak	**0,34**	**1,0430**	**616,00**
MB18	0,131	**2,18**	**2,64**	Pakaex (rinfuza)	**0,80**	0,50	pijesak	**0,46**	**0,8770**	**344,00**
MB19	0,131	**2,20**	**2,68**	Pakaex (rinfuza)	**0,80**	0,50	pijesak	**0,48**	**0,8750**	**362,60**
MB20	0,131	**2,54**	**3,06**	Pakaex (rinfuza)	**1,00**	0,50	pijesak	**0,52**	**1,1570**	**710,00**
MB21	0,131	**2,52**	**2,72**	Permonex V19	**0,40**	0,50	pijesak	**0,20**	**0,9360**	**292,50**
MB22	0,131	**1,90**	**2,16**	Permonex V19	**0,20**	0,50	pijesak	**0,26**	**0,5570**	**82,50**
MB23	0,131	**2,22**	**2,59**	Permonex V19	**0,60**	0,50	pijesak	**0,37**	**1,1040**	**527,60**
MB24	0,131	**2,26**	**2,50**	Permonex V19	**0,80**	0,50	pijesak	**0,24**	**1,1900**	**594,14**
MB25	0,131	**2,31**	**2,60**	Permonex V19	**0,60**	0,50	pijesak	**0,29**	**1,0850**	**633,00**
MB26	0,131	**2,34**	**2,70**	Permonex V19	**0,80**	0,50	pijesak	**0,36**	**1,1310**	**569,00**
MB27	0,131	**2,19**	**2,51**	Permonex V19	**0,40**	0,50	pijesak	**0,32**	**0,5850**	**216,00**
MB28	0,131	**2,18**	**2,40**	Permonex V19	**0,20**	0,50	pijesak	**0,22**	**0,5050**	**70,00**
MB29	0,131	**2,01**	**2,25**	Permonex V19	**0,20**	0,50	pijesak	**0,24**	**0,6870**	**98,00**
MB30	0,131	-	-	Permonex V19	1,60	0,50	pijesak			

Tablica 8.11 Izmjerene i izračunate vrijednosti, nastalog volumena proširenja, nastalog produbljenja i proširenja prilikom pokusnih miniranja u 2016. godini.

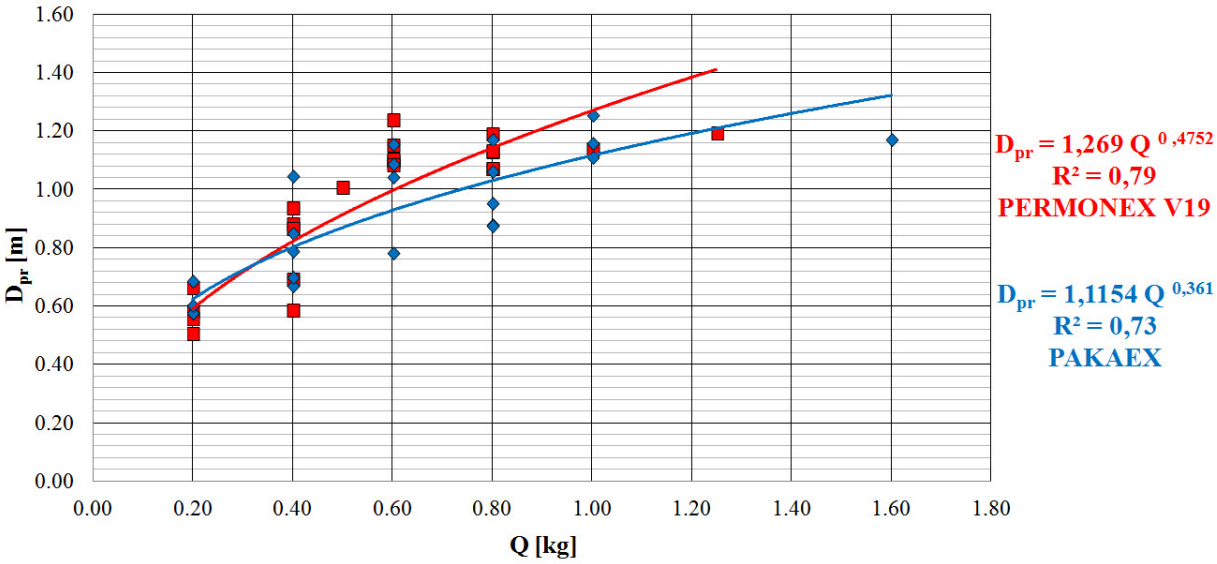
Minska bušotina	Promjer minske bušotine	Dubina minske bušotine		Eksploziv		Čep		Nastalo		Volumen nastalog kuglastog proširenja
		prije miniranja	nakon miniranja	Vrsta	Masa	Duljina	Vrsta	produbljenje	promjer proširenja	
	D_{MB} [mm]	H_{MB} [m]	H_{MBnm} [m]		Q [kg]	$L_Č$ [m]		L_{pr} [m]	D_{pr} [m]	V_{pr} [dm^3]
MB37	0,131	**2,05**	**2,30**	Pakaex (rinfuza)	**0,20**	**0,50**	pijesak	**0,25**	**0,6010**	**117,50**
MB38	0,131	**2,10**	**2,50**	Pakaex (rinfuza)	**0,40**	**0,50**	pijesak	**0,40**	**0,8480**	**298,00**
MB39	0,131	**2,10**	**2,50**	Pakaex (rinfuza)	**0,60**	**0,50**	pijesak	**0,40**	**1,0880**	**378,50**
MB40	0,131	**2,10**	**2,50**	Pakaex (rinfuza)	**0,80**	**0,50**	pijesak	**0,40**	**1,0600**	**519,00**
MB41	0,131	**2,10**	**2,70**	Pakaex (rinfuza)	**1,00**	**0,50**	pijesak	**0,60**	**1,1110**	**809,50**
MB42	0,131	**2,10**	**2,30**	Permonex V19	**0,20**	**0,50**	pijesak	**0,20**	**0,6620**	**148,00**
MB43	0,131	**2,10**	**2,45**	Permonex V19	**0,40**	**0,50**	pijesak	**0,35**	**0,8660**	**281,50**
MB44	0,131	**2,10**	**2,55**	Permonex V19	**0,60**	**0,32**	pijesak	**0,45**	**1,2380**	**769,50**
MB45		**2,10**	**2,50**	Permonex V19	**0,80**	**0,50**	pijesak	**0,40**	**1,0700**	**740,50**
PMB5	0,131	**2,10**	**2,52**	Permonex V19	**0,80**	**0,50**	pijesak	**0,42**	**1,0710**	**722,70**
PMB6	0,131	**2,10**	**2,45**	Permonex V19	**0,60**	**0,50**	pijesak	**0,35**	**1,1520**	**615,05**



Slika 8.53 Dijagram ovisnosti nastalog volumena proširenja V_{pr} [dm^3] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg], Permonex V19 i Pakaex, za 2014., 2015. i 2016. godinu



Slika 8.54 Dijagram ovisnosti nastalog produbljenja L_{pr} [m] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg], Permonex V19 i Pakaex, za 2014., 2015. i 2016. godinu



Slika 8.55 Dijagram ovisnosti promjera proširenja D_{pr} [m] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg], Permonex V19 i Pakaex, za 2014., 2015. i 2016. godinu

Detaljan prikaz rezultata terenskih istraživanja, nastalo produbljenje, promjer proširenja i volumen nastalog kuglastog proširenja dat je u prilozima 5., 6., 7. i 8.

8.5.1. Analiza rezultata dobivenih nakon aktiviranja dviju različitih vrsta eksplozivnog punjenja

Dijagrami ovisnosti prikazani na slikama 8.53 i 8.54 jasno pokazuju da su nastali volumen, V_{pr} [dm^3] i promjer, D_{pr} [m] proširenja pri istoj masi eksplozivnog punjenja Q [kg], veći nakon aktiviranja Permonex V19 nego kod Pakaex eksploziva. S druge strane nastalo produbljenje, L_{pr} [m] pri istoj masi eksplozivnog punjenja Q [kg], veće je kod Pakaex nego kod Permonex V19 eksploziva, dijagram na slici 8.55.

Iz gore navedenog se zaključuje da pojedine minersko-tehničke značajke opisane u poglavlju 4.2., imaju presudan utjecaj na dobivene rezultate kada se izvode kotlovska miniranja. To su svakako brzina detonacije, brizantnost i radna sposobnost eksploziva, te volumen i specifični tlak eksplozije, tlak detonacije i gustoća eksploziva.

Za eksplozive korištene prilikom istraživanja preuzeti podaci proizvođača i o gustoći eksploziva, brzini detonacije, toplini eksplozije i obujmu plinova, tablice 4.1 i 4.3. Osim toga, u tablicama 4.2 i 4.4, dati su rezultati ispitivanja o gustoći eksploziva i srednjoj brzini detonacije dobiveni u akreditiranom *Laboratoriju za eksplozivne tvari* na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu.

Ono što je nedvojbeno dokazano u ovom radu je da je detonacijom jednake mase Permonex-a V19 dobiven veći volumen i promjer proširenja nego detonacijom Pakaex-a. To upućuje na zaključak da eksplozivi koji generiraju veći volumen plinova i imaju veće tlakove detonacije daju i veće volumene proširenja. Naime, veličina tlaka detonacije, odnosno tlak na stijenku bušotine koji je vezan s brzinom detonacije (generalno s njezinim kvadratom), povećava zbijanje tla, te daje veći volumen proširenja. Isto tako i rad ekspanzije plinova uz udarno djelovanje daju ukupni učinak na proširenje (slika 4.4, Detonacijski proces u p-v dijagramu, Sućeska M., 2001; Dobrilović M., 2008).

9. ZAKLJUČAK

Glavni cilj provedenih istraživanja koja su prikazana u ovoj disertaciji bio je proširiti saznanja i spoznaje o mogućnostima korištenja eksploziva u geotehničkoj praksi. To se naročito odnosi na kotlovska miniranja u glinenim tlima kojima se na različitim dubinama ispod površine tla aktiviranjem određene vrste i mase eksploziva oblikuju kuglaste ili drugih oblika. Praktična primjena dobivenih rezultata istraživanja u geotehničkoj praksi je zbijanje koherentnih glinenih tala eksplozivnim punjenjem pri stabilizaciji kosina sidrenjem za različite površinske i podzemne građevine, ugradnji konstruktivnih elemenata za sidrenje temeljnih i potpornih zidova, stabilizaciji različitih gospodarskih objekata kao npr. dalekovodnih stupova, tunela i slično.

Cilj istraživanja bio je usmjeren na određivanje utjecaja i optimalizaciju pojedinih značajki pri izvođenju kotlovskih miniranja sa svrhom postizanja dovoljnog volumena proširenja.

Terenskim istražnim radovima provedenim na eksploatacijskom polju Cukavec II u 2014., 2015. i 2016. godini, mjereni su i utvrđeni rasponi masa dviju različitih vrsta eksplozivnog punjenja, kojima se ostvaruju kuglasta proširenja u glinovitom koherentnom tlu provođenjem pokusnih miniranja. Pokusna miniranja izvedena su na ukupno 48 minskih bušotina, a od čega je bilo 6 probnih minskih bušotina.

Proširenja nastala otpucavanjem kotlovskih mina bila su različita po obliku i veličini ali su u osnovi formirana proširenja u obliku kugle. Pokusnim miniranjima utvrđeni su efektivni rasponi masa dviju različitih vrsta eksploziva kojima se ostvaruje kuglasto proširenje u glinovitom koherentnom tlu provođenjem pokusnih miniranja. Utvrđeno je da su kuglasta proširenja za zadani promjer minske bušotine od 131 mm i dubinu minskih bušotina od 2,00-3,00 m, moguće ostvariti uporabljenim eksplozivima tipa Permonex V19 i Pakaex, u rasponu od 0,2 do 1,6 kg. Detonacijska brzina kao najznačajnija minersko-tehnička značajka eksploziva tipa Permonex V19 preuzeta je na osnovi rezultata mjerenja provedenih u akreditiranom Laboratoriju za eksplozivne tvari na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu sukladno zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025:2007 (Ester Z., 2005) te iznosi 4500 m/s. Za eksploziv Pakaex ista nije mjerena, već je preuzeta iz priložene deklaracije, te iznosi cca 2950 m/s. Aktiviranje eksplozivnih punjenja izvedeno je NONEL sistemom preko trenutnih električnih detonatora (TED). Prilikom pokusnih miniranja idealnom se pokazala veličina pješčanog čepa od 0,5 metara, granulacije 0/4 mm.

Na istražnom lokalitetu Cukavec II izvedena su i terenska geofizička istraživanja u 2014., 2015. i 2016. godini. Cilj tih istraživanja bio je utvrđivanje podataka o općim i mehaničkim svojstvima prirodnih slojeva tla po dubini, te određivanje promjena dinamičkih svojstava tla uzrokovanih aktiviranjem eksplozivnih punjenja različitih vrsta i masa. Radi postizanja tog cilja provedena je i MASW ili višekanalna analiza površinskih valova. To je seizmička geofizička metoda čiji rezultati omogućuju procjenu krutosti tla, a ista je izravno povezana s posmičnim modulom, koji je jedan od najvažnijih inženjerskih parametara. Usporedbom 1D i 2D prikaza brzina S valova, prije i poslije miniranja, dokazano je kako je aktiviranjem eksplozivnih punjenja došlo do povećanja brzina S valova na prosječnoj dubini od 2,0 m do 3,0 m, odnosno da je došlo do poboljšanja dinamičkih svojstava okolnog tla miniranjem. Kod analize stupnja poboljšanja glinenog tla miniranjem uzete su određene dubine mjerenja. Raspon dubina koje su se analizirale bile su: 0-1 m, 1-2 m i 2-3 m. Prosječni koeficijent poboljšanja glinenog tla u okolici kuglastog proširenja iznosio je oko 1,5.

Prilikom pokusnih miniranja na eksploatacijskom polju Cukavec II, mjerene su i brzine oscilacija u okolici istražnih profila. Spomenuta mjerenja izvedena su ponajviše radi dobivanja podataka o intenzitetu oscilacija pri budućim kotlovskim miniranjima, koja će se eventualno izvoditi u svrhu stabilizacije različitih objekata sidrenjem blizu ili u urbanim sredinama. Rezultati tih mjerenja daju preliminarna saznanja o mogućim štetnim utjecajima miniranja u glinenim tlima koja se ogledaju i u znatno većem intenzitetu seizmičkih oscilacija u odnosu na čvrste stijenske mase. U tu svrhu je kao dokaz u radu prezentiran sumarni dijagram ovisnosti brzina oscilacija PVS [mm/s] o reduciranim udaljenostima SD [m/kg^2]. Isti pokazuje kako su izmjerene brzine oscilacija predmetnog glinenog tla na lokalitetu Cukavec II znatno veće u odnosu na 3 grupe istraživanih čvrstih stijenskih masa GSI raspona od 30 do 55 (Mesec J., 2005; Mesec J. et al., 2009; Mesec J. et al., 2010).

U najznačajnije rezultate provedenih istraživanja koji su prikazani u ovom radu spada svakako određivanje volumena nastalih proširenja u glinenome tlu prilikom otpucavanja serije minskih bušotina postavljenih na određenom profilu. U tu svrhu je na Geotehničkom fakultetu osmišljen i razvijen jedinstveni sustav, koji predstavlja integraciju RTK GNSS metode, primjenom online transformacijskih parametara putem CROPOS sustava. Aplikacija je osmišljena na način da izračunava koordinate minske bušotine na temelju poznatih X i Y koordinata (dobivenih GPS-uređajem) i visine H (u konkretnom slučaju dubine bušotina) dobivene upotrebom dubinske kamere (engl. *Heavy Duty GeoVision Borehole Camera*). Kako

bi se mogle izračunati sve koordinate minske bušotine na određenoj dubini snimanja postavljen je i laser (EDS-C) pomoću kojeg su dobivene udaljenosti između dubinske kamere i stijenki minskih bušotina. Za računanje nastalog volumena proširenja osmišljena je aplikacija „Bušotine“. Koncept i mogućnosti rada aplikacije u tehničkom području predstavljaju inovativnost. Osim što aplikacija računa nastalo proširenje, iscrtava 2D i 3D modele nastalog proširenja. Također kompatibilnost aplikacije sa drugim CAD alatima uvelike doprinosi provjeri i detaljnijem 3D modelu nastalog proširenja.

Provedenim istraživanjima je dokazano da je vlažnost glinenog tla najznačajniji parametar koji izravno utječe na volumen nastalog proširenja.

Prema očekivanju i potpuno u skladu s teorijom posmične čvrstoće tla, s povećanjem vlažnosti smanjuje se posmična otpornost glinenog tla, odnosno nedrenirana čvrstoća tla ili nedrenirana kohezija uz prihvaćanje teoretskog uvjeta da je kut unutrašnjeg trenja jednak nuli. Trend smanjenja nedrenirane posmične čvrstoće s povećanjem vlažnosti glinenog tla i obratno, jasno je izražen na svim prikazanim dijagramima koji su tako koncipirani da krivulja povećanja ili smanjenja vlažnosti prati smanjenje odnosno povećanje nedrenirane posmične čvrstoće. Radi obrade i određivanja nastalog volumena kuglastog proširenja, određena je ovisnost volumena nastalog proširenja o zatečenoj vlazi u minskim bušotinama. Dokazano je da promjena vlažnosti ima izravan utjecaj na efekte miniranja. Naime, pri povećanoj vlažnosti tlačni val eksplozije ima jači utjecaj na nastalo kuglasto proširenje. Prilikom veće vlažnosti nastaju veća kuglasta proširenja, a time i veći volumen proširenja.

Zaključno, ovim radom jasno su utvrđene ovisnosti volumena nastalih kuglastih proširenja o masi eksplozivnog punjenja i vrsti uporabljenog eksploziva te njegovih detonacijskih i minersko-tehničkih parametara. Na taj način, postavljena je i osnova za izradu modela nastanka kuglastog proširenja i u drugim vrstima tla i stijena, koja se ogleda u primjeni rezultata istraživanja u geotehničkoj praksi stabilizacije i poboljšavanja svojstava radne sredine izgrađene od tla i stijena.

10. LITERATURA

Agrawal J.P. (2010): High Energy Materials - Propellants, Explosives and Pyrotechnics, Wiley-VCH. 495 pp, Padstow, Cornwall.

Afonin V.G., Geiman L.M., Komir V.M. (1982): Spravočnoe pasobie po vzrivnim rabotam v stroiteljstve, Budiveljnik, Kijev.

Ao-Hong Yu (2002): "Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th Century", Applied Mechanics Reviews, American Society of Mechanical Engineers, New York, U.S.A., 55 (3), pp. 169-218.

Arapov I., Cvetković M., Kovačević M.-S. (2009): Mlazno injektiranje - Projektiranje u uvjetima nesigurnosti, 5. savjetovanje Hrvatskog geotehničkog društva Izvori rizika u geotehničkim zahvatima, knjiga sažetaka/Mulabdić, Mensur - Osijek, Hrvatsko geotehničko društvo, 9-9, Radovi u zbornicima skupova, cjeloviti rad (in extenso).

Araya K., Gao R., Tsunematsu S., Ochi K. (1993): Loosening of Dense Clay Soils by Linear Blasting, Journal of Agricultural Engineering Research, Volume 54, Issue 2, Pages 113-126.

Božić B. (1998): Miniranje u rudarstvu, graditeljstvu i geotehnici, Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet, Sveučilišni udžbenik, Varaždin, ISBN: 953-96597-3-6.

Bohanek V. (2013): Model nastajanja i analiza djelovanja kumulativnog procesa linearnih eksplozivnih naboja. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, pp 156, Zagreb.

Casagrande A. (1947): Classification and identification of soils, Proc. ASCE, 73 (6), pp. 783-810.

Citovič N.A. (1983): Mehanika gruntov, Moskva.

Coulomb C.A. (1776): Essai sur une application des regles de maximis et minimis quelques problemes de statique, relatits a l'architecture. Memoires de Mathematique de l'Academie Royale de Science 7, Paris.

Das B. M. (1983): Fundamentals of Soil Dynamics. New York: Elsevier Science Publishing Inc.

Dobrilović M. (2008.): Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju elektroničkog detonatora, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

Dobrilović M., Bohanek V., Škrlec V., Stanković S., Dobrilović I. (2010): Instructions for calibration method for measuring device of detonation velocity, 11th Intrenational carpatian control conference, Miskolc: University of Miskolc, 285-288 (ISBN: 978-963-06-9289-2).

Ester Z. (2005): Miniranje I - Eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilišni udžbenik, Zagreb.

Freeze R.A. & Cherry J.A. (1979): Groundwater, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

Foti S. (2000): Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves. PhD thesis, Politecnico di Torino, Italy.

Frgić L., Hudec M., Krsnik J., Krajcer M., Mesec J. (1988): Podgrađivanje podzemnih prostorija sidrenjem u tlu, Prethodno saopćenje, Simpozij o tunelima, Brijuni, pp 293-298.

Gabriels P., Snieder R., Nolet G. (1987): In situ measurements of shear-wave velocity in sediments using higher mode Rayleighwaves, Geophys. Prospect., 35, 187-196.

Gazdek M. (2003): Primjena seizmičkih metoda u gotehnici. Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb.

Goel S., Shalini & Patra N.R. (2006): Break out resistance of inclined anchors in sand, Geotechnical & Geological Engineering, Volume 24, Issue 6, pp 1511-1525.

Gohl W.B., Jefferries M.G., Howie J.A., Diggles D. (2000): Explosive compaction: Design, implementation and effectiveness, Geotechnique, Volume 50, Issue 6, Pages 657-665.

Hayashi K. (2003): Data Acquisition and Analysis of Active and Passive Surface Wave Methods. Proceedings of the SAGEEP 2003, San Antonio, Texas, SUR08.

Hudec M., Krsnik J., Abramović V., Frgić L., Krajcer M., Gotić I., Meštrić M., Mesec J., Fingerhut L. (1989): Supporting with anchors in soft rock and soil, Proceedings of the international Congress on Progress and Innovation in Tunnelling, Toronto, Canada, pp 111-117.

Konya C.J., Walter E.J. (1991): Rock Blasting and Overbreak Control, Virginia: National Highway Institute.

Krsnik J. (1989): Miniranje, Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Institut za rudarstvo, geotehniku i naftu, Sveučilišni udžbenik, Zagreb.

Krsnik J., Riđešić I. (1985): Snažne eksplozije s usmjerenim djelovanjem, Građevinar 2, 87 + 91, Zagreb.

Kušnarev D.M., Belikov M.P. (1972): Vzrivnie raboti v gidromeliorativnom i seljskom stroiteljstve, Moskva.

Lambe T.W., Whitman R.V. (1969): Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Marjanović M. (2010): CROPOS - hrvatski pozicijski sustav, Ekscentar, stručni časopis Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, br.12, stranice 28-34.

Medak D., Pribičević B., Rumiha D., Kordić B. (2007): Uloga mreže permanentnih GPS-postaja Republike Slovenije pri iskolčenju magistralnog plinovoda Pula-Karlovac, Simpozij o inženjerskoj geodeziji, SIG2007, stranice 269 - 279.

Mesec J. (2005): Ovisnost brzina oscilacija tla izazvanih miniranjem o inženjersko-geološkim značajkama karbonatnih stijenskih masa, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

Mesec J., Vrkljan D., Ester Z. (2009): Allowed quantity of explosive charge depending on the distance from the blast. Journal: Geotechnical and Geological Engineering. Vol. 3, pp 431-438.

Mesec J. (2009): Mineralne sirovine, vrste i načini dobivanja, Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet, Sveučilišni udžbenik, Varaždin, ISBN 978-953-96597-4-3.

Mesec J., Kovač I., Soldo B. (2010): Estimation particle velocity on the basis of the blast event measurements at the different rock units. Journal: Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Vol. 30, pp. 1004-1009.

Mesec J., Težak D., Grubešić M. (2015): Poboljšanje glinenih tala korištenjem eksploziva, članak znanstveni, Inženjerstvo okoliša. 2, 95-101.

Mitchell J.K. (1976): Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Moro D.G., Pipan M., Forte E. & Finetti I. (2003): Determination of Rayleigh wave dispersion curves for near surface applications in unconsolidated sediments. Expanded Abstract, Society of Exploration Geophysicists, 1247-1250.

Muhovec I. (1987): Uloga i karakter geotehničkih sidara s osvrtom na značenje injekcijskog zahvata, Geotehnička sidra i sidrene konstrukcije, 3 - 25, Zagreb.

Narodne novine (110/2004, 114/2004): Odluka o utvrđivanju službenih geodetskih datuma i ravninskih kartografskih projekcija Republike Hrvatske, Službeni list Republike Hrvatske, Zagreb.

Narodne novine (70/2017): Zakon o eksplozivnim tvarima te proizvodnji i prometu oružja, Službeni list Republike Hrvatske, Zagreb.

Nonveiller E. (1990): Mehanika tla i temeljenje građevina, Školska knjiga, Zagreb.

Olofsson S.O. (1988): Applied Explosives Technology for Construction and Mining, Ärla: Applex.

Park C.B., Miller R.D. & Xia J. (1999): Multichannel analysis of surface waves. Geophysics, 64, 3, 800-808.

Park C.B., Miller R.D. & Xia J. (1998): Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. 68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1377-1380.

Pranjić J. (1991): Mogućnost primjene privrednih sidara u glinama, Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Magistarski rad, Zagreb.

Pribičević B., Medak D. (2003): Geodezija u građevinarstvu, Sveučilišni udžbenik Sveučilišta u Rijeci, Zagreb.

Rezo M., Bačić Ž. (2009): Obrada i izjednačenje mjerenih veličina u RINEX formatu iz CROPOS mreže, 1. Cropos konferencija, Zbornik radova, stranice 41-65.

Schwab F. & Knopoff L. (1972): Fast surface wave and free mode computations. Methods in Computational Physics, 11, Editor B.A. Bolt, Academic Press, New York, 87-180.

Sheriff R. E. & Geldart L. P. (1995): Exploration seismology. Cambridge University Press, 2nd edition.

Simendić P. (1990): Mjerenje dimenzija šupljina ostvarenih detonacijom eksplozivnog naboja u mekom tlu, Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet, OOUR Institut za geotehniku Varaždin, Diplomski rad, Varaždin.

Socco L.V. & Boiero D. (2008): Improved Monte Carlo inversion of surface wave dana. Geophysical Prospecting, 56, 357-371.

Stanković S. (2011): Određivanje ovisnosti brzina oscilacija tla o parametrima miniranja, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, pp 191, Zagreb.

Stokoe II K.H., Wright S.G., Bay J.A. & Roesset J.M. (1994): Characterization of geotechnical sites by SASW method, in Geophysical characterization of sites. ISSMFE Technical Committee #10, edited by R.D. Woods, Oxford Publishers, New Delhi.

Strelec S., Grabar K., Gazdek M., Špiranec M., Stanko D., Jug J. (2014): Geofizičko-geotehničko istraživanje odlagališta otpada, Stručni rad, Inženjerstvo okoliša, Vol.1/No.2, pp 103-112.

Sućeska M. (2001): Eksplozije i eksplozivi - njihova mirnodopska primjena, Brodarski institut, 305 str., Zagreb.

Suto K. (2007): Multichannel analysis of surface waves (MASW) for investigation of ground competence: an introduction, in "Engineering Advances in Earthworks". Proceedings of the Sydney Chapter 2007 Symposium, Australian Geomechanics Society , 71-81.

Škrlec V. (2015): Analiza primjenjivosti eksploziva smanjene gustoće za gospodarska miniranja, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

Šumanovac F. (2012): Osnove geofizičkih istraživanja. Sveučilišni udžbenik, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Takahashi T. (2004): ISRM Suggested Methods for land geophysics in rock engineering, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41, 885-914, 2004.

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. & Keys D.A. (1990): Applied Geophysics. Cambridge University Press, 2nd edition.

Tatiya, R.R. (2012): Surface and Underground Excavation - Methods, Techniques and Equipment, London: A. A. Balkema Publishers.

Težak D., Kranjčić N., Mesec J. (2018): Integration of global navigation satellite system (GNSS) and borehole camera for purpose of modeling the blasting in clay soil, 18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018, Article ID: 188952018030199991.

Vesić A.S. (1965): Cratering by Exsplozives as an Earth Pressure Problem, Proceedings of the Forth ICSMFE, 427 + 431, Montreal.

Qingwen L., Yuan L., Gautam D., Dongping S., Lan Q., Liping W., Jianghui D. (2015): Analysis of the Blasting Compaction on Gravel Soil, Journal of Chemistry, Article ID 642810, 9 pages.

Xia J., Miller R.D. & Park C.B. (1999): Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. Geophysics, 64, 3, 691-700.

Zhongqi W., Yong L. (2003): Numerical analysis on dynamic deformation mechanism of soils under blast loading, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 23, Issue 8, Pages 705-714.

Zlatović S. (2006): Mehanika tla, Geotehnika, Uvod u mehaniku tla, Udžbenik Tehničkog veleučilišta u Zagrebu, ISBN 953-7048-02-0.

INTERNET STRANICE

www.kgs.ku.edu, učitano 21.10.2017.

www.masw.com., učitano 21.10.2017.

https://community.jaspersoft.com/documentation?version=36816, učitano 21.10.2017.

https://dimetix.com/en/?product=eds-c, učitano 23.10.2017.

http://docs.oracle.com/javase/7/docs/, učitano 20.10.2017.

https://docs.oracle.com/javase/8/docs/technotes/guides/security/jaas/JAASRefGuide.html, učitano 20.10.2017.

https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=Rayleigh%20wave, učitano 20.10.2017.

http://hibernate.org/orm/documentation/5.2/, učitano 20.10.2017.

https://help.autodesk.com/view/OARX/2018/ENU/?guid=GUID-235B22E0-A567-4CF6-92D3-38A2306D73F3, učitano 25.10.2017.

https://knowledge.autodesk.com/support/autocad-civil-3d/getting-started?sort=score, učitano 23.10.2017.

https://mvnrepository.com/artifact/net.java.dev.gluegen/gluegen-rt, učitano 21.10.2017.

https://mvnrepository.com/artifact/org.jogamp.jogl/jogl-all, učitano 21.10.2017.

https://mvnrepository.com/artifact/org.scijava/j3dutils, učitano 21.10.2017.

https://mvnrepository.com/artifact/ycad/ycad/1.0.2, učitano 21.10.2017.

http://tomee.apache.org/documentation.html., učitano 20.10.2017.

https://www.autodesk.com/techpubs/autocad/acadr14/dxf/dxf_reference.htm, učitano 25.10.2017.

http://www.geovision.org/, učitano 23.10.2017.

https://www.primefaces.org/, učitano 20.10.2017.

Popis slika

Slika 2.1 Ciklus stijene 9

Slika 2.2 Struktura tla 10

Slika 2.3 Mješavina čestica tla različite krupnoće 10

Slika 2.4 Shematski prikaz strukture sitnozrnatih materijala 10

Slika 2.5 Shema rasporeda materijala u uzorku tla 12

Slika 2.6 Shematski prikaz djelomično zasićenog uzorka 15

Slika 2.7 Stanje naprezanja u edometru 16

Slika 2.8 Tipični dijagram mjerenja pomaka mikroure u vremenu za neki inkrement vertikalnog opterećenja $\Delta\sigma$ [kN/m^2] u edometru, te postupak određivanja pripadnog pomaka ΔH [m] 17

Slika 2.9 Tipičan edometarski dijagram 18

Slika 2.10 Rezultat pokusa u uređaju za smicanje 20

Slika 2.11 Čvrstoća uzorka pri različitim uvjetima dreniranja *CC*, *CU* i *UU* i brzina smicanja, 1 sporo smicanje, 2 brzo smicanje 21

Slika 2.12 Rezultati triaksijalnog pokusa *CU* 21

Slika 3.1 Sidrenje u koherentnom glinenom tlu, (Frgić L. et al., 1988). 22

Slika 3.2 Sustavno klasificiranje geotehničkih sidara u tlu (Muhovec I., 1987) 25

Slika 3.3 Konstrukcija kotlovske mine 28

Slika 3.4 Shematski prikaz moguće konstrukcije sidra 28

Slika 3.5 Geometrijske veličine konturne minske bušotine 30

Slika 3.6 Konstrukcija kotlovske mine i izgled kuglastog proširenja u glini 31

Slika 3.7 Shematski prikaz ugrađenog sidra 31

Slika 3.8 Shematski prikaz kontrole nosivosti ugrađenog sidra 31

Slika 3.9 Prijenos vlačne sile duboko u tlu radi stabilizacije na prevrtanje 32

Slika 3.10 Sidrenje potpornih i obložnih zidova 33

Slika 3.11 Sidrenje objekata 33

Slika 3.12 Sidrenje tunela 33

Slika 3.13 Sidrenje dalekovodnih stupova 33

Slika 4.1 Eksplozija (Sućeska M., 2001; Dobrilović M., 2008) 36

Slika 4.2 Detonacijski proces u patroni eksploziva (Ester Z., 2005; Dobrilović M., 2008) 37

Slika 4.3 Raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu (Sućeska M., 2001; Dobrilović M., 2008) 38

Slika 4.4 Detonacijski proces u p-v dijagramu (Sućeska M., 2001; Dobrilović M., 2008) 38

Slika 4.5 Opća podjela eksplozivnih tvari (Bohanek V., 2013) 40

Slika 4.6 Princip Hessove probe (Krsnik J.,1989) 42

Slika 4.7 Trauzlova proba (Krsnik J.,1989) 43

Slika 4.8 BAM uređaj za određivanje osjetljivosti eksploziva na udar 46

Slika 5.1 Faze kotlovskog miniranja (Krsnik J., 1989) 50

Slika 5.2 Dijagram ovisnosti volumena nastalog kotlovskog proširenja V_{pr} [m^3] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg] (Krsnik J., 1989) 53

Slika 5.3 Djelovanje eksplozije u mekanim stijenama 54

Slika 6.1 Zemljovidni položaj eksploatacijskog polja Čret i Cerje Tužno 57

Slika 6.2 Mehanički mjerač dimenzija proširenja (Simendić P., 1990) 58

Slika 6.3 Ovisnost volumena proširenja V_{pr} [dm^3] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg] 60

Slika 6.4 Ovisnost nastalog promjera proširenja D_{pr} [m] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg] 61

Slika 6.5 Ovisnost volumena proširenja V [dm^3] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg] 62

Slika 6.6 Ovisnost nastalog promjera proširenja D_{pr} [m] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg] 63

Slika 6.7 Ovisnost zatečene vlage w_0 [%] o nastalom volumenu proširenja V_{pr} [dm^3] na eksploatacijskom polju Cerje Tužnom 65

Slika 6.8 Ovisnost zatečene vlage w_0 [%] o nastalom volumenu proširenja V_{pr} [dm^3] na eksploatacijskom polju Čret 65

Slika 7.1 Smještaj eksploatacijskog polja Cukavec II i iskolčene minske bušotine 67

Slika 7.2 Eksploatacijsko polje Cukavec II i iskolčene minske bušotine 68

Slika 7.3 Princip Virtualnih Referentnih stanica 68

Slika 7.4 GNSS prijamnik Topcon HiPer+ 70

Slika 7.5 Disperzija površinskih valova (prerađeno prema Hayashi K., 2003). 76

Slika 7.6 Smjer kretanja Rayleigh-evog vala (prerađeno prema https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=Rayleigh%20wave) 77

Slika 7.7 Uzdužni kompresijski ili primarni *P* val (Foti S., 2000) 79

Slika 7.8 *P* valovi na granici dvaju medija (Das B.M., 1983) 79

Slika 7.9 Princip geofizičkog istraživanja seizmičkim valovima (Gazdek M., 2003) 79

Slika 7.10 Primjeri 1D, 2D i 3D MASW istraživanja (Park C.B. et al., 1999)..... 81

Slika 7.11 Prikaz mjerenja i analize podataka sa aktivnom MASW metodom (Park C.B. et al., 1999)..... 83

Slika 7.12 Prikaz ravnih i blagih istražnih lokacija, te složene topografije (www.kgs.ku.edu) 85

Slika 7.13 Prikaz disperzijske analize u dva koraka (prerađeno prema www.masw.com) 87

Slika 7.14 Karakteristike disperzijske krivulje (prerađeno prema Hayashi K., 2003) 88

Slika 7.15 Procjena elastičnih svojstava tla iz podataka mjerenja površinskih valova (preuzeto sa www.masw.com) 90

Slika 7.16 Shematski prikaz inverzije izmjerene disperzijske krivulje (preuzeto sa www.masw.com) 91

Slika 7.17 Usporedba jedno-modalne i više-modalne inverzije (preuzeto sa www.masw.com) 92

Slika 7.18 Pribor za bušenja s jezgrovanjem 94

Slika 7.19 Prikaz rotacijskog bušenja s jezgrovanjem 94

Slika 7.20 Istražna bušenja na eksploatacijskom polju Cukavec II 95

Slika 7.21 Poremećeni uzorak 96

Slika 7.22 Izvađena jezgra na određenoj dubini 96

Slika 7.23 Drveni sanduk za odlaganje jezgre iz jezgrene cijevi 98

Slika 7.24 Izvađena jezgra glinenog tla iz jezgrene cijevi na EP Cukavec II 98

Slika 7.25 Klasična metoda ispitivanja parametara tla 99

Slika 7.26 Pokusna miniranja na eksploatacijskom polju Cukavec II 105

Slika 7.27 Eksplozivna punjenja Permonex V19 i Pakaex 106

Slika 7.28 Shema minskog polja minskih bušotina iz 2014. godine 106

Slika 7.29 Konstrukcija punjenja minske bušotine 106

Slika 7.30 Trenutak aktiviranja eksplozivnog punjenja 106

Slika 7.31 Nastalo kuglasto proširenje 106

Slika 7.32 Neželjeni lijevak u obliku kratera 108

Slika 7.33 Razvijen integrirani sustav dubinska kamera-laser 110

Slika 7.34 Snimak nastalog proširenja dubinskom kamerom 112

Slika 7.35 Pozicija pokusnih minskih bušotina i mjesta opažanja 113

Slika 7.36 Seizmograf Instantel MiniMate Plus 115

Slika 7.37 Usmjerenje geofona u odnosu na točku detonacije 116

Slika 7.38 Karakteristični snimak brzina oscilacija mjereni 11. srpnja 2015. godine 117

Slika 8.1 Ispis horizontalne i vertikalne koordinate i visine minske bušotine 123

Slika 8.2 Prikaz prvih nekoliko redova izvoda za jedan presjek minske bušotine ili nastalog proširenja 124

Slika 8.3 Model baze podataka 127

Slika 8.4 Ekran prijave u sustav 128

Slika 8.5 Početni ekran aplikacije 128

Slika 8.6 Unos podataka bušotine i udaljenosti po stranama svijeta 129

Slika 8.7 Akcije kod izračuna koordinata 130

Slika 8.8 Primjer izvješća presjeka bušotine 130

Slika 8.9 Pregled slojeva bušotine 131

Slika 8.10 Slika presjeka sloja bušotine u 2D prostoru 131

Slika 8.11 Popis bušotina 132

Slika 8.12 Izračun volumena i akcije u drugoj opciji 132

Slika 8.13 Pojedini slojevi koji pripadaju određenoj bušotini 133

Slika 8.14 Točkasti 3D model minske bušotine 134

Slika 8.15 Točkasti 3D model nastalog proširenja 134

Slika 8.16 Linijski 3D model minske bušotine 134

Slika 8.17 Linijski 3D model nastalog proširenja 134

Slika 8.18 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 8, aplikacija 137

Slika 8.19 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 8, *AutoCad Civil 3D* 137

Slika 8.20 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 31, aplikacija 138

Slika 8.21 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 31, *AutoCad Civil 3D* 138

Slika 8.22 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 20, aplikacija 139

Slika 8.23 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 20, *AutoCad Civil 3D* 139

Slika 8.24 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 38, aplikacija 140

Slika 8.25 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 38, *AutoCad Civil 3D* 140

Slika 8.26 Raspored profila-minskih i probnih bušotina u 2014. godini 141

Slika 8.27 Raspored profila-minskih i probnih bušotina u 2015. godini 142

Slika 8.28 Fazna krivulja promjene brzine S valova za sredinu profila 2 prije miniranja 143

Slika 8.29 Disperzijska krivulja promjene brzine S valova po dubini za sredinu profila 2 prije miniranja 144

Slika 8.30 Promjene brzina S valova po dubini za sredinu profila 2 prije miniranja 145

Slika 8.31 Tomografski prikaz brzina S valova na profilu 2 prije miniranja..... 146

Slika 8.32 Fazna krivulja promjene brzine S valova za sredinu profila 2 poslije miniranja 146

Slika 8.33 Disperzijska krivulja promjene brzine S valova po dubini za sredinu profila 2 poslije miniranja 147

Slika 8.34 Promjene brzina S valova po dubini za sredinu profila 2 poslije miniranja 148

Slika 8.35 Tomografski prikaz brzina S valova na profilu 2 poslije miniranja 149

Slika 8.36 Fazna krivulja promjene brzine S valova za sredinu profila 3 prije miniranja 149

Slika 8.37 Disperzijska krivulja promjene brzine S valova po dubini za sredinu profila 3 prije miniranja 150

Slika 8.38 Promjene brzina S valova po dubini za sredinu profila 3 prije miniranja 151

Slika 8.39 Tomografski prikaz brzina S valova na profilu 3 prije miniranja..... 152

Slika 8.40 Fazna krivulja promjene brzine S valova za sredinu profila 3 poslije miniranja 152

Slika 8.41 Disperzijska krivulja promjene brzine S valova po dubini za sredinu profila 3 poslije miniranja 153

Slika 8.42 Promjene brzina S valova po dubini za sredinu profila 3 poslije miniranja 154

Slika 8.43 Tomografski prikaz brzina S valova na profilu 3 poslije miniranja 155

Slika 8.44 Raspored profila - minskih i probnih bušotina u 2016. godini 157

Slika 8.45 Zatečena vlaga w_0 [%] u minskim bušotinama 160

Slika 8.46 Povećanje ili smanjenje nedrenirane posmične čvrstoće s povećanjem ili smanjenjem vlažnosti glinenog tla u minskoj bušotini MB 15..... 160

Slika 8.47 Povećanje ili smanjenje nedrenirane posmične čvrstoće s povećanjem ili smanjenjem vlažnosti glinenog tla u minskoj bušotini MB 21 161

Slika 8.48 Povećanje ili smanjenje nedrenirane posmične čvrstoće s povećanjem ili smanjenjem vlažnosti glinenog tla u minskoj bušotini MB 28 161

Slika 8.49 Povećanje ili smanjenje nedrenirane posmične čvrstoće s povećanjem ili smanjenjem vlažnosti glinenog tla u minskoj bušotini MB 34 162

Slika 8.50 Dijagram ovisnosti zatečene vlage w_0 [%] o nastalom volumenu proširenja V_{pr} [dm^3] 163

Slika 8.51 Ovisnost brzine oscilacija PVS [mm/s] o reduciranoj udaljenosti SD [m/kg^2], 2014., 2015. i 2016. godina 167

Slika 8.52 Usporedni dijagrami ovisnosti brzina oscilacija PVS [mm/s] o reduciranim udaljenostima SD [m/kg^2] u različitim inženjersko-geološkim formacijama 168

Slika 8.53 Dijagram ovisnosti nastalog volumena proširenja V_{pr} [dm^3] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg], Permonex V19 i Pakaex, za 2014., 2015. i 2016. godinu 172

Slika 8.54 Dijagram ovisnosti nastalog produbljenja L_{pr} [m] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg], Permonex V19 i Pakaex, za 2014., 2015. i 2016. godinu 173

Slika 8.55 Dijagram ovisnosti promjera proširenja D_{pr} [m] o masi eksplozivnog punjenja Q [kg], Permonex V19 i Pakaex, za 2014., 2015. i 2016. godinu 173

Slika 11.1 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 1, aplikacija 204

Slika 11.2 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 1, *AutoCad Civil 3D* 204

Slika 11.3 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 2, aplikacija 204

Slika 11.4 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 2, *AutoCad Civil 3D* 204

Slika 11.5 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 3, aplikacija 205

Slika 11.6 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 3, *AutoCad Civil 3D* 205

Slika 11.7 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 4, aplikacija 205

Slika 11.8 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 4, *AutoCad Civil 3D* 205

Slika 11.9 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 5, aplikacija 206

Slika 11.10 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 5, *AutoCad Civil 3D* 206

Slika 11.11 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 6, aplikacija 206

Slika 11.12 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 6, *AutoCad Civil 3D* 206

Slika 11.13 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 7, aplikacija 207

Slika 11.14 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 7, *AutoCad Civil 3D* 207

Slika 11.15 Linearni 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 1, aplikacija 207

Slika 11.16 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 1, *AutoCad Civil 3D* 207

Slika 11.17 Linearni 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 2, aplikacija 208

Slika 11.18 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 2, *AutoCad Civil 3D* 208

Slika 11.19 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 32, aplikacija 209

Slika 11.20 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 32, *AutoCad Civil 3D* 209

Slika 11.21 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 34, aplikacija 209

Slika 11.22 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 34, *AutoCad Civil 3D* 209

Slika 11.23 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 35, aplikacija 210

Slika 11.24 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 35, *AutoCad Civil 3D* 210

Slika 11.25 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 36, aplikacija 210

Slika 11.26 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 36, *AutoCad Civil 3D* 210

Slika 11.27 Linearni 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 3, aplikacija 211

Slika 11.28 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 3, *AutoCad Civil 3D* 211

Slika 11.29 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 13, aplikacija 212

Slika 11.30 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 13, *AutoCad Civil 3D* 212

Slika 11.31 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 14, aplikacija 212

Slika 11.32 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 14, *AutoCad Civil 3D* 212

Slika 11.33 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 15, aplikacija 213

Slika 11.34 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 15, *AutoCad Civil 3D* 213

Slika 11.35 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 16, aplikacija 213

Slika 11.36 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 16, *AutoCad Civil 3D* 213

Slika 11.37 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 17, aplikacija 214

Slika 11.38 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 17, *AutoCad Civil 3D* 214

Slika 11.39 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 18, aplikacija 214

Slika 11.40 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 18, *AutoCad Civil 3D* 214

Slika 11.41 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 19, aplikacija 215

Slika 11.42 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 19, *AutoCad Civil 3D* 215

Slika 11.43 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 21, aplikacija 215

Slika 11.44 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 21, *AutoCad Civil 3D* 215

Slika 11.45 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 22, aplikacija 216

Slika 11.46 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 22, *AutoCad Civil 3D* 216

Slika 11.47 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 23, aplikacija 216

Slika 11.48 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 23, *AutoCad Civil 3D* 216

Slika 11.49 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 24, aplikacija 217

Slika 11.50 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 24, *AutoCad Civil 3D* 217

Slika 11.51 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 25, aplikacija 217

Slika 11.52 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 25, *AutoCad Civil 3D* 217

Slika 11.53 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 26, aplikacija 218

Slika 11.54 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 26, *AutoCad Civil 3D* 218

Slika 11.55 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 27, aplikacija 218

Slika 11.56 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 27, *AutoCad Civil 3D* 218

Slika 11.57 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 28, aplikacija 219

Slika 11.58 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 28, *AutoCad Civil 3D* 219

Slika 11.59 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 29, aplikacija 219

Slika 11.60 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 29, *AutoCad Civil 3D* 219

Slika 11.61 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 37, aplikacija 220

Slika 11.62 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 37, *AutoCad Civil 3D* 220

Slika 11.63 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 39, aplikacija 220

Slika 11.64 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 39, *AutoCad Civil 3D* 220

Slika 11.65 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 40, aplikacija 221

Slika 11.66 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 40, *AutoCad Civil 3D* 221

Slika 11.67 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 41, aplikacija 221

Slika 11.68 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 41, *AutoCad Civil 3D* 221

Slika 11.69 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 42, aplikacija 222

Slika 11.70 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 42, *AutoCad Civil 3D* 222

Slika 11.71 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 43, aplikacija 222

Slika 11.72 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 43, *AutoCad Civil 3D* 222

Slika 11.73 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 44, aplikacija 223

Slika 11.74 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 44, *AutoCad Civil 3D* 223

Slika 11.75 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 45, aplikacija 223

Slika 11.76 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 45, *AutoCad Civil 3D* 223

Slika 11.77 Linearni 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 5, aplikacija 224

Slika 11.78 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 5, *AutoCad Civil 3D* 224

Slika 11.79 Linearni 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 6, aplikacija 224

Slika 11.80 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 6, *AutoCad Civil 3D* 224

Popis tablica

Tablica 4.1 Teoretske značajke eksploziva Permonex V19 prema specifikaciji proizvođača 47

Tablica 4.2 Rezultati ispitivanja amonij nitratno praškastog eksploziva komercijalnog imena Permonex V19 48

Tablica 4.3 Teoretske značajke eksploziva Pakaex-a prema specifikaciji proizvođača 48

Tablica 4.4 Rezultati ispitivanja ANFO eksploziva komercijalnog imena Pakaex-a 49

Tablica 5.1 Ovisnost koeficijenta *k* o vrsti stijene 54

Tablica 6.1 Rezultati terenskih istraživanja na eksploatacijskom polju Cerje Tužno 60

Tablica 6.2 Rezultati terenskih istraživanja na eksploatacijskom polju Čret 62

Tablica 6.3 Rezultati laboratorijskih ispitivanja na eksploatacijskom polju Cerje Tužno 64

Tablica 6.4 Rezultati laboratorijskih ispitivanja na eksploatacijskom polju Čret 64

Tablica 7.1 Tehničke karakteristike GNSS prijamnika marke Topcon HiPer+ 70

Tablica 7.2 Usporedba projektiranih i iskolčenih vrijednosti minskih bušotina 72

Tablica 7.3 Brzine P valova u nekim geomedijima 75

Tablica 7.4 Prosječne brzine P i S valova i gustoće nekih geomedija 76

Tablica 7.5 Tehničke karakteristike bušaće garniture Clivio RAP-0 95

Tablica 7.6 Potrebne klase kvalitete uzoraka za laboratorijsko ispitivanje tla i odgovarajuće klase uzorkovanja (prema EN 1997-2: 2006) 97

Tablica 7.7 Vrste ispitivanja i standardi koje koristi Geotehnički laboratorij 101

Tablica 7.8 Pokusna miniranja 12. lipnja 2014. godine 107

Tablica 7.9 Pokusna miniranja 12. lipnja 2015. godine 107

Tablica 7.10 Pokusna miniranja 20. srpnja 2015. godine..... 108

Tablica 7.11 Pokusna miniranja 31. kolovoza 2016. godine..... 109

Tablica 7.12 Tehničke karakteristike dubinske kamere 110

Tablica 7.13 Tehničke karakteristike lasera 111

Tablica 7.14 Tehničke karakteristike seizmografa Instantel MiniMate Plus 115

Tablica 8.1 Prikaz raspona dobivenih parametara tla i koeficijenta poboljšanja glinenog tla za profil 2 156

Tablica 8.2 Prikaz raspona dobivenih parametara tla i koeficijenta poboljšanja glinenog tla za profil 3 156

Tablica 8.3 Određena zatečena vlaga u minskim bušotinama..... 158

Tablica 8.4 Rezultati opažanja ovisnosti brzina oscilacija PVS [mm/s] o reduciranim udaljenostima SD [m/kg^2], 12. lipnja 2014. godine..... 164

Tablica 8.5 Rezultati opažanja ovisnosti brzina oscilacija PVS [mm/s] o reduciranim udaljenostima SD [m/kg^2], 12. lipnja 2015. godine..... 165

Tablica 8.6 Rezultati opažanja ovisnosti brzina oscilacija PVS [mm/s] o reduciranim udaljenostima SD [m/kg^2], 20. srpnja 2015. godine..... 166

Tablica 8.7 Rezultati opažanja ovisnosti brzina oscilacija PVS [mm/s] o reduciranim udaljenostima SD [m/kg^2], 31. kolovoz 2016. godine..... 166

Tablica 8.8 Izmjerene i izračunate vrijednosti, nastalog volumena proširenja, nastalog produbljenja i proširenja prilikom pokusnih miniranja u 2014. godini. 169

Tablica 8.9 Izmjerene i izračunate vrijednosti, nastalog volumena proširenja, nastalog produbljenja i proširenja prilikom pokusnih miniranja 12. lipnja 2015. godine..... 170

Tablica 8.10 Izmjerene i izračunate vrijednosti, nastalog volumena proširenja, nastalog produbljenja i proširenja prilikom pokusnih miniranja 20. srpnja 2015. godine 171

Tablica 8.11 Izmjerene i izračunate vrijednosti, nastalog volumena proširenja, nastalog produbljenja i proširenja prilikom pokusnih miniranja u 2016. godini. 172

Popis priloga

Prilog 1. Nastala kuglasta proširenja prilikom pokusnih miniranja u 2014. godini.

Prilog 2. Nastala kuglasta proširenja prilikom pokusnih miniranja, 12. lipnja 2015. godine.

Prilog 3. Nastala kuglasta proširenja prilikom pokusnih miniranja, 20. srpnja 2015. godine.

Prilog 4. Nastala kuglasta proširenja prilikom pokusnih miniranja u 2016. godini.

Prilog 5. Rezultati terenskih istraživanja 12. lipnja 2014. godine.

Prilog 6. Rezultati terenskih istraživanja 12. lipnja 2015. godine.

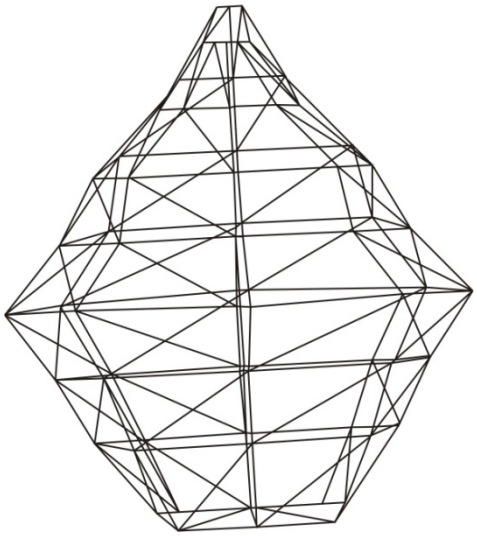
Prilog 7. Rezultati terenskih istraživanja 20. srpnja 2015. godine.

Prilog 8. Rezultati terenskih istraživanja 31. kolovoza 2015. godine.

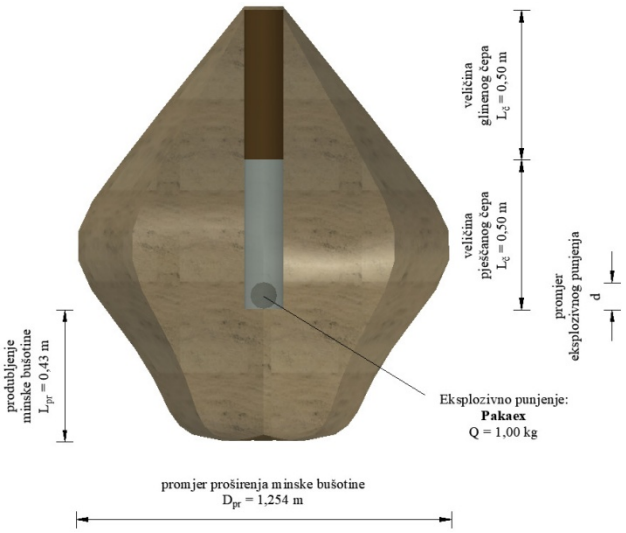
Prilozi

Prilog 1. Nastala kuglasta proširenja prilikom pokusnih miniranja u 2014. godini

Minska bušotina MB 1 $\left(E\ 489450{,}00,\ N\ 5122751{,}77,\ H\ 195{,}49\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $1{,}00\ kg$, Duljina čepa $1{,}0\ m$ ($0{,}5\ m$ pijesak i $0{,}5\ m$ glina). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 759{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 744{,}29\ dm^3$.
Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 14{,}71\ dm^3$.

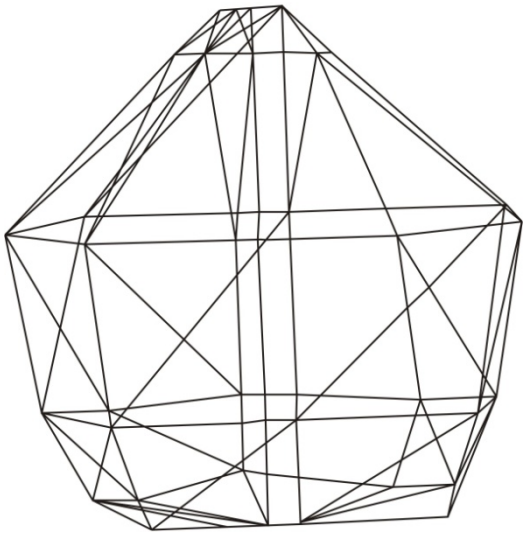


Slika 11.1 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 1, aplikacija

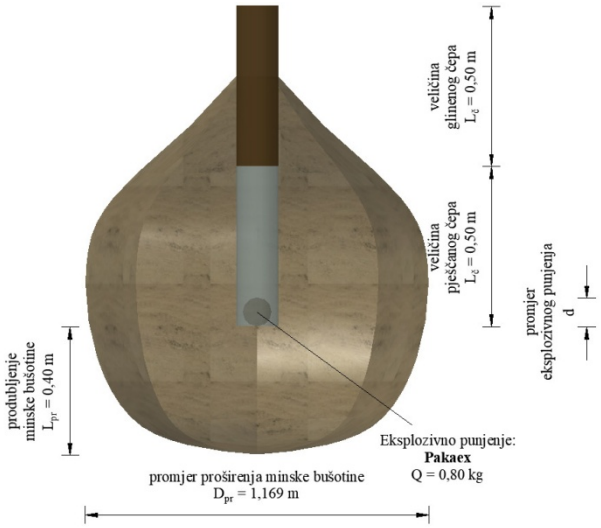


Slika 11.2 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 1, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 2 $\left(E\ 489453{,}79,\ N\ 5122748{,}40,\ H\ 195{,}65\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}80\ kg$, Duljina čepa $1{,}0\ m$ ($0{,}5\ m$ pijesak i $0{,}5\ m$ glina). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 585{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 564{,}40\ dm^3$.
Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 20{,}60\ dm^3$.



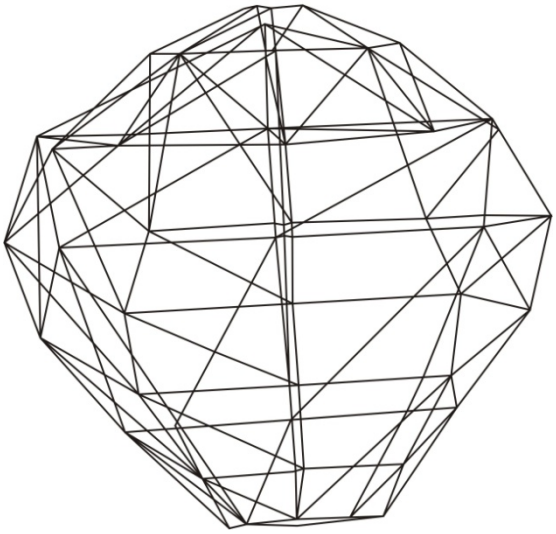
Slika 11.3 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 2, aplikacija



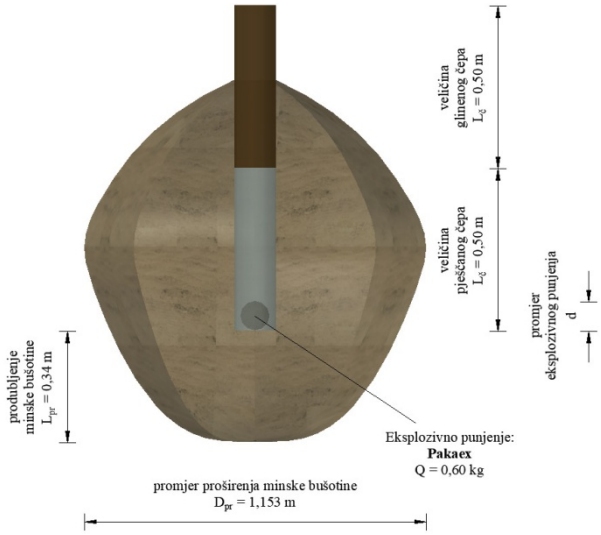
Slika 11.4 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 2, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 3 $\left(E\,489457{,}47,\ N\,5122745{,}07,\ H\,195{,}85\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}60\,kg$, Duljina čepa $1{,}0\,m$ ($0{,}5\,m$ pijesak i $0{,}5\,m$ glina). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 520{,}00\,dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 494{,}30\,dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 25{,}83\,dm^3$.



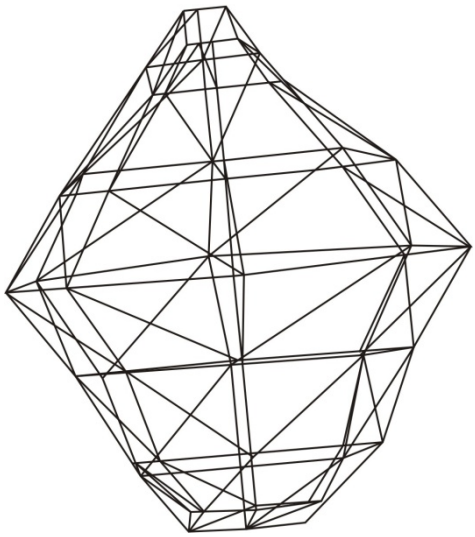
Slika 11.5 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 3, aplikacija



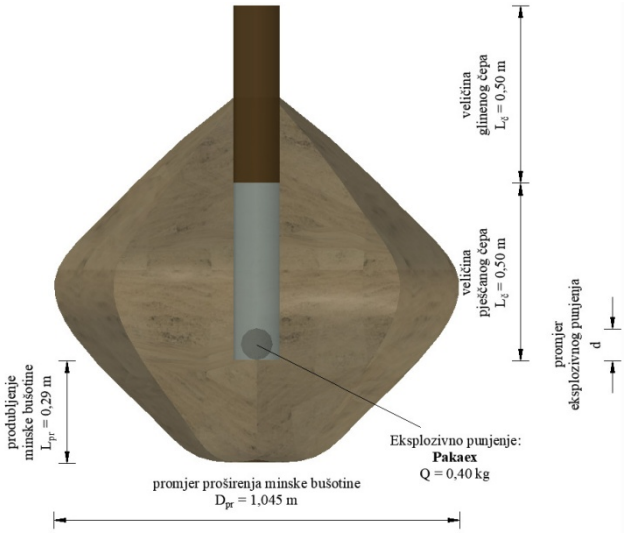
Slika 11.6 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 3, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 4 $\left(E\,489461{,}22,\ N\,5122741{,}75,\ H\,195{,}82\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}40\,kg$, Duljina čepa $1{,}0\,m$ ($0{,}5\,m$ pijesak i $0{,}5\,m$ glina). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 472{,}00\,dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 451{,}09\,dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 20{,}91\,dm^3$.



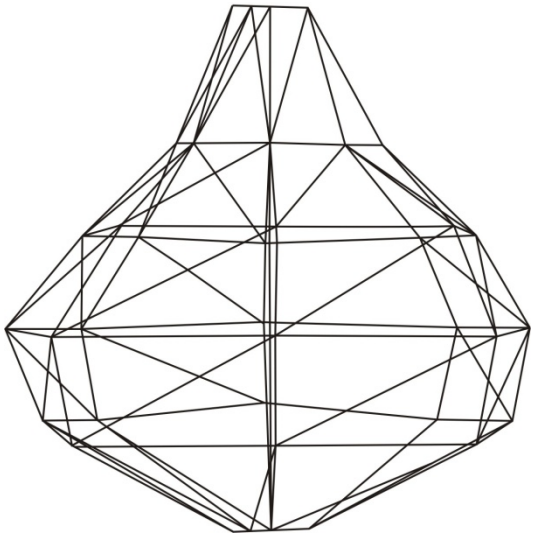
Slika 11.7 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 4, aplikacija



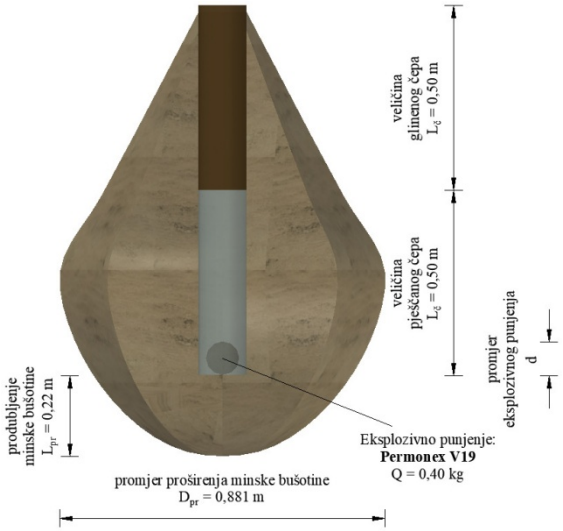
Slika 11.8 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 4, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 5 $\left(E\ 489464{,}88,\ N\ 5122738{,}43,\ H\ 195{,}80\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}40\ kg$, Duljina čepa $1{,}0\ m$ ($0{,}5\ m$ pijesak i $0{,}5\ m$ glina). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 329{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 318{,}00\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 11{,}00\ dm^3$.



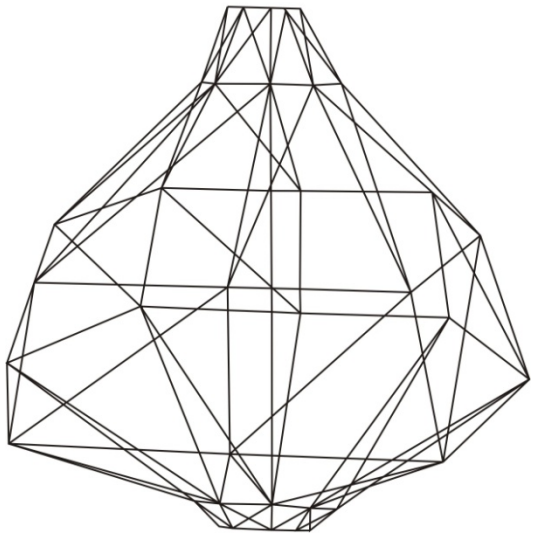
Slika 11.9 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 5, aplikacija



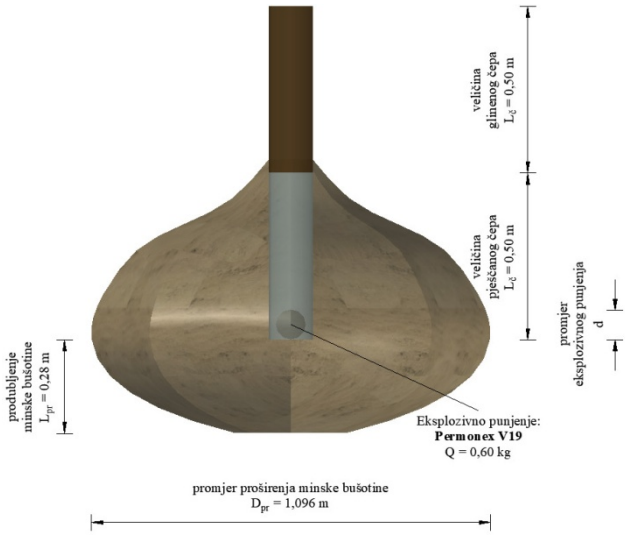
Slika 11.10 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 5, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 6 $\left(E\ 489468{,}61,\ N\ 5122735{,}08,\ H\ 195{,}94\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}60\ kg$, Duljina čepa $1{,}0\ m$ ($0{,}5\ m$ pijesak i $0{,}5\ m$ glina). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 447{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 426{,}90\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 20{,}10\ dm^3$.



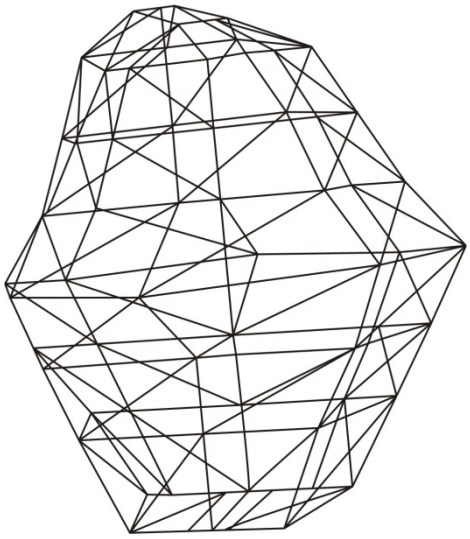
Slika 11.11 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 6, aplikacija



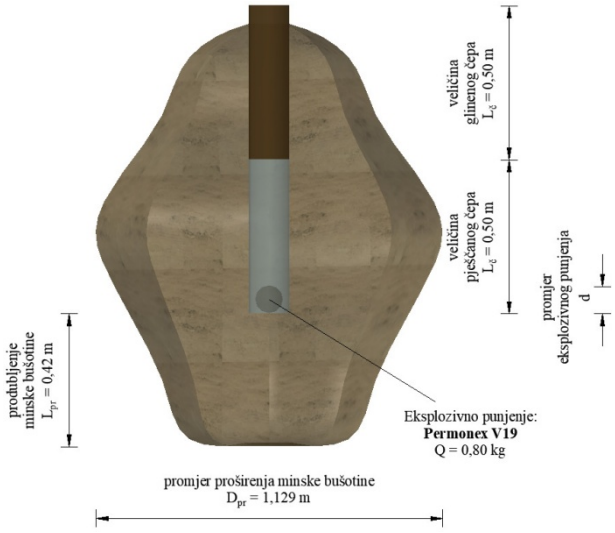
Slika 11.12 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 6, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 7 $\left(E\ 489472{,}40,\ N\ 5122731{,}76,\ H\ 195{,}99\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}80\ kg$, Duljina čepa $1{,}0\ m$ ($0{,}5\ m$ pijesak i $0{,}5\ m$ glina). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 669{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 644{,}88\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 24{,}12\ dm^3$.



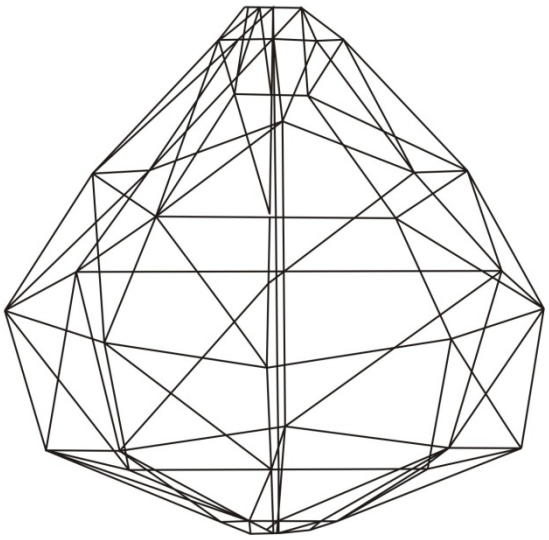
Slika 11.13 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 7, aplikacija



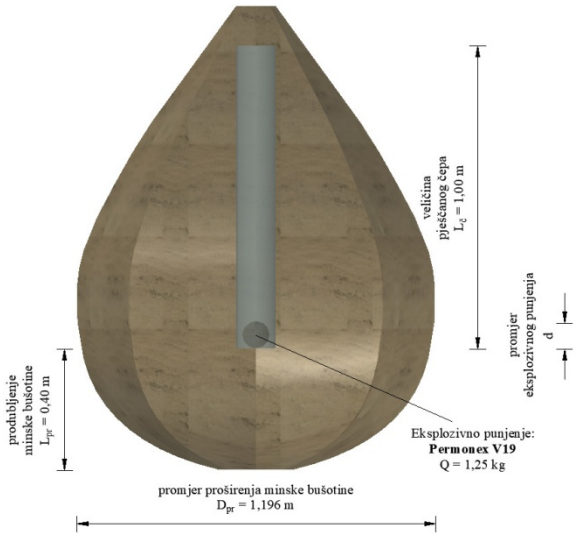
Slika 11.14 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 7, *AutoCad Civil 3D*

Probna minska bušotina PMB 1 $\left(E\ 489445{,}79,\ N\ 5122735{,}66,\ H\ 196{,}53\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $1{,}25\ kg$, Duljina čepa $1{,}0\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 883{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 861{,}30\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 21{,}70\ dm^3$.



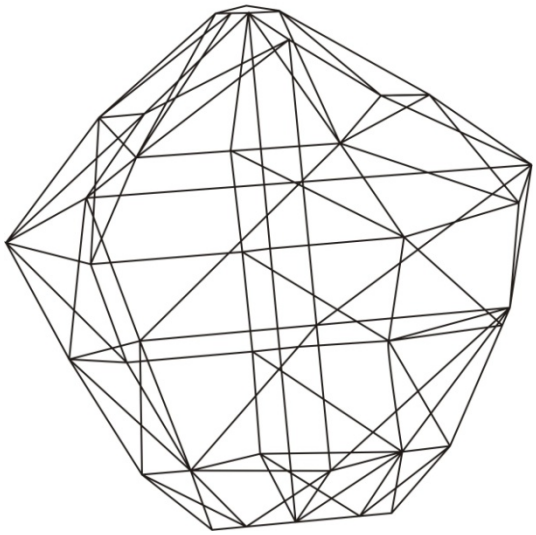
Slika 11.15 Linearni 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 1, aplikacija



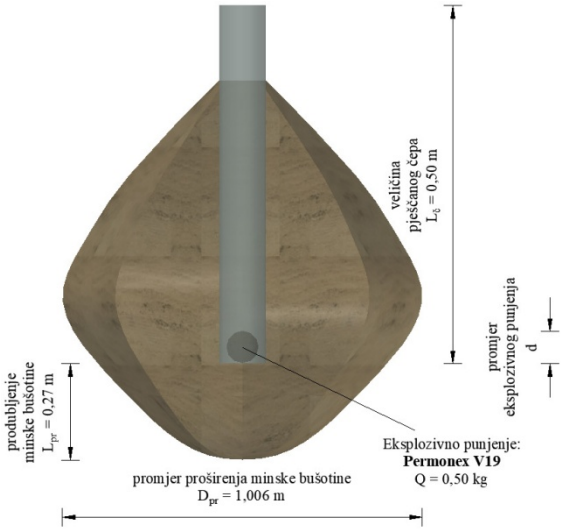
Slika 11.16 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 1, *AutoCad Civil 3D*

Probna minska bušotina PMB 2 $\left(E\ 489453{,}24,\ N\ 5122729{,}03,\ H\ 196{,}74\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}50\ kg$, Duljina čepa $1{,}0\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 382{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 361{,}30\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 20{,}70\ dm^3$.



Slika 11.17 Linearni 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 2, aplikacija

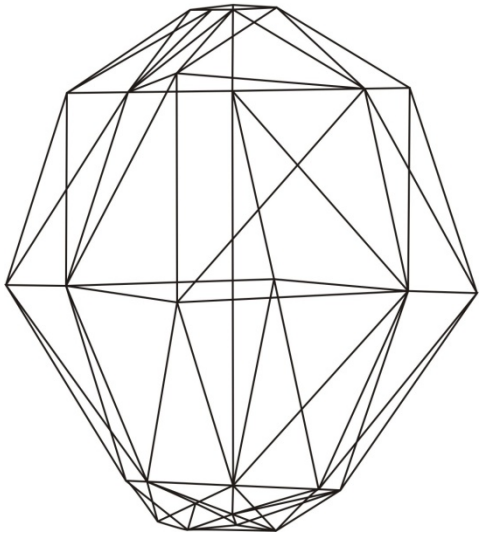


Slika 11.18 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 2, *AutoCad Civil 3D*

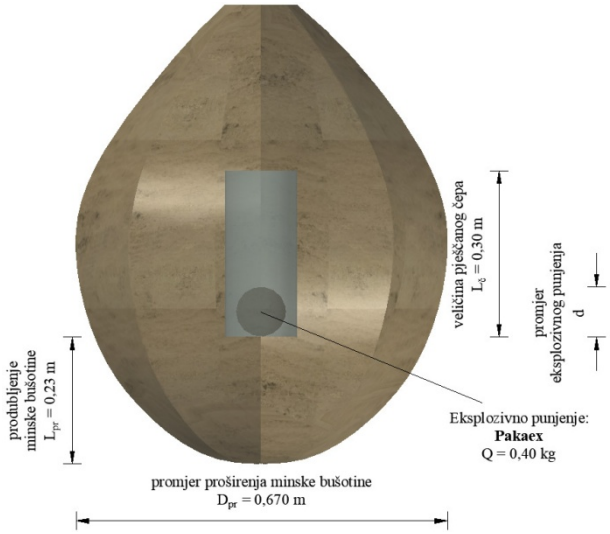
Prilog 2. Nastala kuglasta proširenja prilikom pokusnih miniranja, 12. lipnja 2015. godine

Minska bušotina MB 32 $\left(E\ 489145{,}81,\ N\ 5122570{,}99,\ H\ 198{,}71\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}40\ kg$, Duljina čepa $0{,}3\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 161{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 148{,}34\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 12{,}66\ dm^3$.



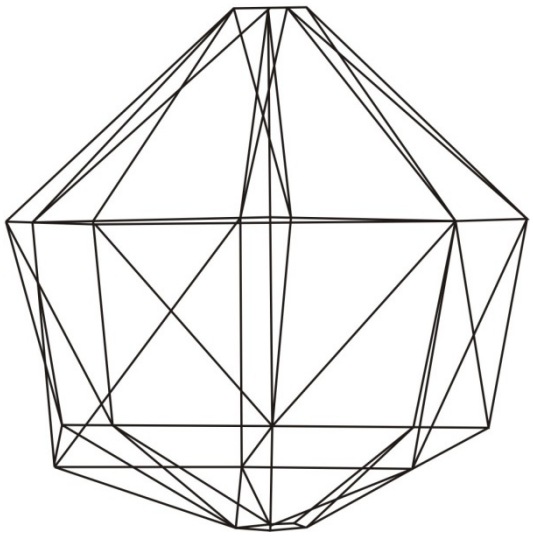
Slika 11.19 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 32, aplikacija



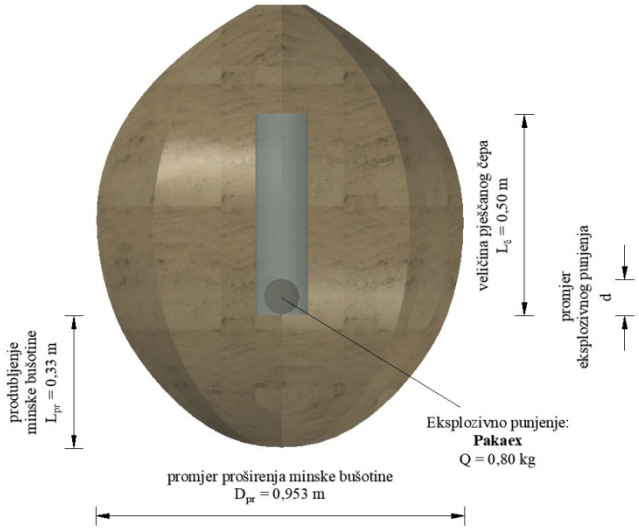
Slika 11.20 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 32, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 34 $\left(E\ 489153{,}27,\ N\ 5122564{,}36,\ H\ 198{,}97\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}80\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 382{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 357{,}04\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 24{,}96\ dm^3$.



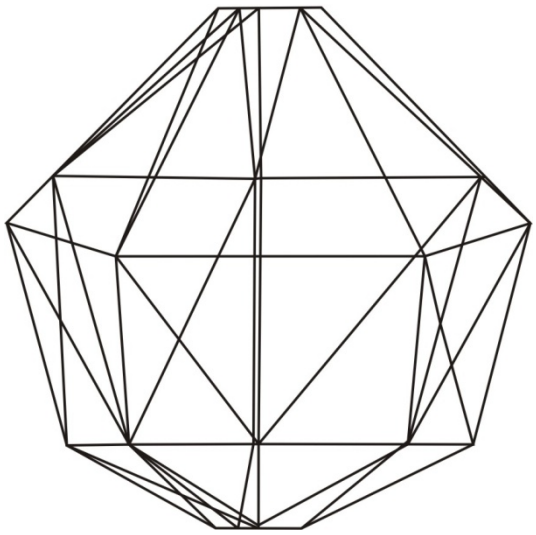
Slika 11.21 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 34, aplikacija



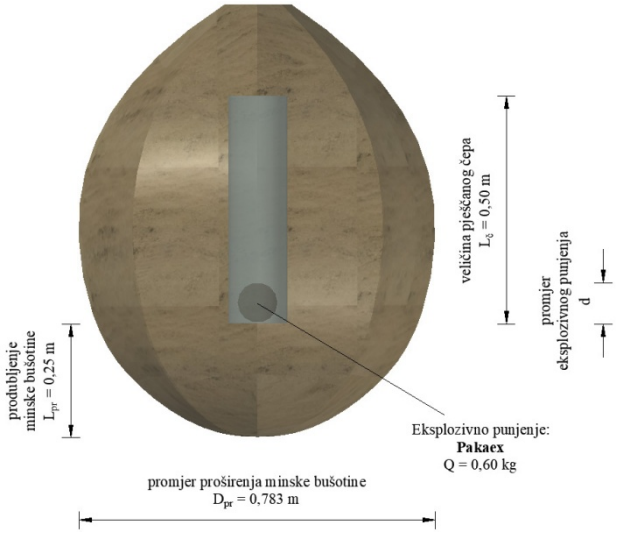
Slika 11.22 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 34, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 35 $(E\,489156{,}98,\ N\,5122560{,}99,\ H\,198{,}95)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}60\,kg$, Duljina čepa $0{,}5\,m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 266{,}00\,dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 244{,}90\,dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 21{,}10\,dm^3$.



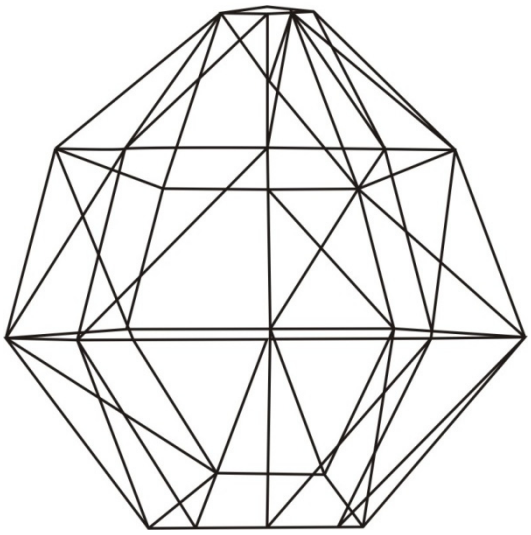
Slika 11.23 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 35, aplikacija



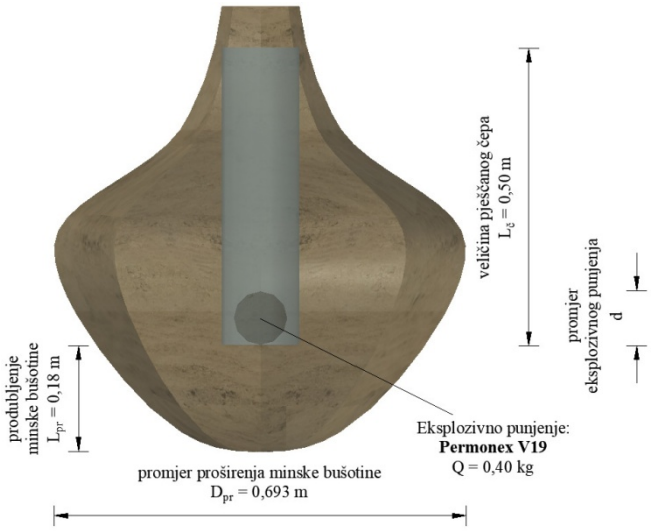
Slika 11.24 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 35, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 36 $(E\,489160{,}70,\ N\,5122557{,}69,\ H\,199{,}13)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}60\,kg$, Duljina čepa $0{,}5\,m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 117{,}00\,dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 109{,}21\,dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 7{,}79\,dm^3$.



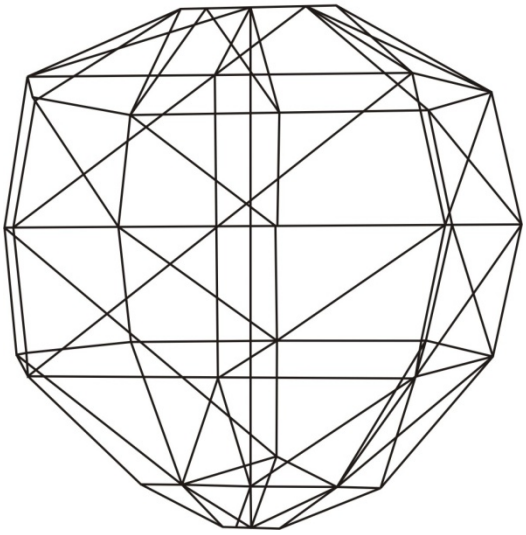
Slika 11.25 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 36, aplikacija



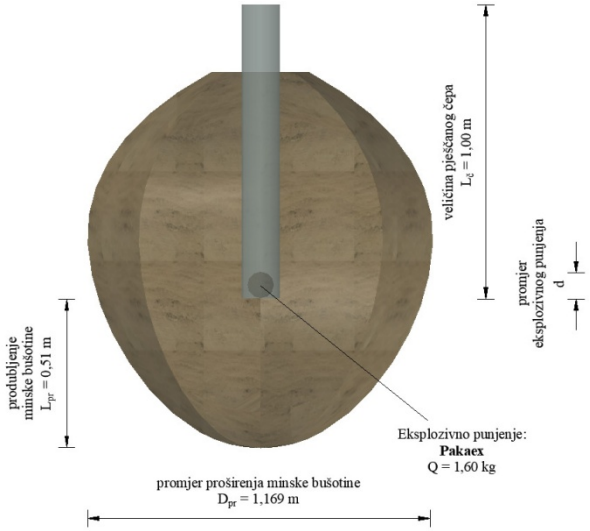
Slika 11.26 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 36, *AutoCad Civil 3D*

Probna minska bušotina PMB 3 $\left(E\ 489127{,}98,\ N\ 5122573{,}54,\ H\ 198{,}43\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $1{,}60\ kg$, Duljina čepa $1{,}0\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 814{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 798{,}34\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 15{,}66\ dm^3$.



Slika 11.27 Linearni 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 3, aplikacija

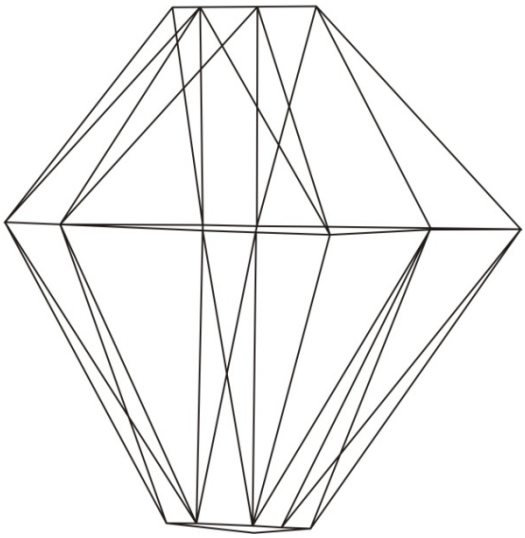


Slika 11.28 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 3, *AutoCad Civil 3D*

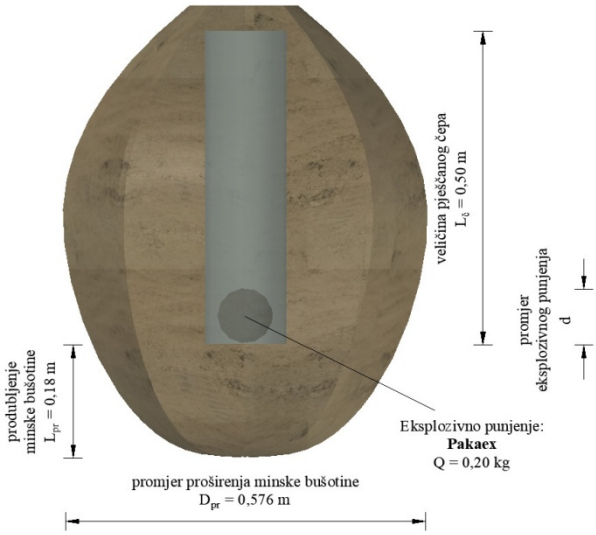
Prilog 3. Nastala kuglasta proširenja prilikom pokusnih miniranja 20. srpnja 2015. godine

Minska bušotina MB 13 $\left(E\ 489075{,}21,\ N\ 5122634{,}06,\ H\ 196{,}25\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}20\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 110{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 90{,}47\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 19{,}53\ dm^3$.



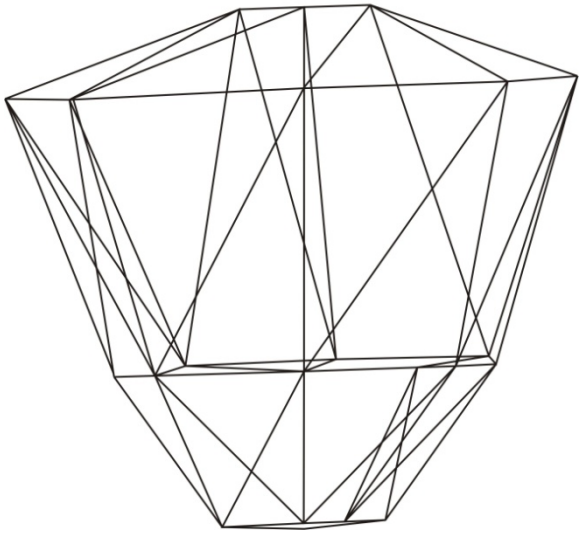
Slika 11.29 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 13, aplikacija



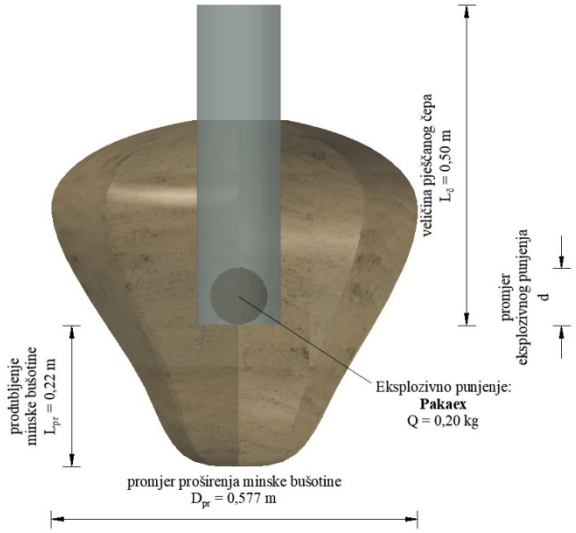
Slika 11.30 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 13, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 14 $\left(E\ 489078{,}87,\ N\ 5122631{,}08,\ H\ 196{,}34\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}20\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 69{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 61{,}41\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 7{,}59\ dm^3$.



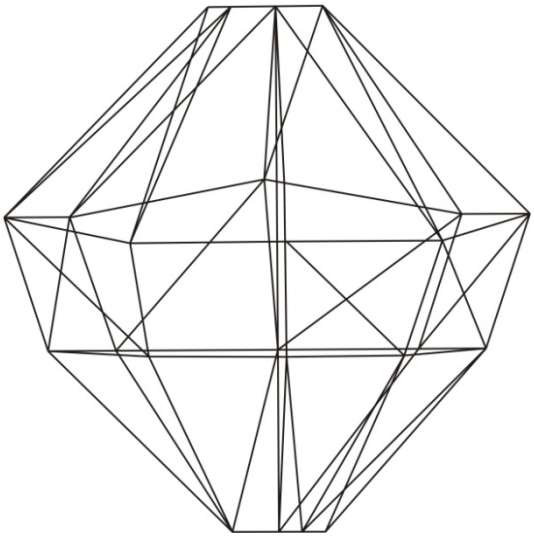
Slika 11.31 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 14, aplikacija



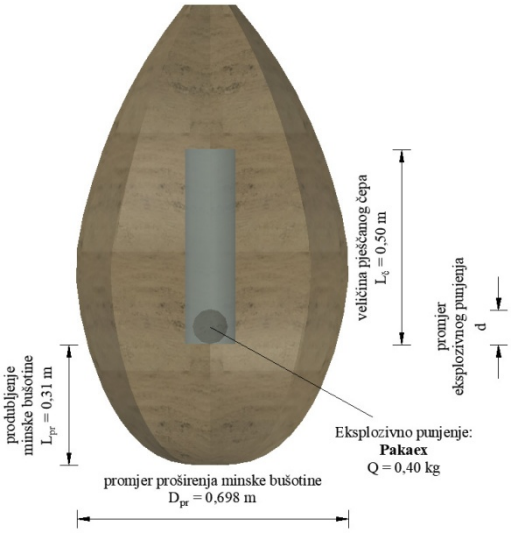
Slika 11.32 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 14, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 15 $\left(E\,489082{,}48,\ N\,5122627{,}57,\ H\,196{,}36\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}40\,kg$, Duljina čepa $0{,}5\,m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 254{,}00\,dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 234{,}80\,dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 19{,}20\,dm^3$.



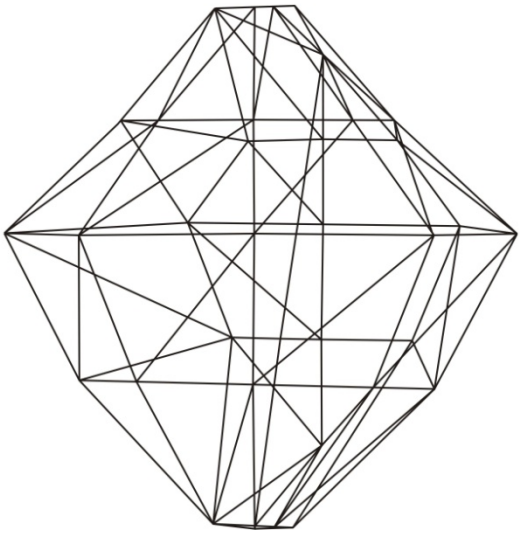
Slika 11.33 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 15, aplikacija



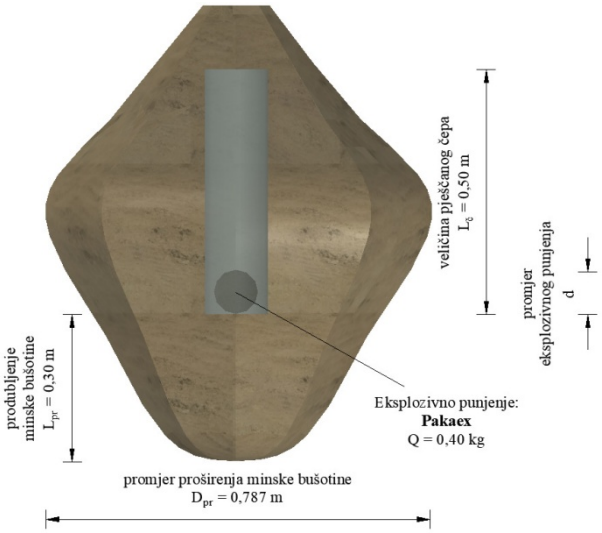
Slika 11.34 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 15, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 16 $\left(E\,489086{,}37,\ N\,5122624{,}19,\ H\,196{,}17\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}40\,kg$, Duljina čepa $0{,}5\,m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 195{,}00\,dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 194{,}08\,dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 0{,}92\,dm^3$.



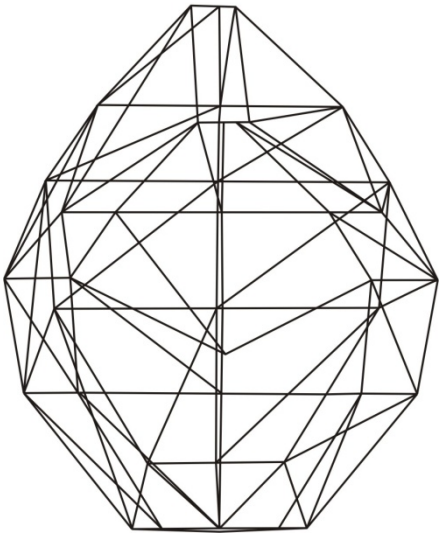
Slika 11.35 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 16, aplikacija



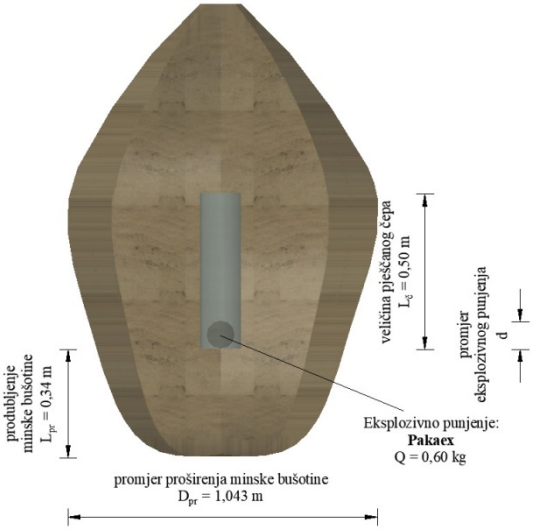
Slika 11.36 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 16, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 17 $\left(E\ 489090{,}09,\ N\ 5122620{,}77,\ H\ 196{,}65\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}60\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 623{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 609{,}00\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 14{,}00\ dm^3$.



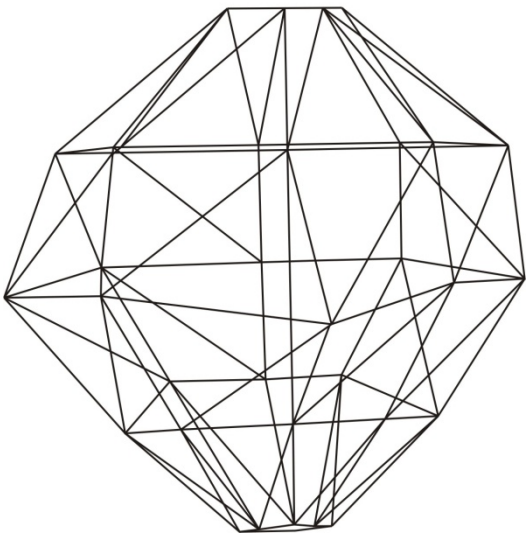
Slika 11.37 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 17, aplikacija



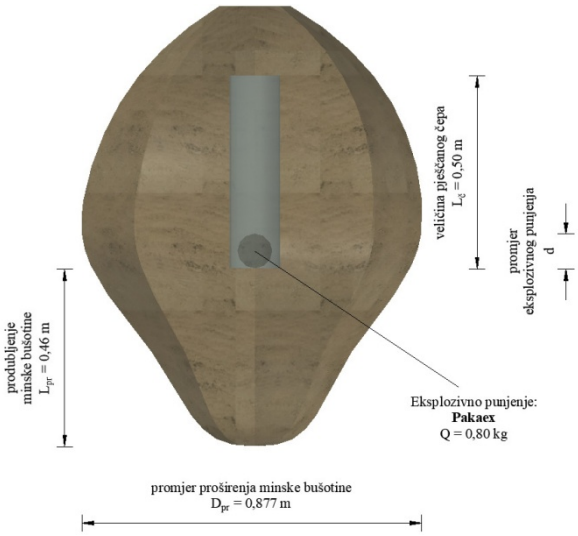
Slika 11.38 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 17, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 18 $\left(E\ 489093{,}58,\ N\ 5122617{,}65,\ H\ 196{,}90\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}80\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 340{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 348{,}30\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 8{,}30\ dm^3$.



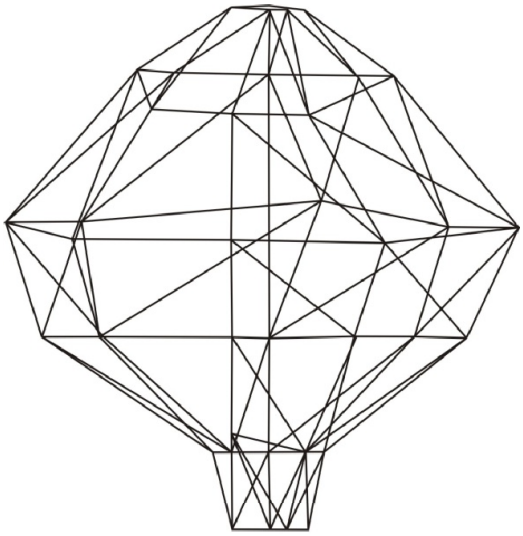
Slika 11.39 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 18, aplikacija



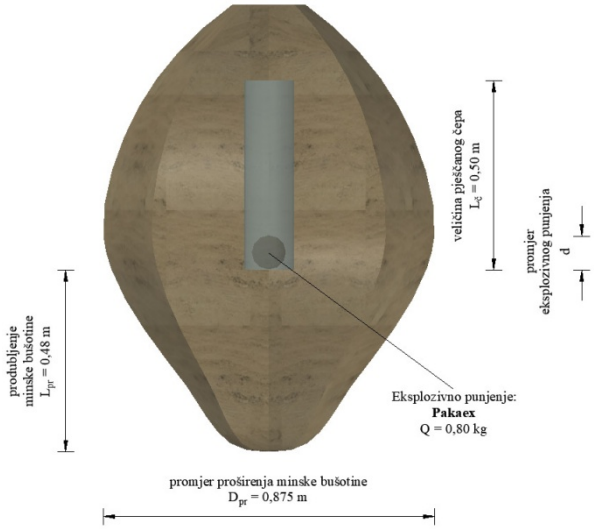
Slika 11.40 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 18, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 19 $\left(E\ 489101{,}15,\ N\ 5122610{,}96,\ H\ 197{,}13\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}80\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 363{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 362{,}23\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 0{,}77\ dm^3$.



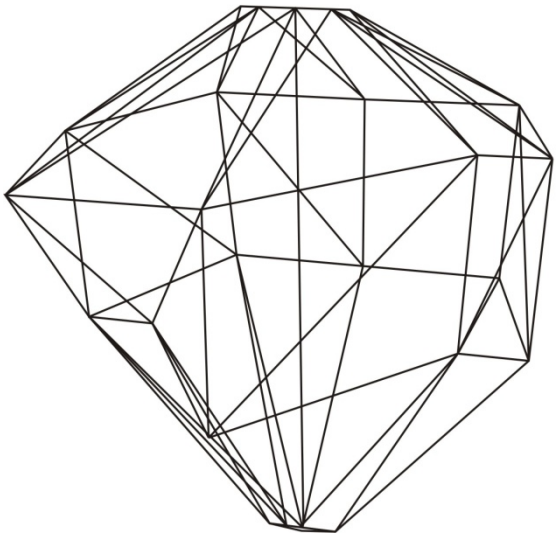
Slika 11.41 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 19, aplikacija



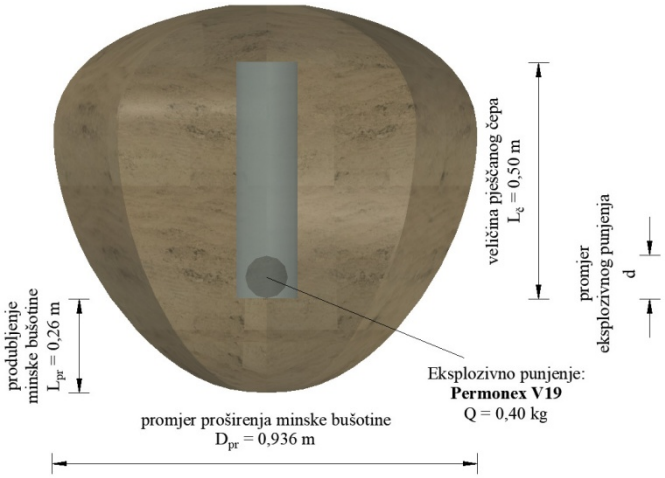
Slika 11.42 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 19, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 21 $\left(E\ 489104{,}97,\ N\ 5122607{,}56,\ H\ 197{,}29\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}40\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 303{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 282{,}42\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 20{,}58\ dm^3$.



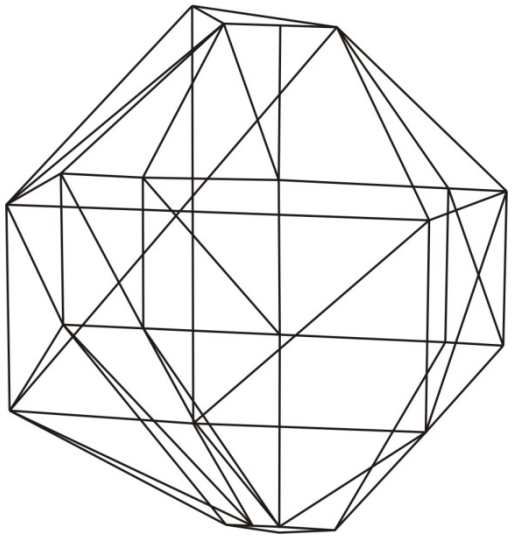
Slika 11.43 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 21, aplikacija



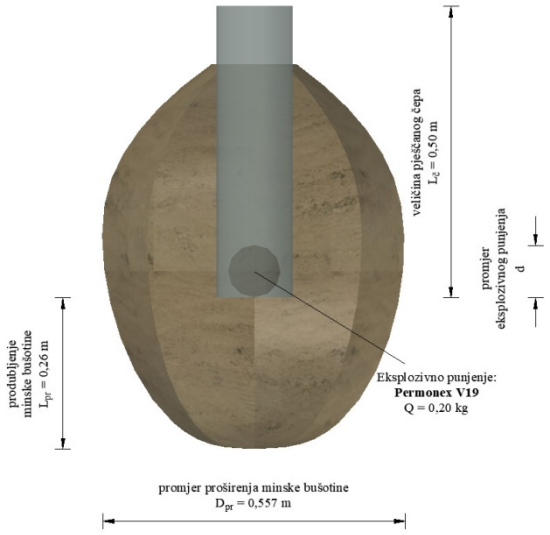
Slika 11.44 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 21, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 22 $\left(E\ 489108{,}63,\ N\ 5122604{,}32,\ H\ 197{,}44\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}20\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 85{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 77{,}70\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 7{,}30\ dm^3$.



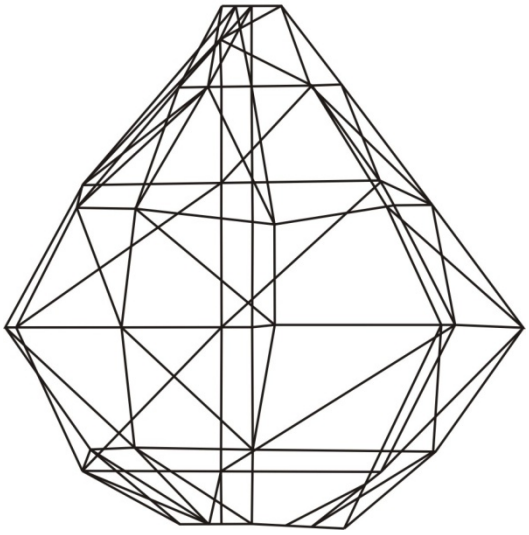
Slika 11.45 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 22, aplikacija



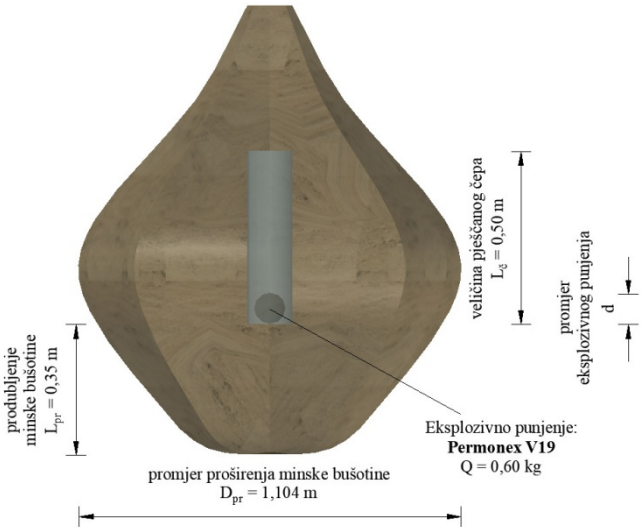
Slika 11.46 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 22, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 23 $\left(E\ 489112{,}26,\ N\ 5122600{,}88,\ H\ 197{,}56\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}60\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 541{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 514{,}19\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 26{,}81\ dm^3$.



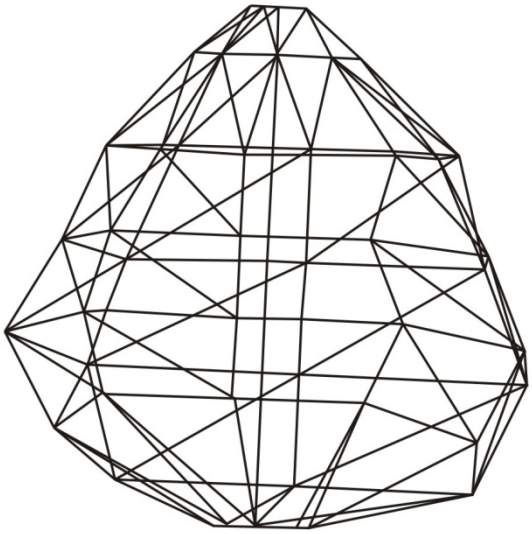
Slika 11.47 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 23, aplikacija



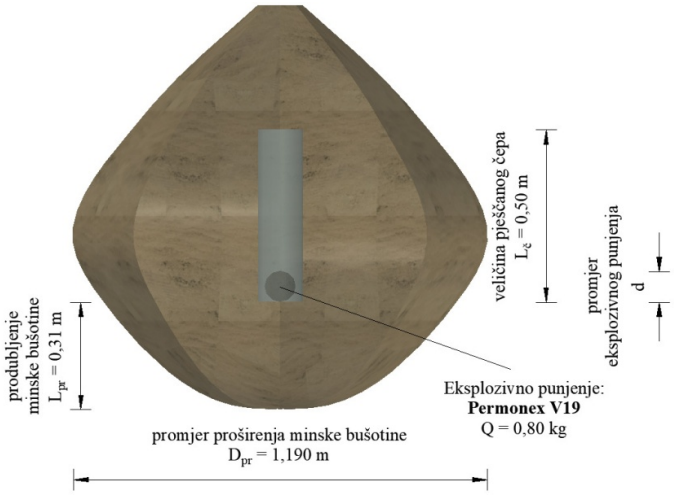
Slika 11.48 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 23, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 24 $\left(E\,489112{,}26,\ N\,5122600{,}88,\ H\,197{,}56\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}80\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 626{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 610{,}80\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 15{,}20\ dm^3$.



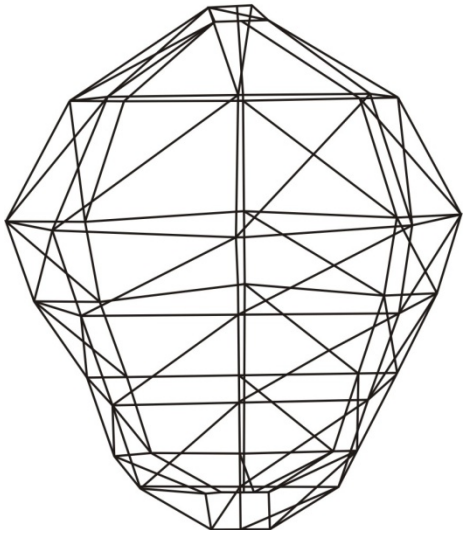
Slika 11.49 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 24, aplikacija



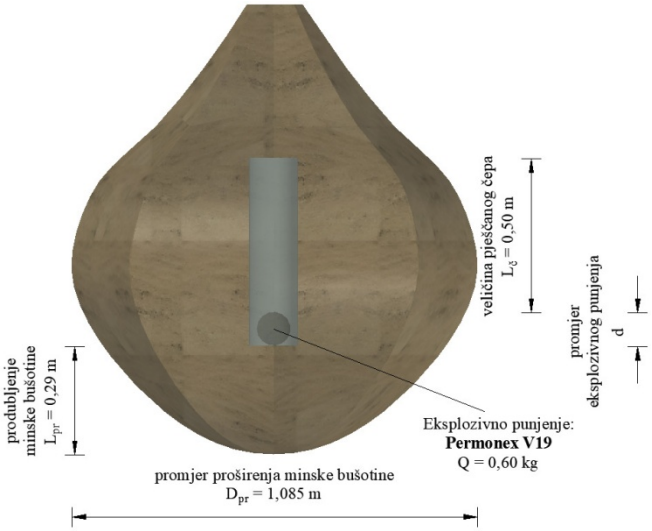
Slika 11.50 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 24, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 25 $\left(E\,489119{,}66,\ N\,5122594{,}27,\ H\,197{,}74\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}60\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 638{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 628{,}04\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 9{,}96\ dm^3$.



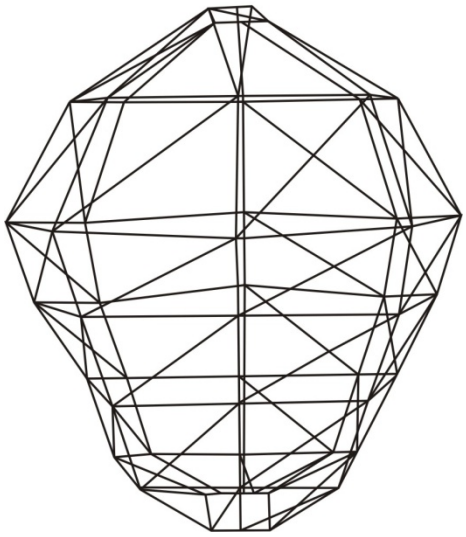
Slika 11.51 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 25, aplikacija



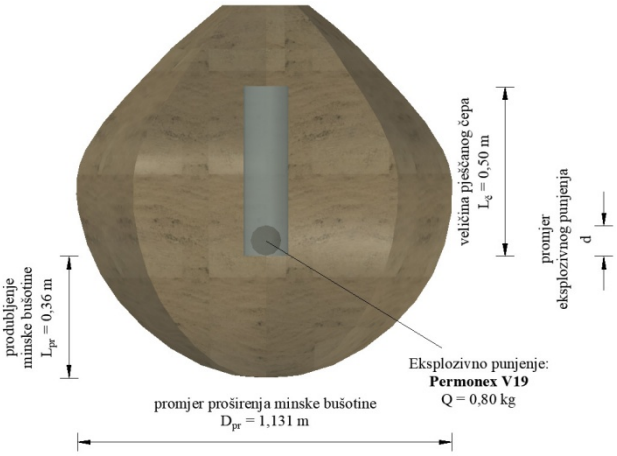
Slika 11.52 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 25, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 26 $\left(E\ 489123{,}49,\ N\ 5122591{,}12,\ H\ 197{,}84\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}80\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 574{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 564{,}00\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 10{,}00\ dm^3$.



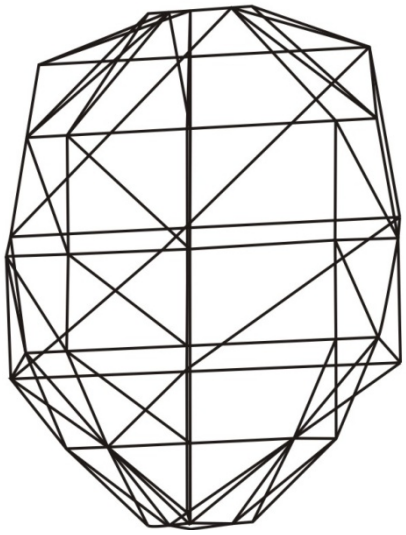
Slika 11.53 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 26, aplikacija



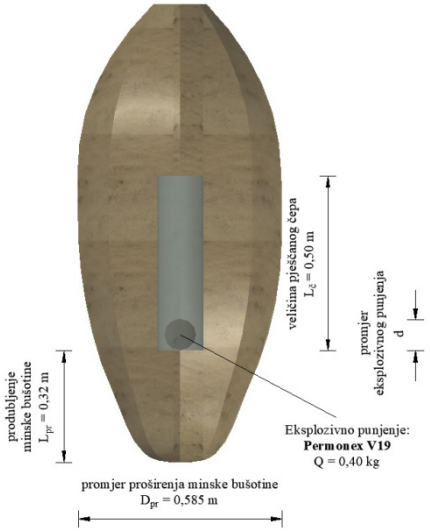
Slika 11.54 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 26, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 27 $\left(E\ 489127{,}42,\ N\ 5122587{,}92,\ H\ 197{,}79\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}40\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 218{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 213{,}83\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 4{,}17\ dm^3$.



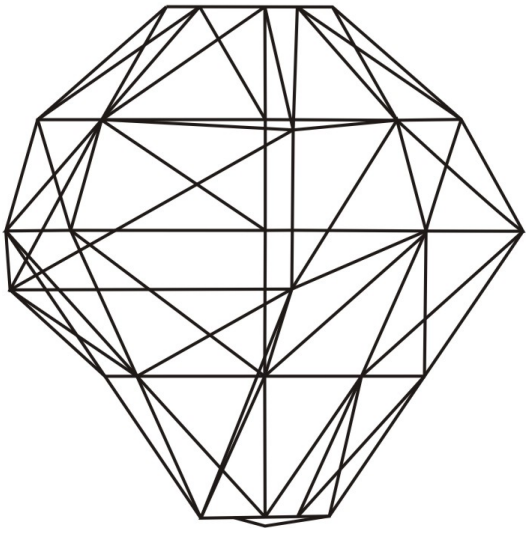
Slika 11.55 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 27, aplikacija



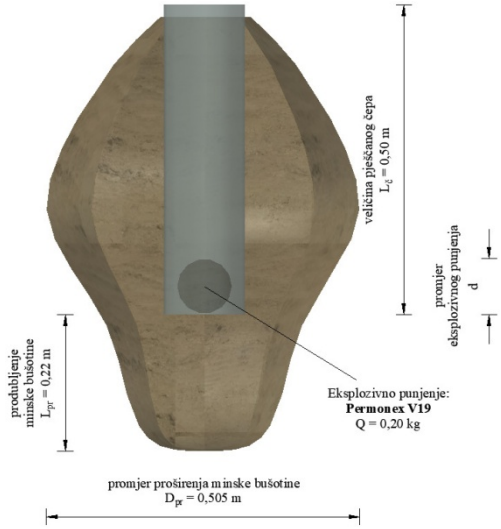
Slika 11.56 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 27, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 28 $\left(E\ 489130{,}99,\ N\ 5122584{,}43,\ H\ 198{,}07\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}20\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 70{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 66{,}60\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 3{,}40\ dm^3$.



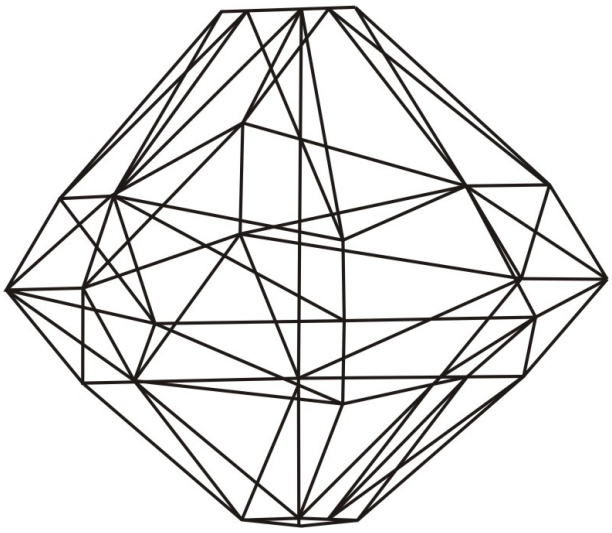
Slika 11.57 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 28, aplikacija



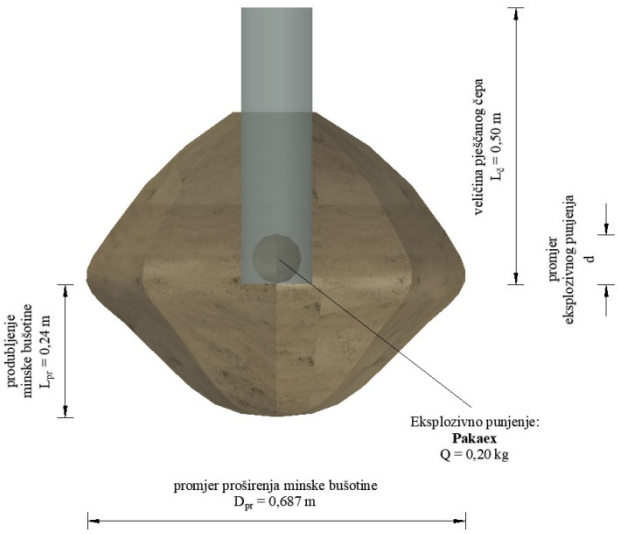
Slika 11.58 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 28, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 29 $\left(E\ 489134{,}65,\ N\ 5122581{,}02,\ H\ 198{,}20\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}20\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 96{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 98{,}08\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 2{,}08\ dm^3$.



Slika 11.59 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 29, aplikacija

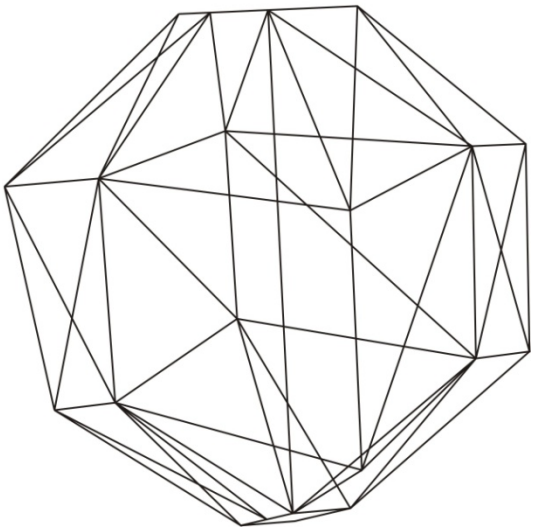


Slika 11.60 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 29, *AutoCad Civil 3D*

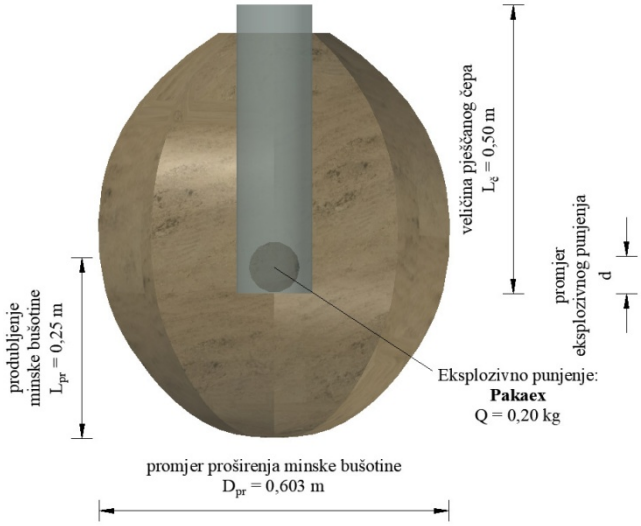
Prilog 4. Nastala kuglasta proširenja prilikom pokusnih miniranja u 2016. godini

Minska bušotina MB 37 $\left(E\ 489059{,}52,\ N\ 5122615{,}00,\ H\ 197{,}34\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}20\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 122{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 113{,}46\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 8{,}54\ dm^3$.



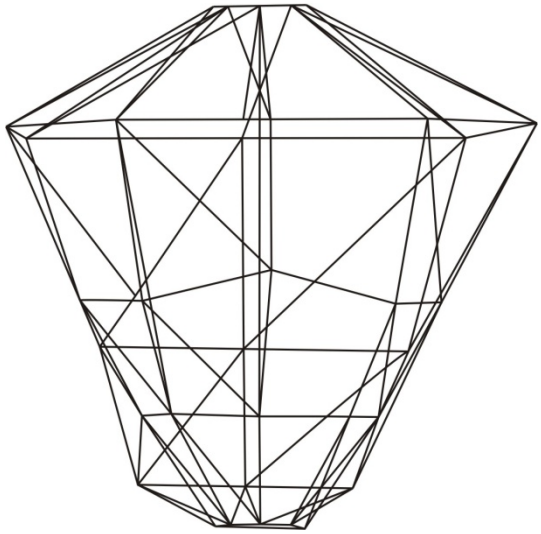
Slika 11.61 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 37, aplikacija



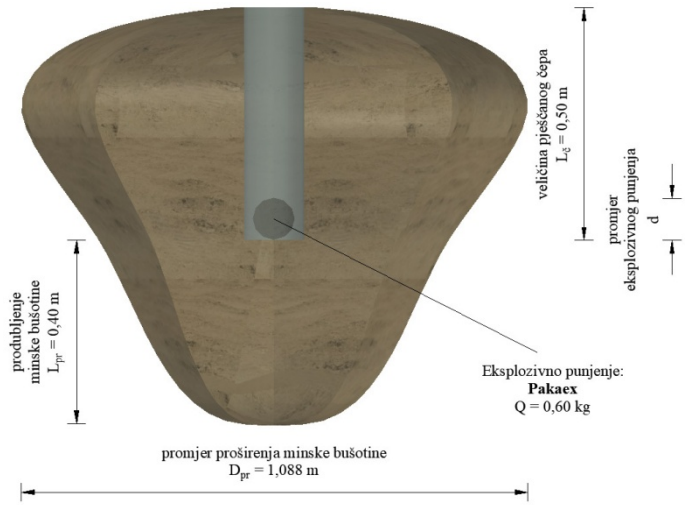
Slika 11.62 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 37, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 39 $\left(E\ 489066{,}97,\ N\ 5122608{,}38,\ H\ 197{,}54\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}60\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 384{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 372{,}99\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 11{,}01\ dm^3$.



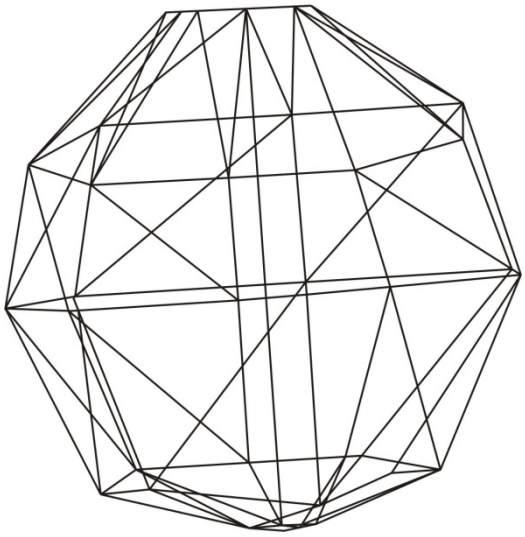
Slika 11.63 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 39, aplikacija



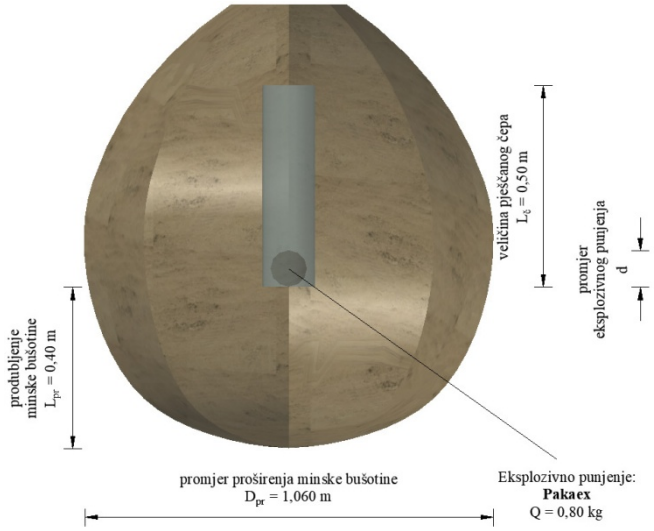
Slika 11.64 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 39, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 40 $\left(E\ 489070{,}71,\ N\ 5122605{,}03,\ H\ 197{,}58\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $0{,}80\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 526{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 511{,}98\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 14{,}02\ dm^3$.



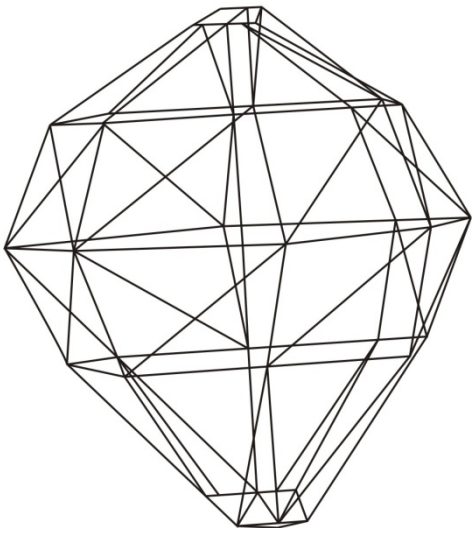
Slika 11.65 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 40, aplikacija



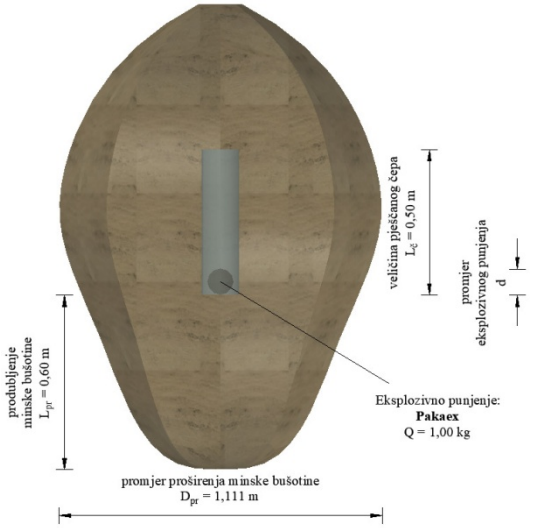
Slika 11.66 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 40, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 41 $\left(E\ 489074{,}43,\ N\ 5122601{,}75,\ H\ 197{,}54\right)$. Eksplozivno punjenje, Pakaex $1{,}00\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 819{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 799{,}22\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 19{,}78\ dm^3$.



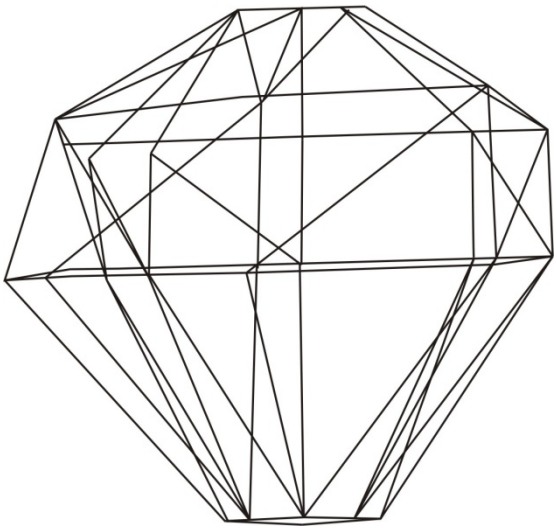
Slika 11.67 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 41, aplikacija



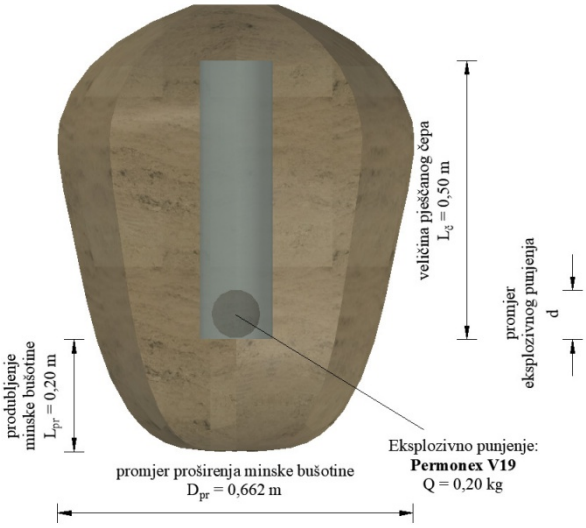
Slika 11.68 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 41, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 42 $(E\ 489078{,}13,\ N\ 5122598{,}39,\ H\ 197{,}63)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}20\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 155{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 141{,}05\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 13{,}95\ dm^3$.



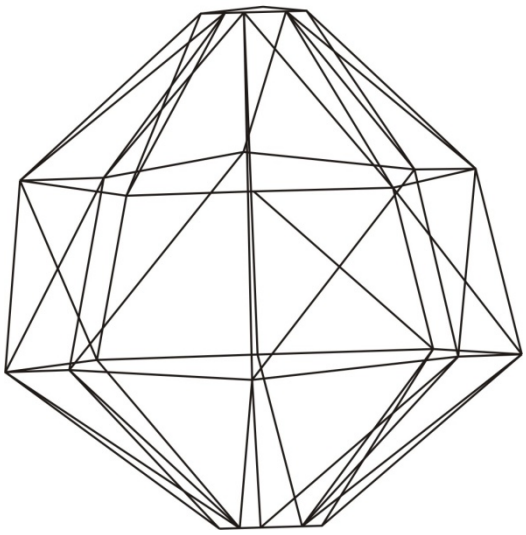
Slika 11.69 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 42, aplikacija



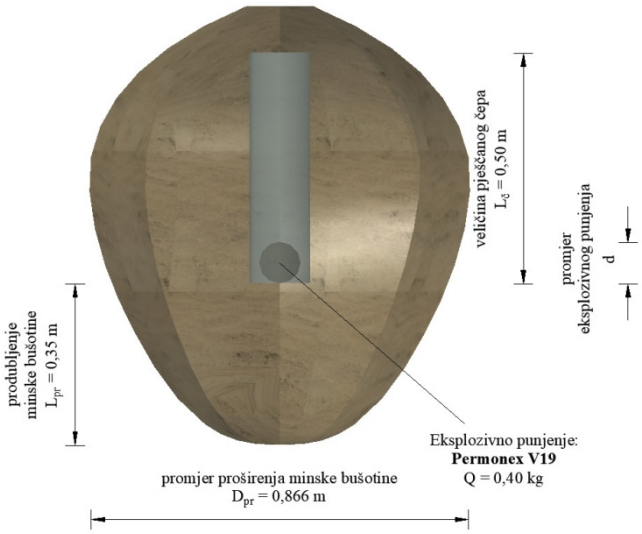
Slika 11.70 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 42, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 43 $(E\ 489081{,}86,\ N\ 5122595{,}05,\ H\ 197{,}80)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}40\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 290{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 272{,}75\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 17{,}25\ dm^3$.



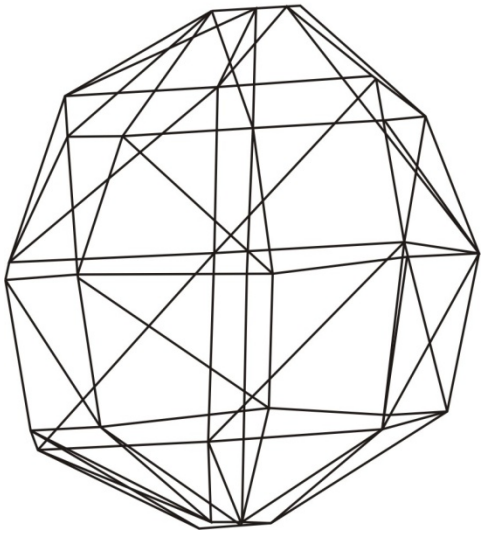
Slika 11.71 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 43, aplikacija



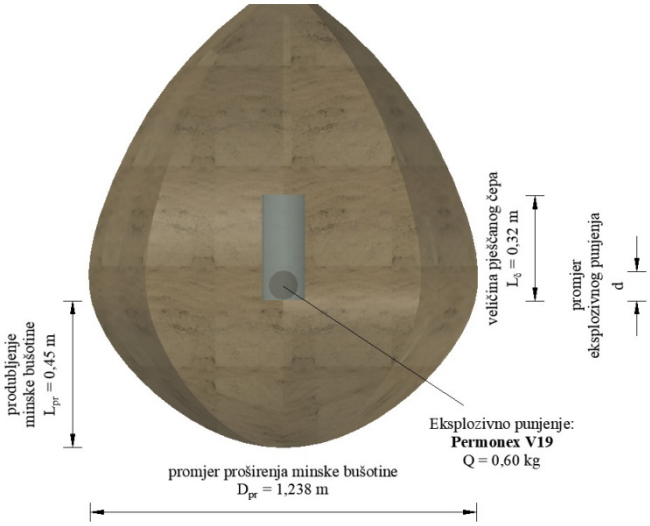
Slika 11.72 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 43, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 44 $\left(E\ 489085{,}61,\ N\ 5122591{,}71,\ H\ 197{,}90\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}60\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 779{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 759{,}70\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 19{,}02\ dm^3$.



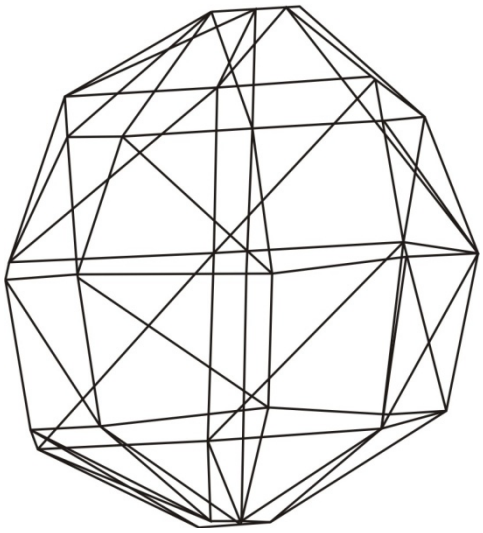
Slika 11.73 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 44, aplikacija



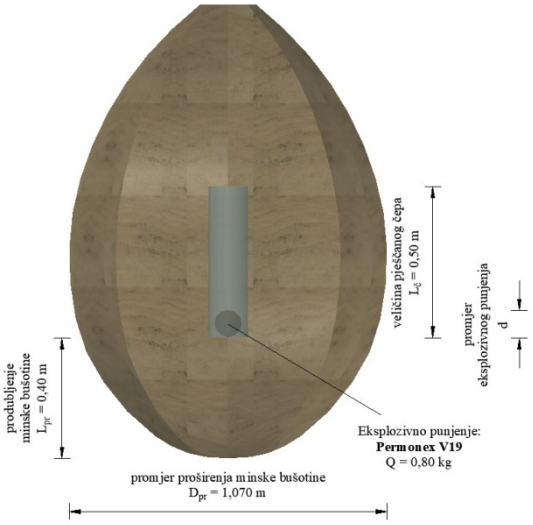
Slika 11.74 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 44, *AutoCad Civil 3D*

Minska bušotina MB 45 $\left(E\ 489089{,}30,\ N\ 5122588{,}35,\ H\ 198{,}07\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}80\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 749{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 731{,}63\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 17{,}37\ dm^3$.



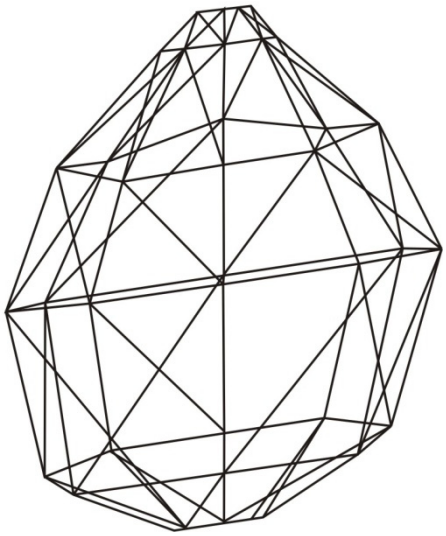
Slika 11.75 Linearni 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 45, aplikacija



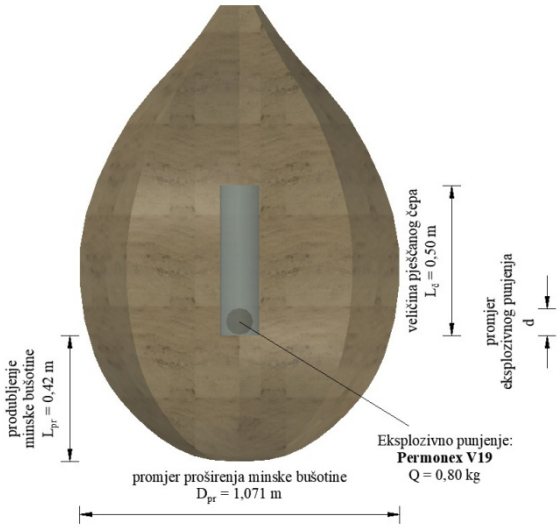
Slika 11.76 3D model nastalog proširenja minske bušotine MB 45, *AutoCad Civil 3D*

Probna minska bušotina PMB 5 $\left(E\ 489130{,}32,\ N\ 5122551{,}70,\ H\ 198{,}61\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}80\ kg$, Duljina čepa $0{,}5\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 729{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 716{,}41\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 12{,}59\ dm^3$.



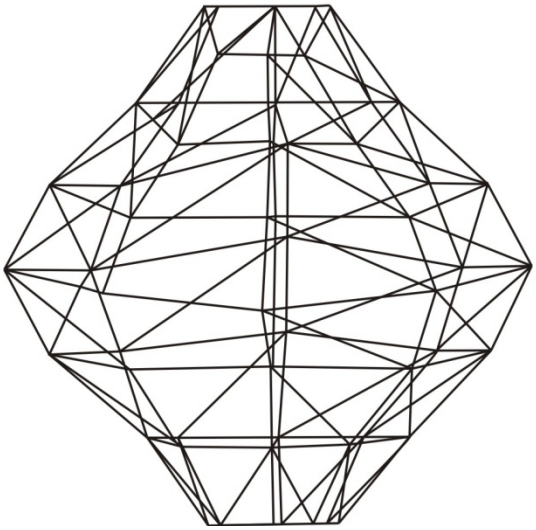
Slika 11.77 Linearni 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 5, aplikacija



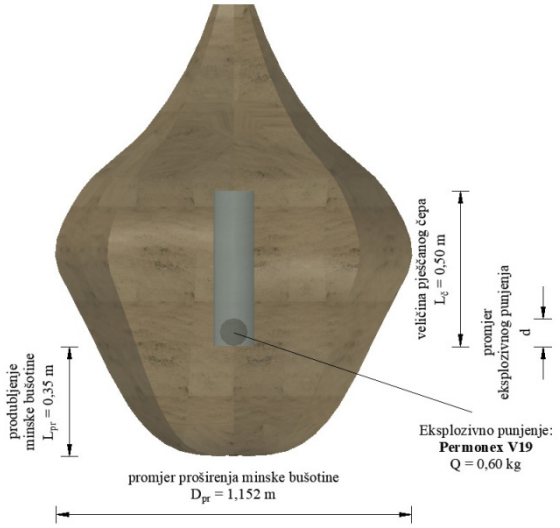
Slika 11.78 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 5, *AutoCad Civil 3D*

Probna minska bušotina PMB 6 $\left(E\ 489127{,}98,\ N\ 5122573{,}54,\ H\ 198{,}43\right)$. Eksplozivno punjenje, Permonex V19 $0{,}60\ kg$, Duljina čepa $1{,}0\ m$ (pijesak). Kuglasto proširenja, *AutoCad Civil 3D* $V_{ACAD} = 627{,}00\ dm^3$, Aplikacija $V_{aplikacija} = 603{,}09\ dm^3$.

Razlika $V_{razlika} = V_{ACAD} - V_{aplikacija} = 23{,}91\ dm^3$.



Slika 11.79 Linearni 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 6, aplikacija



Slika 11.80 3D model nastalog proširenja probne minske bušotine PMB 6, *AutoCad Civil 3D*

Prilog 5. Rezultati terenskih istraživanja 12. lipnja 2014. godine

Minska bušotina	Promjer minske bušotine	Koordinate minskih bušotina			Dubina minske bušotine	Dubina minske bušotine nakon miniranja	Vrsta eksploziva	Masa eksploziva	Duljina čepa	Vrsta minskog čepa	Produbljenje	Nastali promjer proširenja	Zatečena vlaga	Volumen nastalog proširenja
	D_{MB} [m]	Y [m]	X [m]	H_{vrh} [m]	H_{MB} [m]	H_{MBnm} [m]		Q [kg]	$L_Č$ [%]		L_{pr} [m]	D_{pr} [m]	W_0 [%]	V_{pr} [dm^3]
PMB1	0,131	489445,79	5122735,66	196,53	2,03	2,43	Permonex V19	1,25	1,00	pijesak	**0,40**	**1,1930**	**34,60**	**872,20**
PMB2	0,131	489453,24	5122729,03	196,74	2,09	2,27	Permonex V19	0,50	1,00	pijesak	**0,27**	**1,0060**	**32,00**	**371,65**
MB1	0,131	489450,00	5122751,77	195,49	2,01	2,44	Pakaex (rinfuza)	1,00	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	**0,43**	**1,2540**	**34,90**	**751,65**
MB2	0,131	489453,79	5122748,40	195,65	1,98	2,38	Pakaex (rinfuza)	0,80	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	**0,40**	**1,1690**	**34,80**	**574,70**
MB3	0,131	489457,47	5122745,07	195,85	2,07	2,41	Pakaex (rinfuza)	0,60	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	**0,34**	**1,1530**	**34,00**	**507,10**
MB4	0,131	489461,22	5122741,75	195,82	1,94	2,23	Pakaex (rinfuza)	0,40	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	**0,26**	**1,0450**	**33,60**	**461,55**
MB5	0,131	489464,88	5122738,43	195,8	1,98	2,14	Permonex V19	0,40	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	**0,22**	**0,8810**	**33,25**	**323,00**
MB6	0,131	489468,61	5122735,08	195,94	1,94	2,14	Permonex V19	0,60	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	**0,28**	**1,0960**	**33,00**	**436,96**
MB7	0,131	489472,40	5122731,76	195,99	1,94	2,36	Permonex V19	0,80	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	**0,42**	**1,1290**	**33,58**	**656,95**
MB8	0,131	489476,12	5122728,26	196,24	2,02	2,48	Permonex V19	1,00	0,5/ 0,5	pijesak/ glina	**0,46**	**1,1400**	**33,40**	**835,50**

Prilog 6. Rezultati terenskih istraživanja 12. lipnja 2015. godine

Minska bušotina	Promjer minske bušotine	Koordinate minskih bušotina			Dubina minske bušotine	Dubina minske bušotine nakon miniranja	Vrsta eksploziva	Masa eksploziva	Duljina čepa	Vrsta minskog čepa	Produbljenje	Nastali promjer proširenja	Zatečena vlaga	Volumen nastalog proširenja
	D_{MB} [m]	Y [m]	X [m]	H_{vrh} [m]	H_{MB} [m]	H_{MBnm} [m]		Q [kg]	$L_{Č}$ [%]		L_{pr} [m]	D_{pr} [m]	W_0 [%]	V_{pr} [dm^3]
PMB3	0,131	489127,98	5122573,54	198,43	3,07	3,50	Pakaex (rinfuza)	1,60	1,00	pijesak	**0,51**	**1,1690**	**33,20**	**807,00**
PMB4	0,131	489133,55	5122568,55	198,45	2,90	/	Permonex V19	0,60	1,00	pijesak	**ZAČEPLJENA**			
PMB4	0,131	489133,55	5122568,55	198,45	1,20	/	Permonex V19	0,60	0,5	pijesak	**UNIŠTENA PREVELIKOM MASOM EKSPLOZIVA**			
MB31	0,131	489142,09	5122574,35	198,49	3,04	3,20	Permonex V19	0,20	0,30	pijesak	**0,16**	**0,5840**	**29,40**	**80,50**
MB32	0,131	489145,81	5122570,99	198,71	3,05	3,28	Pakaex (rinfuza)	0,40	0,30	pijesak	**0,23**	**0,6700**	**30,70**	**154,50**
MB33	0,131	489149,53	5122567,63	198,82	3,04	/	Pakaex (rinfuza)	0,60	0,3	pijesak	**ZAČEPLJENA**			
MB33	0,131	489149,53	5122567,63	198,82	1,63	/	Permonex V19	0,40	0,3	pijesak	**UNIŠTENA PREVELIKOM MASOM EKSPLOZIVA**			
MB34	0,131	489153,27	5122564,36	198,97	2,87	3,10	Pakaex (rinfuza)	0,80	0,50	pijesak	**0,33**	**0,9530**	**31,57**	**393,50**
MB35	0,131	489156,98	5122560,99	198,95	2,80	3,05	Pakaex (rinfuza)	0,60	0,50	pijesak	**0,25**	**0,7830**	**30,40**	**255,50**
MB36	0,131	489160,70	5122557,69	199,13	3,07	3,25	Permonex V19	0,40	0,50	pijesak	**0,23**	**0,6930**	**30,00**	**113,50**

Prilog 7. Rezultati terenskih istraživanja 20. srpnja 2015. godine

Minska bušotina	Promjer minske bušotine	Koordinate minskih bušotina			Dubina minske bušotine	Dubina minske bušotine nakon miniranja	Vrsta eksploziva	Masa eksploziva	Duljina čepa	Vrsta minskog čepa	Produbljenje	Nastali promjer proširenja	Zatečena vlaga	Volumen nastalog proširenja
	D_{MB} [m]	Y [m]	X [m]	H_{vrh} [m]	H_{MB} [m]	H_{MBnm} [m]		Q [kg]	$L_Č$ [%]		L_{pr} [m]	D_{pr} [m]	W_0 [%]	V_{pr} [dm^3]
MB13	0,131	489075,21	5122634,06	196,25	2,44	2,62	Pakaex (rinfuza)	0,20	0,50	pijesak	**0,18**	**0,5760**	**30,50**	**100,50**
MB14	0,131	489078,87	5122631,08	196,34	2,52	2,74	Pakaex (rinfuza)	0,20	0,50	pijesak	**0,22**	**0,5770**	**26,90**	**64,50**
MB15	0,131	489082,48	5122627,57	196,36	2,47	2,78	Pakaex (rinfuza)	0,40	0,50	pijesak	**0,31**	**0,6980**	**32,20**	**244,50**
MB16	0,131	489086,37	5122624,19	196,17	2,53	2,83	Pakaex (rinfuza)	0,40	0,50	pijesak	**0,30**	**0,7870**	**30,10**	**194,50**
MB17	0,131	489090,09	5122620,77	196,65	2,51	2,85	Pakaex (rinfuza)	0,60	0,50	pijesak	**0,34**	**1,0430**	**34,60**	**616,00**
MB18	0,131	489093,58	5122617,65	196,90	2,18	2,64	Pakaex (rinfuza)	0,80	0,50	pijesak	**0,46**	**0,8770**	**30,70**	**344,00**
MB19	0,131	489097,38	5122614,18	197,00	2,20	2,68	Pakaex (rinfuza)	0,80	0,50	pijesak	**0,48**	**0,8750**	**31,40**	**362,60**
MB20	0,131	489101,15	5122610,96	197,13	2,54	3,06	Pakaex (rinfuza)	1,00	0,50	pijesak	**0,52**	**1,1570**	**33,20**	**710,00**
MB21	0,131	489104,97	5122607,56	197,29	2,52	2,72	Permonex V19	0,40	0,50	pijesak	**0,26**	**0,9360**	**33,60**	**292,50**
MB22	0,131	489108,63	5122604,32	197,44	1,90	2,16	Permonex V19	0,20	0,50	pijesak	**0,26**	**0,5570**	**32,00**	**82,50**
MB23	0,131	489112,26	5122600,88	197,56	2,22	2,59	Permonex V19	0,60	0,50	pijesak	**0,35**	**1,1040**	**33,60**	**527,60**
MB24	0,131	489116,60	5122597,48	197,65	2,26	2,50	Permonex V19	0,80	0,50	pijesak	**0,31**	**1,1900**	**34,10**	**618,40**
MB25	0,131	489119,66	5122594,27	197,74	2,31	2,60	Permonex V19	0,60	0,50	pijesak	**0,29**	**1,0850**	**34,80**	**633,00**
MB26	0,131	489123,49	5122591,12	197,84	2,34	2,70	Permonex V19	0,80	0,50	pijesak	**0,36**	**1,1310**	**33,80**	**569,00**
MB27	0,131	489127,42	5122587,92	197,79	2,19	2,51	Permonex V19	0,40	0,50	pijesak	**0,32**	**0,5850**	**33,20**	**216,00**
MB28	0,131	489130,99	5122584,43	198,07	2,18	2,40	Permonex V19	0,20	0,50	pijesak	**0,22**	**0,5050**	**27,86**	**70,00**
MB29	0,131	489134,65	5122581,02	198,20	196,19	2,25	Pakaex (rinfuza)	0,20	0,50	pijesak	**0,24**	**0,6870**	**29,10**	**98,00**
MB30	0,131	489138,53	5122577,81	198,28			Permonex V19	1,60	0,50	pijesak	**UNIŠTENA PREVELIKOM MASOM EKSPLOZIVA**			

Prilog 8. Rezultati terenskih istraživanja 31. kolovoza 2015. godine

Minska bušotina	Promjer minske bušotine	Koordinate minskih bušotina			Dubina minske bušotine	Dubina minske bušotine nakon miniranja	Vrsta eksploziva	Masa eksploziva	Duljina čepa	Vrsta minskog čepa	Produbljenje	Nastali promjer proširenja	Zatečena vlaga	Volumen nastalog proširenja
	D_{MB} [m]	Y [m]	X [m]	H_{vrh} [m]	H_{MB} [m]	H_{MBnm} [m]		Q [kg]	$L_Č$ [%]		L_{pr} [m]	D_{pr} [m]	W_0 [%]	V_{pr} [dm^3]
MB37	0,131	489059,52	5122615,00	197,34	2,05	2,30	Pakaex (rinfuza)	0,20	0,50	pijesak	**0,25**	**0,6010**	**29,80**	**117,50**
MB38	0,131	489063,24	5122611,74	197,45	2,10	2,50	Pakaex (rinfuza)	0,40	0,50	pijesak	**0,40**	**0,8480**	**30,40**	**298,00**
MB39	0,131	489066,97	5122608,38	197,54	2,10	2,50	Pakaex (rinfuza)	0,60	0,50	pijesak	**0,40**	**1,0880**	**31,50**	**378,50**
MB40	0,131	489070,71	5122605,03	197,58	2,10	2,50	Pakaex (rinfuza)	0,80	0,50	pijesak	**0,40**	**1,0600**	**33,01**	**519,00**
MB41	0,131	489074,43	5122601,75	197,54	2,10	2,70	Pakaex (rinfuza)	1,00	0,50	pijesak	**0,60**	**1,1110**	**34,70**	**809,50**
MB42	0,131	489078,13	5122598,39	197,63	2,10	2,30	Permonex V19	0,20	0,50	pijesak	**0,20**	**0,6620**	**32,80**	**148,00**
MB43	0,131	489081,86	5122595,05	197,80	2,10	2,45	Permonex V19	0,40	0,50	pijesak	**0,30**	**0,8660**	**33,00**	**281,50**
MB44	0,131	489085,61	5122591,71	197,90	2,10	2,55	Permonex V19	0,60	0,32	pijesak	**0,38**	**1,2380**	**34,60**	**769,50**
MB45	0,131	489089,30	5122588,35	198,07	2,10	2,50	Permonex V19	0,80	0,50	pijesak	**0,40**	**1,0700**	**35,50**	**740,50**
PMB5	0,131	489126,55	5122555,03	198,66	2,10	2,52	Permonex V19	0,80	0,50	pijesak	**0,42**	**1,0710**	**34,70**	**722,70**
PMB6	0,131	489130,32	5122551,70	198,61	2,10	2,45	Permonex V19	0,60	0,50	pijesak	**0,35**	**1,1520**	**33,40**	**615,05**

Popis korištenih oznaka i odgovarajućih jedinica

Oznaka	Značenje oznake	Jedinica mjere
a	razmak minskih bušotina	[m]
A_c	presjek čeličnog užeta (snopa)	[mm^2]
B	linija najmanjeg otpora	[m]
b	razmak između redova kotlovskih bušotina	[m]
c	kohezija	[kN/m^2]
C_f	fazna brzina	[m/s]
$coef_B$	konstanta aplikacije	-
CW	maksimalno eksplozivno punjenje po minskoj bušotini	[kg]
D	udaljenost minske bušotine od mjesta opažanja	[m]
$d_{bušotine}$	dubina bušotine	[m]
D_{MB}	promjer minske bušotine	[m]
D_{pr}	promjer proširenja minske bušotine nakon miniranja	[m]
d_s	promjer linijskog sidra	[m]
E	Young-ov modul	[kN/m^2]
e	koeficijent pora	-
e_0	početni koeficijent pora	-
E_0	početna horizontalna koordinata	[m]
F	nosivost	[kN]
f	frekvencija	[Hz]
f_G	frekvencija geofona	[Hz]
G	modul smicanja	[kN/m^2]
g_{ek}	gustoća eksplozivnog punjenja	[kg/dm^3]
H	visina etaže	[m]
H_0	početna visina uzorka	[mm]
H_c	visina čestica tla	[mm]
H_{dno}	izmjerena dubina minske bušotine	[m]
H_{MB}	dubina minske bušotine	[m]
H_{MBnm}	dubina minske bušotine nakon miniranja	[m]
H_P	ukupna visina pora	[mm]
H_{vrh}	visina minske bušotine	[m]
I_C	indeks konzistencije	-
I_P	indeks plastičnosti	[%]
K	koeficijent poboljšanja tla	-
k_p	pokazatelj proširenja minskih bušotina	[dm^3/kg]
k_0	koeficijent otpora mekane stijene spram djelovanja eksplozije	-

Oznaka	Značenje oznake	Jedinica mjere
k	koeficijent ovisan o vrsti mekane stijene u kojoj se izvodi kotlovsko miniranje	-
K_X	prostorna frekvencija	[Hz]
$\bar{l}$	umnožak prosječne izmjerene udaljenosti	[m]
$L_Č$	duljina čepa	[m]
L_{pr}	nastalo produbljenje minske bušotine nakon miniranja	[m]
m	masa uzorka	[g]
m_d	masa osušenog uzorka	[g]
m_{kg}	koeficijent gustoće kotlovskih bušotina	-
m_v	masa isparene vode	[g]
n	relativna poroznost	[%]
N_0	početna vertikalna koordinata	[m]
PVS	brzina oscilacije tla	[mm/s]
Q	masa eksploziva	[kg]
q_k	specifična potrošnja eksploziva za kotlovsko miniranje	[kg/m^3]
Q_k	eksplozivno punjenje za proširenje minske bušotine	[kg]
Q_{kp}	eksplozivno punjenje za glavno kotlovsko miniranje	[kg]
Q_s	vrijednost nosivosti linijskog sidra	[kN]
Q_u	granična nosivost linijskog sidra	[kN]
Q_{us}	nosivost sidra s obzirom na otpor tla	[kN]
R_i	polumjer istiskivanja	[m]
R_r	polumjer zone razaranja	[m]
SD	reducirana udaljenost	[m/kg^2]
S_r	stupanj zasićenosti	[%]
u	tlak vode u porama, porni tlak	[kN/m^2]
V	volumen odloma kotlovske minske bušotine	[m^3]
V_c	volumen čvrstih čestica	[cm^3]
V_L	brzina longitudinalne komponente oscilacija	[cm/s]
V_p	volumena pora	[cm^3]
V_P	brzina longitudinalnih valova	[m/s]
V_{pr}	volumen nastalog proširenja minske bušotine nakon miniranja	[dm^3]
V_R	rezultantna brzina oscilacija tla	[cm/s]
V_S	brzina posmičnih valova	[m/s]
V_T	brzina transverzalne komponente oscilacija	[cm/s]
v_{top}	visina vrha bušotine	[m]
V_u	ukupni volumen uzorka tla	[cm^3]
V_V	brzina vertikalne komponente oscilacija	[cm/s]
V_v	volumen vode sadržane u porama	[cm^3]

Oznaka	Značenje oznake	Jedinica mjere
V_z	volumen pora ispunjen plinovima	[cm^3]
w	vlaga uzorka	[%]
w_0	zatečena vlaga	[%]
w_L	granica tečenja	[%]
w_P	granica plastičnosti	[%]
w_s	relativna vlažnost	[%]
X	X koordinata minske bušotine	[m]
$\bar{x}$	aritmetička sredina udaljenosti	[m]
Y	Y koordinata minske bušotine	[m]
z_{max}	maksimalna dubina istraživanja	[m]

Popis korištenih oznaka i odgovarajućih jedinica

Oznaka	Značenje oznake	Jedinica mjere
α	karakteristični kut za određenu stranu svijeta	[°]
β	bezdimenzionalni adhezijski faktor	-
ΔE	horizontalni pomak koordinate E	[m]
$\Delta \varepsilon$	promjena koeficijenta pora	-
ΔH	pomak	[m]
$\Delta \sigma$	vertikalno opterećenje	[kN/m^2]
ΔN	vertikalni pomak koordinate N	[m]
Δv	visina vrha minske bušotine	[m]
ρ	obujamska masa vlažnog tla	[g/cm^3]
ρ'	obujamska masa uronjenog tla	[g/cm^3]
ρ_d	obujamska masa suhog tla	[g/cm^3]
ρ_{gt}	gustoća glinenog tla	[g/cm^3]
ρ_s	specifična gustoća	[g/cm^3]
ρ_w	obujamska masa vode	[g/cm^3]
σ_d	dozvoljeno naprezanje	[kN/m^2]
σ_n	normalno naprezanje	[kN/m^2]
σ'_n	efektivno naprezanje tla zasićenog vodom	[kN/m^2]
φ	kut unutrašnjeg trenja	[°]
λ_{max}	najveća valna duljina generiranih površinskih valova, dozvoljeno naprezanje	[m]
ν	Poisson-ov koeficijent	-
τ_f	efektivno naprezanje	[kN/m^2]

Popis kratica

AC - Artur Casagrande klasifikacija tla,
ANFO - smjesa amonijevog nitrata i mineralnog ulja,
ASTM - Američka norma,
AWT - Abstract Window Toolkit,
BS - Britanska norma,
CAD - Computer-aided design,
CC - drenirani pokus,
CEN - Europski odbor za normizaciju,
CENELEC - Europski odbor za elektrotehničku normizaciju,
CROPOS - Hrvatski pozicijski sustav (CROatianPOsitioning System),
CU - drenirani nekonsolidirani pokus,
DC - državna cesta,
DGU - Državna geodetska uprava,
DIN - Deutsches Institut für Normung,
DXF - Drawing Exchange Format,
EC8 - Eurokod 8,
EJB - Enterprise Java Bean,
ETSI - Europski institut za telekomunikacijske norme,
GNSS - Global Navigation Satellite System,
GPS - Global Positioning System,
HAA - Hrvatska akreditacijska agencija,
HRN - hrvatska norma,
HTRS96 - Hrvatski terestrički referentni sustav za epohu 1995.55,
HVRS71 - Hrvatski visinski referentni sustav za epohu 1971.5,
ISO - International Organization for Standardization,
JAAS - Java Authentication and Authorization Service,
JDK - Java Development Kit,
JOGL - Java binding for OpenGL,
LC - lokalna cesta,
MASW - višekanalna analiza površinskih valova (Multi-Channel Analysis of Surface Waves),
MB - minska bušotina,
MO - mjesto opažanja,
MP - minsko polje,
NMEA - The National Marine Electronics Association,
NTRIP - Networked Transport of RTCM via Internet Protocol,
OSMRE - Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement,

PMB	- probna minska bušotina,
PVS	- peak vector sum,
RTCM	- Radio Technical Commission for Maritime Services,
RTK	- kinematika u realnom vremenu (real-time kinematic),
SD	- reducirana udaljenost,
SASW	- spektralna analiza površinskih valova,
TED	- trenutni električni detonator,
USBM	- United States Bureau of Mines,
UU	- nekonsolidirani pokus,
VRS	- virtualne referentne stanice.

Životopis

Denis Težak rođen je 26. prosinca 1984. godine u Varaždinu. Od 2003.-2010. studirao je na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu i stekao zvanje: Diplomirani inženjer geotehnike. Poslijediplomski studij rudarstva upisuje 2010. godine na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Od 01. travnja 2010. godine zaposlen je na Geotehničkom fakultetu kao stručni suradnik na izradi rudarskih projekata, pod vodstvom prof. dr. sc. Josipa Meseca i kao voditelj geodetske terenske ekipe. 2011. godine zapošljava se na radno mjesto asistent na Geotehničkom fakultetu . Održava vježbe iz predmeta: Stabilnost kosina, Projektiranje u rudarstvu, Miniranje, Podzemne prostorije i Eksploatacija mineralnih sirovina. Pomogao je prilikom izrade brojnih diplomskih i završnih radova te je neposredni voditelj prilikom izrade jednog završnog rada.

Od 01. listopada 2017. zapošljava se na Geotehničkom fakultetu na radno mjesto stručni suradnik u nastavi iz predmeta iz grane rudarstvo na preddiplomskom studiju Inženjerstvo okoliša i Geoinženjerstvo, te na diplomskom studiju Geoinženjerstva.

Od 2010. do 2017. godine obnašao je funkciju predsjednika Povjerenstva za izradu nastavne strukture preddiplomskog i diplomskog studijskog programa Inženjerstva okoliša, te doktorskog studijskog programa Inženjerstva okoliša. Od 2015. godine član je Hrvatskog društva inženjera geotehnike.

Autor je i koautor niza znanstvenih i stručnih radova iz područja miniranja, rudarstva, geodezije i geotehnike te srodnih područja.

Suradnik je na nizu projekata, elaborata i mjerenja iz područja miniranja, rudarstva, geodezije i geotehnike te srodnih područja.

U svom znanstvenom radu aktivno se služi engleskim jezikom i posjeduje osnovno znanje iz njemačkog jezika. Aktivno se služi Microsoft Office alatima, te aplikacijama i programima: *AutoCad Civil 3D* 2018, CGSplus 2015 Plateia, StudioArs Series 8.1 DSL_FLS Utility GeoStudio 2012, Incli 2, GEO8, CorelDRAW, Topcon Link, Prolink, T7D, Fortran i Tsoft.

Oženjen je i otac dvoje djece, Lare i Lea.

Popis objavljenih radova

1. Strelec S., Smrečki D., Jug J., **Težak D.** (2012): *Utjecaj istražnih radova i faza građenja na horizontalne deformacije,* Drugi međunarodni naučni skup: stanje i pravci razvoja građevinarstva- GTZ i drugo savjetovanje GEO-EXPO2012 / Ibrahimović, Adnan ; Zenunović , Damir (ur.). Tuzla : Rudarsko-geološko-građevinski fakultet Tuzla i In scan d.o.o. Tuzla, 707-714.

2. Mesec J., **Težak D.**, Grubešić M. (2015): *Poboljšanje glinenih tala korištenjem eksploziva,* Inženjerstvo okoliša, 2, 95-101.

3. Mesec J., **Težak D.**, Dino B. (2015): *Seizmički efekti miniranja utvrđeni 13.08.2015. godine prilikom prvog proizvodnog miniranja kod otvaranja kamenoloma Loskunja-Vojnić,* Mineral. 105, 5/2015, 22-27.

4. Mesec J., Strelec S., **Težak D.** (2017): *Ground vibrations level characterization through the geological strength index (GSI)*, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 32, 1, 1-6.

5. **Težak D.**, Kranjčić N., Mesec J. (2018): *Integration of global navigation satellite system (GNSS) and borehole camera for purpose of modeling the blasting in clay soil*, 18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018, Article ID: 188952018030199991.

6. Kranjčić N., **Težak D.** (2018): *Using satellite imaging in cartographic visualisation of bark beetle damaged forest*, 18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018, Article ID: 186372018051899991.

7. Kranjčić N., **Težak D.**, Rezo M. (2018): *Evaluation of different digital elevation models*, 18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018, Article ID: 186372018051899992.

8. Mesec J., **Težak D.**, Jug J. (2018): Reducing the adverse effects of blasting on the cave ecosystem near future exploitation field Gradusa, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, broj 42 (4/2018), DOI: 10.17794/rgn.2018.4.4.

<u>U postupku recenzije i objavljivanja</u>:

9. **Težak D.**, Mesec J., Hlapčić M. (2018): *Application development to determine the expansion volume in clay soil generated by the detonation of explosive charge*, Geotechnical and Geological Engineering, GEGE-D-18-00192-Submission Confirmation.