

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI-FAKULTET**  
DIPLOMSKI STUDIJ GEOLOŠKOG INŽENJERSTVA

**MAGNETOTELURSKA ISTRAŽIVANJA NA PODRUČJU**  
**APATOVCA**

Diplomski rad

Ivana Žanić

GI 223

Zagreb, 2017.

## MAGNETOTELURSKA ISTRAŽIVANJA NA PODRUČJU APATOVCA

IVANA ŽANIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za geofizička istraživanja i rudarska mjerenja  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

### Sažetak

Magnetotelurska istraživanja su izvedena u okviru hidrogeoloških istraživanja na mirkolokaciji u dolini Glogovnice kod Apatovca. Cilj istraživanja je određivanje litoloških i strukturnih odnosa u svrhu procjene hidrogeološkog potencijala. Magnetotelurske sonde postavljene su duž dvaju profila MTP-1 duljine 2400 m i MTP-2 duljine 1400 m. Prema prijašnjim istraživanjima na tom području nalaze se kvartarne, miocenske, oligomiocenske i kredne naslage te izdanci krednih bazičnih eruptiva (Opić i Graganić, 2007). 1-D interpretacija podataka dobivenih MT-istraživanjima rađena je u programu Geotools MT, a u svrhu 2-D interpretacije korišten je program ZondMT2D. Na MTP-1 dominira tijelo velikih otpornosti na položajima 600-1400 m, povećana otpornost uzrokovana je pojavom trošnog i razlomljenog dijabaza koji se nalazi unutar sedimentnih zaglinjenih stijena. Na MTP-2 tijelo povećanih otpornosti nalazi se na drugoj polovici. Velike otpornosti su uzrokovane potočnim nanosom materijala.

Ključne riječi: magnetotelurska istraživanja, hidrogeološka istraživanja, 1-D interpretacija, 2-D interpretacija, Geotools MT, ZondMT2D

Diplomski rad sadrži: 29 stranica, 1 tablicu, 8 slika, 9 priloga i 15 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Prof. dr. sc. Franjo Šumanovac, RGNF  
Pomoć pri izradi: Doc. dr.sc. Jasna Orešković, RGNF

Ocjenjivači: Prof. dr. sc. Franjo Šumanovac, RGNF  
Doc. dr. sc. Jasna Orešković, RGNF  
Prof. dr. sc. Ivan Dragičević, RGNF

Datum obrane: 17. veljače 2017.

## MAGNETOTELLURIC INVESTIGATIONS IN THE APATOVEC AREA

IVANA ŽANIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Geophysical Exploration and Mining Surveying  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Abstract

Magnetotelluric explorations were performed as a part of hydrogeological investigations on micro-location in the Glogovnica valley near Apatovec. The goal of the research was to determine the lithological and structural relationships in order to estimate the hydrogeological potential. Magnetotelluric probes were placed along two profiles - MTP-1 (length of 2400 m) and MTP-2 (length of 1400 m). According to the previous investigations, Quaternary, Miocene, Oligo-Miocene and Cretaceous deposits and outcrops of Cretaceous basic eruptive rocks were found at the survey area (Opić i Grganić, 2007). 1-D interpretation of the data obtained through the MT-research was done using the GeoTools MT program. For the purpose of 2-D interpretation, the ZondMT2D program was used. The MTP-1 is dominated by the large body of high resistivity from 600 to 1400 m, increased resistance caused by the friable and fractional diabase, which is located within the sedimentary clay rocks. On the MTP-2 body, increased resistance is located on the second half of the profile. High resistivity is caused by the materials transported by the stream.

Keywords: magnetotelluric method, hydrogeological investigations, 1-D interpretation, 2-D interpretation, Geotools MT, ZondMT2D

Thesis contains: 29 pages, 1 table, 8 figures, 9 appendixes and 15 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Full Professor Franjo Šumanovac, PhD  
Technical support and assistance: Assistant Professor Jasna Orešković, PhD

Reviewers: Full Professor Franjo Šumanovac, PhD  
Assistant Professor Jasna Orešković, PhD  
Full Professor Ivan Dragičević, PhD

Date of defense: February 17<sup>th</sup>, 2017

# SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. Uvod .....                                | 1  |
| 2. Geografski položaj.....                   | 2  |
| 3. Pregled dosadašnjih istraživanja.....     | 3  |
| 4. Geološke karakteristike .....             | 4  |
| 4.1. Litologija područja .....               | 4  |
| 4.2. Strukturne karakteristike .....         | 6  |
| 4.3. Hidrogeologija područja .....           | 7  |
| 5. Metode istraživanja.....                  | 10 |
| 5.1. Metode otpornosti.....                  | 10 |
| 5.2. Magnetotelurska metoda .....            | 12 |
| 5.2.1. Teorijske osnove.....                 | 12 |
| 5.2.2. Primjena metode .....                 | 14 |
| 6. Terenska mjerenja .....                   | 15 |
| 7. Interpretacija podataka .....             | 17 |
| 7.1. Jednodimenzionalna interpretacija ..... | 17 |
| 7.2. Dvodimenzionalna interpretacija.....    | 20 |
| 8. Prikaz rezultata .....                    | 23 |
| 8.1. Magnetotelurski profil 1 (MTP-1).....   | 24 |
| 8.2. Magnetotelurski profil 2 (MTP-2).....   | 26 |
| 9. Zaključak .....                           | 27 |
| 10. Popis Literature .....                   | 28 |

## Popis slika

|  |    |
|--|----|
| Slika 2-1. Geografski položaj istraživanog terena (izvor: Google Karte) .....  | 2  |
| Slika 4-1. Geološka karta područja istraživanja (Kruk i Dedić, 2015).....      | 5  |
| Slika 4-2. Hidrogeološka karta Kalnika (Mraz i dr., 2008).....                 | 8  |
| Slika 4-3. Hidrogeološki profil (Šimunić, 1986).....                           | 9  |
| Slika 5-1. Približni raspored otpornosti nekih stijena (Šumanovac, 2012) ..... | 11 |
| Slika 5-2. Skica mjerenja MT metodom.....                                      | 13 |
| Slika 5-3. Antena za emitiranje visokih frekvencija.....                       | 14 |
| Slika 6-1. Magnetotelurska oprema STRATAGEM EH-4.....                          | 15 |

## Popis tablica

|  |     |
|--|-----|
| Tablica 1. Koordinate magnetotelurskih sondi u sustavu HTRS96..... | 166 |
|--|-----|

# Popis priloga

1. Položajna karta

2.1a-2.2b: Mjerene krivulje električne otpornosti

3.1 – 3.6: Interpretirani modeli magnetotelurskog sondiranja – MTP1 i MTP2

# 1. UVOD

Istraživani teren nalazi se na području Apatovca koji je smješten u Koprivničko-križevačkoj županiji na sjeveru Hrvatske. Geofizička istraživanja izvedena su u svrhu određivanja litoloških i strukturnih odnosa kako bi se mogao procijeniti hidrogeološki potencijal istraživanog terena.

Primijenjene su električna tomografija, duboko električno sondiranje i magnetotelurska metoda koja će u ovom radu biti detaljnije obrađena. Električnom tomografijom kartirani su plići strukturni i litološki odnosi do dubine 130 m, kako bi se definirali strukturni odnosi u cilju zaštite otkrivenog vodonosnika. Dubokim električnim sondiranjem istraženi su litološki odnosi na izdvojenim položajima te mogućnosti zahvata vode na dubinama većim od 100 m. Magnetotelurska metoda je odabrana zbog mogućnosti istraživanja strukturnih i litoloških odnosa na većim dubinama, do 1000 m. Magnetotelurske sonde postavljene su duž dvaju ukupne duljine 3800 m i zahvaćaju dubine do 1000 m.

Krivulje magnetotelurskog sondiranja interpretirane su programom Geotools MT (Geotools Corporation, 1997) koji omogućuje jednodimenzionalnu interpretaciju (1-D). Dvodimenzionalna interpretacija (2-D) izvedena je u programu ZondMT2D (Zond Geophysical Software, 2012). Rezultat je prikazan u obliku dvaju profila koji prikazuju promjene otpornosti u odnosu na povećanje dubine prodiranja električnog ili elektromagnetnog polja.

## 2. GEOGRAFSKI POLOŽAJ

Naselje Apatovec nalazi se u sjevernom dijelu Hrvatske, pripada Koprivničko-križevačkoj županiji, a samo naselje ima 350 stanovnika. Na udaljenosti od 20 km na istočnoj strani nalazi se Koprivnica, s južne strane su Križevci, a 30 km sjeverozapadno je grad Varaždin (Slika 2-1). Apatovec je sa sjeverozapadne strane okružen planinom Kalnik. Apatovec se nalazi na 220 m nm dok je mikrolokacija istraživanja, smještena u dolini rijeke Glogovnice, na visini od 180 m nm.



Slika 2-1. Geografski položaj istraživanog terena (izvor: Google Karte)



### 3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Gorjanović-Kramberger (1902) je detaljno opisao naslage koje izgrađuju okolicu izvora kod Apatovca, te navodi da se izvor nalazi u raspucanim dijabazima. Kalničko gorje izgrađuju stijene i naslage krede, paleogena, donjeg miocena, badena, sarmata, panona, ponta i kvartara (Bojanić, 1972; Šimunić i dr., 1982; Šimunić, 1984; Šimunić, 1986).

Mraz i dr. (2008) dali su detaljan opis geoloških i hidrogeoloških karakteristika istraživanog terena. Navode da su najstarije stijene tog područja kredni klastiti s probojima bazičnih vulkanita, zatim slijede vapnenačko-dolomitne breče paleogena, donjomiocenski klastiti, badenske vapnenačko-laporovite stijene, panonske i pontske laporovito-pješčenjačke i pjeskovite naslage, te kvartarne proluvijalne breče i aluvijalni sedimenti potočnih dolina. Izdvojili su tri osnovne hidrogeološke cjeline koje definiraju hidrogeološke odnose i vodonosnike. Prvoj od tih cjelina pripada sjeverno rubno područje Kalnika, zatim masiv Kalnika i južno Kalničko pribrežje

Opić i Grganić (2007) tvrde da istraživani teren izgrađuju kvartarne, miocenske, oligomiocenske i kredne naslage te izdanci krednih bazičnih eruptiva koji su okarakterizirani pukotinskom poroznošću.

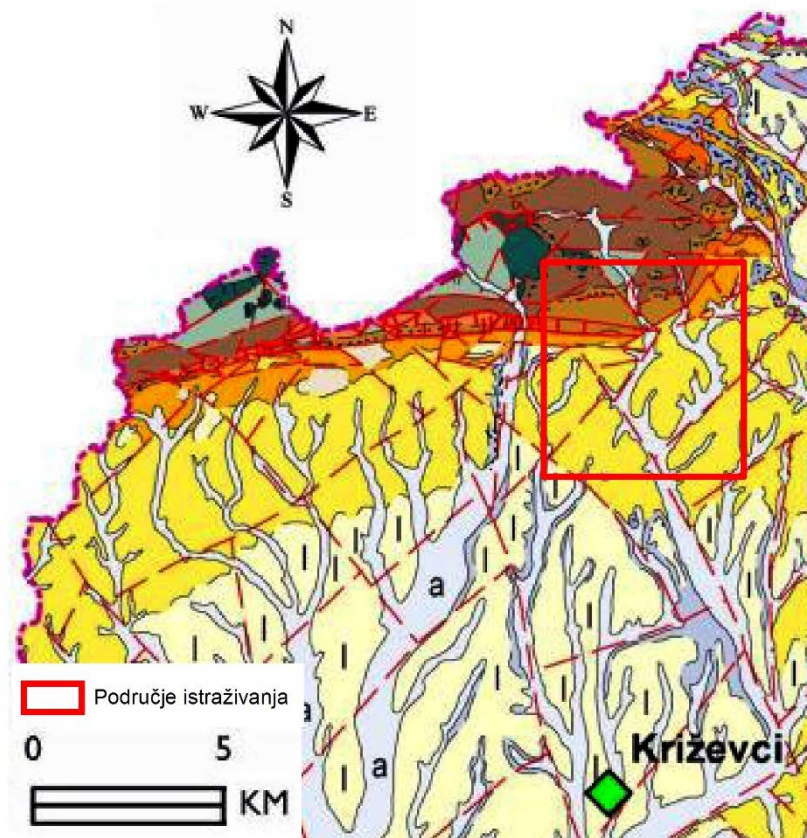
## 4. GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE

### 4.1. LITOLOGIJA PODRUČJA

Na istraživanom području (Slika 4-1) nalaze se stijene od kredne do holocenske starosti. Osim dominantnih sedimentnih naslaga zastupljene su magmatske i metamorfne stijene. Sedimentne stijene pojavljuju se kao lapori, gline, pijesci, te vapnenci i breče. Od metamorfnih stijena, na lokalitetu su zastupljeni serpentinit i serpentinitna breča. Bazične magmatske stijene su otkrivene na području Kalnika, a sastoje se od dijelova spilitiziranih dijabaza i spilita (BB), te rjeđe lava i tufova. Ovi vulkaniti su sinkroni s dubokovodnim krednim klastitima, što znači da su „utiskivani“ u nekonsolidirane sedimente ili su se razlijevali po morskom dnu, a vulkanske stijene se nalaze u obliku dijabaza i tufova (Kruk i Dedić, 2015).

Najstarije stijene užeg područja Apatovca izgrađuju dijabazi, spilitizirani dijabazi i spiliti kredne starosti, dok se gabri i lave rjeđe nalaze. Genetski su vezani uz kredni vulkanogeni–sedimentni kompleks stratigrafskog raspona otriv–turon (Šimunić i dr., 1982). Izlivanjem bazalta pod morem uzrokovano je stvaranje „pillow lava“ između čijih jastučastih oblika postoje šupljine koje mogu poslužiti za akumulaciju i podzemno kretanje voda. Akumulaciji podzemnih voda pogoduju i pukotine nastale naglim hlađenjem bazalta i naknadnim tektonskim pokretima.

Dominantan donjomiocenski litološki član su grublji klastiti, pijesci, pješčenjaci, konglomerati i šljunci smješteni u bazi. U krovini su zastupljeni tufovi i ugljen te izmjena lapora i glina. Intenzivna erozija izdignutog reljefa uzrokovala je diskordantno nalijeganje spomenutih naslaga. Na značajnu tektonsku aktivnost u vrijeme njihovog nastajanja ukazuje bočna i vertikalna varijabilnost litofacijesa i okoliša te sinsedimentacijski vulkanizam. Na području Kalnika debljina miocenskih naslaga iznosi do 500 m.



#### TUMAČ GEOLOŠKIH OZNAKA

- geološka granica
- - - geološka granica pokrivena
- ..... erozijska granica pokrivena
- ||||| granica izljevnog vulkanita
- terasni odsjek
- rasjed
- - - rasjed pokriven
- ++++ rasjed reverzni
- +++++ rasjed reverzni pokriven
- spušten blok

#### TUMAČ IZDVOJENIH JEDINICA

|                  |  |                             |   |
|------------------|--|-----------------------------|---|
| a                | Holocen, Sedimenti korita                  | a <sub>4</sub>              | Pleistocen, IV. terasa                    |
| a <sub>1,2</sub> | Holocen, I. i II. terasa                   | a <sub>j</sub>              | Pleistocen, Aluvijalno-jezerski sedimenti |
| b                | Holocen, Barski sedimenti                  | M <sub>7</sub>              | Pont, Lapor, pijesci, ugljen              |
| p                | Holocen, Eolski sedimenti                  | M <sub>6</sub>              | Panon, Laporoviti vapnenci, lapori        |
| a <sub>pr</sub>  | Holocen, Aluvijalno-proluvijalni sedimenti | M <sub>5</sub>              | Sarmat, Vapneni lapori                    |
| lp               | Pleistocen, Lesoidni sedimenti             | M <sub>4</sub> <sup>2</sup> | Gornji baden, Klastiti i karbonati        |
| l                | Pleistocen, Les                            | M <sub>1</sub>              | Donji miocen, Klastiti s ugljenom         |
| pr               | Pleistocen, Proluvij                       | E                           | Eocen, Kalničke breče                     |
| a <sub>3</sub>   | Pleistocen, III. terasa                    | K <sub>1,2</sub>            | Alb-turon, Klastiti s vulkanitima         |
|                  |  | ββ                          | Magmatiti,                                |

Slika 4-1. Geološka karta područja istraživanja

(Kruk i Dedić, 2015)

Naslage gornjeg badena karakteriziraju marinski sedimenti uz naglašenu ulogu biogenih elemenata u toku sedimentacije od kojih prevladavaju biogeni i litotamnijski vapnenci. Zastupljeni su još konglomerati, breče, pješčenjaci, pijesci i lapori. Debljina naslaga varira u rasponu od 200 do 400 m, ovisno o području i facijesu.

U sastavu sarmatskih i panonskih stijena dominiraju pločasti laporoviti te listićavi vapnenci, pjeskoviti vapnenci, vapnenački, glinoviti i bituminozni lapori, pješčenjaci i

pijesci. Naslage su relativno tanke, debljina ne prelazi 20 m. U panonu se pojavljuje filološki facijes koji se odlikuje ritmičkom izmjenom pješčenjaka, pijesaka, siltova, siltita, lapora i rjeđe konglomerata. U okolici istraživanog područja, u dolini rijeke Glogovnice, naslage donjeg panona su debljine do 20 m.

Naslage pontske starosti izgrađene su od lapora, pješčenjaka, glina i šljunaka. Debljina naslaga na južnim padinama iznosi od 600 do 800 m.

Kvartarne naslage izgrađuju aluvijalni i proluvijalni sedimenti čija debljina ne prelazi 10 m. Ovi sedimenti mogu, ovisno o godišnjem dobu, sadržavati velike količine vode.

#### 4.2. STRUKTURNE KARAKTERISTIKE

Tektonske odnose bliže okolice Apatovca potrebno je opisati u okviru tektonskih odnosa Kalničkog gorja zbog pripadanja jedinstvenoj tektonskoj cjelini. Tektonski pokreti tijekom miocena, pliocena i kvartara su definirali današnju strukturnu građu spomenutog područja. Reljef Kalnika stvoren je sredinom badena, a do današnje visine se konačno izdigao u gornjem pliocenu.

Na području Apatovca se zapravo radi o završetku velike antiklinale koja je orijentirana I-Z. Njezinu jezgru izgrađuju kredni klastiti i vulkaniti, a u tjemenu su smješteni trošeni i zdrobljeni bazalti. Prilikom boranja u tjemenu antiklinale dolazi do najjačih pritisaka zbog čega su te stijene zdrobljene. Pukotine u tim bazaltima su pogodno mjesto za akumulaciju i cirkulaciju podzemnih voda (Šimunić, 1986).

Kalničko gorje ispresijecano je mnogobrojnim vertikalnim i subvertikalnim rasjedima, duž čijih je paraklaza dolazilo do pomicanja, uzdizanja i spuštanja pojedinih dijelova struktura. Dominantni smjer rasjeda je alpski smjer pružanja istok–zapad, vidljivi su i rasjedi smjera pružanja sjeverozapad–jugoistok i sjever–jug, poprečni na alpski smjer pružanja, koji presijecaju čitavo područje. Njihov postanak posljedica je tangencijalnih potisaka smjera sjever–jug, koji su u pliocenu borali i presijecali starije strukture (Mraz i dr., 2008).

### 4.3. HIDROGEOLOGIJA PODRUČJA

Na području sjevernog Kalnika mogu se izdvojiti tri hidrogeološke cjeline (Mraz i dr. 2008.) što je prikazano na slici 4-2 i pripadajućem hidrogeološkom profilu (Slika 4-3).

1. Sjeverno rubno područje Kalnika koje u hidrogeološkom sustavu predstavlja barijeru. Naslage čine nepropusne i slabo propusne klastične stijene kredne i miocenske starosti.

2. Masiv Kalnika, vodonosnik, izgrađen od propusnih klastičnih karbonatnih stijena paleogena i badena.

3. Južno Kalničko pribrežje, izgrađeno pretežito od slabo propusnih stijena neogenske i kvartarne starosti.

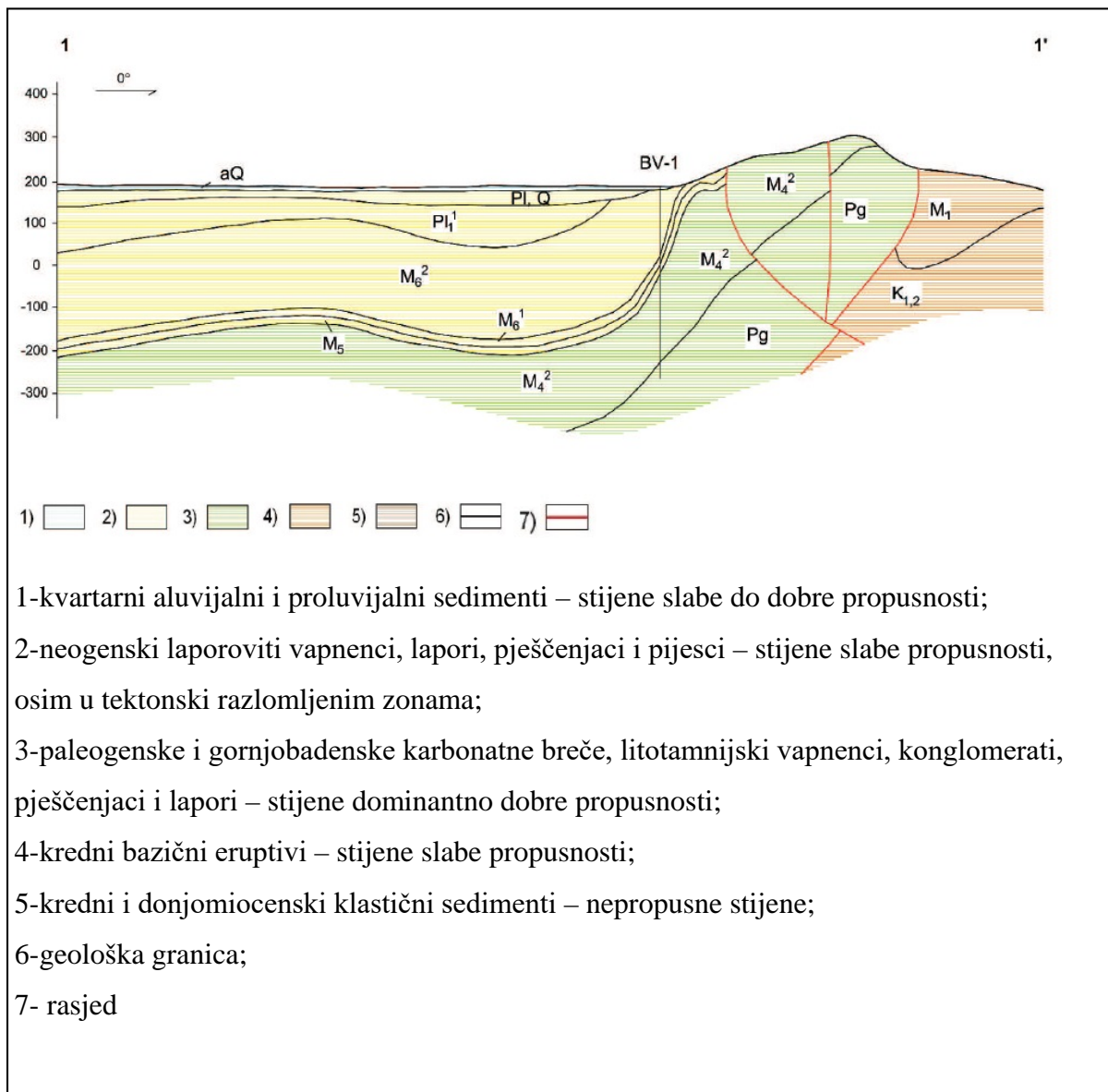
Unutar nabrojanih cjelina nalaze se dva vodonosnika; vodonosnik krednih bazičnih eruptiva i badenski vodonosnik.

Vodonosnik krednih bazičnih eruptiva je nastao tijekom tektonskih pokreta eruptiva koja su kao čvrsta tijela pružali otpore što je dovelo do poremećaja i prekida primarnih odnosa s okolnim sedimentima. Navedenim procesom su krovinske naslage došle u diskordantan položaj u odnosu na eruptive izgrađene od dijabaza, spilitiziranog dijabaza i spilita. Upravo su dijabazi nositelji mineralne vode.

Badenski vodonosnik je izgrađen od brečokonglomerata i krupnozrnatih pješčenjaka koje se nalaze na istočnom dijelu masiva, točnije na području Apatovca i Mihalja. Naslage karakterizira vodopropusnost i visoka infiltracija površinskih voda.



Slika 4-2. Hidrogeološka karta Kalnika (Mraz i dr., 2008)



Slika 4-3. Hidrogeološki profil (Šimunić, 1986)

## 5. METODE ISTRAŽIVANJA

Geoelektrične metode se temelje na mjerenjima električnih svojstava stijena (Šumanovac, 2007). Mogu se podijeliti na metode koje opažaju već postojeća, odnosno prirodna električna polja, npr. metoda vlastitog potencijala ili spontanog potencijala, telurska i magnetotelurska metoda. U metode koje koriste umjetnim načinom izazvana električna polja ubrajamo metodu električne otpornosti i metodu inducirane polarizacije. Na temelju mjerenih otpornosti, tj. njihove promjene s dubinom moguće je dobiti saznanja o litologiji naslaga i njihovom stanju (kompaktnosti, raspucalosti, šupljikavosti), ali i kakvoći vode (mineralizaciji i zaslanjenosti).

### 5.1. METODE OTPORNOSTI

Metode se temelje na određivanju raspodjele električnih otpornosti stijena mjerenjima s površine. Napon  $U$  određen je izrazom:

$$U = \rho I \frac{L}{A} \quad [\text{V}] \quad (5.1)$$

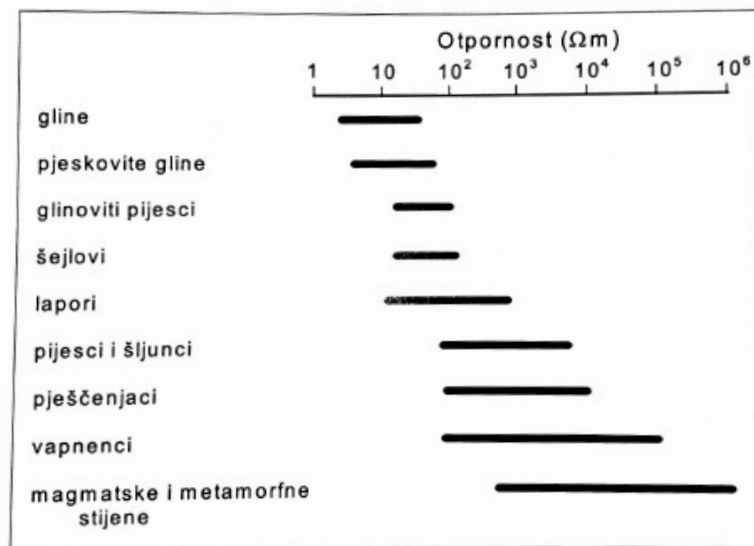
Pri čemu je  $I$  jakost struje,  $\rho$  otpornost,  $L$  duljina, a  $A$  površina poprečnog presjeka vodiča kroz koji teče struja. Zbog njihove izravne veze, iz izraza za napon izveden je izraz za računanje otpornosti:

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I} \quad [\Omega] \quad (5.2)$$

Pri čemu je  $\rho$  otpornost,  $\Delta U$  razlika potencijala, a  $K$  je konstanta koja ovisi o geometrijskom rasporedu elektroda. Mjerenja se izvode četveroelektrodnim rasporedom gdje se preko dvije elektrode pušta struja u zemlju, a na preostale dvije mjeri razlika potencijala prouzročena tom strujom. Ukoliko je podzemlje električki homogeno, mjerenjem se dobiju stvarne otpornosti materijala, u protivnom, rezultat je prividna otpornost koja ovisi o otpornostima pojedinih stijena. Prodiranje struje ovisi o razmaku elektroda, veći razmak znači i dublje prodiranje dok se manji razmak koristi za plitka zahvaćanja.



Stijene se razlikuju prema otpornostima, međutim ista stijena može imati otpornost u vrlo širokim rasponima pa dolazi do preklapanja otpornosti različitih stijena u razmjerno širokim granicama (Slika 5-1). Različita električna otpornost kod pojedinih vrsta stijena postoji zbog različite količine vode u stijeni koja ovisi o šupljikavosti i strukturi stijene. Osim količine, na otpornost utječu mineralizacija i temperatura vode.



Slika 5-1. Približni raspored otpornosti nekih stijena (Šumanovac, 2012)

Gline imaju najmanje otpornosti, 20ak  $\Omega\text{m}$ , pijesci 80-200  $\Omega\text{m}$ , šljunci 100-300  $\Omega\text{m}$ , a ako su suhi i puno veće. U karbonatnim stijenama otpornosti se mogu mijenjati u vrlo širokim granicama, od nekoliko tisuća  $\Omega\text{m}$  pa i stotinjak tisuća  $\Omega\text{m}$ , u ovisnosti o njihovom stanju. Rezultat istraživanja je profil (kontrast) električne otpornosti podzemlja, relevantnost profila ovisi o razlikama otpornosti stijena, tj. što su razlike veće, to se mogu očekivati precizniji rezultati interpretacije.

## 5.2. MAGNETOTELURSKA METODA

Magnetotelurska metoda (MT) je elektromagnetska geofizička metoda za određivanje električne vodljivosti stijena iz mjerenja komponenti prirodnog magnetnog i električnog polja na Zemljinoj površini. Dubina prodiranja kreće se od nekoliko metara korištenjem viših frekvencija, do 10 000 m ili dublje koristeći niže frekvencije. Razvijena u SSSR-u i Francuskoj tijekom 1950-ih, MT-metoda je postala metoda koja se koristi za istraživanja podzemlja diljem svijeta. Komercijalna upotreba uključuje istraživanja ugljikovodika (nafte i plina), geotermijska istraživanja, kao i istraživanje podzemnih voda. Različite stijene i geološke strukture imaju širok raspon električne otpornosti, mjerenje iste omogućava se razlikovanje materijala i omogućuje poznavanje tektonskih procesa i geoloških struktura. Osnovna prednost ove metode u odnosu na električno sondiranje postizanje velike dubine prodiranja bez razvlačenja dugačkih kabela.

### 5.2.1. TEORIJSKE OSNOVE

Metoda se temelji na mjerenju omjera vodoravnih komponenti prirodnog električnog (telurnog) i magnetnog polja na površini, koji je za danu frekvenciju konstantan za konstantnu otpornost. Ovaj omjer se naziva impedancijom  $Z$  (5.3), a ovisi o električnoj otpornosti i frekvenciji, pa su u homogenoj sredini njihovi odnosi definirani izrazom

$$Z = \sqrt{\pi\rho\mu\nu} (1-i), \quad (5.3)$$

gdje je  $\nu$  frekvencija,  $\rho$  otpornost,  $\mu$  magnetni permeabilitet, a  $i$  imaginarna jedinica.

Vrijednost električnog polja dobije se mjerenjem napona pomoću depolarizirajućih elektroda, dok vrijednost magnetnog polja možemo dobiti na dva načina. Prvi način je pomoću magnetometara koji opažaju intenzitet magnetnog polja, a drugi pomoću zavojnica s velikim brojem namotaja koje daju informaciju o magnetnoj indukciji. Velik broj namotaja kod zavojnice je nužan zbog korištenja frekvencija između 1 i 0,001 Hz, jezgra mora biti izgrađena od materijala velikog permeabiliteta, a uređaj mora imati odgovarajuća pojačala s malim šumovima.

Dubina prodiranja  $d$ , ovisi o otpornosti stijena i frekvenciji. Definirana je dubinom na kojoj amplituda elektromagnetnog polja opadne na  $1/e$  svoje vrijednosti na površini (5.4). Uporabom postupno sve nižih frekvencija zahvaćaju se sve veće dubine, prema analogiji s električnim sondiranjem, dobije se magnetotelursko sondiranje.

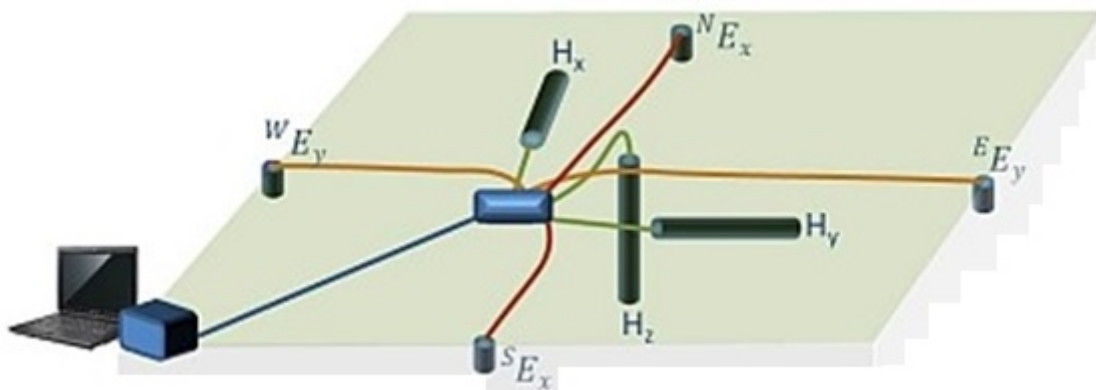
$$d = 503,3 \sqrt{\frac{\rho}{\nu}} \quad (5.4)$$

Površinska električna i elektromagnetna polja međusobno su okomita. Na odabranom pravcu, npr. 0-X, opaža se električno polje, odnosno napon  $E_x$  (Slika 5-2), a na okomitom pravcu, 0-Y, intenzitet elektromagnetnog polja  $H_y$ . Moguće je mjeriti i magnetnu indukciju  $B_y$ , koja se izražava u obliku  $B_y = \mu_0 H_y$ , gdje je  $\mu_0$  konstanta koja se naziva magnetni permeabilitet. Iz napona se izračunavaju komponente prividne otpornosti  $\rho_{xy}$  i  $\rho_{yx}$  prema izrazu:

$$\rho_{xy} = |Z_{xy}|^2 \cdot 1/\omega\mu_0 \quad (5.5)$$

gdje je  $Z$  impedancija, a  $\omega$  kružna frekvencija (Bahr, 1988). Komponente faze  $\phi_{xy}$  i  $\phi_{yx}$  dobiju se iz izraza:

$$\phi_{xy} = \tan^{-1}(\text{Im}(Z_{xy})/\text{Re}(Z_{xy})). \quad (5.6)$$



Slika 5-1. Skica mjerenja MT metodom

### 5.2.2. PRIMJENA METODE

U novije vrijeme MT-metoda se primjenjuje u obliku tomografskih mjerenja, po uzoru na metodu električne tomografije. Izvodi se niz mjerenja MT-sondi raspoređenih na profilu. Mjerene prividne otpornosti unose se u vertikalni presjek (2-D prikaz) te se dobiva mjerena pseudosekcija, a njezinom inverzijom, dobiva se inverzni model otpornosti ili vodljivosti podzemlja, koji se jednostavnije geološki interpretira (Šumanovac, 2007). MT metoda omogućuje istraživanja velikih dubina, od nekoliko desetaka pa čak i nekoliko stotina kilometara. Osim što u MT metodi nema razvlačenja dugačkih kabela, još jedna prednost u odnosu na električno sondiranje je ta što plitki tanki slojevi ne izazivaju osobite poteškoće. Standardna oprema za plića istraživanja pokriva frekvenzijsko područje od 0,1 Hz do 100 kHz, odnosno dubine od nekoliko metara do nekoliko kilometara, ovisno o otpornosti stijena. Za manje dubine zahvata koristi se umjetni izvor, antena prikazana na slici 5-3, a ne samo prirodna polja, čime se dobivaju kvalitetni podaci za najpliće zahvate. Antena je potrebna jer u području viših frekvencija često dolazi do poremećaja prirodnog signala.



Slika 5-2. Antena za emitiranje visokih frekvencija

## 6. TERENSKA MJERENJA

Prilikom terenskih mjerenja korištene su tri metode: električno sondiranje, električna tomografija i magnetotelurska metoda. Električno sondiranje izvedeno je na 7 točaka koje su označene s GS-1 do GS-7 i prikazane na položajnoj karti, (Prilog 1). Mjerenja su izvedena Schlumbergerovim rasporedom elektroda, a maksimalni polurazmak strujnih elektroda (AB/2) iznosio je 2000 m na svim sondama (Šumanovac, 2009). Mjerenja su izvedena instrumentom Terrameter SAS 1000.

Druga primjenjivana metoda je električna tomografija mjerena na dva profila, na Prilogu 1 označena s P-1 i P-2 (Prilog 1). Duljine profila iznosile su 1000 m. Mjerenja su izvedena Wennerovim rasporedom elektroda s jediničnim razmakom od 10 m pa je efektivni dubinski zahvat iznosio 130 m (Šumanovac, 2009). Mjerenja su izvedena automatskim višeelektrodnim sustavom LIS (engl. LundImaginig System) švedske tvrtke ABEM.

Magnetotelurska mjerenja izvedena su na ukupno 40 MT-sondi čije su koordinate prikazane u tablici 1. Na prvom, većem, profilu izmjereno je 25 sondi, a drugi profil se sastoji od njih 15 (Prilog 1). Razmak između sondi je 100 m što znači da je duljina prvog profila 2400 m, a drugog 1400 m. Dio područja prekrivaju oba profila zbog dobivanja detaljnijih rezultata. Za terenska mjerenja korišten je magnetotelurski sustav STRATAGEM EH-4 (Slika 6-1), američke tvrtke Geometrics. Ovaj sustav za pliće zahvate koristi umjetno generirano polje pomoću antene koja emitira signal u području frekvencija od 1 kHz do 70 kHz (Slika 5-3).



Slika 6-1. Magnetotelurska oprema STRATAGEM EH-4

Tablica 1. Koordinate magnetotelurskih sondi u sustavu HTRS96

| MT-sonda | X(m)   | Y(m)    | Z(m) |
|----------|--------|---------|------|
| MT-1     | 502806 | 5112804 | 255  |
| MT-2     | 502867 | 5112725 | 275  |
| MT-3     | 502927 | 5112645 | 270  |
| MT-4     | 502992 | 5112569 | 235  |
| MT-5     | 503049 | 5112487 | 242  |
| MT-6     | 503110 | 5112407 | 231  |
| MT-7     | 503171 | 5112328 | 220  |
| MT-8     | 503232 | 5112248 | 210  |
| MT-9     | 503293 | 5112169 | 220  |
| MT-10    | 503354 | 5112090 | 208  |
| MT-11    | 503414 | 5112010 | 220  |
| MT-12    | 503479 | 5111934 | 220  |
| MT-13    | 503536 | 5111852 | 220  |
| MT-14    | 503597 | 5111772 | 218  |
| MT-15    | 503658 | 5111693 | 216  |
| MT-16    | 503727 | 5111620 | 212  |
| MT-17    | 503783 | 5111537 | 205  |
| MT-18    | 503840 | 5111455 | 198  |
| MT-19    | 503901 | 5111376 | 198  |
| MT-20    | 503966 | 5111299 | 195  |
| MT-21    | 504023 | 5111217 | 199  |
| MT-22    | 504064 | 5111125 | 202  |
| MT-23    | 504086 | 5111027 | 200  |
| MT-24    | 504127 | 5110935 | 198  |
| MT-25    | 504158 | 5110840 | 210  |
| MT-26    | 503744 | 5111299 | 230  |
| MT-27    | 503796 | 5111211 | 220  |
| MT-28    | 503852 | 5111127 | 200  |
| MT-29    | 503908 | 5111042 | 200  |
| MT-30    | 503964 | 5110958 | 195  |
| MT-31    | 504020 | 5110873 | 190  |
| MT-32    | 504076 | 5110789 | 185  |
| MT-33    | 504137 | 5110696 | 183  |
| MT-34    | 504188 | 5110616 | 186  |
| MT-35    | 504244 | 5110535 | 183  |
| MT-36    | 504300 | 5110450 | 186  |
| MT-37    | 504356 | 5110366 | 187  |
| MT-38    | 504412 | 5110281 | 185  |
| MT-39    | 504468 | 5110197 | 178  |
| MT-40    | 504524 | 5110112 | 179  |

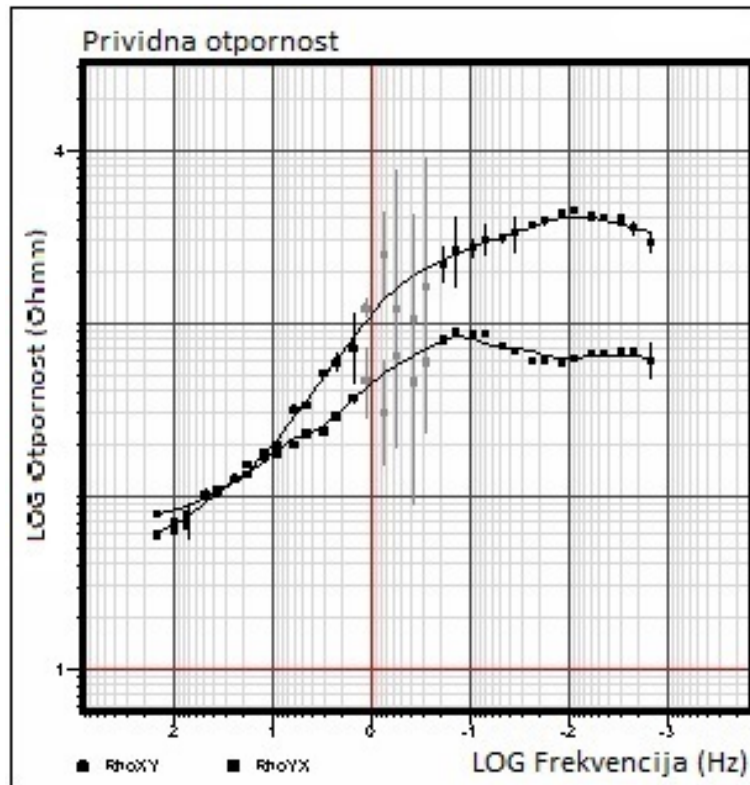
## 7. INTERPRETACIJA PODATAKA

### 7.1. JEDNODIMENZIONALNA INTERPRETACIJA

1-D interpretacija podataka dobivenih MT-istraživanjima rađena je u programu Geotools MT koji osigurava sveobuhvatan pristup MT analizi. Program omogućuje interpretatoru sintetsko modeliranje na temelju čega se mogu planirati prikupljanje i obrada podataka, te modeliranje s prikupljenim podacima i prezentaciju. Podržane su različite varijante interpretacije MT-podataka i osigurani su alati adekvatni za pridobivanje što više informacija iz podataka.

Za stvaranje baze mjerenih podataka potrebno je definirati zemljopisnu dužinu, širinu i nadmorsku visinu kako bi program mogao definirati UTM zonu, odrediti centralni meridijan i smjestiti podatke iz baze u odnosu na taj meridijan. Nakon definiranja tih polaznih vrijednosti moguće je učitati podatke tj., vrijednosti s mjerenih točaka. U ovom slučaju korišteni su izlazni podaci iz Stratagem sustava. Kako bi bilo omogućeno upravljanje podacima, npr. unošenje koordinata i visina točaka u svrhu prikazivanja topografije područja, oni se unose u „txt“ formatu.

Nakon uspješnog učitavanja podataka moguće je izgladivanje krivulja otpornosti, tj. uklanjanje ekstremnih vrijednosti na krivuljama uzrokovanih šumovima s površine. Za svaku mjerenu vrijednost interpretator može označiti frekvencije kao neaktivne (ili mrtve), što znači da podaci te frekvencije mogu, a i ne moraju, biti prikazani za operacije kao što su 1-D ili 2-D inverzija (Slika 7-1).



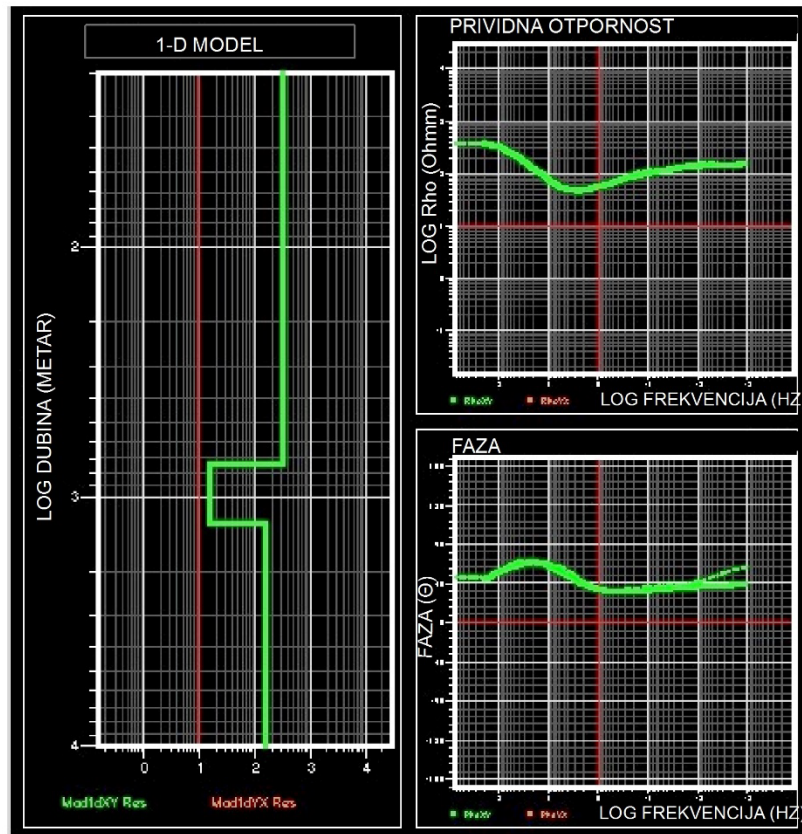
Slika 7-1. Označavanje neaktivnih frekvencija

U programu Geotools MT, svaki 1-D model je spremljen kao jedan par zapisa- zapis sloja i zapis otpornosti. Unutar zapisa, postoji više različitih 1-D modela, svaki temeljen na različitoj procijenjenoj impedanciji. Za svaku od njih je moguće napraviti 1-D model, temeljen na izvornim podacima, ili onim interpretiranim. Svi 1-D modeli mogu se pregledati individualno ili u isprepletenim sekcijama (Geotools MT User's Guide, 1997).

Program omogućuje tri različite automatske interpretacije: Marquardtovu, Occamovu i Fischerovu. Marquardtova inverzija zahtjeva broj slojeva kao ulazni podatak, model se stvara tako da se modeliraju otpornosti i debljine slojeva do minimalne RMS greške između mjerenih i interpretiranih (modeliranih) podataka. Za razliku od Marquardtove, rezultat Occamove interpretacije je model s velikim brojem slojeva (od 20 do 50), uvjet nije RMS greška, već što izgladeniji model. Fischerova interpretacija dosta sliči Marquardtovoj, ali ne zahtjeva određivanje broja slojeva unaprijed. Umjesto toga, inverzija automatski određuje broj slojeva prema podacima.

Slika 7-2. prikazuje izgled prozora prilikom 1-D modeliranja gdje se može uočiti da se interpretacija izvodi u logaritamskom mjerilu.



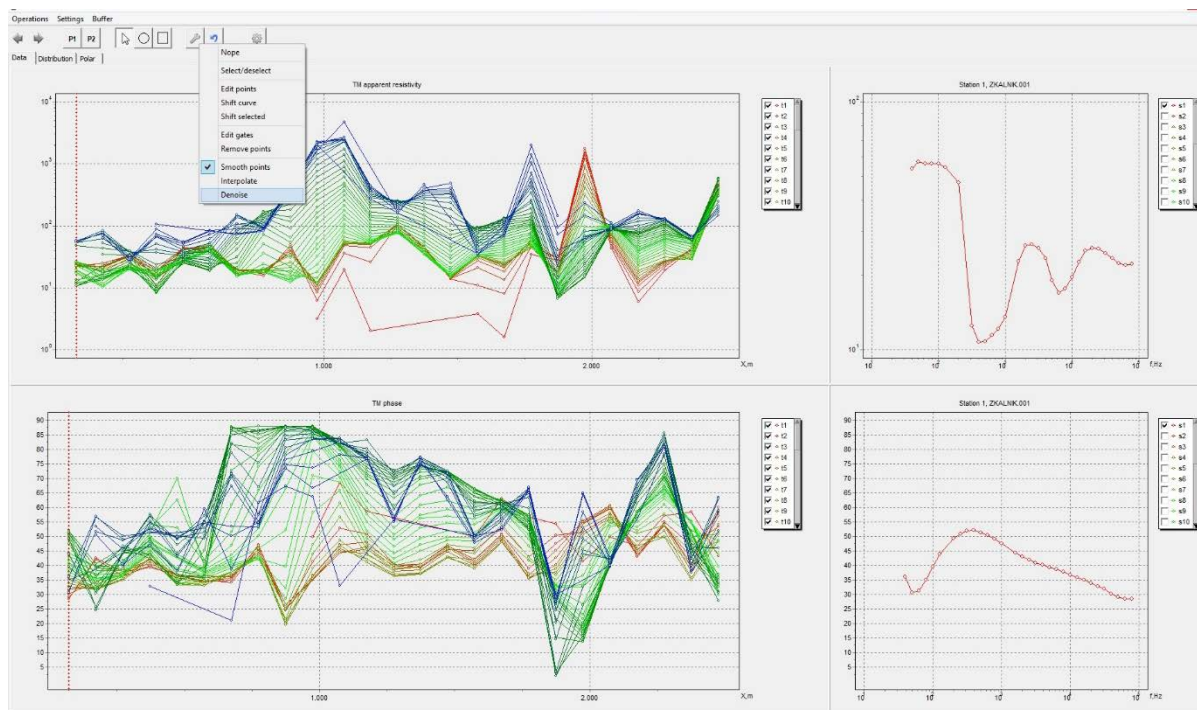


Slika 7-2. Izgled prozora prilikom 1-D modeliranja

## 7.2. DVODIMENZIONALNA INTERPRETACIJA

U svrhu 2-D interpretacija korišten je program ZondMT2D (Zond Geophysical Software, 2012) koji omogućuje automatsku inverziju i dobivanje 2-D modela otpornosti korištenjem podataka obiju komponenti prividnih otpornosti ( $\rho_{xy}$ ,  $\rho_{yx}$ ) i pripadajućih faza ( $\phi_{xy}$ ,  $\phi_{yx}$ ). Software posjeduje različite varijante algoritama za interpretaciju podataka. Kontrolni sustav koji je definiran maksimalnom RMS-greškom ili maksimalnim brojem iteracija omogućuje odabir najlogičnijeg geološkog i geofizičkog rješenja između mogućih rezultata.

Interpretacija započinje učitavanjem mjerenih podataka, također je moguće učitati koordinate i visine pojedine točke mjerenja u svrhu dobivanja pružanja i topografije profila. Podatke je potrebno izgladiti zbog utjecaja neizbježnih smetnji koje uzrokuju odskakanje podataka. Izgladivanje se vrši tako da se mjereni podaci otpornosti koji drastično odskakuju od susjednih, ili izbrišu, ili poravnaju prema susjednim točkama (Slika 7-3). Moguće je i automatsko izgladivanje koje nije uvijek pouzdano pa se preporuča da to napravi iskusniji interpretator.



Slika 7-3. Izgled prozora u kojem je omogućeno uređivanje krivulja otpornosti

Prilikom izravnog modeliranja (engl. Forward Modeling) za početni model se uzima model s izračunatim prividnim otpornostima, koje se uspoređuju s mjerenim prividnim otpornostima. Ukoliko postoje razlike veće od zadanog kriterija (RMS-greške, korijena srednjeg kvadrata odstupanja), početni model se mijenja i ponovno se za popravljani model računaju prividne otpornosti i uspoređuju s mjerenim prividnim otpornostima (Šumanovac, 2007). Taj postupak se ponavlja dok se ne postigne zadovoljavajuće slaganje izračunatih i mjerenih prividnih otpornosti. RMS-greškom su izražena odstupanja teoretskih, izračunatih prividnih otpornosti od mjerenih otpornosti prema izrazu:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\rho_{im} - \rho_{it}}{\rho_{im}} \right)^2} \quad (7.1)$$

Gdje je RMS srednja kvadratna greška,  $\rho_{im}$  izmjerena vrijednost prividne otpornosti,  $\rho_{it}$  teoretska vrijednost prividne otpornosti za određenu iteraciju, a N je broj točaka na odabranom presjeku.

Inverzija metodom najmanjih kvadrata, koju su objavili Loke i Baker, ima najširu primjenu (Šumanovac, 2007). Najčešće korištene varijacije metode najmanjih kvadrata su: Gauss-Newtonova (izraz 7.2), kvazi Newtonova i kombinirana Gauss-Newtonova i kvazi Newtonova metoda.

$$(J_i^T J_i + \lambda C^T C) p_i = J_i^T g_i, \quad (7.2)$$

Gdje je  $i$  broj iteracije,  $J_i$  Jacobijeva matrica parcijalnih derivacija,  $\lambda$  faktor prigušenja (engl. Damping Factor), C 2-D matrica izgladivanja (engl. Flatness Filter),  $p_i$  vektor promjene otpornosti modela, a  $g_i$  vektor odstupanja koji sadrži razlike logaritama mjerenih i izračunatih vrijednosti otpornosti. Prividne i mjerene otpornosti se najčešće izražavaju u logaritamskom mjerilu, zbog velikih promjena otpornosti.

ZondMT2D ima mogućnosti korištenja raznih varijanti automatskih interpretacija. Biranjem određene inverzije odabire se algoritam inverznog modeliranja. ZondMT2D sadrži Occamovu i Marquardtovu inverziju, kao i Geotools MT, zatim Fokusiranu (engl. Focused), blokovsku (engl. Blocks) i Smoothness constrained inverziju. Prilikom odabira pojedine potrebno je definirati faktor izgladivanja, broj iteracija i/ili RMS grešku.

Ovisno o zadatku i kvaliteti rezultata mjerenja, moguće je birati koji se podaci žele uzeti u obzir za interpretaciju, podaci otpornosti i/ili podaci faze. Isto tako, moguće je birati

koju komponentu tenzora impedancije koristiti pri izračunu inverzije, TE (engl. transverse-electric) ili TM (engl. transverse-magnetic). TE podaci se odnose na smjer pružanja struktura. Budući da orijentaciju XY koordinatnog sustav određuje interpretator, ne postoji nerazdvojna veza između komponenti XY/YX i TE/TM.

Inverzije „Smoothness constrained“, Occamova, Marquardtova i Fokusirana koriste metodu najmanjeg kvadrata koja se temelji na velikom faktoru izgladivanja. Rezultat „Smoothness constrained“ inverzije je izgladjeni model bez oštih granica. Ova vrsta inverzije preporučuje se u većini slučajeva. Occamova inverzija uz faktor izgladivanja koristi i dodatni kontrast minimizacije. Marquardtova koristi regulator parametra za prigušivanje. Ovaj model omogućuje interpretacije s oštrim rubovima, ali nespretno korištenje ove inverzije može dovesti do velikog povećanja RMS greške. Zbog toga se preporuča korištenje ove inverzije nakon provedbe „Smoothness constrained“ i Occamove inverzije.

Blokovska uklapa parametre za pojedine domene koje se razlikuju u otpornosti. Domene s jednakom otpornosti uzimaju se u obzir kao jedan blok. Ovaj algoritam je poželjno koristiti nakon nabrojanih interpretacija, kada su već definirani određeni blokovi.

Fokusirana inverzija koristi dodatni kontrast pri fokusiranju. Ovaj algoritam je osjetljiv na „Treshold“ parametar, odnosno, ako je kontrast susjednih ćelija veći od određene vrijednosti tada su parametri ćelije niži, u suprotnom, ako je kontrast nizak, parametri su viši.

Osim automatske inverzije moguće je izvesti i izravno modeliranje (engl. Forward modeling), odnosno interpretator zadaje model podzemlja prema mjerenim podacima, a program iz modela izračunava profil prividnih otpornosti.

## 8. PRIKAZ REZULTATA

Prema prijašnjim podacima na području istraživanja nalaze se kvartarne, miocenske, oligomiocenske i kredne naslage te izdanci krednih bazičnih eruptiva (Opić i Grganić, 2007). Oligomiocenske i kredne stijene sastoje se uglavnom od klastičnih nepropusnih naslaga, dok se u miocenskim stijenama ( $M_4^2$ ) nalaze karbonatne i karbonatno-klastične komponente koje su propusne. Kredni dijabazi su označeni kao slabo propusne stijene s pukotinskom poroznošću. U istraživačkoj bušotini AS-18, dubine 94 m, nalaze se klastične naslage (Opić, 2007). U bušotini, dominiraju pijesci, koji se izmjenjuju s pješčenjacima, pokojim slojem šljunka, a na dnu se nalaze prašasti pijesci, zaglinjeni prahovi i glina. U zdencu ZG-2, koji je izvela tvrtka Crosco, nalaze se dijabazi različitog stupnja razlomljenosti, osim u površinskom dijelu (do dubine od 6.5 m) gdje se nalazi nasip i pijesak. S obzirom na bolju izdašnost u bušotini ZG-2, prema usmenim informacijama, očito su glavni vodonosnici na ovom terenu razlomljene dijabazne stijene.

Klastične naslage uzrokovat će općenito manje otpornosti. Otpornosti glina su oko 20  $\Omega$ m, dok s povećanjem pjeskovite komponente dolazi do povećanja otpornosti. S druge strane većina karbonatnih naslaga uzrokuje velike otpornosti, najčešće od nekoliko stotina do više tisuća  $\Omega$ m. Ako su kompaktne i suhe, imaju vrlo velike otpornosti, dok s povećanjem stupnja razlomljenosti dolazi do smanjenja otpornosti jer su pukotine obično zapunjene glinom i vodom koje djeluju na smanjenje otpornosti. Slične otpornosti mogu se očekivati u magmatskim stijenama ako su kompaktne, a ako su razlomljene i trošne doći će do smanjivanja otpornosti. S obzirom na to da su bazične magmatske stijene podložnije trošenju pri čemu nastaju minerali malih otpornosti, općenito će imati ponešto manje otpornosti od karbonatnih stijena (Šumanovac, 2009).

Na električnim sondama, s hidrogeološkog stajališta, povoljnije su veće otpornosti koje mogu ukazivati na potencijalne vodonosnike, dok male otpornosti potječu od glinovitih i zaglinjenih naslaga koje karakterizira nepropusnost. U ovom slučaju, posebnu pozornost treba obratiti na povećanje otpornosti na dubinama većim od 100 m, koje može upućivati na potencijalno dublje vodonosnike.

## 8.1. MAGNETOTELURSKI PROFIL 1 (MTP-1)

Na prvom profilu interpretirane su 24 magnetotelurske sonde duž profila duljine 2300 m i dopiru do dubine od 1000 m, a raspon otpornosti je između 10 i više od 1000  $\Omega$ m. Profil se generalno može podijeliti u tri dijela. Prvi dio, duljine oko 500 m, karakteriziraju stijene malene otpornosti koje su, gledano s hidrogeološkog stajališta, zbog svoje nepropusnosti nepovoljne. Na središnjem dijelu profila vidljivo je veliko povećanje otpornosti stijena koje ukazuje na potencijalan vodonosnik. Dio s velikim otpornostima zauzima oko 600 m profila. Treći dio obilježavaju stijene malenih otpornosti koje se s dubinom povećavaju. U tom dijelu je vidljiva pojava nanosa, koje karakteriziraju velike otpornosti. Nanos se nalazi na samoj površini koja zauzima 100tinjak m.

Od sonde Kalnik 1.1 do sonde Kalnik 1.6 (Prilog 2.1a), prema otpornostima je moguće razlučiti četiri sloja naslaga. Otpornosti su razmjerno malene, variraju između 10 i 100  $\Omega$ m, dok je znatnije povećanje otpornosti moguće uočiti tek na dubinama većim od 500 m. Prema otpornostima moguće je zaključiti da je taj dio profila izgrađen od sedimentnih zaglinjenih, odnosno laporovitih, nepropusnih stijena koje uzrokuju male otpornosti. Od sonde Kalnik 1.7 do sonde Kalnik 1.15 (Prilozi 2.1a i 2.1b) vidljivo je veliko povećanje otpornosti koje prelazi vrijednosti od 1000  $\Omega$ m. Dubina početka povećanja otpornosti je varijabilna. Na sondi Kalnik 1.7, točnije na 600-tom metru profila, kontakt stijena malih i velikih otpornosti je na 30-om metru dubine. Na sljedećoj sondi je povećanje na 15-om metru dubine dok je na sondi Kalnik 1.10 kontakt najbliži i nalazi se na 10 m dubine. Od sonde Kalnik 1.11 kontakt zaliježe od 10 m dubine do 35 m na sondi Kalnik 1.15. Uspoređujući rezultate magnetotelurskih sondi s tomografskim profilom Apatovec P-1 može se zaključiti da se stijene velikih otpornosti mogu naći na dubini od 40 m pa na dalje. MT sonde Kalnik 1.7, 1.8 i 1.9 pokazuju povećanje otpornosti s dubinom koje završava na dubini od 1000 m, dok je na sondama Kalnik 1.10 - Kalnik 1.15 velika otpornost zabilježena i u dubljim stijenama. Kontakt s tijelom malih otpornosti na početku profila je oštar, gotovo vertikalni. Ovakav raspored otpornosti ukazuje na prisutnost kompaktnih stijena unutar sedimentnih zaglinjenih naslaga uzrokovanih tektonskim pokretima. Na ovom području visoke otpornosti uzrokuju dijabazne stijene koje su vjerojatno razlomljene i dosta trošne što pospješuje akumulaciju mineralne vode. Na preostalim sondama do kraja profila nema naznaka za postojanjem sličnih povećanja otpornosti na sličnim dubinama već postoji područje između

sondi Kalnik 1.20 i 1.21 (Prilog 2.1b) na kojem su velike otpornosti zabilježene na površini profila što je detaljnije obrađeno magnetotelurskim profilom MTP-2.

Rezultat izravnog modeliranja u programu ZondMT2D (Prilog 3.1) većim djelom se poklapa s interpretiranim sondama u programu Geotools MT. Model je napravljen na temelju rezultata 1-D modeliranja, tomografskih profila i litoloških podataka iz dosadašnjih istraživanja. Profil se također može podijeliti na tri dijela od kojih SZ dio izgrađuju stijene malih otpornosti, središnji dio stijene velikih, a JI dio stijene malih otpornosti s iznimkom površinskog povećanja duljine 150 m. Povećanje otpornosti, tj. pojava stijena velikih otpornosti, na izravnom modelu je vidljivo na 700-tom metru profila i rasprostire se do 1200-tog metra. Isto tako, uočavaju su stijene koje uzrokuju povećanje otpornosti na površini profila, na 20. i 21. sondi, koje nisu deblje od 30 m. Duž površine terena se nalazi zaglinjeni sloj koji uzrokuje smanjenje otpornosti duž profila do dubine 10 m.

Korištene su i inverzije koje predlaže sam program. Od postojećih izdvojene su Occamova i Fokusirana inverzija (Prilog 3.3 i 3.4) koje prikazuju dosta logičan odnos otpornosti na profilu koji se podudara s profilom dobivenim modeliranjem. Profilom dominira tijelo velikih otpornosti koje zaliježe do 350m, a ukupna debljina spomenutih naslaga je maksimalno 500 m. Isto tako je vidljivo i kratko površinsko povećanje otpornosti na JI dijelu profila.

## 8.2. MAGNETOTELURSKI PROFIL 2 (MTP-2)

Na magnetotelurskom profilu 2 izmjereno je 15 sondi duž profila duljine 1400 m, a zahvaćaju dubine do 1000 m. Otpornosti stijena kreću se od 10  $\Omega$ m pa do više tisuća  $\Omega$ m.

Od sonde Kalnik 2.1 do sonde Kalnik 2.6 (Prilog 2.2a) krivulje prividnih otpornosti stijena u podzemlju imaju sličan oblik. Otpornost se postepeno povećava s dubinom, ali ne prelazi vrijednost od 200  $\Omega$ m. Stijene zastupljene na tom području su vjerojatno zaglinjeni ili laporoviti sedimenti čija otpornost upravo zbog glinene komponentne ne može biti velika. Sonde na drugom dijelu profila, Kalnik 2.7 - Kalnik 2.12 (Prilog 2.2a), upućuju na tijelo velikih otpornosti na dubini do 150 m. Kontakt stijena različitih otpornosti na sondi Kalnik 2.7 je vidljiv na 20-tom m dubine, zatim postaje sve plići tako da je na sondi Kalnik 2.11 kontakt na 2 m dubine. Nakon sonde Kalnik 2.12, na kojoj je kontakt na 8 m dubine, slijede sonde Kalnik 2.13 – Kalnik 2.15 (Prilog 2.2b) na kojima nema tako izraženog kontakta. Spomenuti kontakt pokazuje skok otpornosti s 10-20  $\Omega$ m na 1000  $\Omega$ m, i zatim pad na 10-20  $\Omega$ m nakon kojega slijedi postupan porast otpornosti s dubinom kojeg uzrokuju pješčane naslage iz kojih se već eksploatira voda. Debljina tog tijela visokih otpornosti je promjenjiva, a zaliježe na velikim dubinama. Najdeblje naslage su na sondi Kalnik 2.7 i iznose 140 m, a najtanje na sondama Kalnik 2.8 i 2.10 gdje paket naslaga iznosi 72 i 74 m. Povećanu otpornost na površini uzrokuje pješčani nanos potoka.

Kao i na profilu MTP-1 napravljeno je modeliranje u programu ZondMT2D (Prilog 3.2) za MTP-2. Rezultat modeliranja je profil koji prikazuje malene otpornosti do 600 metara. Na II dijelu profila vidljive su povećane otpornosti, koje su uzrokovane naslagama debljine do 150 m. S dubinom je vidljivo povećanje otpornosti uzrokovano pješčanim naslagama.

Korištene su i automatske inverzije iz programa. Kao i kod prvog profila, izdvojeni su rezultati su dobiveni Occamovom i Fokusiranom inverzijom (Prilog 3.5 i 3.6) koji nisu podudarni s dobivenim modelom kao u slučaju MTP-1. Naime, velike otpornosti između sonde Kalnik 2.7 i 2.10 program nije prepoznao kao plitko i kratko površinsko povećanje, već su te površinske naslage spojene u jedno tijelo s dubljim naslagama većih otpornosti.



## 9. ZAKLJUČAK

Geofizička istraživanja izvedena su u svrhu određivanja litoloških i strukturnih odnosa kako bi se mogao procijeniti hidrogeološki potencijal istraživanog terena. Primijenjene su električna tomografija, duboko električno sondiranje i magnetotelurska metoda. Rezultati magnetotelurskih istraživanja su dobiveni 1-D modeliranjem u programu Geotools MT i 2-D modeliranjem u programu ZondMT2D. Podaci 1-D i 2-D modeliranja se u velikoj mjeri podudaraju.

Prvim magnetotelurskim profilom (MTP-1) dominira tijelo velikih otpornosti na položajima 600-1400 m. S hidrogeološkog stajališta, velike otpornosti su povoljne jer ukazuju na razlomljene stijene koje mogu tvoriti prostor pogodan za akumulaciju vode. Povećana otpornost, vrijednosti do 1000  $\Omega\text{m}$ , na MTP-1 uzrokovana ju pojavom trošnog i razlomljenog krednog dijabaza s pukotinskom poroznošću koji se nalazi unutar sedimentnih zaglinjenih stijena.

Na drugom magnetotelurskom profilu (MTP-2) tijelo povećanih otpornosti nalazi se na II polovici profila. Velike otpornosti su uzrokovane potočnim nanosom materijala. Profil dobro oslikava i geometriju plitkih naslaga povećanih otpornosti. Povećanje otpornosti s dubinom uzrokuju pjeskovite naslage iz kojih se eksploatira voda.

Perma podacima magnetotelurskih istraživanja, tomografije, električnog sondiranja zajedno s postojećim podacima o litološkim i strukturnim karakteristikama najpovoljnije područje za hidrogeološke zahvate je vršni dio dijabaznog tijela

## 10. POPIS LITERATURE

- BAHR, K. (1988): Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion. *Journal of Geophysics*, 62, 119-127.
- BOJANIĆ, L. (1972): Kalnik – vodoistražni radovi. Fond HGI, Zagreb.
- GEOMETRICS (2007): Operation Manual for Stratagem Systems Running IMAGEM, ver. 2.19.
- GEOTOOLS MTS CORPORATION (1997): Geotools MT User's Guide, Austin, Texas, USA.
- KRUK, B. i DEDIĆ, Ž., (2015): Rudarsko-geološka studija Koprivničko-križevačke županije – Sažetak. Hrvatski geološki institut - Zavod za mineralne sirovine.
- MRAZ, V., MARKOVIĆ, T. i LARVA, O., (2008): Hidrogeološka i hidrokemijska obilježja masiva Kalnika. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 20, 13-15, Zagreb.
- OPIĆ, I., (2007): Istražno piezometarske bušotine: AS-15, AS-16, AS-17, AS-18 i AS-18a. Fond struč. dok. Kalničke vode, Bionatura d.d.
- OPIĆ, I. i GRGANIĆ, Z., (2007): Hidrogeološki istražni radovi na širem okruženju izvorišta Apatovačke Kiselice. Fond struč. Dok. Kalničke vode, Bionatura d.d.
- ŠIMUNIĆ, A., PIKIJA, M. i HEĆIMOVIĆ, I., (1982): Osnovna geološka karta M 1:100000, list Varaždin. Karta i tumač. HGI, Zagreb i Sav. geol. zavod, Beograd.
- ŠIMUNIĆ, A. (1984): Detaljno geološko istraživanje šireg područja Vratna u svrhu lociranja bušotine za pitku vodu. Fond HGI, 38/84, Zagreb.
- ŠIMUNIĆ, A. (1986): Geološke i hidrogeološke karakteristike bliže okolice dubokog bunara Vratno-1 (BV-1). Fond HGI, 37/86, Zagreb.
- ŠUMANOVAC, F., (2007): Geofizička istraživanja podzemnih voda. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Pauk Cerna.
- ŠUMANOVAC, F., (2009): Geofizička istraživanja u dolini Glogovnice kod Apatovca. Fond struč. dok. Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta.

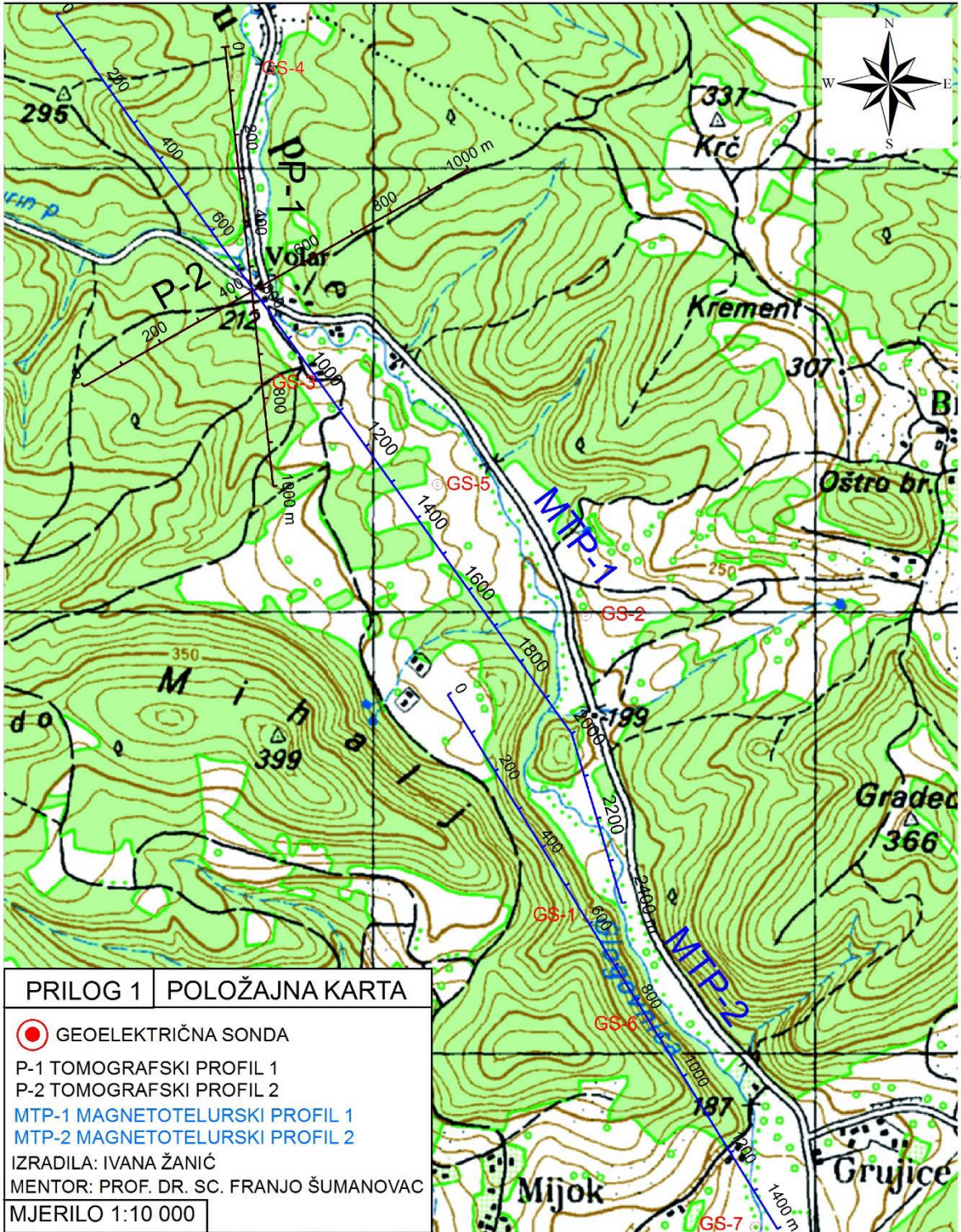
ŠUMANOVAC, F., (2012): Osnove geofizičkih istraživanja. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

ZOND GEOPHYSICAL SOFTWARE (2012): ZONDMT2D Program for two-dimensional interpretation of data obtained by magnetotelluric sounding. Saint Petersburg.

PRILOZI

6387992

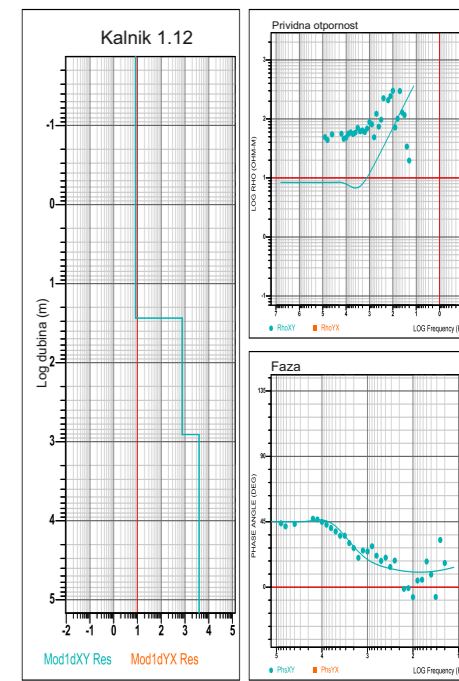
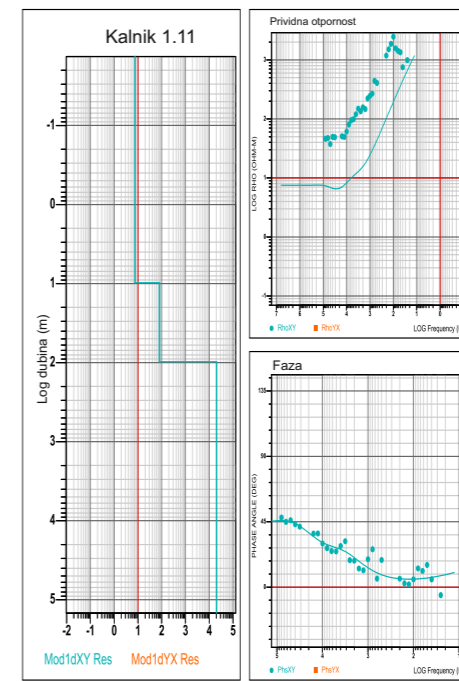
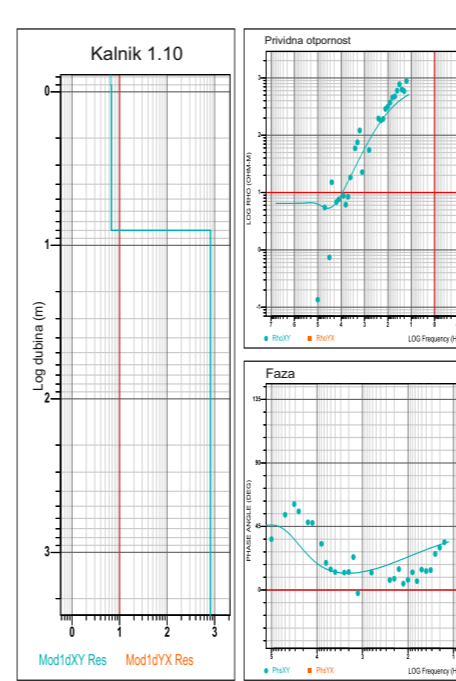
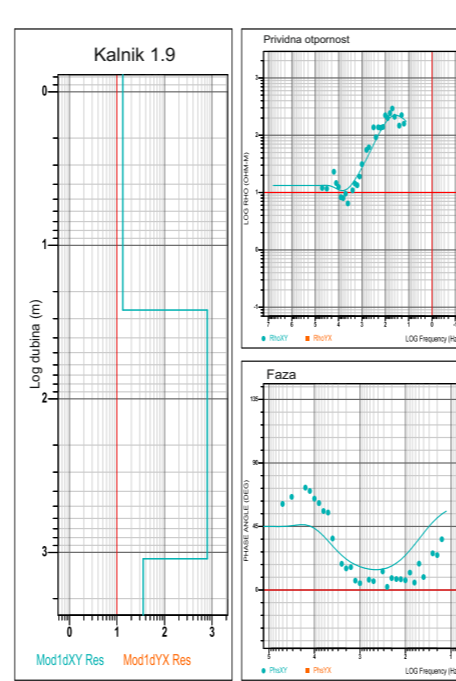
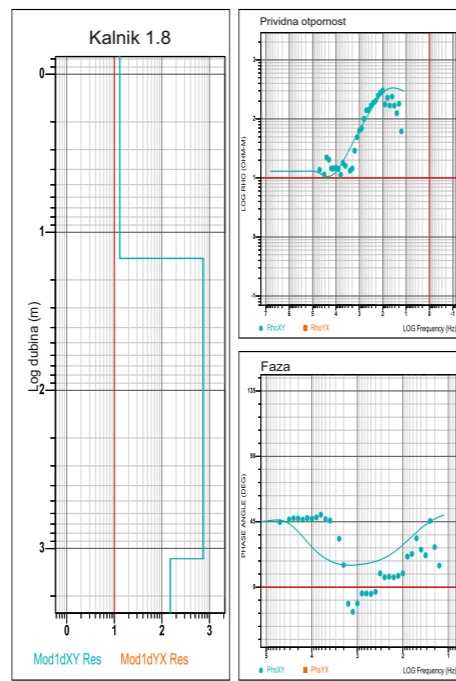
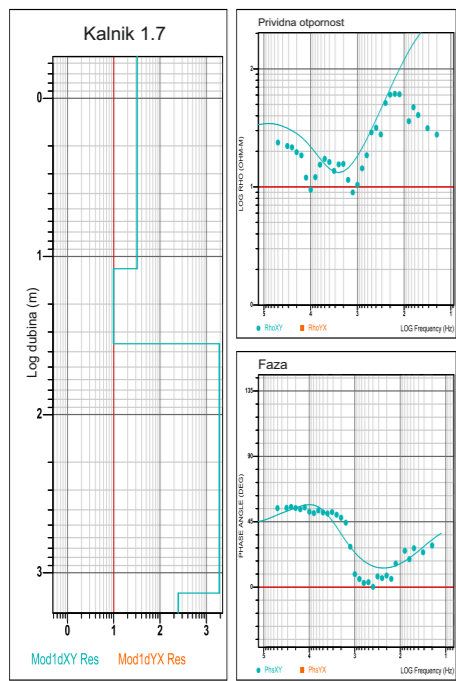
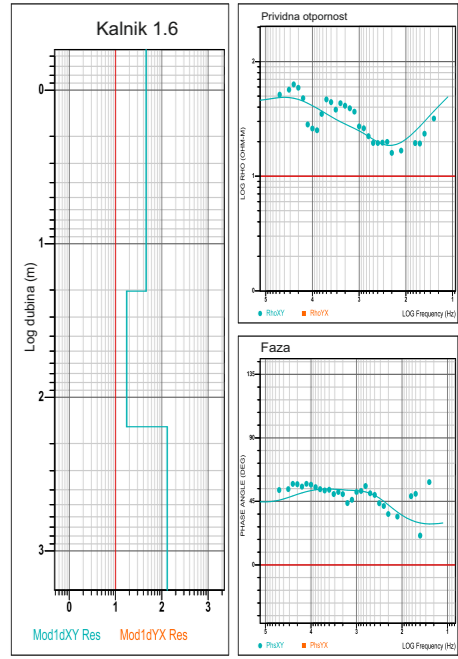
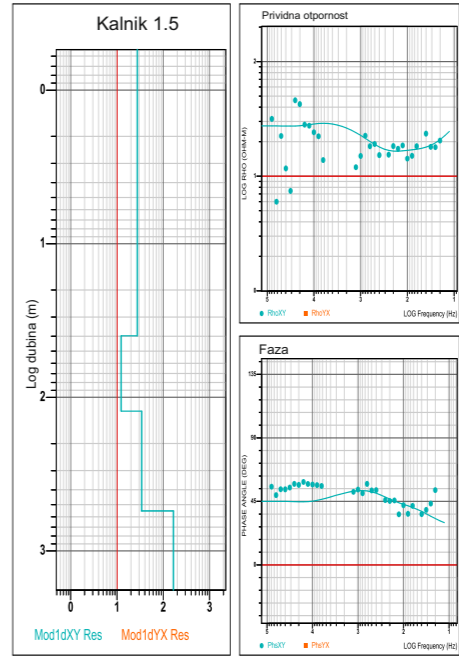
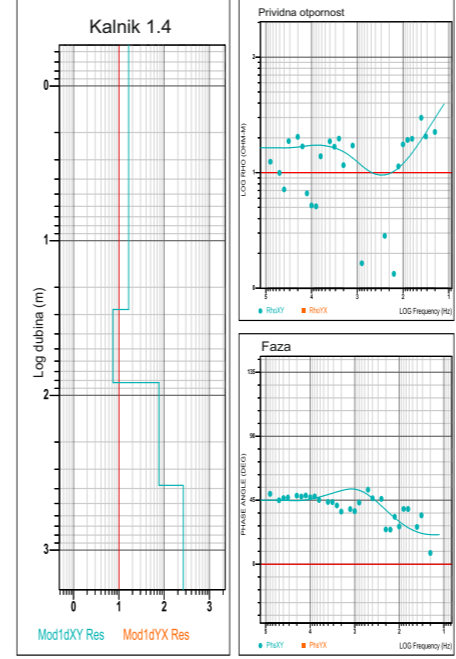
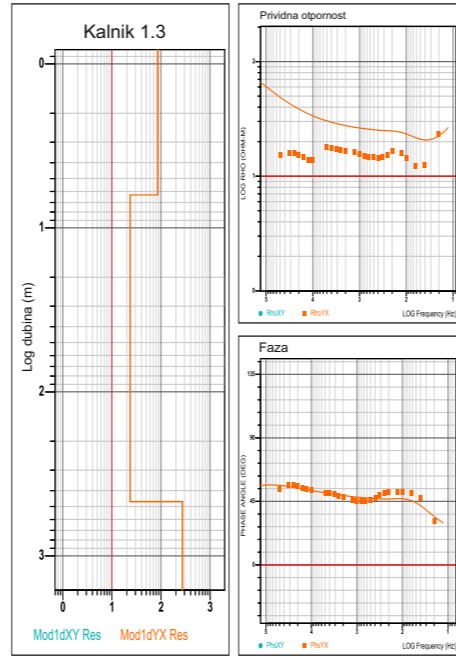
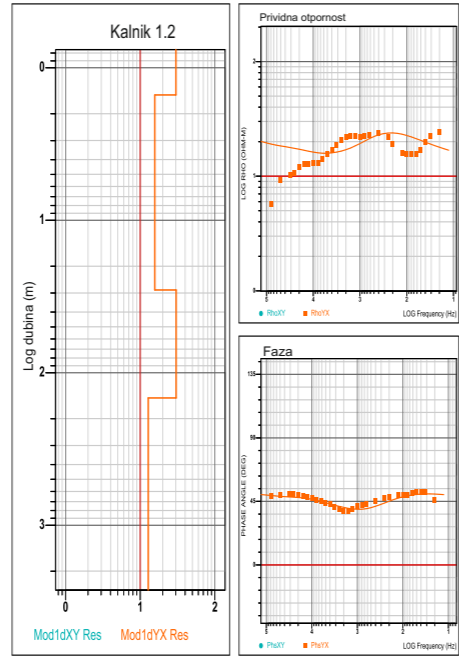
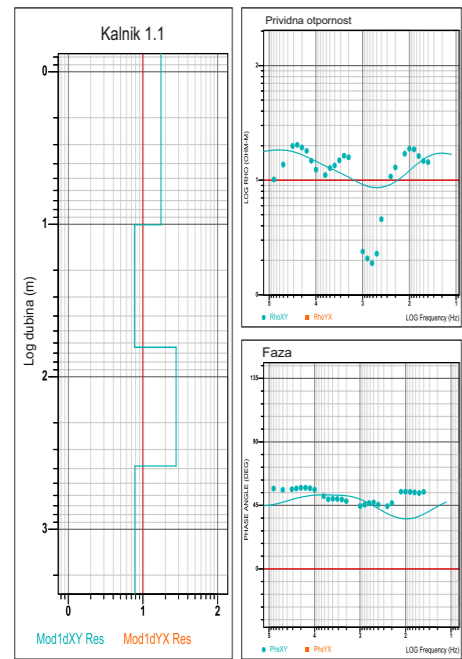
6388992



5113005

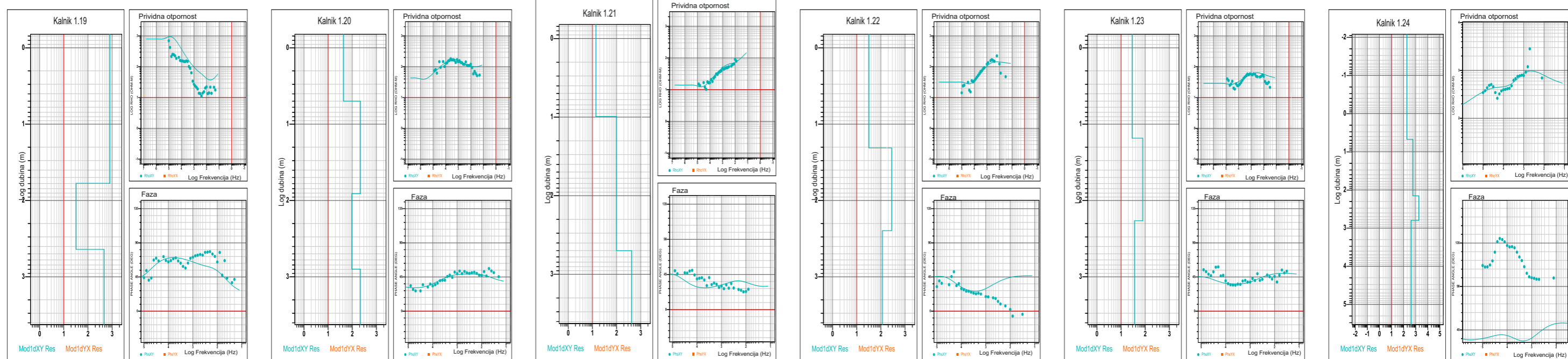
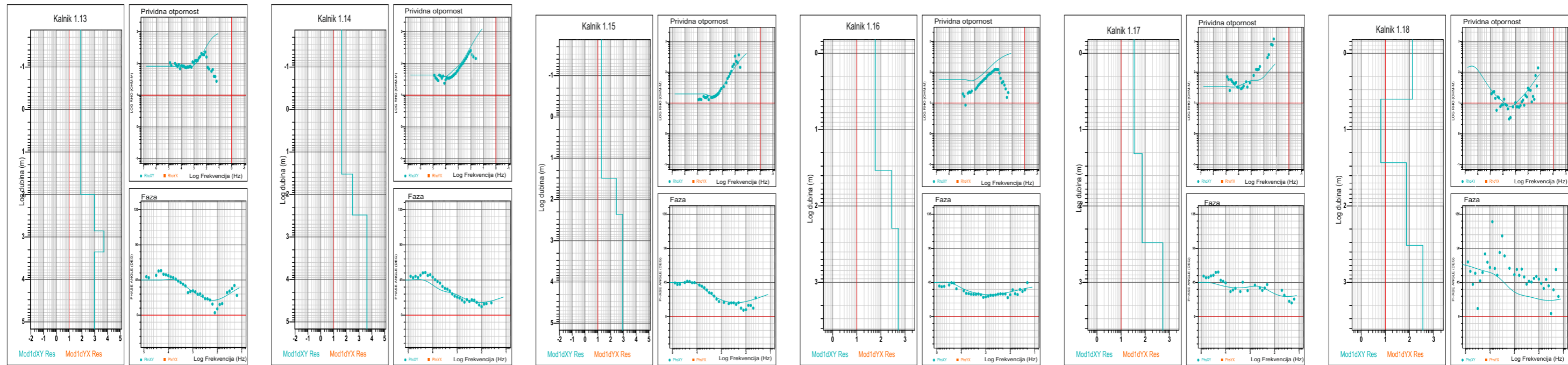
5112004

5110998



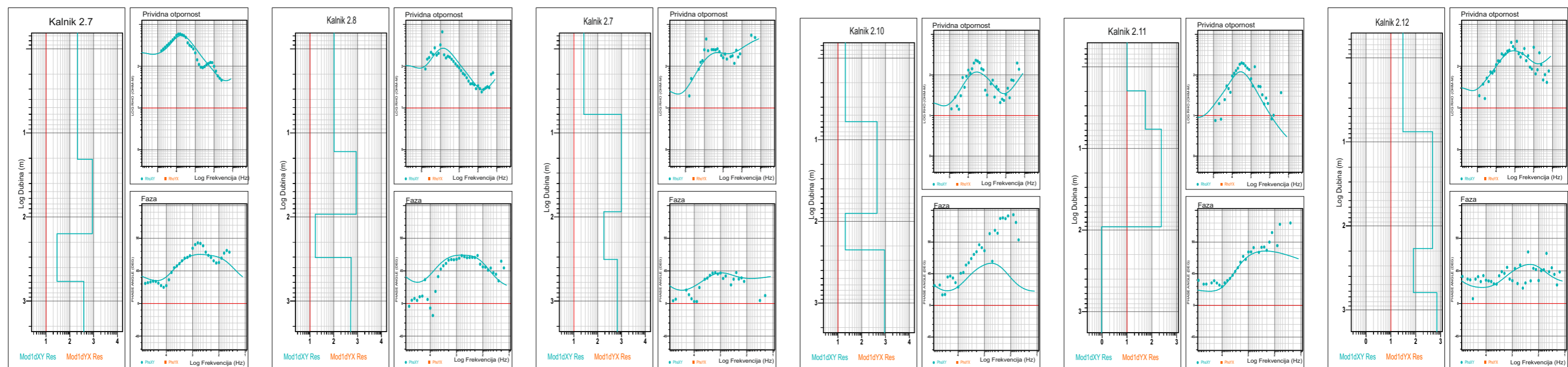
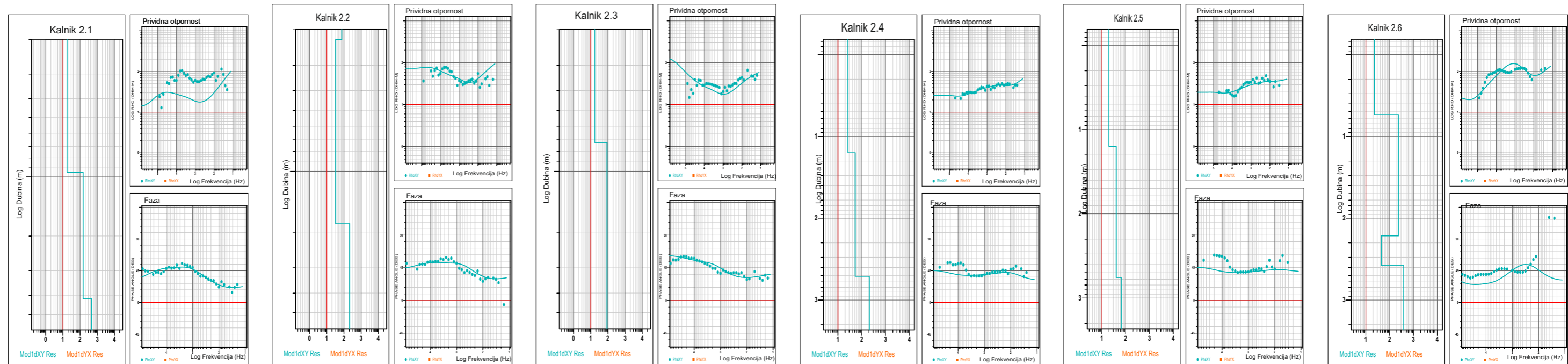
PRILOG 2.1A MAGNETOTELURSKJE SONDE

IZRADILA: IVANA ŽANIĆ  
 MENTOR: PROF. DR. SC. FRANJO ŠUMANOVAC



PRILOG 2.1B MAGNETOTELURSKE SONDE

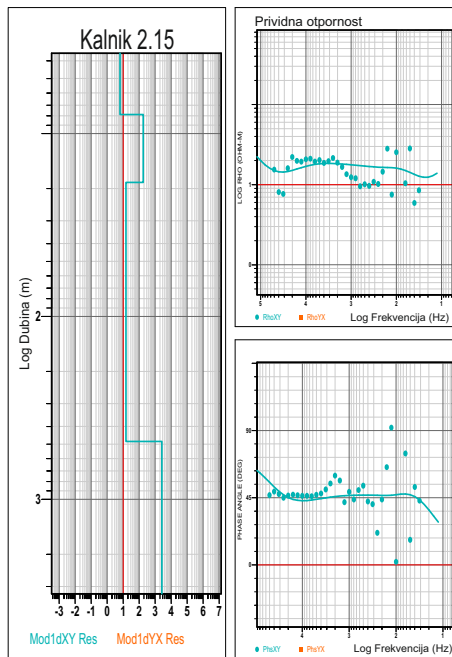
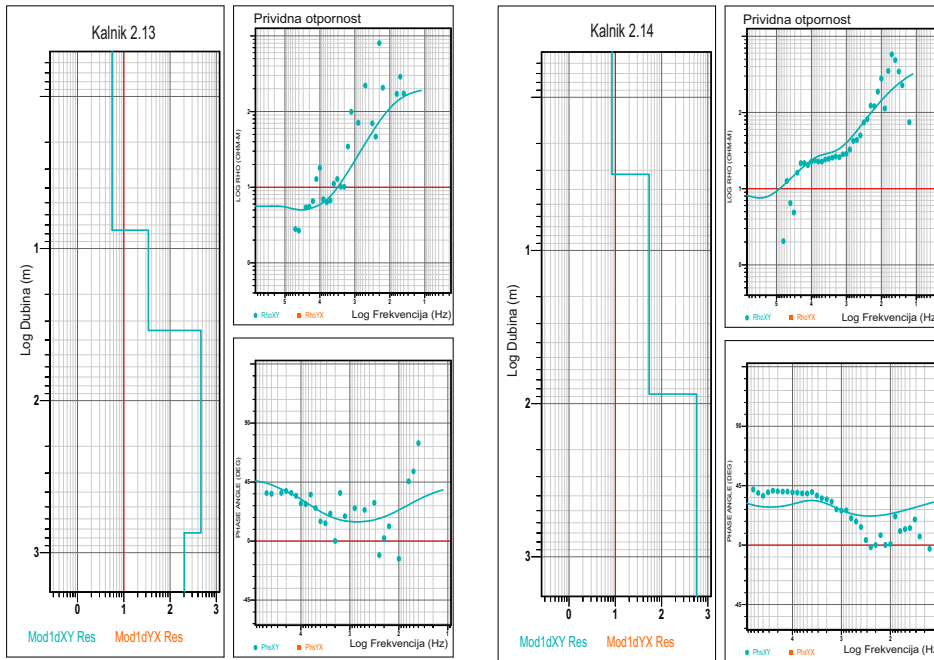
IZRADILA: IVANA ŽANIĆ  
 MENTOR: PROF. DR. SC. FRANJO ŠUMANOVAC



PRILOG 2.2A      MAGNETOTELURSKE SONDE

IZRADILA: IVANA ŽANIĆ  
 MENTOR: PROF. DR. SC. FRANJO ŠUMANOVAC





PRILOG 2.2B

MAGNETOTELURSKE SONDE

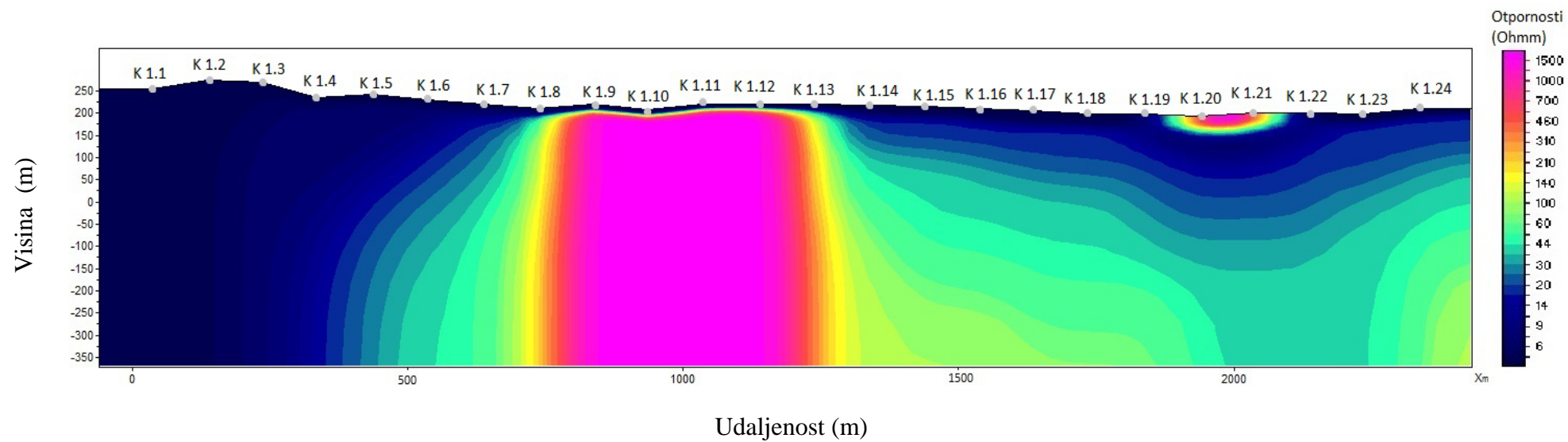
IZRADILA: IVANA ŽANIĆ

MENTOR: PROF. DR. SC. FRANJO ŠUMANOVAC

# Apatovec MTP-1

SZ

JJ

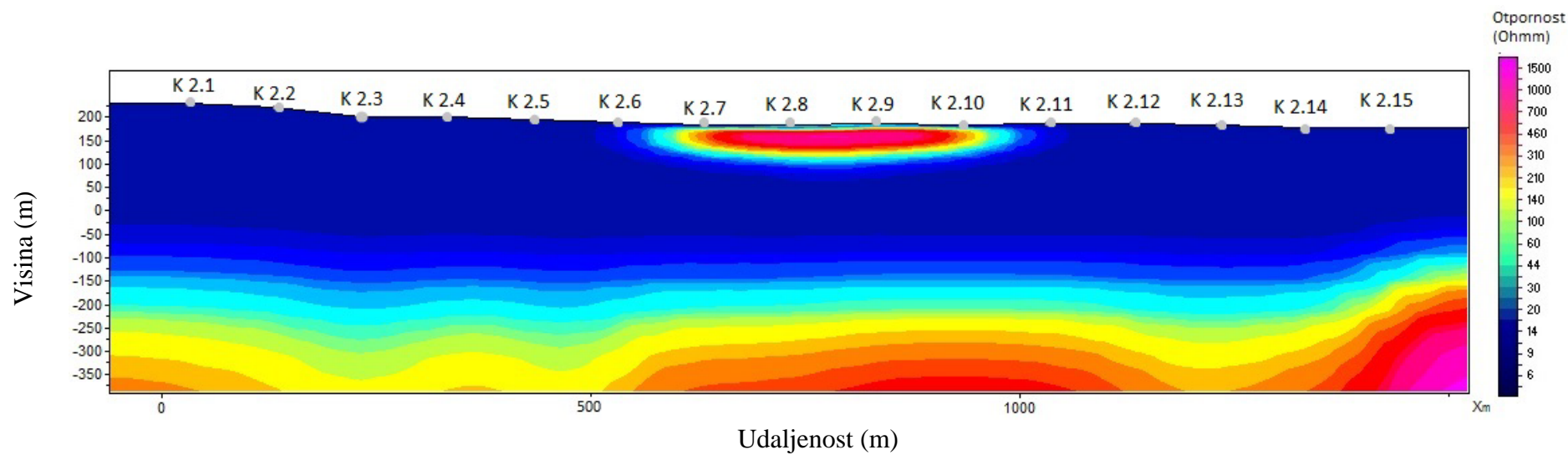


|  |                          |
|--|--------------------------|
| PRILOG 3.1                             | MAGNETOTELURSKI PROFIL 1 |
| IZRADILA: IVANA ŽANIĆ                  |                          |
| MENTOR: PROF. DR. SC. FRANJO ŠUMANOVAC |                          |

# Apatovec MTP-2

SZ

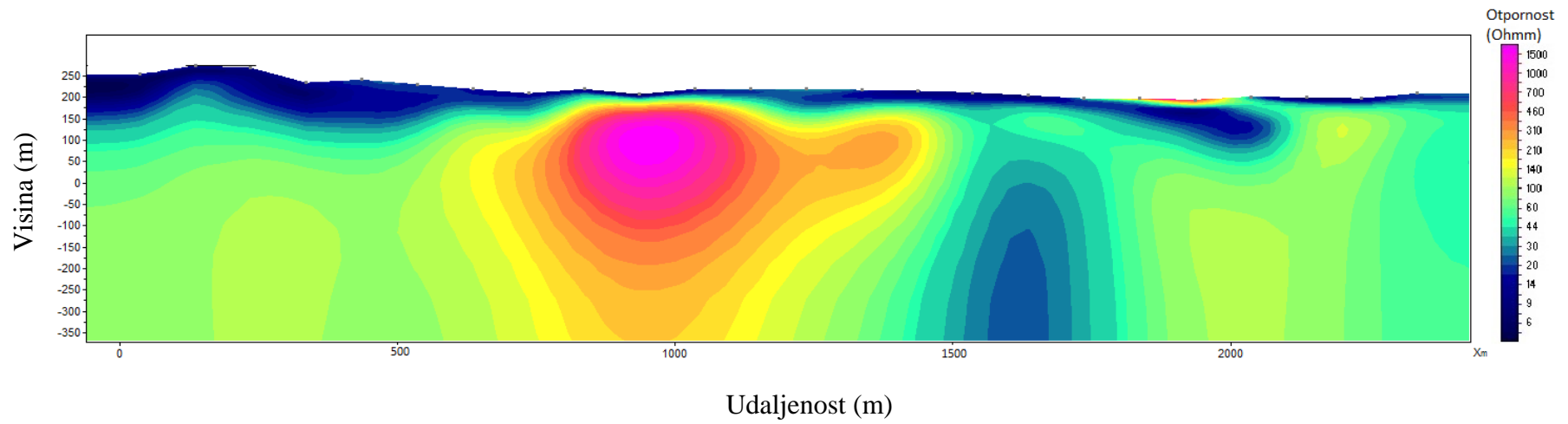
JJ



|  |                          |
|--|--------------------------|
| PRILOG 3.2                             | MAGNETOTELURSKI PROFIL 2 |
| IZRADILA: IVANA ŽANIĆ                  |                          |
| MENTOR: PROF. DR. SC. FRANJO ŠUMANOVAC |                          |

MTP-1

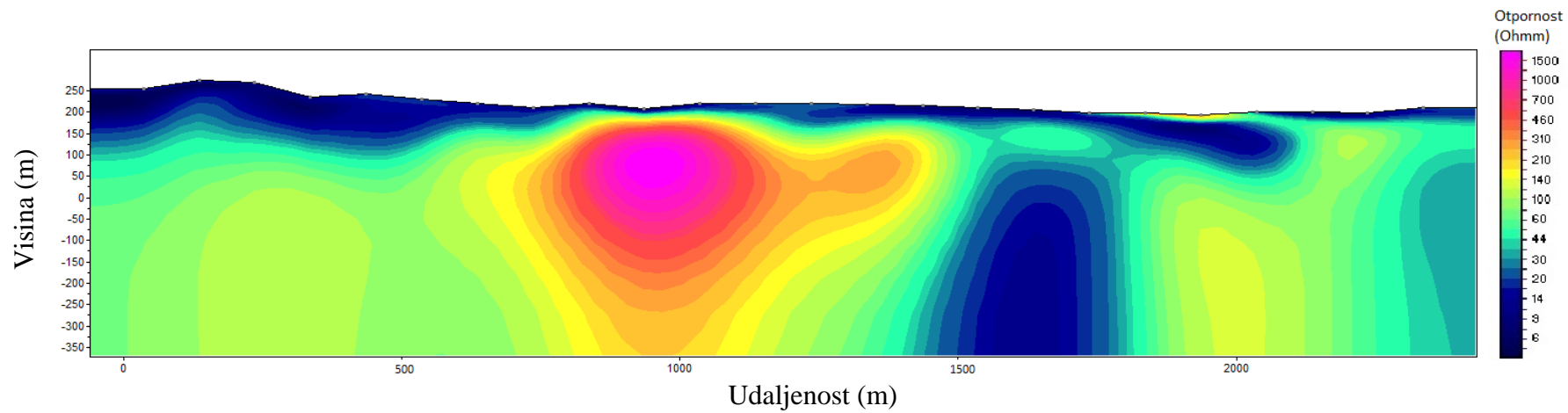
**Fokusirana inverzija**



|  |                          |
|--|--------------------------|
| PRILOG 3.3                             | MAGNETOTELURSKI PROFIL 1 |
| FOKUSIRANA INVERZIJA                   |                          |
| IZRADILA: IVANA ŽANIĆ                  |                          |
| MENTOR: PROF. DR. SC. FRANJO ŠUMANOVAC |                          |

MTP-1

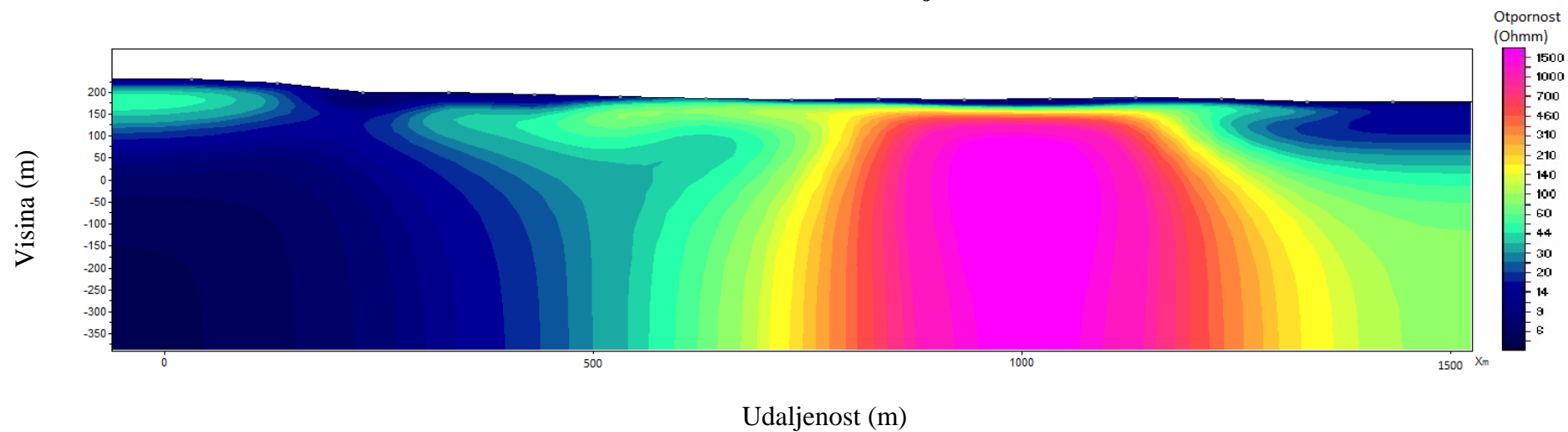
**Occamova inverzija**



|  |                          |
|--|--------------------------|
| PRILOG 3.4                             | MAGNETOTELURSKI PROFIL 1 |
| OCCAMOVA INVERZIJA                     |                          |
| IZRADILA: IVANA ŽANIĆ                  |                          |
| MENTOR: PROF. DR. SC. FRANJO ŠUMANOVAC |                          |

MTP-2

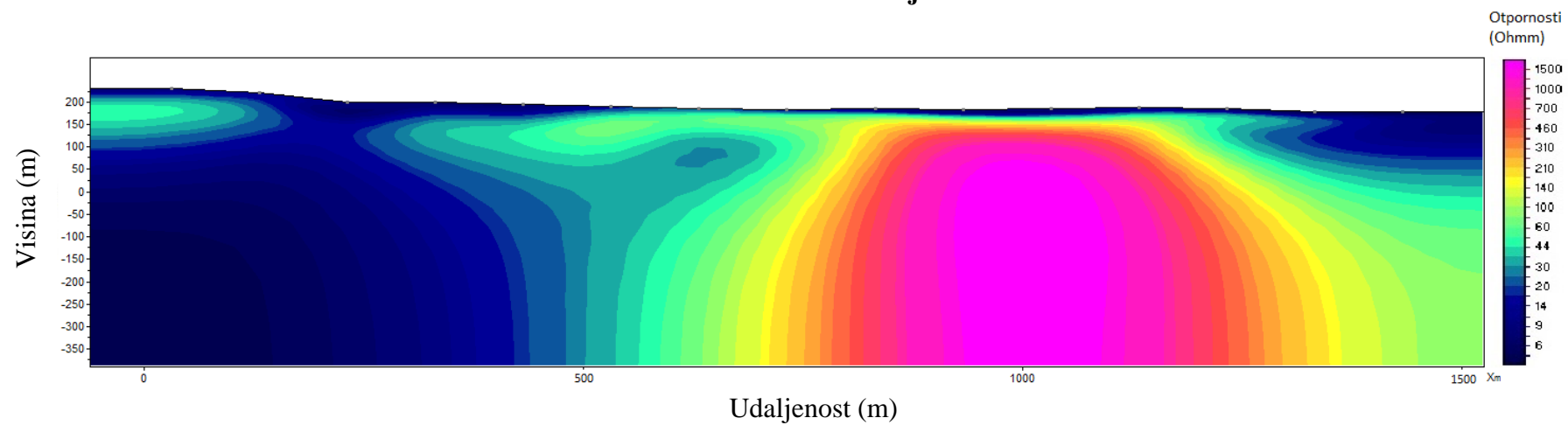
**Fokusirana inverzija**



|  |                          |
|--|--------------------------|
| PRILOG 3.5                             | MAGNETOTELURSKI PROFIL 2 |
| FOKUSIRANA INVERZIJA                   |                          |
| IZRADILA: IVANA ŽANIĆ                  |                          |
| MENTOR: PROF. DR. SC. FRANJO ŠUMANOVAC |                          |

## MTP-2

### Occamova inverzija



|  |                          |
|--|--------------------------|
| PRILOG 3.6                             | MAGNETOTELURSKI PROFIL 2 |
| OCCAMOVA INVERZIJA                     |                          |
| IZRADILA: IVANA ŽANIĆ                  |                          |
| MENTOR: PROF. DR. SC. FRANJO ŠUMANOVAC |                          |