

# Magneototelurska mjerenja na širem području Udbine

## Magnetotelluric data acquisition in the wider Udbina region

**Ivana Žanić**

INA-Industrija nafte, d.d.  
ivana.zanic@ina.hr

**Igor Sruk**

INA-Industrija nafte, d.d.  
igor.sruk@ina.hr

**Damir Takač**

INA-Industrija nafte, d.d.  
damir.takac@ina.hr



**Ključne riječi:** magnetotelurika, mjerna točka, Dinaridi-14, Lemeško korito, otpornosti stijenske formacije, inverzno modeliranje, izravno modeliranje

**Key words:** magnetotellurics, station, Dinarides-14, Lemeš trough, resistivity of the rock formation, inverse modelling, forward modelling



### Sažetak

Istraživanje ugljikovodika je vrlo zahtjevno i vrlo skupo, pogotovo kada se provodi u terenima kao što su to Dinaridi. S jedne strane, morfološka razvedenost terena otežava istraživanje, a s druge strane, površinska geološka građa dodatno otežava snimanje seizmičkih podataka kao osnovne metode dubinskog istraživanja u naftnoj industriji. Osim seizmičkih, postoje i druge geofizičke metode koje su znatno jeftinije od seizmičkih i premda slabije rezolucije, služe kao njihova prethodnica. Upotreba takvih metoda doprinosi boljem pozicioniranju i dizajnu seizmičke mreže čime se znatno utječe na kvalitetu seizmičkih podataka. Magneototelurika je jedna od takvih metoda, a Dinaridi su sa svojom morfološkom razvedenošću i geološkom građom pogodan poligon za primjenu magneototelurike. Po prvi puta INA primjenjuje ovu metodu u istraživanju ugljikovodika. Kao uže područje interesa odabran je jugoistočni dio istražnog

bloka Dinaridi-14 koji pokriva oko 1500 km<sup>2</sup> područja između Korenice i Bruvna te Gospića i Donjeg Lapca. Rezultati magneototelurskog mjerenja prikazani su profilno kao otpori stijenskih formacija temeljem kojih se provodi geološka interpretacija. Načelno, profili prikazuju odnose otpornih formacija kao nisko-otporne i visoko-otporne bez strogo određenih granica između formacija budući da iste vrijednosti otpora imaju različite starosne formacije kao što jedna formacija može imati veliki raspon otpornosti ovisno o njoj litološkoj građi. U svakom slučaju, rezultati ovakvih mjerenja utjecat će na nastavak istraživanja i bolje sagledavanje dubinske geološke građi ovog dijela Dinarida.



### Abstract

Hydrocarbon exploration is very demanding and expensive, especially in terrains as Dinarides. The morphological complexity of Dinarides complicates any exploration activities. From the other hand the seismic survey as the primary method in HC exploration in oil industry additionally suffer from the geological setting. Beside the seismic method, there are many other geophysical techniques that are more cheaper than seismics. Although such techniques are low resolution, they serve as the forerunner of

the seismic survey. The application of those methods contribute to better positioning and designing the seismic survey and thus it has the influence on seismic data quality. Magnetotelluric is just about right method and Dinarides with such morphological diversity and geological setting are the suitable terrain for MT application. For the first time INA is using MT in HC exploration. Southeast part of the exploration block Dinarides-14 was chosen for magnetotelluric survey that cover area of 1500 km<sup>2</sup> between Korenica, Bruvno, Donji Lapac and Gospić as well. The results of magnetotelluric survey are shown at the crosssections as the resistivity of rock formations. Based on such measurements the geological interpretation will be performed. Generally, crosssections display the relationships of the resistivity formations as low-resistivity and high-resistivity rock formation without sharp boundaries between them since the same resistivity could have several formations and one formation could have several resistivities or range of resistivity as well depending on its lithology content. In any case, the results of MT survey will affect to future exploration and better insight on subsurface geology of this part of Dinarides.

## 1. Uvod

Dinaridi su oduvijek privlačili i znanstvenike, napose geologe koji su se iznova vraćali u Dinaride pokušavajući dokučiti njihovu podzemnu građu. Spoznaje o dubinskoj geološkoj građi još uvijek su načelno oskudne upravo zbog vrlo malog broja dubokih istražnih bušotina. Premda su Dinaridi na površini kao otvorena knjiga i postoje brojni radovi o mogućoj dubinskoj geološkoj građi, još uvijek se činjenično premalo zna. S obzirom da su istražna bušenja vrlo skupa, primijenjena geologija se okreće nekim drugim, prihvatljivim metodama i tehnikama kako bi pokrili što veći prostor od interesa, a istovremeno istražili što veće dubine. Upravo u tom smislu, geofizičke metode zadovoljavaju navedene uvijete.

Postoji čitav spektar geofizičkih metoda koja svaka za sebe ima i prednosti i nedostatke, ali i odgovarajuće rezultate ovisno o rezoluciji koju odnosna metoda može postići, počevši od gravimetrije, magnetometrije, preko geoelektrike, elektromagnetike, pa sve do karotažnih mjerenja u bušotinama. Najrobusnija je svakako gravimetrija s gotovo neograničenim dubinskim zahvatom, ali relativno malom rezolucijom u svim smjerovima. S druge strane, geofizička mjerenja u bušotinama imaju najveću vertikalnu rezoluciju,

čak i svega nekoliko cm, ali se u horizontalnom smislu odnosi samo na tu mjernu lokaciju. U korelaciji s drugim bušotinama na malom razmaku mogu se vrlo detaljno pratiti horizontalne promjene svojstava formacije, ali su ta mjerenja ograničena na relativno mali prostor i malu dubinu zahvata mjerenja uz vrlo veliku cijenu istraživanja.

Za potrebe istraživanja ugljikovodika svakako najkorisnija je seizmička metoda koja uz sva ograničenja zadovoljava potrebe istraživanja. Njen dubinski zahvat od nekoliko km daje kontinuitete seizmičkih događaja koji se mogu interpretirati u prostoru. No, u slučaju terena s karbonatnim stijenama na površini, metoda je opterećena rasapom energije i gubitkom vidljivosti seizmičkih događaja što ju čini vrlo skupom s obzirom na rezultate mjerenja u takvim terenima.

Područje istražnog bloka Dinaridi-14 nalazi se upravo u takvom geološkom razvoju gdje je vrlo korisno prije snimanja seizmičkih podataka primijeniti neku drugu, jeftiniju metodu koja će detektirati užu zonu interesa koja bi se mogla prekriti 2D ili 3D seizmikom. U ranijim fazama istraživanja ugljikovodika u Dinaridima provedena su seizmička istraživanja u nekoliko navrata. No, njihovi rezultati su bili vrlo upitni jer se nije mogao dobiti dovoljan broj zadovoljavajućih kontinuiteta koji bi mogli detektirati užu zonu interesa. Osim toga, položaj tih profila nije bio odgovarajući u odnosu na pružanje struktura te se vidljivi seizmički događaji nisu mogli dovesti u vezu s poznatim geološkim granicama. Stoga je odlučeno da se prije postavljanja nove seizmičke mreže provede snimanje magnetotelurskom metodom koja će dati naznake dubinske geološke građe.

## 2. Magnetotelurika u Dinaridima

Već je spomenuto da je magnetotelurika najpogodnija za terene s razvedenom morfologijom kao i za terene na čijoj se površini nalaze karbonatne stijene ili bilo koje stijene s velikom seizmičkom brzinom. Područje Dinarida je upravo takvo područje. Magnetotelurika kao prethodnica seizmičkim snimanjima ima dvojako značenje. S jedne strane dobit će se grube naznake podzemne građe, prije svega strukturne. S druge strane, temeljem tih spoznaja postaviti će se odgovarajuća mreža profila 2D seizmike. Nakon provedenih početnih istražnih radnji, težište istraživanja ugljikovodika usmjereno je na jugoistočni dio bloka u područje između Korenice i Bruvna. Dva su osnovna razloga za takvu odluku.

Prvi razlog je strukturološke prirode (Slika 1 lijevo). To je područje koje prema geološkoj karti ukazuje na određeni nesklad u pružanju struktura. Prema idejnoj koncepciji, taj nesklad je uzrokovan višestrukim navlačenjem trijasko-jurskog (T-J) kompleksa na kredni kompleks ili na samog sebe re-aktivacijom „Unskog“ rasjeda početkom paleogena. Lijeva rotacija „Ličkog“ bloka (zapadno krilo Unskog rasjeda) dovela je do dezintegracije mezozojskog kompleksa koji se razbio na nekoliko segmenata danas prepoznati kao jezgre brda Čemernica, Maslovara ili Kremen. Pretpostavka je da su se T-J segmenti mezozojskog kompleksa navlačili na kredni kompleks ili na dijelove T-J kompleksa uz lijevu rotaciju i klizanjem po permo-trijaskim šejlovitim ili „evaporitskim“ slojevima i na taj način stvarali složene geološke odnose koji odstupaju od dinaridskog pružanja (SZ-JI). Upravo te klizne plohe mogle bi biti barijera migraciji ugljikovodika, a potencijalne zamke mogu se razviti upravo ispod takvih navlaka.

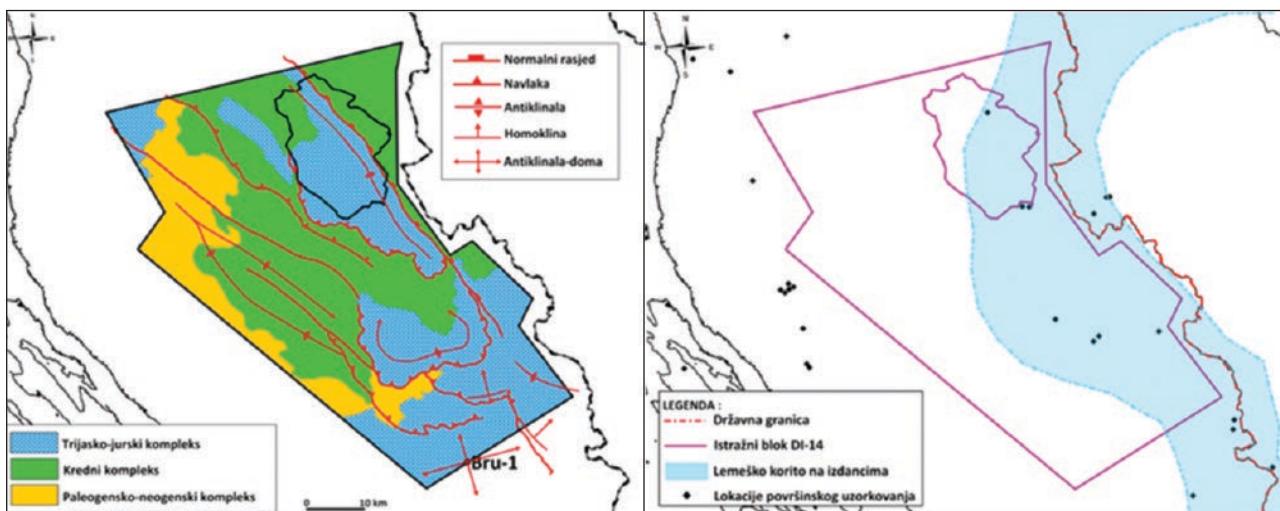
Drugi razlog je facijesne prirode sa stanovišta matičnih stijena (Slika 1 desno). U širem prostoru Dinarida, po kvaliteti i potencijalu ističu se trijasko, jurske i kredne matične stijene. Matične stijene su karbonati i kalcitni šejlovi koji sadrže kvalitetan organski facijes marinskog, algalno-bakterijskog podrijetla s povećanom količinom sumpora (kerogen tip I-IIS). Taloženje matičnih stijena usko je vezano za uvijete i okoliše taloženja na Jadranskoj karbonatnoj platformi (Velić i ostali, 2002a; 2002b, Vlahović i ostali, 2005). Taložile su se u lagunarnim okolišima i „*sabkha*“ okolišima koji su karakteristični za platformnu sedimentaciju, ali isto tako i u sin-sedimentacijski formiranim dubljevodnijim unutar-platformnim koritima s dobrom anoksijom i stratifikacijom koji su postojali tijekom

njene evolucije. Interpretacija rezultata geokemijskih analiza matičnih stijena šireg prostora, pokazala je da su gornjojurski karbonati i kalcitni šejlovi Lemeških naslaga te karbonati krednih evaporitnih i dubljevodnih facijesa izrazito dobrog do odličnog naftnog potencijala. Gornjojurske matične stijene su po svojim svojstvima najbolje i najkvalitetnije upravo u ličkom dijelu Lemeškog korita. Specifični organski facijesi jurskih i krednih matičnih stijena su najdublje zalijegali tijekom kasne krede i paleocena prije strukturiranja. (Troskot-Čorbić., T., 2011).

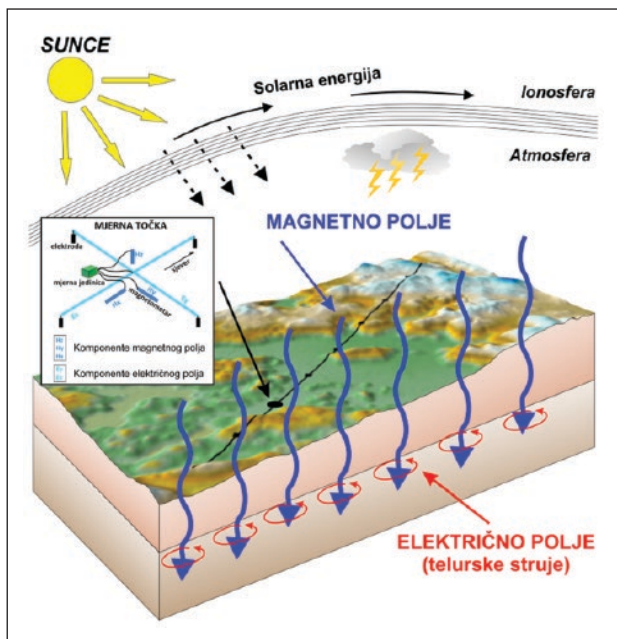
Usporednim promatranjem ova dva faktora dolazi se do spoznaje o ključnim elementima naftnog sustava. Činjenica da na površini postoje izdanci Lemeškog korita u zoni izrazite strukturalno-tektonske kompleksnosti borano-navlačnog pojasa podrazumijeva dublje zalijeganje površinskih formacija čime se ostvaruje aktivni naftni sustav koji ispod kliznih navlačnih ploha mogu sadržavati zamke za ugljikovodike. Najveća nepoznanica je podzemna strukturalna građa. Upravo je zadatak magnetotelurike da pokuša predočiti tu podzemnu građu.

### 3. Metoda magnetotelurskog mjerenja

Pojam **MAGNETOTELURIKA** je složenica (MT) od „magneto“ što znači MAGNET i „telurika“ što znači ZEMLJINE STRUJE. Dakle, to je geofizička metoda koja mjeri magnetno i električno polje zemlje. Metoda magnetotelurskog mjerenja je pasivna 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



Slika 1. Strukturni površinski odnosi (lijevo) i Lemeško korito (desno)



Slika 2. Princip stvaranja telurskih struja

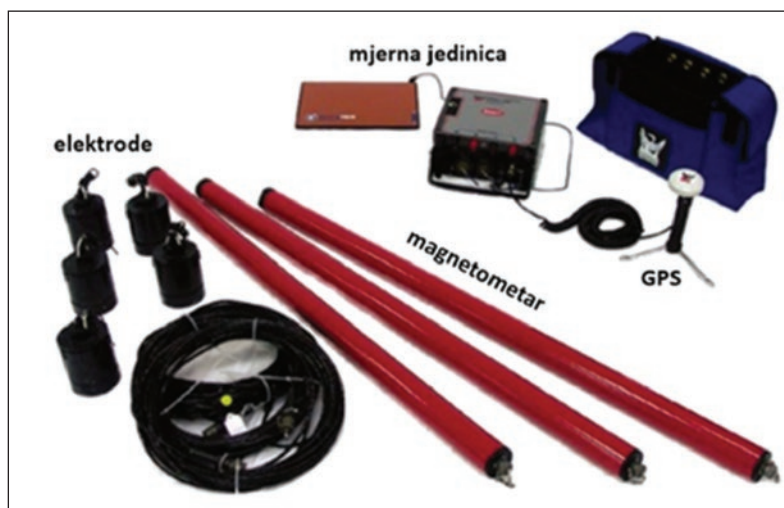
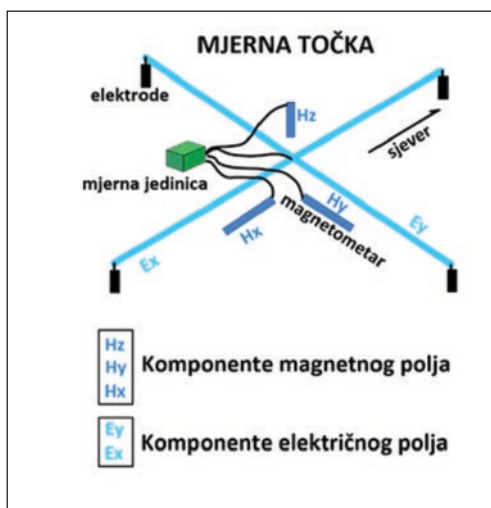
frekvencija, do 10 km ili dublje koristeći niže frekvencije. Razvijena je u SSSR-u i Francuskoj tijekom 1950-ih i postala je metoda koja se koristi za istraživanja podzemlja u različite svrhe diljem svijeta. Komercijalna upotreba uključuje istraživanja ugljikovodika (nafte i plina), geotermijska istraživanja, kao i istraživanje podzemnih voda. Različite stijene i geološke strukture imaju širok raspon električnog otpora, čijim mjerenjem se omogućava razlikovanje materijala i omogućava upoznavanje tektonskih procesa i geoloških struktura. Metoda se temelji na mjerenju omjera vodoravnih komponenti prirodnog električnog (telurskog) i magnetnog polja na površini, koji je za određenu frekvenciju konstantan za konstantnu otpornost. Ovaj omjer se naziva impedancijom  $Z$ , a ovisi o električnoj otpornosti i frekvenciji.

Magnetotelurika je pasivna i neinvazivna metoda, u potpunosti bez ikakvog utjecaja na okoliš te ne koristi dodatni (vanjski ili stimulativni) izvor energije. Sve promjene geomagnetnog polja induciraju električne struje u Zemlji. Posebno opsežne struje vrlo niskih frekvencija induciraju u Zemljinoj kori promjene magnetnog polja, koje prouzrokuju promjenjive električne struje u ionosferi (zbog sunčevog elektronskoga strujanja, okretanja Zemlje itd.) te jako udaljene grmljavine u atmosferi (Slika 2). Ta strujanja su po cijeloj površini Zemlje, a pojedinačni strujni sustavi pokrivaju površine više milijuna  $\text{km}^2$ . Stoga su dobili ime telurske (Zemljine) struje. Posljedica telurskih strujanja, koja neprestano mijenjaju veličinu i smjer, je promjenljivo elektromagnetno polje, a istraživanje tog elektromagnetnog polja telurskih strujanja zove se magnetotelurika.

Terensko snimanje, odnosno mjerenje telurskih strujanja je prilično jednostavno i bez ikakvog utjecaja na okoliš i ekološku mrežu. Oprema za jednu mjernu točku sastoji se od seta uređaja koji obuhvaća (Slika 3 desno):

- MT stanicu za simultanu akviziciju magnetotelurskih (MT) i audiomagnetotelurskih (AMT) podataka
- tri zavojnice za registriranje magnetskog polja u smjerovima N-S, E-W i vertikalne komponente
- pet ne-polarizirajućih elektroda za registraciju električnog polja u smjerovima N-S i E-W
- GPS antenu
- telurske kablove i spojne kablove zavojnica.

Mjerna figura (Slika 3 lijevo) sastoji se od dva međusobno okomita električna dipola ( $E_x$ ,  $E_y$ ) ili elektroda na razmaku od 100 m i tri magnetna senzora



Slika 3. Shema mjerne točke i oprema

ili magnetometra koji mjere magnetnu horizontalnu ( $H_x$ ,  $H_y$ ) i vertikalnu ( $H_z$ ) komponentu (sl.3 desno). Prijemnici i senzori kalibrirani su na samoj točki prije početka mjerenja, a rezultat mjerenja pohranjen je u datoteci s oznakom serijskog broja instrumenta ili senzora. Sirovi podaci (vremenske serije) spremaju se na CompactFlash karticu, a zatim se sprema na tvrdi disk računala. Također se bilježe i točne lokacije svake točke primjenom GPS-a. Varijacije elektromagnetnog polja zabilježene su u frekvencijskom spektru. Podaci se sređuju, nadopunjuju s lokacijskim podacima i pripremaju za interpretaciju.

#### 4. Program magnetotelurskog mjerenja

Metode mjerenja otpora u Dinaridima načelno nisu novina. I ranijih godina je bilo geoeletričnih mjerenja i to na širem prostoru Dinarida. Početak takvih mjerenja seže u 60-e godine prošlog stoljeća kada su mjerene dvije točke upravo u području Udbine. Jedna je u Krbavskom polju, a druga u blizini Bruvna. Velika kampanja geoeletričnih mjerenja provedena je 1986. godine kada je s 19 profila pokrivena gotovo cijela Lika (sl.4).

Projekt mjerenja MT-a odnosno njegovih trasa djelomično se preklapa s dosadašnjim radovima koje je provela INA, d.d. Ta preklapanja nalaze se samo na južnom i istočnom dijelu područja od interesa, a odnose se na postojeće 2D seizmičke profile, geoeletrične profile i bušotinu Bruvno-1 (Slika 4).

Postojeći seizmički podaci na istražnom području DI-14 ne prekrivaju područje od interesa, snimljeni su starim tehnologijama, niske su rezolucije, nedovoljno dubokog zahvata i loše kvalitete. Vrlo rijetka i

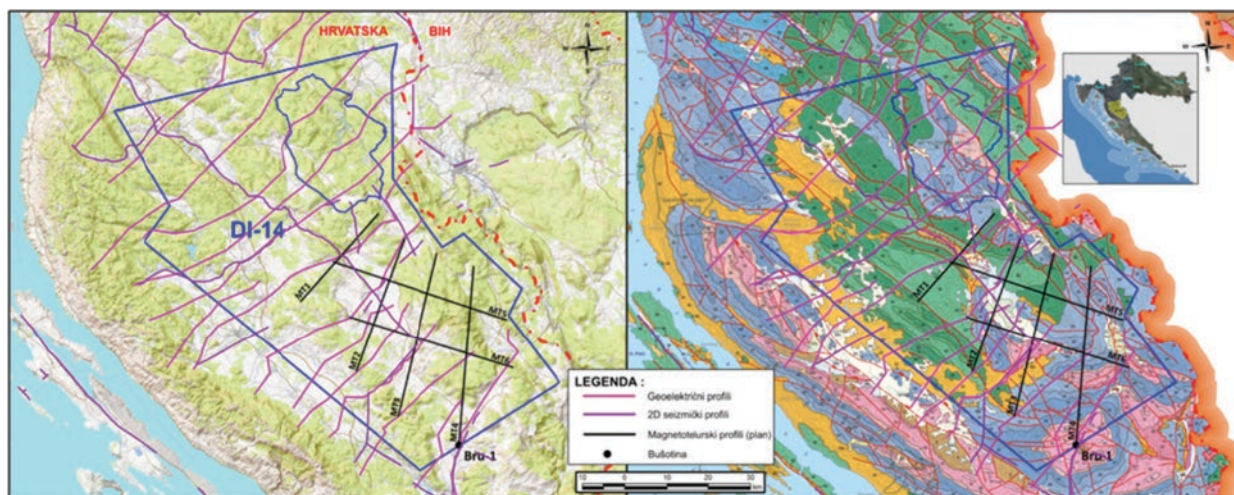
nepravilna mreža linijskih 2D profila s nepravilnom orijentacijom i varijabilnim razmakom između linija ne omogućava naftno geološke analize koje su potrebne za utvrđivanje postojanja potencijalnih istražnih objekata.

Glavni cilj planiranog magnetotelurskog mjerenja jest prekrivanje konceptijski perspektivnog područja u istražnom prostoru DI-14 čiji će podaci omogućiti usmjeravanje istražnih aktivnosti u budućnosti. Nedostatnost podataka iz podzemlja, niz otvorenih pitanja vezanih za strukturno-tektonski sklop, te pitanje prisutnosti, debljine i dubine stijena koje su bitne za ugljikovodični sustav razlozi su za provođenje ciljanih istražnih radnji.

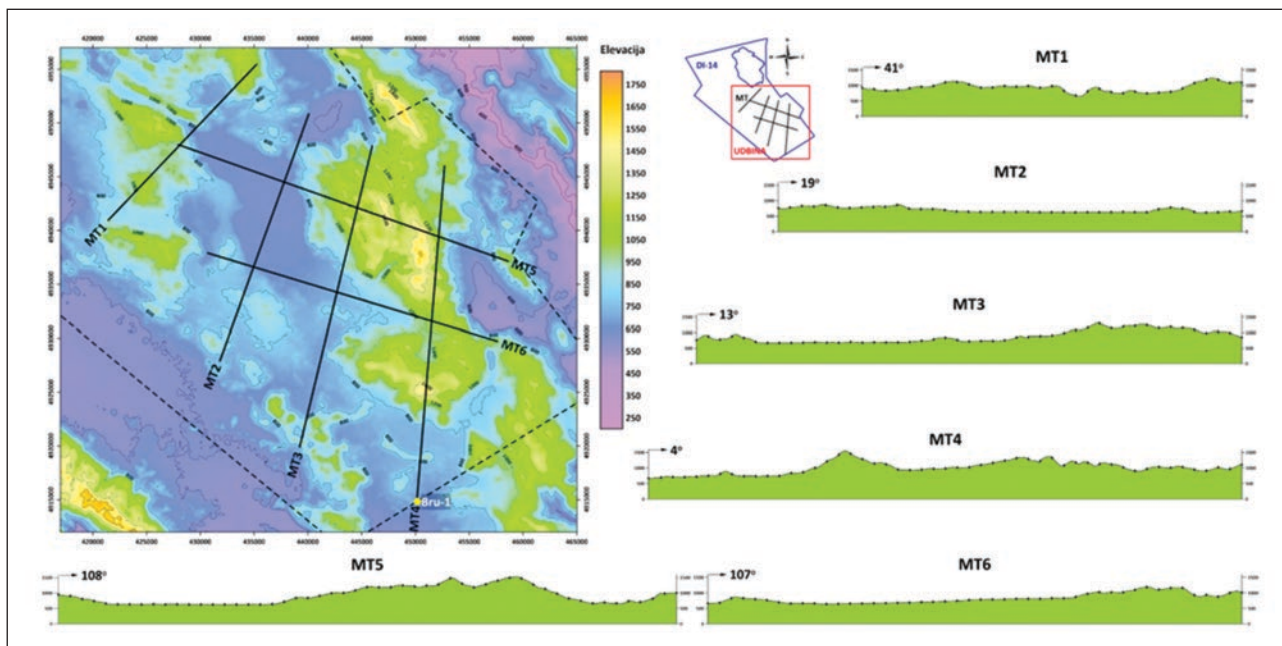
Profili ili trase po kojima se predviđa razmještaj točaka za magnetotelurska mjerenja dizajnirani su tako da neke od njih budu paralelne s konstruiranim konceptijskim geološkim profilima. Orijevirane su gotovo okomito na glavne rasjede i navlake da se što jasnije prikaže strukturno-tektonski sklop. Radi povezivanja s egzaktnim dubinskim podacima, jedna od trasa prelazi preko bušotine Bruvno-1, jedine u tome području.

Magnetotelurski projekt **UDBINA-MT-2021** obuhvaća ukupnu površinu od 1500 km<sup>2</sup> sa šest trasa koje čine MT mjerne točke teorijski pravilno raspoređene linijski po trasi na razmacima od približno 625 m (Slika 4). Predviđeno je 270 MT točaka, a željena dubina zahvata je osam i više kilometara.

MT trase ne prelaze preko zaštićenih područja. Na samom području snimanja nalazi se park šuma Laudonov gaj i šumski rezervat Velika Plješivica – Drenovača, te jedan značajni krajobraz Bijeli Potoci –Kamensko koji su također i spomen područje. Na području od interesa postoji i ekološka mreža NATU-



Slika 4. Profili magnetotelurskog mjerenja na istražnom bloku Dinaridi-14



Slika 5. Topografski obris magnetotelurskih profila s mjernim točkama

RA 2000 POP (područja očuvanja značajna za ptice) i NATURA 2000 POVS (područja očuvanja značajna za vrste i stanišne tipove), preko kojih prolaze MT trase. No, kako je metoda potpuno neinvazivna, nije bilo nikakvih oštećenja ili zadiranja u prirodni okoliš.

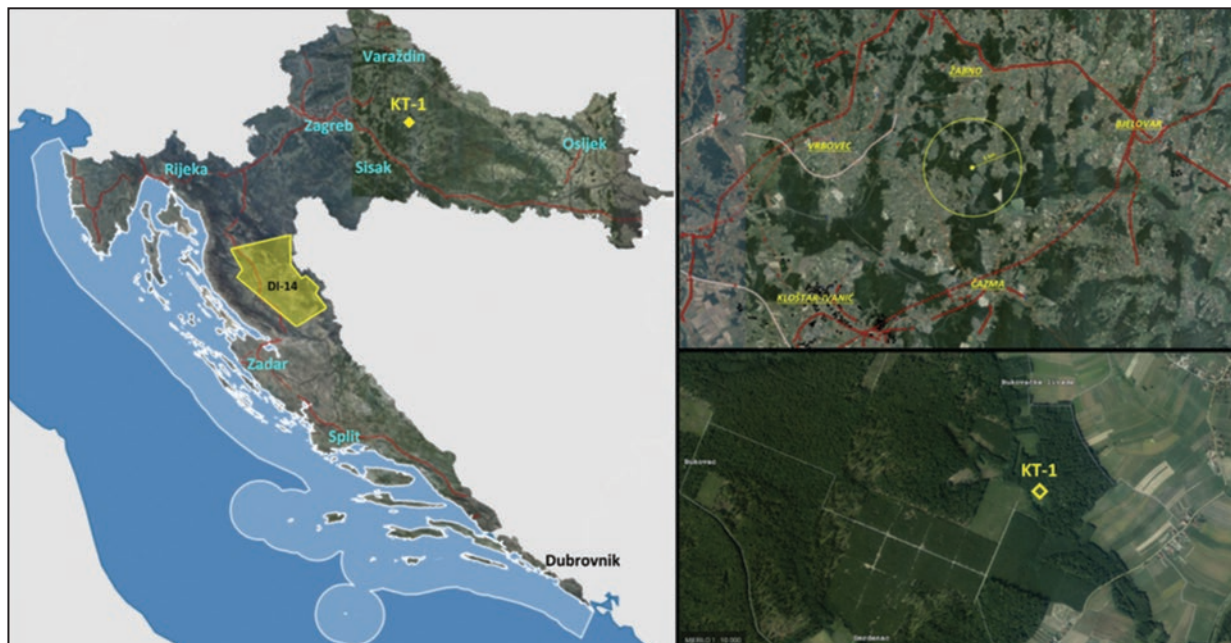
S obzirom na činjenicu da se mjerno područje nalazi u zoni nekadašnjih ratnih operacija, pojavila se bojazan u postojanje minskih sumnjivih područja koja se do danas još nisu razminirala. No, uvidom u dokumente („Uvid u stanje miniranosti“) Ministarstva unutarnjih poslova, Ravnateljstva civilne zaštite utvrdilo se da postoje minski sumnjiva područja koja, na sreću, ne zadiru u mjerni prostor, tj. u prostor pokriven trasama MT mjerenja te se mjerenja mogu nesmetano provesti. U svakom slučaju, izvođač radova PBG Geophysical Exploration Ltd. informiran je o potencijalnim opasnostima na terenu te je taj detalj uvršten u njihov plan zaštite na radu. Treba napomenuti da tijekom izvođenja radova nije bilo niti jednog incidenta.

Poseban problem kod mjerenja MT podataka je mreža strujnih vodova. Najveći utjecaj na rezultate mjerenja imaju visokonaponski strujni vodovi i antene. Na području mjerenja MT podataka nalaze se HEP-ovi visoko naponski vodovi (dalekovodi) s rasponom napona od 35 kV do 400 kV, koji se sijeku s dva MT profila (MT-1 i MT-6).

Također postoji i mreža srednjeg napona, te odgovarajuće trafostanice. Raspon napona u ovoj mreži iznosi od 10 kV do 35 kV. Na slici 2.6 prikazan je

položaj dalekovoda, mreže srednjeg napona i odgovarajućih trafostanica u odnosu na MT profile odnosno trase. Premda srednje-naponski vodovi i trafostanice imaju slabiji utjecaj na rezultate mjerenja, poželjno ih je izbjegavati u što većoj mjeri ili se maksimalno izmahnuti dovoljno daleko od izvora smetnji zadržavajući pri tome što je god moguće pravilniju mrežu magnetotelurskih profila.

Ovako gusta naponska mreža je nepovoljna za MT snimanja zbog velikog umjetnog elektromagnetskog utjecaja koji proizvodi (smetnja, šum). Zbog toga umjetno izazvanog elektromagnetskog polja koji prikriva prirodno elektromagnetsko polje zemlje, postavlja se obično jedna ili čak i dvije MT jedinice koje se zovu udaljene referentne točke (stanice) ili kontrolne točke (KT). Te referentne stanice postavljaju se na lokacijama koje nisu opterećene takvim šumom. Ove stanice mogu biti udaljene od područja zahvata više desetaka, pa čak i stotina kilometara. Bitno je da lokacija kontrolne točke zadovoljava minimalne uvjete koji osiguravaju zadovoljavajuću kvalitetu mjerenog signala. Ti uvjeti zahtijevaju da u krugu od pet km nema visokonaponskih vodova i antena kao niti električne željeznice, a nema čak niti velikih infrastrukturnih objekata. Od dvije predložene lokacije (bjelovarsko i makarsko područje) izvođač radova je odabrao lokaciju bjelovarskog područja. Određena referentna točka je u području između gradova Bjelovara, Žabna, Vrbovca i Čazme (Slika 6), a nalazi se oko 150 km sjeveroistočno od mjernog područja.



Slika 6. Položaj kontrolne točke

Kontrolna točka sadrži minimalne smetnje koje niti na koji način ne mogu utjecati na vrijednosti mjerenja prirodnog elektromagnetskog polja Zemlje, pa je samim tim pouzdana kontrolna točka.

## 5. Terenski radovi

Tijekom mjeseca rujna voditelji projekta posjetili su mjernu točku MT5-146 koja se nalazi na sjevernoj strani Lapačkog polja u predjelu Dnopolje. GPS lokator se nalazi na samoj točki. Strujne elektrode su postavljene oko 50 m od mjerne točke u smjeru sjever, jug, istok i zapad, a spojene su s mjernim uređajem na način da elektrode sjever-jug te istok-zapad zatvaraju strujni krug. One mjere komponente električnog polja  $E_y$  i  $E_x$  (sl. 3). Magnetne sonde su ukopane u zemlju (Slika 7 lijevo) na način da dvije sonde orijentirane u pravcu istok-zapad i sjever-jug koje mjere horizontalne komponente magnetnog polja  $H_y$  i  $H_x$ , a jedna sonda je postavljena vertikalno koja mjeri vertikalnu komponentu magnetnog polja  $H_z$  (Slika 3). Sve su sonde potom spojene na mjerni uređaj. Prije početka mjerenja provodi se kalibracija mjernog uređaja kao i unos parametara koji se odnosi na samu mjernu točku (Slika 7 desno). Mjerenje se provodi tijekom 22-24 sata. Nakon toga mjereni podaci se skidaju s mjernog uređaja, a čitava oprema se seli na slijedeću mjernu točku. Iskopane rupe se zatrpavaju i čitava mjerna točka vraća se u prvobitno stanje. Po potrebi, u slučaju lošeg signala i primljenih podataka postupak se ponavlja.

Predviđeni plan mjerenja u potpunosti je ispunjen. No, tijekom samog izvođenja mjerenja dolazilo je do određenih odstupanja od plana koja su se rješavala u hodu (Slika 8). Ta odstupanja su minimalna i generalno iznose manje od 100 m. Odstupanja veća od 100 m dogodila su se na 21 točki, a kreću se čak i do gotovo 300 m.

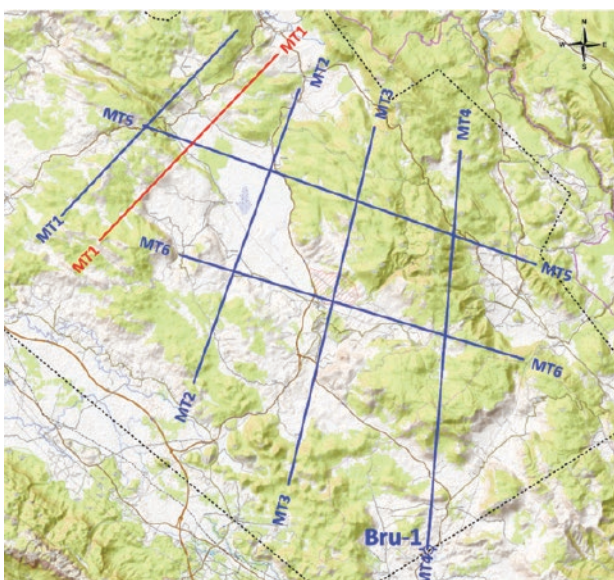
Jedan od razloga odstupanja odnosi se na samu lokaciju mjerne točke koja se iz morfoloških ili pedoloških razloga nije mogla u potpunosti realizirati prema planu te se točka mora izmjestiti na pogodniju lokaciju.

Također, jedan od razloga su i izvori elektromagnetskih smetnji koje proizvode električni vodovi i trafo-stanice te je nužno izmicanje mjernih točaka kako bi se te smetnje uklonile ili maksimalno smanjile. Odstupanja iznose i do 300 m. Takva odstupanja su bila na zapadnoj strani profila MT-5, na sjevernoj strani profila MT-2 te u središnjem dijelu profila MT-6 u Krbavskom polju blizu Udbine.

Najveće odstupanje od plana je izmještanje cijelog profila MT1 (Slika 8). Planom je bio predviđen položaj trase profila (sl.8 plavo) koji bi pokrivaio dio područja kojega pokriva geološki profil izrađen od strane HGI-a iz 2006. godine koji bi poslužio za usporedbu magnetotelurskih mjerenja. No, u tijeku izvođenja magnetotelurskih mjerenja, pregledom terena utvrdile su se dvije činjenice. S jedne strane, izuzetno morfološki težak teren zadavao bi probleme u poštivanju same trase profila. S druge strane, veliki dio profila prolazi gotovo ispod ili jako blizu srednje-naponske



Slika 7. Postavljanje opreme na mjernu točku MT5-146. Lijevo-ukopavanje magnetskih sondi; Desno-kalibracija i postavka osnovnih parametara koji se odnose na točku



Slika 8. Izmješteni profil MT1 (crveno) u odnosu na plan (plavo)

energetske mreže koja predstavlja vrlo jaki izvor smetnji i tako narušava kvalitetu mjerenog podatka. Iz tih razloga, došlo je do promjene trase profila MT1 koji je izmješten oko 3.5 km prema jugoistoku s istom orijentacijom i istim brojem točaka, što je usuglašeno i s izvođačem radova (Slika 8. crveno).

## 6. Suradnja s lokalnom zajednicom

Lokalna zajednica je bila obaviještena o radovima koji se provode na terenu. To obavještavanje odnosi se na nekoliko razina. Prije svega, to su službena tijela županija, gradova, općina i mjesnih odbora. Nadalje, to su tijela koja upravljaju s prirodnim resursima kao što su lovačka društva, Hrvatske šume, Vodovod, HEP, Plinacro te poduzeća za upravljanje lokalnim cestama. Također, treba obavijestiti i sigurnosne službe, kao što je vojska, MUP, Hitna pomoć i vatrogasci. I na kraju, potrebno je obavijestiti i vlasnike preko čijih terena prolaze MT trase ili mjerne točke. Cilj obavještavanja je detaljno informiranje lokalne zajednice o planiranim aktivnostima, njihovom tijeku i dužini trajanja mjerenja.

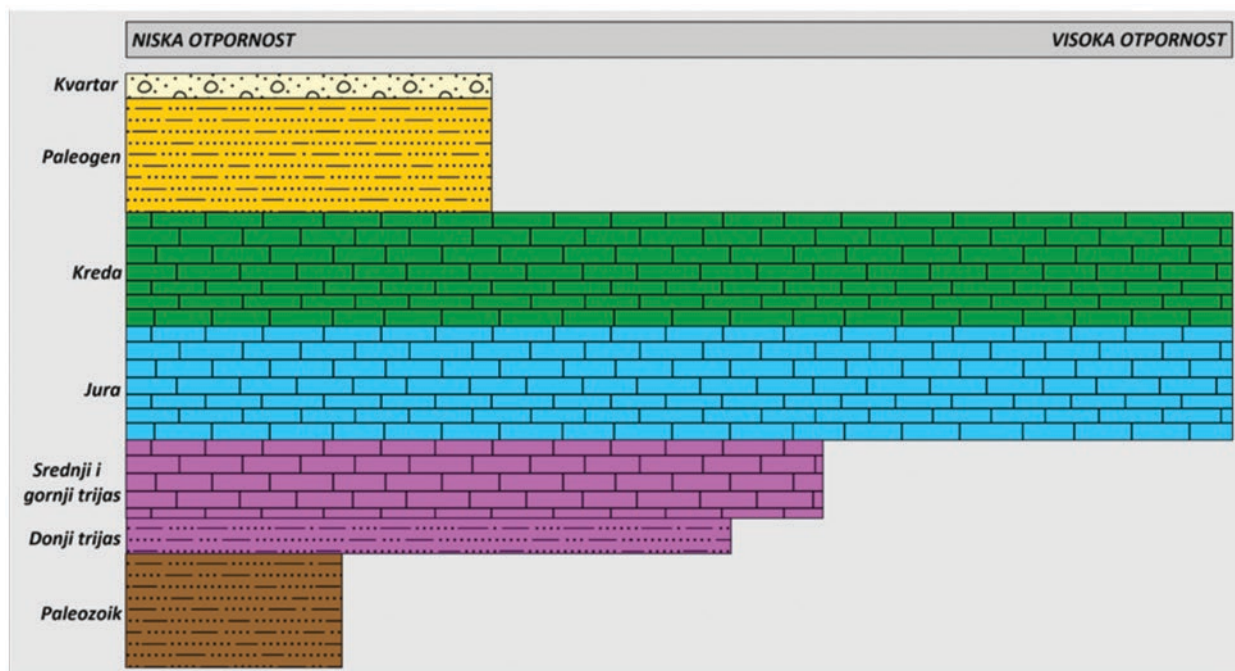
S obavještavanjem, odnosno informiranjem krenulo se mjesec dana prije početka radova te je ostvarena odlična suradnja i s lokalnom zajednicom i s lokalnim poljoprivrednicima, napose stočarima. Vrlo je važno da se osigura nesmetano mjerenje na određenoj mjernoj točki. U tom smislu, važno je da se stoka izmjesti, a električni pastiri isključe kako ne bi stvarali potencijalne smetnje u mjerenju prirodnog Zemljinog električnog polja. U tom kontekstu, važno je spomenuti da tijekom izvođenja MT mjerenja nije bilo niti jedne primjedbe na aktivnosti kao niti jedan zahtjev za naknadu učinjene štete.

## 7. Rezultati magnetotelurskih mjerenja

Poljska kompanija PBG Geophysical Exploration Ltd. provela je preliminarnu interpretaciju mjerenih podataka. Interpretacija MT podataka temelji se na 1D Occam-ovom algoritmu i 2D inverziji primjenom NLGC-a (nelinearni konjugirani gradijent).

Occam-ov algoritam je tipična 1D metoda inverzije te se posljedično dobije klasični slojni model. Za bolju vizualizaciju, takvi modeli se obično interpoliraju kako bi se dobio profil sastavljen od pojedinačnih sondi. Zapravo se može reći da se s Occam-ovim algoritmom dobije finalni model bez utjecaja





Slika 9. Odnos raspona otpornosti stijenskih formacija na širem prostoru Udbine

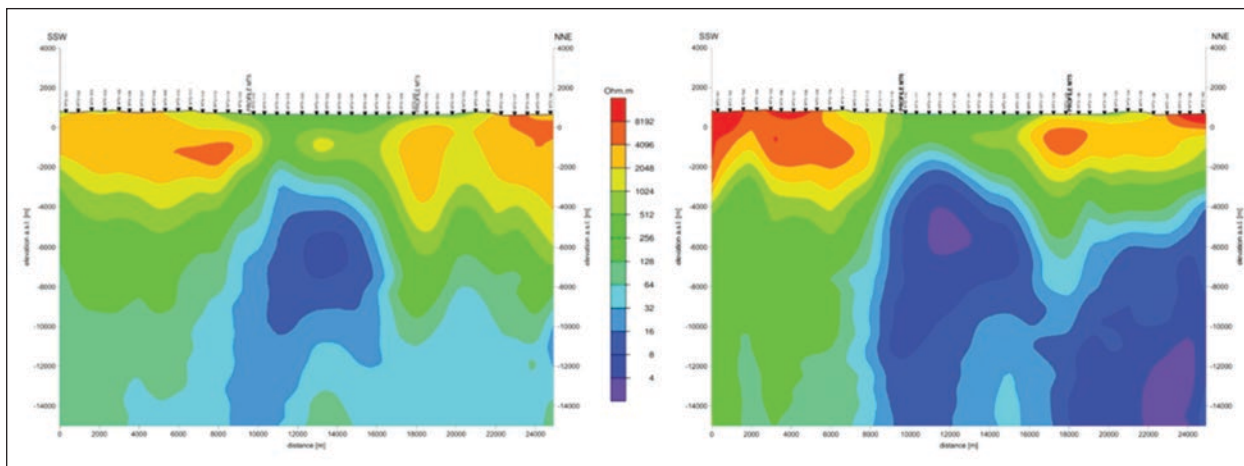
interpretatora, ali je model zaglađen, pa prema tome nema oštrog granica između geoelektričnih slojeva. To nadalje dovodi do jednostavnog modela koji sadrži osnova svojstva svih mogućih modela koji se mogu poklopiti s terenskim podacima (Constable i ostali, 1987). Veliki broj geoelektričnih modela mogu se poklopiti s dobivenim podacima od koji neki mogu biti i vrlo složeni. Otpornosti slojeva variraju dok se ne postigne odgovarajuće podudaranje terenskih i izračunatih krivulja.

Rodi i Mackie (2001) su razvili rutinu inverzije zaglađenog modela koja pronalazi regulirana rješenja (Tikhonov-a regularizacija) za 2D inverzije magnetotelurskih podataka primjenom metode NLGC-a. Simulacije izravnog modeliranja koriste jednadžbe konačnih razlika stvorene prema Maxwell-ovim mrežnim analognim jednadžbama. Program invertira podatke u mreži koju definira sam korisnik, čiji su blokovi ispunjeni podacima otpornosti. Sama mreža u konačnici je toliko velika da izlazi izvan okvira samog profila.

Interpretacija obuhvaća inverzne modele 1D, 2D i 3D u dvije verzije: a) neuvjetovanog (unconstrain) modela i b) uvjetovanog (constrain) modela. Neuvjetovani model sadrži interpretaciju mjerenih podataka bez utjecaja strukturnog modela, dok uvjetovani model koristi i prethodno postavljene strukturno-tektonski model i prati odstupanja od osnovne ideje.

**1D model** temelji se na interpretaciji mjerenih vrijednosti na mjernim točkama i prikazu interpretacije na profilu (Occam). Kada se te pojedinačne točke interpolacijom povežu u jednu cjelinu dobije se **2D model** (NLGC) koji se može nadograditi sa strukturni modelom. **3D model** je u stvari pseudo-3D gdje su vrijednosti interpretiranih otpora po profilima interpolirani u prostoru i svedeni na pravilnu mrežu. U programu magnetotelurskom mjerenja UDBINA-MT-2021, izrađena je mreža od 350x350 m s dubinskim zahvatom od 16000 m.

Interpretacija može biti geofizička i geološka. Ovdje će biti prikazana samo geofizička interpretacija. Rasponi otpornosti pojedinih stijenskih formacija nisu strogo uniformirani, već se preklapaju na način da ista stijenska formacija ima različite otpornosti, ovisno o proslojavanju s drugim tipovima stijena ili više formacija imaju jednake otpornosti ako imaju isti ili vrlo sličan litološki sadržaj. U promatranom širem području Udbine, otpornosti stijenskih formacija mogu se načelno svesti na tri kategorije: nisko-otporne, visoko-otporne i vrlo visoko-otporne. Moguće su i kombinacije u nekim detaljima. U korelaciji s geološkim sadržajem, nisko-otporne stijene odgovaraju klastitima dok su visoko odporne načelno karbonatne stijene. U korelaciji sa stratigrafskim odnosima (Slika 9), nisko-otporne stijene su klastiti paleozoika i paleogena s time da su paleogenski klastiti nešto viših otpornosti nego



Slika 10. Magnetotelurska geofizička interpretacija profila MT2 – 1D model (lijevo) i 2D model (desno)

paleozojski. Kvartar je također nisko-otporan, ali zbog male debljine više se ponaša kao moguća smetnja interpretaciji nego stijenska masa. Najviše otpornosti imaju kredne i jurske karbonatne stijene s time što je gotovo nemoguće povući oštru granicu između njihovih otpornosti. Trijaskne stijene su nešto složenije. Generalno su nižih otpornosti od krednih i jurskih, a viših otpornosti od paleozojskih. Za pretpostaviti je da je takav raspon odraz same litološke građe trijaskog kompleksa koji u donjem dijelu ima klastične naslage koje postupno prelaze u karbonatne pa dolazi do miješanja litologija niskih i visokih otpornosti.

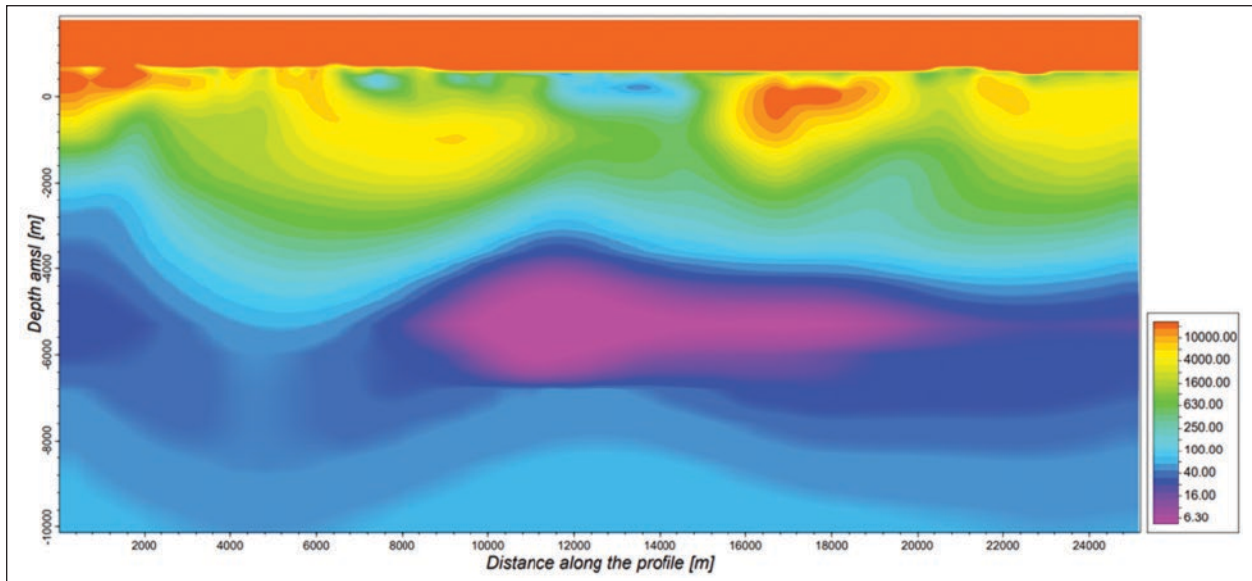
Kao primjer magnetotelurskih istraživanja na širem prostoru Udbrane, prikazan je magnetotelurski profil MT2 koji prolazi dijelom Krbavskog polja (Slika 8). Krovina nisko-otpornih stijena (paleozoik?) u jugozapadnom dijelu profila nalazi se na dubini od oko 2 km u odnosu na razinu mora, dok je u sjeveroistočnom dijelu na oko pet km (Slika 10). Vidljive su dvije visoko-otporne zone koje su u sredini razdvojene relativno nisko-otpornom zonom. To može ukazivati na to da je u predjelu Krbavskog polja inverzna struktura, slična situacija kao i na Bruvnu: topografski je dolina, a strukturno je antiklinala s paleozojskom jezgrom blizu površine.

**3D inverzija** provedena je primjenom algoritma opisanog u radu Avdeneev i ostali, 2015. Izravno modeliranje temelji se na metodi integralne jednadžbe i funkcije minimiziranja odstupanja od trenda primjenom kvazi-Newton-ove metode (Avdeev i Avdeev, 2009). Za utvrđivanje optimalnog modela vodljivosti algoritam također invertira i distorzije statičkih parametara. S time se poboljšava vodljivost i olakšava podešavanje modela na dobivene podatke (Moorkamp i ostali, 2020).

Već je spomenuto da su bliže površini na raspolaganju više frekvencije koje povećavaju rezoluciju. No, one se vrlo brzo padaju s dubinom iz čega i proizlazi činjenica kako duže vrijeme mjerenja osigurava sagledavanje većih dubina, ali manje rezolucije zbog vrlo malih frekvencija koje su znatno ispod 1 Hz. Radi uspostave područja osjetljivosti podataka i utjecaja na nepodudaranja mjerenih krivulja na niskim frekvencijama podataka inverzije, provedeni su testovi s finalnim modelima i to mijenjajući otpornosti na najdubljem dijelu modela. Testovi pokazuju da su frekvencije ispod 0,1 Hz (odgovara periodu od 10 sekundi) osjetljive na strukture dublje od 20 km. Prema tome, ne može se očekivati da se ta mjerenja podudare s inverzijskim modelom. Naime, takve strukture su znatno dublje od postavljenih ciljeva. Iz toga proizlazi da je dobro podudaranje podataka u frekvencijskom rasponu 780-0,1 Hz sasvim dovoljno da se uhvate strukture u zoni interesa.

Vertikalni presjek profila MT2 izdvojenog iz volumena 3D inverzije pokazuje sličnost s 2D profilom (Slika 11). I ovdje se vidi kako nisko-otporni facijes odvaja dva visoko-otporna facijesa. Jasno se vidi kako otpornost značajno opada s dubinom i na 5000 m ispod površine prosječna otpornost je ispod 100  $\Omega\text{m}$ . Prema karakteristikama rezolucije magnetotelurskih podataka dobro se vidi gornja granica te niske otpornosti, dok se dublje teško može nešto razlučiti. U stvari, vidi se značajno zamagljenje prema dnu modela, a strukture se ne mogu razlučiti procesom inverzije.

Debljine visoko-otpornih facijesa dosežu i do četriri km, ovisno o njihovom položaju u strukturnom okruženju. Ponegdje i potpuno izostaju te se javljaju zone nisko-otpornih facijesa u karbonatnom kompleksu. Jedan od zadataka magnetotelurike odnosio se na



Slika 11. Magnetotelurski profil MT2 izdvojen iz seta 3D inverzije magnetotelurskih podataka

utvrđivanje dekolmana, ili potencijalnih kliznih ploha po kojima se mogla odvijati navlačna tektonika. Naznake navlačne tektonike i kliznih ploha su mjestimično vidljivi što će sveobuhvatna geološka interpretacija uz potporu površinske geologije svakako i pokazati. Jedna od novina koja se ukazala magnetotelurskim mjeranjima su upravo zone niskih otpornosti unutar jedinstvenog visoko-otpornog facijesa koje nastaju vrlo plitkim pozicioniranjem paleozojskog klastičnog kompleksa što samo govori o intenzitetu tektonskih i erozijskih procesa.

## 8. Zaključak

U sklopu istraživanja ugljikovodika na istražnom prostoru Dinaridi-14, provedena su magnetotelurska mjerenja na odabranom užem području, jugoistočnom dijelu ukupnog istražnog prostora. To područje obuhvaća širu okolinu naselja Udbine. Mjerenja su provedena tijekom jeseni 2021. godine, a izvođač radova je poljska kompanija PBG Geophysical Exploration Ltd. iz Krakova. Planom je predviđeno mjerenje na 270 točaka na međusobnom razmaku od 620 m organiziranih u šest profila. Plan je u potpunosti ispunjen uz devet naknadno ponovljenih mjerenja na zahtjev Ine. Odstupanja od plana su minorna i odnose se na izmještanje mjerne točke od planirane lokacije ili zbog vrlo teškog terena gdje se nije moglo pristupiti ili zbog blizine trafo-stanica ili energetskih vodova u cilju smanjenja smetnji mjenog signala. Važno je napomenuti da se ovakav tip mjerenja po prvi puta izvodi na području RH i da je na neki način novina

u pristupu i metodologiji istraživanja ugljikovodika i svakako predstavlja pozitivan metodološki iskorak.

Provedena je i preliminarna interpretacija magnetotelurskih podataka koja obuhvaća samo geofizičku interpretaciju. Interpretacija ukazuje na generalno tri grupe otpornih facijesa koje daju naznake geološke građe. To su facijesi nisko-otpornih, visoko-otpornih i vrlo visoko-otpornih stijenskih formacija. U korelaciji sa stratigrafskim formacijama, nisko-otporni facijesi odgovarali bi klastitima paleozoika i paleogena. Vrlo visoko-otporni i visoko-otporni facijesi odgovarali bi karbonatima krede i jure. Trijaski kompleks je podijeljen u dvije skupine. Jednu skupinu čine nisko-otporni klastični facijesi dok drugu skupinu čine visoko-otporni, ali niže-otporni facijesi od kredne i jurske stijenske formacije.

Provedeno je 1D, 2D i 3D modeliranje koje indicira debljinu visoko-otpornih facijesa od oko četiri km. Mjestimično je ta debljina uvjetovana i navlačenjima. S druge strane, postoje nisko-otporni facijesi vrlo blizu površine što indicira plitko pozicioniranje baze karbonatne platforme, što će pokazati geološko modeliranje. Naime, treba imati na umu da su Dinaridi u geološkoj prošlosti bili podvrgnuti opetovanim navlačenjima i da se veliki dio materijala erodirao. Danas se promatraju relikti nekadašnjih struktura kojima je vrlo teško rekonstruirati prvobitni položaj.

Rezultati magnetotelurskih mjerenja dali su naznake geoloških odnosa u podzemlju, koje će se upotrijebiti za korekciju geološkog modela, ali će biti i podloga za prijedlog mreže snimanja 2D seizmike u nastavku istraživanja ugljikovodika na ovom području.

## Literatura

1. Avdeev, D. and Avdeeva., 2009: 3D Magnetotelluric inversion using a limited-memory quasi-newton optimisation. *Geophysics*, 74(3):F45-F57, doi:10.1190/1.3114023
2. Avdeev, D. B., and Avdeeva, A. D., 2006: A rigorous three-dimensional magnetotelluric inversion. *Progress in Electromagnetics Research, PIER*, 62:41-48
3. Avdeeva, A., Moorkamp, M., Avdeev, D., Jegen, M., and Miensopust, M., 2015: Three-dimensional inversion of magnetotelluric impedance tensor data and full distortion matrix. *Geophysical Journal International*, 202(1): 464-481
4. Christopherson, R., K., 2001: MT Gauges Earth's Electric Fields. Search & Discovery article #20025, AAPG Explorer, 2001, pg.22-30
5. Constable, C. S., R. Parker, L. C., Constable, G., 1987: Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, Vol.52, No.3, s. 289-300
6. Moorkamp, M. A., Avdeeva, A., Basokur, T. and Erdogan, E., 2020: Inverting magnetotelluric data with distortion correction-stability, uniqueness and trade-off with model structure. *Geophysical Journal International*, 222(3):1620-1638, 06. ISSN 0956-54X. doi:10.1093/gji/ggaa278
7. Rodi, W., Mackie, R. L., 2001: Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotellurics inversion. *Geophysics*, Vol.66, s. 174-187
8. Takač, D., Troškot-Čorbić, T., Mikša., G, Balić, D. (2021): Povratak Dinaridima: Nova strukturna koncepcija. *Nafta i plin* 168-169, s. 49-70
9. Troškot-Čorbić, T. (2011): Organski facijesi u gornjojurskim naslagama Gorskog kotara, Like i Dalmacije (Organic facies of the Upper Jurassic sediments in Gorski kotar, Lika and Dalmatia – in Croatian). PhD Thesis, University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, pp. 266.
10. Velić, I., Vlahović, I. & Matičec, D. (2002a): Depositional sequences and palaeogeography of the Adriatic Carbonate Platform. *Mem. Soc. Geol. It.*, 57, 141-151.
11. Velić, I., Vlahović, I. & Matičec, D. (2002b): Depositional sequences and palaeogeography of the Adriatic Carbonate Platform. *Mem. Soc. Geol. It.*, 57, 141-151.
12. Vlahović, I., Tišljarić, J., Velić, I. & Matičec, D. (2005): Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology*, 220, 333-360.