

PHASE I - REPORT ON RESEARCH

Geophysics research - input into
documentation on possibility of closing the
loop of water flow

Deliverable D.T2.5.1
Croatia (PP6)

Final version
09 2020





Geofizičko istraživanje neinvazivnom metodom magnetotelurike u Gradu Križevcima

Broj: 43/20

Predstojnik Zavoda za hidrogeologiju i
inženjersku geologiju

Dr. sc. Josip Terzić, dipl. ing. geol.

Ravnatelj Hrvatskog geološkog
instituta

HRVATSKI GEOLOŠKI INSTITUT
1 ZAGREB - Sachsova 2

Dr. sc. Slobodan Miko, dipl. ing. geol.

28. rujna 2020.

PROJEKTNI ZADATAK: **Geofizičko istraživanje neinvazivnom metodom magnetotelurike**

INVESTITOR: **Grad Križevci**
Ivana Zakmardija Dijankovečkoga 12
48260 Križevci
OIB: 35435239132

IZVOĐAČ: **HRVATSKI GEOLOŠKI INSTITUT**
Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju
Sachsova 2
10000 Zagreb
OIB: 43733878539

UGOVOR: **2137/02-01/1-20-11 (Grad Križevci)**
2509/20 (Hrvatski geološki institut)

VODITELJICA ISTRAŽIVAČKIH RADOVA: **dr. sc. Staša Borović, dipl. ing. geol.**

SURADNICI: **Ivan Kosović, dipl. ing. geol.**
dr. sc. Josip Terzić, dipl. ing. geol.

AUTORICA IZVJEŠĆA: **dr. sc. Staša Borović, dipl. ing. geol.**

Na naslovnoj stranici: Postavljanje magnetotelurske sonde na lokaciji kod Visokoga gospodarskog učilišta U Križevcima (Lucija Gudić)

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
2. MAGNETOTELURSKA ISTRAŽIVANJA	2
2.1. TEORIJSKE OSNOVE MAGNETOTELURSKE METODE	2
2.2. INSTRUMENTI I TERENSKA MJERENJA	3
2.3. PREDNOSTI I NEDOSTATCI METODE	5
2.4. OPREMA KORIŠTENA U ISTRAŽIVANJU U GRADU KRIŽEVCIMA	6
2.5. TIJEK ISTRAŽIVANJA I ODABIR LOKACIJA	7
2.6. EDUKACIJA STUDENATA	11
3. ZAKLJUČAK	12
<i>LITERATURA</i>	<i>13</i>

1. UVOD

U podzemlju Grada Križevaca prije više je desetljeća dokazano postojanje stijena koje sadrže termalne vode (geotermalnih vodonosnika). Od tada se ovaj vrijedan resurs periodički i u skladu s mogućnostima istraživao u više navrata kroz komercijalne projekte i projekte financirane od strane Europske unije, o čemu je očuvana i većina dokumentacije.

Trenutno je Grad Križevci partner u projektu sufinanciranom od strane Europske unije kroz program regionalne suradnje Interreg Srednja Europa (Interreg CE) akronima HealingPlaces (identifikacijski broj: CE 1308), te je u sklopu projekta kao vanjske stručnjake angažirao Hrvatski geološki institut sa ciljem što kvalitetnije izrade tematske isporuke (*deliverable*) D.T2.5.1 Dokumentacija o mogućnostima korištenja termalne vode u zatvorenom sustavu (petlji) u Križevcima. Ova tematska aktivnost i isporuka organizirane su u dvije faze: provedba novih geofizičkih istraživanja neinvazivnom metodom magnetotelurike (Faza I) te izrada višedimenzionalne studije o kružnom korištenju geotermalnog resursa (Faza II).

Ovo izvješće predstavlja geofizička istraživanja provedena na prostoru Grada Križevaca u rujnu 2020. godine (Faza 1) s ciljem pridobivanja dodatnih spoznaja o prostiranju geotermalnog vodonosnika radi razmatranja mogućih lokacija za izradu budućih proizvodnih i utisnih bušotina koje su nužni preduvjet za održivo korištenje geotermalnog resursa.

2. MAGNETOTELURSKA ISTRAŽIVANJA

2.1. Teorijske osnove magnetotelurske metode

Magnetotelurska metoda ili magnetotelurika je elektromagnetska (EM) metoda površinskog geofizičkog istraživanja. Njome se mogu utvrditi električna svojstva podzemlja (raspodjela električne vodljivosti/otpornosti po dubini). Radi se o metodi koja registrira postojeća (prirodna) polja vanjskog porijekla. Magnetsko polje Zemlje je promjenjivo, a Zemlja pritom djeluje kao dobar vodič zbog čega se induciraju električne (telurske) struje u kori i plaštu. Raspodjela gustoće telurskih struja zavisi od otpornosti horizontalnih vodljivih slojeva. Strujni tok na manjim dubinama u Zemljinoj kori zavisi od podzemnih struktura koje su različitih otpornosti. Telurske struje pak induciraju sekundarno magnetsko polje, koje se ovom metodom također registrira (Naidu, 2012).

Teorijske osnove magnetotelurske metode datiraju iz 1950-ih godina, a nezavisno jedan od drugoga objavili su ih Tikhonov (1950) i Cagniard (1953). U pola stoljeća od pojave metode došlo je do značajnog poboljšanja instrumenata, mogućnosti izračuna i interpretacije rezultata te je magnetotelurika postala kompetitivna metoda geofizičkog istraživanja pogodna za proučavanje cijelog niza geoloških struktura i problema (Naidu, 2012).

Osnova je magnetotelurske metode simultano mjerenje totalnog EM polja, odnosno, promjene magnetskog polja (B_t) i induciranog električnog polja (E_t) tijekom vremena. Električna svojstva (npr. električna otpornost) geoloških formacija mogu se zatim utvrditi iz međuodnosa komponenti mjerenog električnog (E) i magnetskog (B) polja. Za izračune se koriste omjeri komponenti horizontalnog električnog polja (E_x i E_y), horizontalnog magnetskog polja (B_x i B_y) te vertikalnog magnetskog polja (B_z). U skladu sa svojstvima svih elektromagnetskih valova, dubina prodiranja zavisi od frekvencije vala. Omjer E_x i B_y (ili E_y i B_x) bit će konstantan za određenu frekvenciju i konstantnu otpornost. Ovaj se omjer naziva impedancija (Z), a zavisi od otpornosti i frekvencije. U homogenoj sredini njihovi su odnosi definirani izrazom:

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

u kojem je ν frekvencija, ρ električna otpornost, μ je magnetna permeabilnost, a i imaginarna jedinica (Šumanovac, 2007).

Dubina prodiranja (d) jednaka je dubini na kojoj električno polje ili elektromagnetno polje opadne na $1/e$ svoje vrijednosti na površini. Ona zavisi od otpornosti materijala (ρ) i frekvencije (ν). Što je frekvencija niža, to će dubina prodiranja biti veća:

$$d = 503,3 \sqrt{\frac{\rho}{\nu}}$$

Otpornost (ρ) homogenog materijala računa se iz sljedećeg izraza:

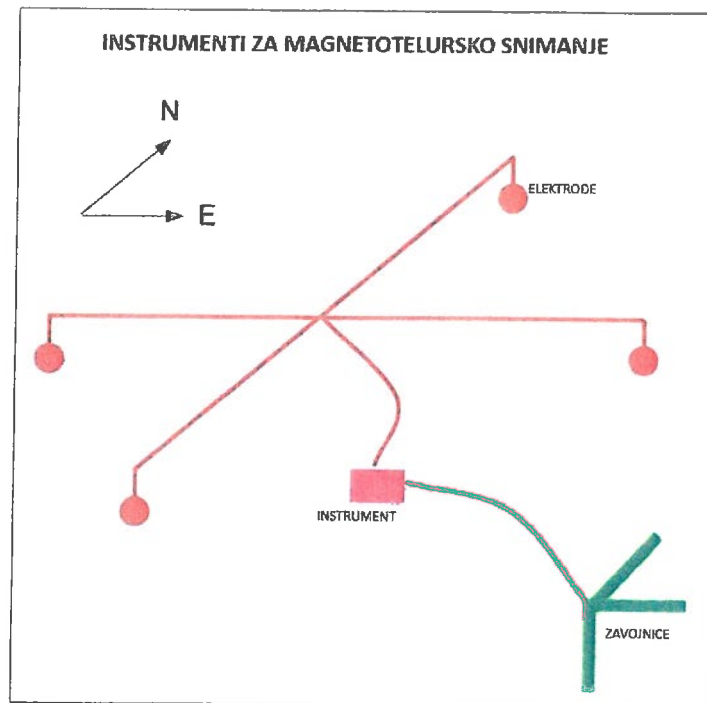
$$\rho = \frac{\mu_0}{2\pi\nu} \cdot \left| \frac{E_x}{B_y} \right|^2$$

Ako se E_x izrazi u mV/km, B_y u nT, a ρ u Ωm , tada se gornji izraz može pojednostavniti u:

$$\rho = \frac{0,2}{\nu} \cdot \left| \frac{E_x}{B_y} \right|^2$$

2.2. Instrumenti i terenska mjerenja

Magnetotelurska stanica mjeri promjene prirodnog električnog i magnetskog polja Zemlje tijekom vremena. Snima se pet komponenti kao funkcija vremena [$E_x(t)$, $E_y(t)$, $H_x(t)$, $H_y(t)$ i $H_z(t)$], dok se točno vrijeme prima preko GPS signala. Shematizirani izgled opreme prikazan je na **Slici 1**.



Slika 1. Oprema za magnetoteluriku (prema Unsworth, 2013)

Za mjerenje električnog polja koriste se dipoli s depolarizirajućim elektrodama, pri čemu duljina dipola varira zavisno od željenog dubinskog zahvata. Instrument mjeri napon između elektroda. Uobičajeno je korištenje dvaju dipola: jedan u orijentaciji sjever - jug, a drugi istok – zapad. Elektrode se ukopavaju u tlo kako bi se spriječilo pomicanje.

Kod magnetskog se polja obično mjere sve tri komponente. Koriste se indukcijske zavojnica s velikim brojem namotaja bakrene žice te jezgrom visoke magnetske permeabilnosti (Šumanovac, 2007). Promjena u magnetskom polju duž osi zavojnice inducirat će napon u zavojnici. To znači da je moguće samo mjerenje relativne jakosti elektromagnetske indukcije. Zavojnice se ukopavaju kako bi se smanjilo pomicanje i vibracija te povećala termička stabilnost.

Nakon snimanja podataka vrši se analiza vremenskih nizova magnetotelurskih podataka. Komponente električnog i magnetskog polja se Fourierovim transformacijama

preoblikuju iz funkcije vremena u funkciju frekvencije. Prividna otpornost, $\rho_a(\omega)$, i razlika u fazi, $\Phi(\omega)$, se tada izračunavaju kao funkcija frekvencije: ρ_{xy} i Φ_{xy} se računaju iz E_x i H_y , a ρ_{yx} i Φ_{yx} iz E_y i H_x .

Snimanje s referentnom točkom (ili više njih) provodi se ukoliko na području istraživanja postoji izražen EM šum. Referentna točka nalazi se dovoljno daleko da do nje ne dopiru EM šumovi prisutni na istraživanom području, ali ne predaleko kako ne bi bilo varijacija i u prirodnim poljima. Odabiru se, naravno, izolirane lokacije bez antropogenog utjecaja. Obično se nalaze na udaljenostima više desetaka, pa i preko sto kilometara, od istraživanog područja. Podatci s referentne točke služe nakon mjerenja za obradu signala (kako bi se kod Fourierovih transformacija uzimale u obzir samo koherentne kombinacije električnog i magnetskog polja) koja se ne može provesti prije isključivanja šumova (Unsworth, 2013).

2.3. Prednosti i nedostaci metode

Magnetotelurika među elektromagnetskim geofizičkim metodama ima najveći potencijal za primjenu u dubokim istraživanjima. Njome se mogu istraživati područja na dubinama od više kilometara, kao i cijela kora, nekoliko desetaka, pa čak do stotinu i više kilometara. Kao rezultat magnetotelurskog snimanja dobiva se raspodjela električne otpornosti po dubinama kao i kod klasičnog geoelektričnog sondiranja. Budući da se koriste prirodno električno i magnetsko polje Zemlje, nije potrebna energija za generiranje signala, kao ni razvlačenje dugih kablova koje bi bilo nužno za zahvaćanje većih dubina geoelektričnim sondiranjem. Dubina zahvata zavisi isključivo od frekvencije koja se registrira, odnosno, što su frekvencije niže, zahvaća se veća dubina. Još je jedna prednost MT to što je neinvazivna i povoljna za okoliš. Metoda je jako korisna za lociranje istražnih bušotina jer daje dobru generalnu sliku podzemlja čak i ukoliko postoji problem elektromagnetskog šuma i/ili pripovršinskih vodljivih slojeva. Budući da su bušotine izrazito skupe u odnosu na površinska geofizička istraživanja, moguće je postići znatnu financijsku uštedu kvalitetnim magnetotelurskim snimanjem područja u pravilnoj mreži za 2D ili, optimalno, 3D inverziju.

Kao i kod ostalih metoda koje kao rezultat daju raspodjelu električne otpornosti u podzemlju, prisutna je električna višeznačnost koja se može smanjiti ili ukloniti upotrebom postojećih podataka iz bušotina i/ili drugih geofizičkih metoda (npr. debljine pojedinih slojeva, njihova otpornost, poroznost i sl.).

Glavni je nedostatak što snimanje prirodnog polja znači snimanje jako malih iznosa napona i magnetske indukcije te potencijalno nepovoljni odnos signala i šuma. EM šum predstavljaju različiti antropogeni elementi okoliša: prometnice, dalekovodi, crpke i slično. Najveći su problem visokonaponski dalekovodi te elektrificirane pruge zbog indukcije koja može u potpunosti prekriti prirodno magnetsko polje. Stoga snimanje u urbaniziranim i insdustrijaliziranim sredinama nosi značajne izazove koji se, ipak, često mogu umanjiti ukoliko se udaljena referentna točka smjesti dovoljno daleko.

MT mjerenja u današnje vrijeme imaju primjenu u pronalaženju, istraživanju i monitoringu ležišta ugljikovodika i geotermalnih vodonosnika, u okolišnoj geofizici i hidrogeologiji, istraživanju ležišta minerala te tektonskim i litosfernim istraživanjima (Šumanovac, 2007).

2.4. Oprema korištena u istraživanju u Gradu Križevcima

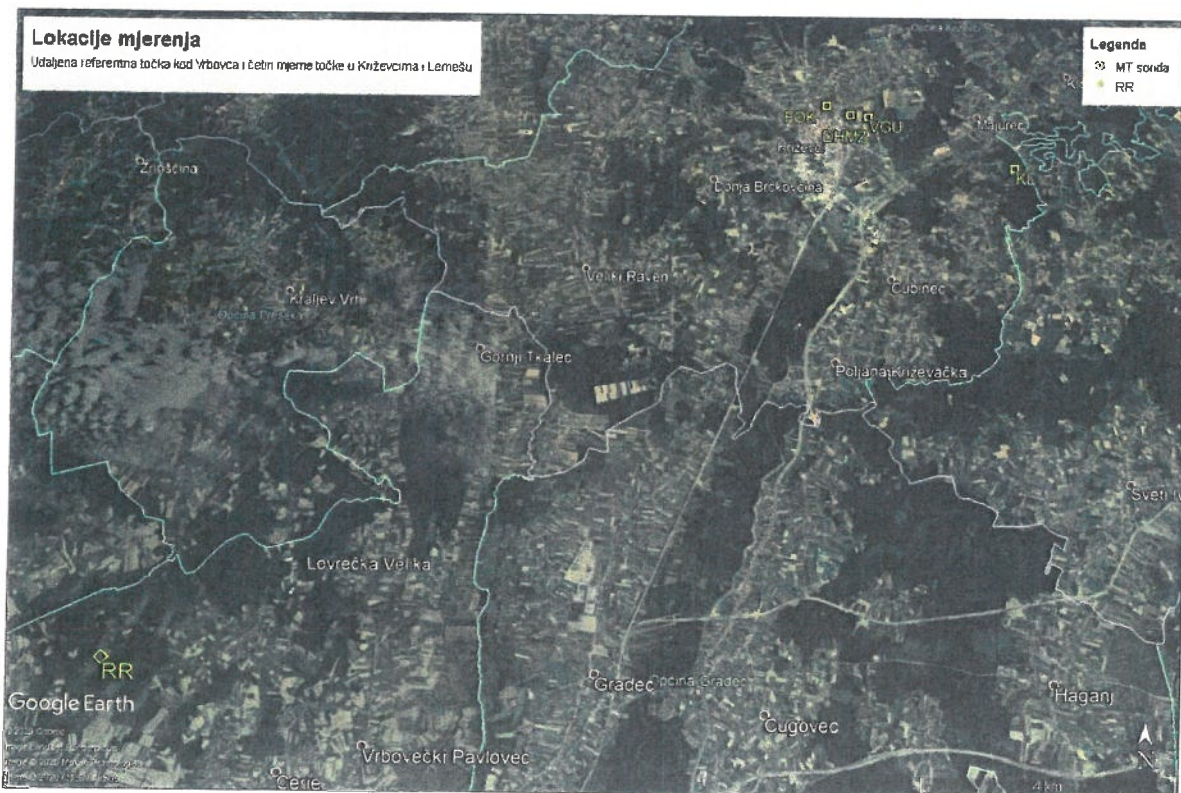
Korištena su tri kompleta opreme za širokopojasna (magnetotelurska i audiomagnetotelurska) istraživanja (A)MT, sve proizvodi tvrtke Phoenix Geophysics Ltd:

- MTU-5C prijemnik za simultano prikupljanje MT i AMT podataka (http://umt.phoenix-geophysics.com/pdf/MTU-5C_brochure.pdf) (3 kom.);
- GPS antene (3 kom.);
- MTC-150 zavojnice (<http://mtc-100-series.phoenix-geophysics.com/description>) (6 kom.) - za registriranje horizontalnih komponenti magnetskog polja;
- MTC-180 zavojnice (3 kom.) - za registriranje vertikalne komponente magnetskog polja;

- PE5-D nepolarizirajuće elektrode (15 kom.) - za registriranje komponenti električnog polja;
- Ostala priključna i sitna oprema.

2.5. Tijek istraživanja i odabir lokacija

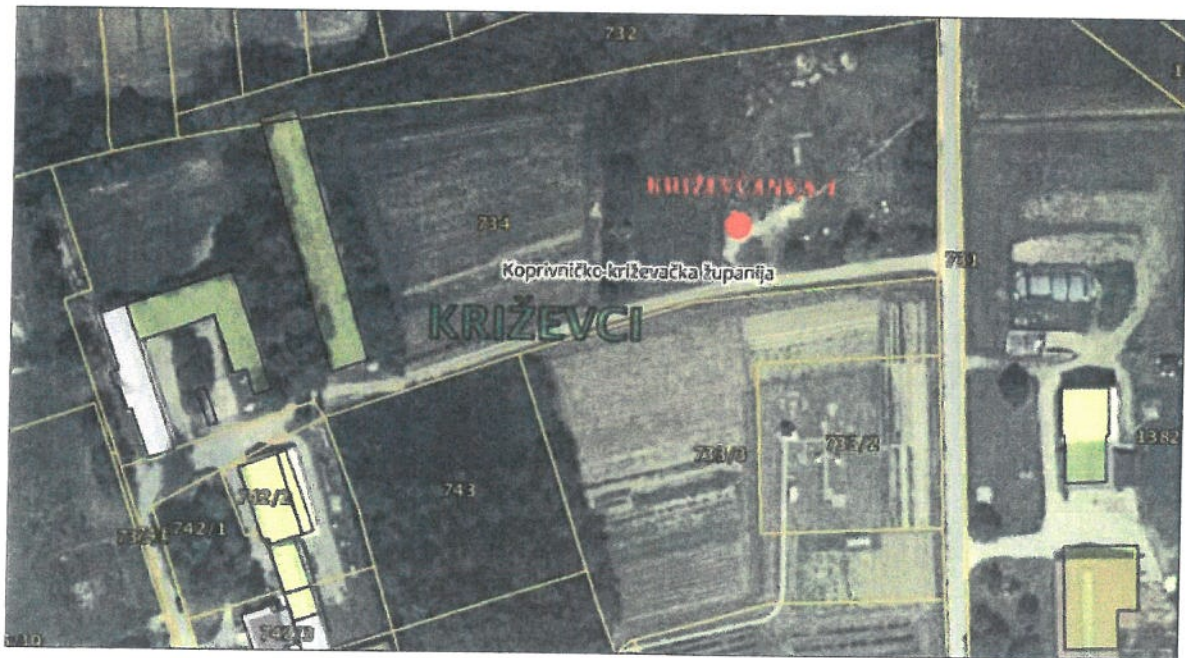
Akvizicija podataka provedena je od 14. do 18. rujna 2020. godine. Jedan je set opreme postavljen kao udaljena referentna točka (magnetotelurska (MT) sonda RR, od *engl. Remote Reference*) u Graberancu kod Vrbovca (oko 20 km od mjernih točaka), dok su ostala dva seta postavljana kao točke od interesa: po jedan tik uz istražne bušotine Križevčanka-1 (MT sonda DHMZ) i Križevci-1 u Križevačkom Lemešu (MT sonda KL), zatim kod Visokoga gospodarskog učilišta u Križevcima (MT sonda VGU) te u podnožju Katedrale Presvetog Trojstva (MT sonda FOK) (**Slika 2**).



Slika 2. Lokacijska karta provedenih istraživanja (*satelitska snimka u pozadini preuzeta s Google Earth Pro*)

S obzirom na količinu očekivanog EM šuma na točkama od interesa, utvrđeno je da bi bilo optimalno postaviti udaljenu referentnu točku na udaljenosti 10-50 km. Kao pogodna lokacija definirano je ruralno područje u okolici Vrbovca, udaljeno od točaka od interesa između 18 i 20 km te bez vidljivih izvora EM šuma. Na toj je lokaciji prije početka mjerenja provedena i kalibracija opreme (svih jedinica za akviziciju i svih zavojnica), što je uvijek potrebno učiniti na mjestu bez šuma nakon duljeg transporta jer trešnja tijekom prijevoza instrumentarija predstavlja jedan od izvora nepreciznosti mjerenja.

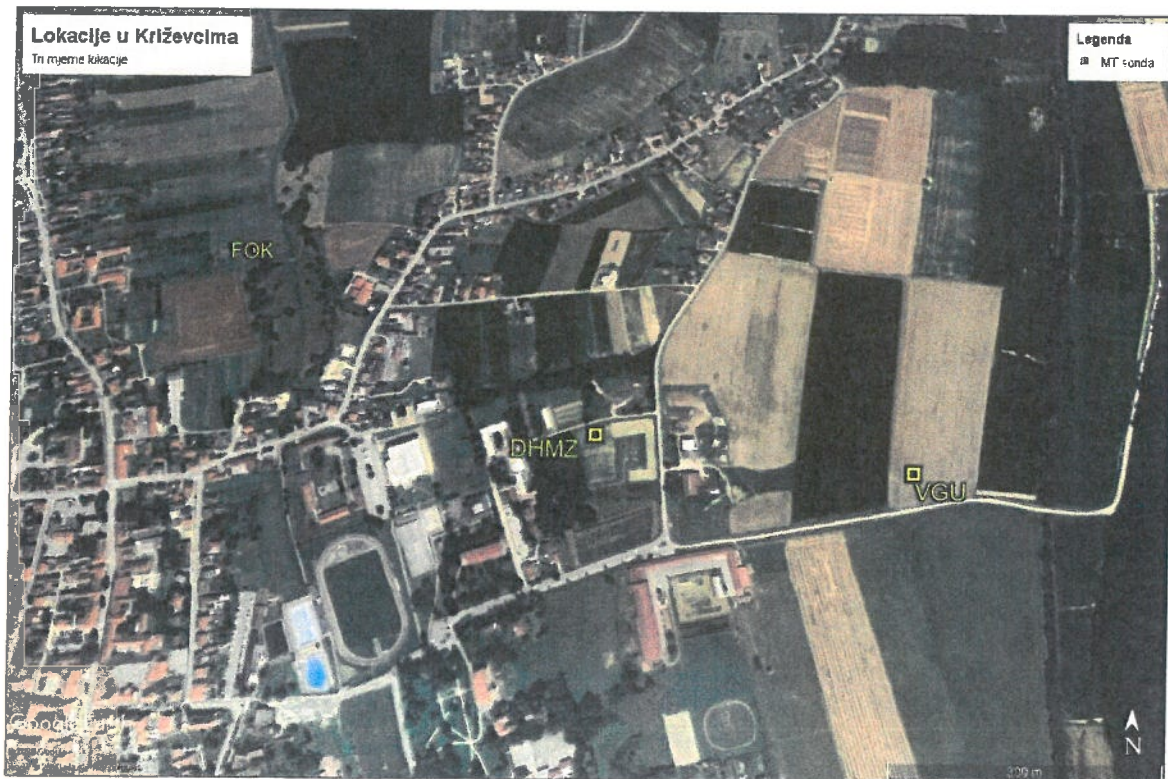
Lokacije četiriju mjernih sonde postavljene su u dogovoru s predstavnicom investitora, gospođom Lucijom Gudić. Naime, investitor je u natječajnoj dokumentaciji naveo da potražuje provedbu magnetotelurskih istraživanja na katastarskoj čestici broj 734 katastarske općine Križevci. No, veličina te čestice je ukupno 17.940,25 m², što obuhvaća i dvije zgrade. Investitoru je ova lokacija interesantna jer se ovdje nalazi jedina postojeća ispitana bušotina, Križevčanka-1 (Kža-1) (Slika 3).



Slika 3. Lokacija katastarske čestice broj 734 katastarske općine Križevci (podloga preuzeta s www.katastar.hr)

Budući da je na prostoru oko bušotine Križevčanka-1 uočena nepovoljna konfiguracija terena i sastav tla (znatan nagib te građevinski otpadni materijal), lokacija je preseljena nekoliko desetaka metara južnije, na katastarsku česticu 733/3, uz meteorološku postaju Državnog hidrometeorološkog zavoda. To ne predstavlja problem jer se istražuje podzemlje na znatnim dubinama (više kilometara) te se premještanjem lokacije u tom smislu ne gube podatci vezani uz ovu bušotinu.

Također, budući da jedna sonda zahtijeva površinu od, otprilike 2.500 m², nametnuo se zaključak da nije smisleno postavljati nekoliko točaka jednu do druge, već će za investitora biti korisnije prikupiti podatke na nešto širem području. Na taj su način pozicionirane ostale dvije točke unutar Križevaca (**Slika 4**).



Slika 4. Lokacije triju mjernih točaka u Križevcima (*satelitska snimka u pozadini preuzeta s Google Earth Pro*)

Lokacija na posjedu Visokoga gospodarskog učilišta je odabrana kao jedno od potencijalnih mjesta za izradu dodatne proizvodne bušotine, budući da postoji

moгуćnost korištenja u poljoprivrednoj (plasteničkoj / stakleničkoj) proizvodnji. Lokacija u podnožju Katedrale Presvetog Trojstva pak je odabrana jer se već ranije razmatrala kao moguća lokacija utisne bušotine u slučaju pokretanja proizvodnje na bušotini Križevčanka -1. Četvrta je lokacija izmještena iz samih Križevaca u Križevački Lemeš jer je pregledom dokumentacije utvrđeno da je i tamo 1960-ih bila izrađena jedna bušotina, Križevci-1 (Ki-1). Ona se pokazala negativnom na ugljikovodike, no formacije su bile u potpunosti zasićene vodom. Točne koordinate bušotine u postojećoj dokumentaciji nisu pronađene, dostupna je tek skica lošije kvalitete na karti mjerila 1:50.000 (Slika 5a). Na temelju tog podatka i razgovora sa starijim mještanima ovog naselja, sonda je postavljena u blizini pretpostavljene lokacije (Slika 5b). Točnu lokaciju nije bilo moguće utvrditi jer je bušotina, nakon što se pokazala neperspektivnom za pronalaženje ugljikovodika, ubrzo tehnički napuštena (likvidirana).



Slika 5. a) Lokacija istražne bušotine Ki-1 na isječku topografske karte u elaboratu Jurkovića (1962); **b)** Lokacija mjerne točke u Križevačkom Lemešu (satelitska snimka u pozadini preuzeta s Google Earth Pro)

Oprema je postavljena tijekom dana te ostavljena da vrši akviziciju podataka do sljedećeg dana, zato što je tijekom noći antropogeni EM šum redovito znatno niži. Kao glavne faktore šuma važno je istaknuti strujne vodove i cestovne prometnice. Povoljna je okolnost što se radilo o niskonaponskoj mreži i prometnicama niskog opterećenja.

2.6. Sudjelovanje studenata

Investitor je u sklopu provedbe tematske aktivnosti A.T2.5.1, u sklopu koje je angažiran Hrvatski geološki institut, predvidio da će se provedba novih geofizičkih istraživanja koristiti i kao prilika za edukaciju studenata o toj temi. Stoga je uspostavljen kontakt s Geotehničkim fakultetom Sveučilišta u Zagrebu, te su profesori dr. sc. Hrvoje Meaški i dr. sc. Mario Gazdek organizirali dolazak grupe studenata koji su slušali kolegije o geofizičkim istraživanjima kako bismo ih informirali o metodi magnetotelurike, te im pokazali kako u praksi izgleda provedba jednog takvog istraživanja. Održana je kratka prezentacija metode koja će se provoditi, te su prve dvije točke postavljene zajedno sa studentima (DHMZ i VGU) (**Slika 6**).



Slika 6. Prezentacija instrumentarija i magnetotelurske metode na lokaciji DHMZ (foto: Lucija Gudić)

3. ZAKLJUČAK


Grad Križevci je angažirao Hrvatski geološki institut kao vanjskog eksperta u sklopu provedbe projekta HealingPlaces radi provedbe neinvazivnih geofizičkih istraživanja metodom magnetotelurike te izrade višedimenzionalne studije o mogućnostima održivog korištenja geotermalnog resursa.

Iako je istraživanje bilo predviđeno samo na konkretnoj parceli na kojoj se nalazi bušotina Križevčanka-1, u kojoj je identificiran geotermalni vodonosnik, zbog njene malene površine je u dogovoru s investitorom područje istraživanja prošireno te su izvedene četiri magnetotelurske sonde uz korištenje udaljene referentne točke na udaljenosti od 20-ak kilometara, što će biti važno u fazi obrade podataka. Na ovaj način moguće je utvrditi lateralno prostiranje vodonosnika, što je bitan podatak za planiranje lokacije utisne i/ili novih proizvodnih bušotina kada započne korištenje.

Također, u skladu s planiranim aktivnostima projekta HealingPlaces, u istraživanje su putem terenske nastave na jedan dan uključeni i studenti.

Obrada prikupljenih podataka, rezultati i njihova interpretacija u kontekstu ostalih relevantnih postojećih podataka bit će prezentirani u višedimenzionalnoj studiji u sklopu druge faze ove aktivnosti.

U Zagrebu, 28. rujna 2020.



Dr. sc. Staša Borović, dipl. ing. geol.

LITERATURA

Cagniard, L. (1953): Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting, Geophysics, 18, 605-635.

Jurković, A. (1962): Geološki izvještaj za duboku istražnu bušotinu Križevci-1 (Ki-1), Naftaplin, Zagreb, 7 p.

Naidu, G. D. (2012): Deep crustal structure of the Son-Narmada-Tapti lineament, Central India, Springer – Verlag, Berlin Heidelberg, 98 p.

Šumanovac, F. (2007): Geofizička istraživanja podzemnih voda, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 244 p.

Tikhonov, A. N. (1950): On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's crust, Doklady, 73, 295-297.

Unsworth, M. (2013): Geophysics 424: Electromagnetic and potential field methods (skripta), University of Alberta, <http://www.ualberta.ca/~unsworth/UA-classes/424/notes424-2013.html> (pristup 12. 11. 2013.)