

PHASE II - MULTIDIMENSIONAL STUDY - WITH ENGLISH SUMMARY

Circular way of using the existing geothermal water resource in order to avoid depletion of resources

Deliverable D.T2.5.1
Croatia (PP6)

Final version
11 2020





ENGLISH SUMMARY

Today's global economic system is still largely dependent on fossil fuels: oil, natural gas and coal. In addition to serving as the fuel for most machines and power plants and means of transport, it also represents (for now) an irreplaceable raw material in producing a whole range of products without which the modern world would be unthinkable (most synthetic polymers and copolymers - plastics, rubber, resins, insulating materials, dyes and fabrics, then refrigerants, solvents, absorbents, detergents). But, the time of low or moderate fossil fuel prices is coming to an end. One reason is certainly the fact that the most accessible deposits are to a greater or lesser extent exhausted and new ones are constantly sought. Those are mostly in remote areas of the Earth, far from the centres of population and production and in inhospitable natural conditions, where both exploration and exploitation are much more expensive and risky than has been the case in the past (offshore platforms, the continental shelf, the Arctic, oil shale and tar sands). The very exploitation and transport of fossil fuels often cause accidents with large-scale pollution (e.g. Niger Delta, Ecuador, sinking of the Exxon tanker Valdez) or devastation of complete ecosystems in large areas (e.g. oil explosion the Deepwater Horizon platform in the Gulf of Mexico or the exploitation of oil shale in Alberta, Canada). Another reason, whose importance is growing, is the growing awareness of the need to protect the environment.

There are more and more data indicating that greenhouse gases, emitted into the atmosphere by burning fossil fuels, are one of the main causes of global warming which, among other things, causes climate change, sea level rise and land cover (IPCC, 2014a, b,).

Because of that, it is expected that in the near future, greenhouse gas emissions will be targeted by higher and higher taxes (European Commission, 2019).

Likewise, acid oxides formed by combustion in combined with precipitation cause acid rain which particularly damages the plant cover, which, would otherwise absorb part of the greenhouse gases. Rising fossil fuel prices and growing environmental awareness have spurred it humanity to exploit and explore new, renewable and sustainable energy sources.

The largest single source of energy used on Earth is certainly solar energy (in form of electromagnetic radiation). It is stored in fossil fuels in the form hydrocarbons and by insolation, new quantities are constantly arriving on Earth. Solar energy is also the driver of differentiated warming of the Earth's atmosphere and oceans, hence the main cause of planetary circulation of air and water masses (allows the use of wind and waves as energy sources). The Sun (along with the Moon) causes tides by its gravity, which can also be a source of energy. **The only source of energy on Earth that comes from the Earth itself is geothermal energy.**



This energy originates from the phase of formation of the Earth in collision with other bodies and from heat energy released during the radioactive decay of individual isotopes (^{40}K , ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th) which can be found in the core, mantle and bark. In the center of the Earth, the temperature is around 6000 K, which is higher than on the surface of the Sun. This heat is constantly transferred from the warmer interior to the colder surface of the Earth, in the mantle mostly by convection (fluid flow) and in the crust by conduction (conducting heat through solid matter). The total solar energy that the Earth's atmosphere, hydrosphere and lithosphere absorb through solar radiation (insolation) is approximately 3.85 YJ ($3.85 \cdot 10^{24}$ J) per year. In that way, in an hour, the Earth receives more energy than is spent on it in total per year.

An additional 3 ZJ ($3 \cdot 10^{21}$ J) is incorporated into the biomass annually by photosynthesis. Amount of the solar energy that comes to the Earth's surface is so great, that in one year the Earth receives energy that is twice as much as the energy that can be released in total by burning all the existing oil, gas, coal and uranium reserves that have ever existed on the planet. Solar energy can be used to varying degrees on each part of the planet, in dependencies, primarily, on latitude.

Geothermal heat flux per unit area is approximately ten thousand times less than insolation, however, the energy of the Earth is always available (it does not depend on the time of day either meteorological conditions), which, together with total stocks, makes it truly the **most reliable source**, especially to cover the base load.

In accordance with the described global trends in the use of energy from renewable and non-renewable sources, it is certainly interesting to explore the potential for using renewables sources in Croatia. One of the available and promising renewable energy sources in Croatia is geothermal energy. The City of Križevci has, on several occasions and different funding mechanisms, made efforts to bring geothermal water to use, whose existence in the well Križevčanka-1 in the area of Ratarna in the city itself, proved during research in the 1980s, in order to have long-term sustainable use of it.

In this study, which was prepared as part of the HealingPlaces project (funded by Interreg Central Europe programme), as Pilot action 5, the results of the geophysical research conducted in the first phase of research (Borović, 2020) will be analysed and also options for long-term sustainable and environmentally sound use of geothermal water in Križevci will be considered. The project envisaged research on some of the newer and non-invasive method of geophysical research to contribute to the knowledge of the available geothermal resource, and analysis of the environmental aspect of the circular use of resources, in order to enter them in the documentation on the possibilities of closing the geothermal "loop". Geophysical research was conducted during September 2020 and its interpretation is here presented. Also, taking into account other existing documentation, environmentally friendly way to use this resource will be proposed.



The objectives of this deliverable were to conduct new non-invasive geophysical surveys by the method of magnetotellurics in the area of the City of Križevci in order to gather new knowledge on the structure of the underworld and prepare a multidimensional study that includes interpretation data from geophysical surveys, as well as studying of sustainable modalities use of the Križevci geothermal aquifer, both in terms of maintaining good quantitative state of aquifers, as well as in terms of environmental protection.

In this study, the treatment and the interpretation of the collected data is presented, and they are placed in the context of existing research with different aspects of the geothermal resource identified in Križevci (geological, hydrogeological, hydrodynamic, hydrochemical, balneological, thermodynamic and techno-economic). From the general geological structure of the Pannonian Basin System and its part, the Drava depression, potential geothermal aquifers have been identified. Based on magnetotelluric research Croatian Geological Survey has gathered insights into the distribution of electrical resistances in the subsoil which indicates the presence of certain lithologies and / or fluid saturation of the medium.

After digitization and re-analysis of data on experimental pumping from 1989 and 2008, a series of numerical simulations were conducted in order to determine the most likely behaviour of aquifers over the next ten years in the case of pumping and injection pumping. Possible ways of using geothermal water are considered, as well as environmental aspects of use geothermal waters in the general sense and in the case of a specific well Križevčanka-1.

New magnetotelluric research has led to interesting insights on several the location. Unfortunately, the data of the probe near the best explored object, the well Kža-1, due to significant EM noise were not suitable for transferring knowledge about resistance values to other locations. On the other hand, the recording is of excellent quality at the location of the other (technically abandoned) wells, Ki-1, and served well to establish correlations between lithology and electrical resistance in the underground. The most interesting new insight is related with the location of a possible future well, KžaGT-2 (according to Jankov and Bilić, 2020). Magnetotelluric research has led to the same insights that colleagues derived from existing research, provided what is assumed by magnetotelluric research: the large thickness of the aquifer at that location and it can be stated that it would be favourable to make a **future well**.

Numerical simulations indicated that the use of a geothermal aquifer would be more sustainable in quantitative terms, if used in a way that there is both **production** and geothermal water **injection** (simulations show smaller reductions in the scenario with by injecting geothermal water). Also, it is important to note that simulations of long-term scenarios (ten years) reach a quasi-stationary state after approximately 6 months of pumping, for quantities of 2 l/s, but also for 5 l/s.



That means it would be possible to run trial production and in the meantime seek funding for the construction of another well which would be equipped as an injection well (closing the loop).

Geothermal resource temperatures impose direct use of the heat as the most logical solution. To make it as cost-effective as possible, of course, it is advisable to find the right number of users who would use the heat of produced geothermal water in *cascade mode* (where they would be in order in system in accordance with lowering resource temperatures). Because of the fact that bringing geothermal water to the surface to have energy use of it is financially demanding operation, once it is brought to the surface, the aim is to use its energetic potential to the fullest extent possible, as described in Chapter six of this Study.

One of the important aspects of using geothermal water in any case, and in particular when it comes to urbanized space as in this Križevci case, is the **impact on the environment and surroundings**. Because it is a highly mineralized water (and it is possible that at first, due to a limited number of users, it would not be sufficiently cooled in the system of use), from the aspect of hydrogeological situation or reservoir situations, but also from an environmental point of view, it would be most favourable to explore the possibilities of making an injection well.

In the meantime, there is a chance that for some time (up to a maximum of five years) subcooled geothermal water could be discharged into a natural recipient. Such a situation is undesirable in the long run and therefore in neither case it is recommended.

Besides the impact on the physical environment, it is certainly necessary to include into the consideration the social surrounding in which the exploration and use of the geothermal resource takes place. In order to avoid any short-term and/or in the long run, misunderstandings and disagreements with the local community, timely and scientifically based information to the interested public is recommended about all implemented and planned works through a wide range of communication channels. Following the September's 2020 magnetotellurics research, there are more activities that could be carried out for the sake of better future resource development. First of all, it is recommended to start as soon as possible, with research for locating and drilling the injection well. From research, except magnetotellurics, it is recommended to use 3D seismic reflection research in that narrower space in more detail at the potential location of the injection well. Combination of these two geophysical methods would represent appropriate preconditions for selecting the correct one injection well locations. Also, in case of continuation of magnetotelluric research, a longer data acquisition time is recommended; up to three nights per point, in order to have sufficient data on lower frequencies (which provide information on higher depths), since a significant part of the data in September 2020's research had to be discarded at the processing stage due to the presence of electromagnetic noise which is inherent in urban areas.



Numerical simulations in this Study proved to be a very useful tool for the question of determining the movement of the groundwater level in an aquifer during abstraction with and without injecting the subcooled fluid back into the aquifer.

However, in the implementation of future more detailed simulations, in addition to fluid flow modeling, there is also a need to model heat transfer, especially if the construction of an injection well is considered, because it is clear that the injection of subcooled water can lead to a decrease in temperature of thermal water in the aquifer (even in the pumping well). Also, although the program that was used allows modelling in three-dimensional space, this could not be carried out in this Study for Križevci area due to lack numerous required input data. In order to do it in the future, there are necessary prerequisites: (1) detailed 3D geological reconstruction of the area; (2) hydraulic and thermal parameterization of all members of the structural assembly and (3) knowledge of the boundary conditions of the system. Since there is no such information in the existing Križevci documentation, the result of every more complex modelling, with existing data, would be more of a mathematical construct than a representation of the actual situation underground.

As can be seen from the extensive research and documentation already conducted, and the desire to use the geothermal resource, as well as for its thorough research, City of Križevci has significant experience in project management, attracting project funding and communication with the local community. Thanks to these comparative advantages, Croatian Geological Survey is of the opinion that the geothermal water resource in Križevci will be put into the function of sustainable use in the foreseeable future, and that the necessary research work for further sustainable development of the geothermal resource in Križevci will continue.

D.T2.5.1.

VIŠEDIMENZIONALNA STUDIJA - FAZA II - KRIŽEVCI

**”KRUŽNI NAČIN” KORIŠTENJA POSTOJEĆEG
RESURSA GEOTERMALNE VODE**

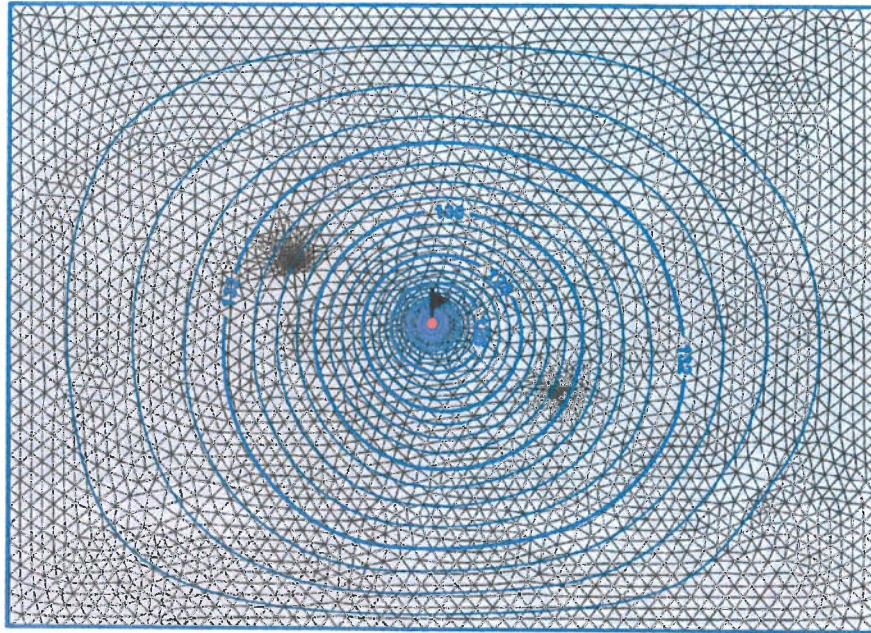
**Finalna verzija
11.2020**

Prva aktivnost - faza II pilot akcije - D.T2.5.1.:

Višedimenzionalna (okolišni aspekt i interpretacija podataka iz geofizičkog ispitivanja) studija o “kružnom načinu” korištenja postojećeg resursa geotermalne vode u Križevcima, koji osigurava održivu uporabu i očuvanje prirodnih svojstava vodonosnika (poput tlaka) te sprječava iscrpljivanje podzemnih voda

IZRADIO: HRVATSKI GEOLOŠKI INSTITUT

NARUČITELJ: GRAD KRIŽEVCI



Višedimenzionalna studija o kružnom načinu korištenja postojećeg resursa geotermalne vode u Križevcima

Broj: 56/20

Predstojnik Zavoda za hidrogeologiju i inženjersku geologiju



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

Ravnatelj Hrvatskog geološkog instituta

HRVATSKI GEOLOŠKI INSTITUT
1 ZAGREB - Bečkovoć 1



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

30. studenog 2020.

PROJEKTNI ZADATAK: **Višedimenzionalna studija o kružnom načinu korištenja postojećeg resursa geotermalne vode u Križevcima**

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.
Nedeljko Stanić, tehničar**

AUTORI IZVJEŠĆA: **dr. sc. Staša Borović, dipl. ing. geol.
dr. sc. Marco Pola, dipl. ing. geol.**

Na naslovnoj stranici: Izvadak iz numeričke simulacije

SADRŽAJ:

1.	UVOD	1
2.	PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	4
3.	GEOLOŠKA GRAĐA PODRUČJA GRADA KRIŽEVACA I OKOLICE	9
3.1.	REGIONALNE GEOLOŠKE ZNAČAJKE	9
3.2.	GEOLOŠKA GRAĐA ISTRAŽIVANOG PODRUČJA	10
3.3.	POTENCIJALNI I DOKAZANI GEOTERMALNI VODONOSNICI	12
4.	REZULTATI MAGNETOTELURSKIH ISTRAŽIVANJA	16
4.1.	OBRADA PODATAKA	16
4.2.	INVERZIJE PODATAKA	19
4.3.	INTERPRETACIJA PODATAKA	23
5.	NUMERIČKO MODELIRANJE	27
5.1.	KONSTRUKCIJA MODELA I OPIS SIMULACIJA	27
5.2.	REZULTATI NUMERIČKIH SIMULACIJA	31
5.2.1.	Simulacije pokusnog crpljenja iz 2008. godine	31
5.2.2.	Simulacije pokusnog crpljenja iz 1989. godine	36
5.2.3.	Prediktivne simulacije za desetogodišnji period	38
6.	MOGUĆNOSTI KORIŠTENJA ENERGIJE GEOTERMALNIH VODA	42
6.1.	IZRAVNO KORIŠTENJE TOPLINE	43
6.2.	PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE	49
6.3.	KORISTI ZA LOKALNU SREDINU	52
7.	ODRŽIVO KORIŠTENJE GEOTERMALNIH VODONOSNIKA	55
7.1.	OPĆE POSTAVKE ODRŽIVOGA KORIŠTENJA	55

7.2.	ODRŽIVO KORIŠTENJE KRIŽEVAČKOGA GEOTERMALNOG VODONOSNIKA	58
8.	ZAKLJUČCI I PREPORUKE	63
	<i>LITERATURA</i>	<i>67</i>
	PRILOZI 1-4	

1. UVOD

Današnji je globalni ekonomski sustav još uvijek najvećim dijelom ovisan o fosilnim gorivima: nafti, zemnom plinu i ugljenu. Osim što služe kao pogonsko gorivo većine strojeva i elektrana te prijevoznih sredstava, predstavljaju i (za sad) nezamjenjivu sirovinu u proizvodnji cijelog niza proizvoda bez kojih bi suvremeni svijet bio nezamisliv (većine sintetičkih polimera i kopolimera - plastika, guma, smola, izolacijskih materijala, bojila i tkanina, zatim rashladnih sredstava, otapala, apsorpcijskih sredstava, deterdženata). No, vremenu niskih ili umjerenih cijena fosilnih goriva nazire se kraj.

Jedan je razlog svakako činjenica što su najpristupačnija ležišta u manjoj ili većoj mjeri iscrpljena te se konstantno traže nova, koja se, međutim, nalaze u sve zabačenijim područjima Zemlje, daleko od centara naseljenosti i proizvodnje te u negostoljubivim prirodnim uvjetima, gdje su i istraživanje i eksploatacija mnogo skuplji i rizičniji nego što je bio slučaj u prošlosti (*offshore* platforme, kontinentalni šelf, Arktik, naftni škriljavci i katranski pijesci). I sama eksploatacija i transport fosilnih goriva često uzrokuju havarije velikih razmjera, primjerice, onečišćenja (delta Nigera, Ekvador, potonuće tankera Exxon Valdez) ili devastacije kompletnih ekosustava na velikim područjima (eksplozija naftne platforme Deepwater Horizon u Meksičkom zaljevu ili eksploatacija naftnih škriljavaca u Alberti, Kanada).

Drugi razlog, čiji značaj raste, je porast svijesti o potrebi zaštite okoliša. Sve je više podataka koji ukazuju da su staklenički plinovi, emitirani u atmosferu spaljivanjem fosilnih goriva, jedan od glavnih uzroka globalnog zagrijavanja koje, između ostalog, uzrokuje klimatske promjene, porast razine mora i kopnjenje ledenih pokrova (IPCC, 2014a, b,). Zato je očekivano da će u bliskoj budućnosti emisije stakleničkih plinova biti na meti sve viših poreza (Europska komisija, 2019). Isto tako, kiseli oksidi nastali sagorijevanjem u kombinaciji s oborinama uzrokuju kisele kiše, što osobito oštećuje biljni pokrov, koji bi inače apsorbirao dio stakleničkih plinova.

Sve više cijene fosilnih goriva i sve veća okolišna osviještenost potaknule su čovječanstvo na iskorištavanje i istraživanje novih, obnovljivih i održivih izvora energije.

Najveći pojedinačni izvor energije koja se koristi na Zemlji svakako je Sunčeva energija (u obliku elektromagnetskog zračenja). Ona je pohranjena u fosilnim gorivima u obliku ugljikovodika, a insolacijom na Zemlju stalno pristižu nove količine. Sunčeva je energija i pokretač diferenciranog zagrijavanja Zemljine atmosfere i oceana, dakle glavni uzročnik planetarne cirkulacije zračnih i vodenih masa (omogućuje korištenje vjetra i valova kao izvora energije). Sunce (zajedno s Mjesecom) svojom gravitacijom uzrokuje morske mijene, koje također mogu biti izvor energije.

Jedini izvor energije na Zemlji koji potječe od nje same je geotermalna energija.

Ta energija potječe iz faze formiranja Zemlje u koliziji s drugim tijelima te od toplinske energije koja se oslobađa prilikom radioaktivnog raspada pojedinih izotopa (^{40}K , ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th) koji se mogu naći u jezgri, plaštu i kori. U središtu Zemlje temperatura iznosi oko 6000 K, što je više nego na površini Sunca. Ta se toplina stalno prenosi iz toplije unutrašnjosti prema hladnijoj površini Zemlje, u plaštu većinom konvekcijom (strujanjem fluida), a u kori kondukcijom (vođenjem topline kroz krutu materiju).

Ukupna solarna energija koju putem Sunčevog zračenja (insolacije) apsorbiraju Zemljina atmosfera, hidrosfera i litosfera iznosi otprilike 3,85 YJ ($3,85 \cdot 10^{24}$ J) godišnje. Na taj način u sat vremena Zemlja primi više energije nego što se na njoj ukupno potroši godišnje. Dodatnih 3 ZJ ($3 \cdot 10^{21}$ J) se godišnje fotosintezom ugradi u biomasu. Količina solarne energije koja dolazi na površinu Zemlje je toliko velika da u godini dana Zemlja primi energiju koja je dvostruko veća od energije koja se ukupno može osloboditi sagorijevanjem svih zaliha nafte, plina i ugljena te urana koje postoje i koje su ikad postojale na planetu. Solarna se energija može u različitoj mjeri koristiti na svakom dijelu planeta, u zavisnosti, prvenstveno, od geografske širine.

Geotermalni toplinski tok po jedinici površine je otprilike deset tisuća puta manji nego insolacija, međutim, energija Zemlje je uvijek dostupna (ne ovisi o dobu dana ni meteorološkim uvjetima), što je, zajedno s ukupnim zalihama, čini zaista najpouzdanijim izvorom, osobito za pokrivanje osnovnog opterećenja.

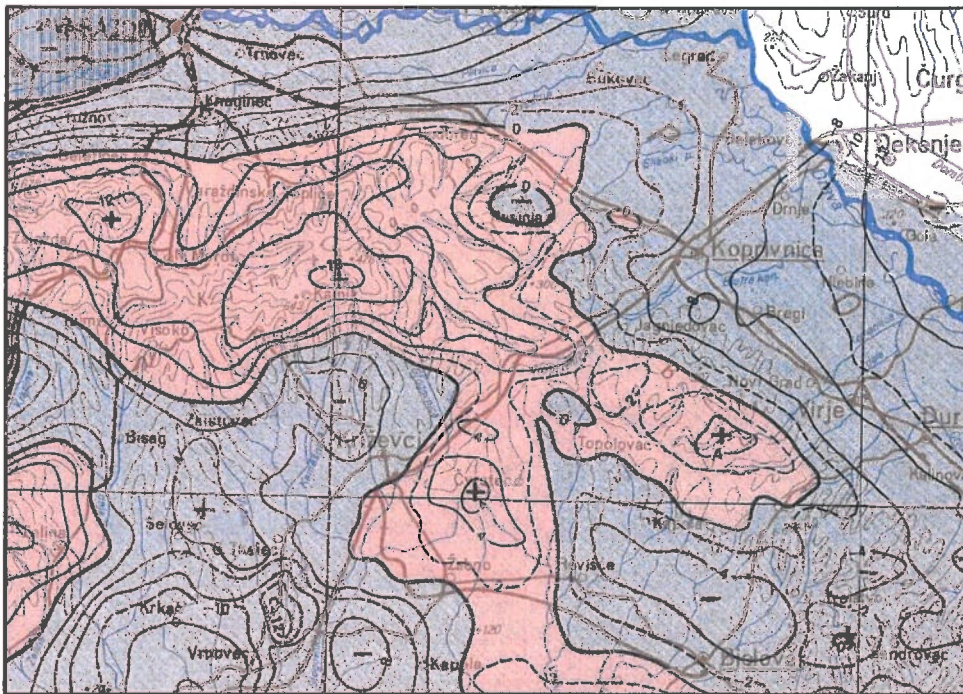
U skladu s opisanim globalnim tendencijama korištenja energije iz obnovljivih i neobnovljivih izvora, svakako je zanimljivo istražiti potencijal za korištenje obnovljivih izvora u našoj državi. Jedan od dostupnih i perspektivnih obnovljivih izvora energije u

Hrvatskoj je geotermalna energija. Grad Križevci (Naručitelj) je u više navrata i različitim mehanizmima financiranja ulagao napore kako bi se geotermalna voda, čije je postojanje u bušotini Križevčanka-1 u predjelu Ratarna u samom gradu dokazano još tijekom istraživanja 1980-ih, privela dugoročno održivom korištenju

U ovoj studiji, koja je izrađena u sklopu projekta HealingPlaces (financiranog iz programa Interreg Srednja Europa), će se stoga, na zahtjev Naručitelja, analizirati rezultati geofizičkih istraživanja provedenih u prvoj fazi istraživanja (Borović, 2020), te će se razmotriti opcije za dugoročno održivo i okolišno prihvatljivo korištenje geotermalnih voda u Križevcima. Projektom je bilo predviđeno istraživanje nekom od neinvazivnih metoda geofizičkog istraživanja kako bi se doprinijelo poznavanju raspoloživog geotermalnog resursa, te analiza okolišnog aspekta kružnog načina korištenja resursa, kako bi se isti unijeli u dokumentaciju o mogućnostima zatvaranje geotermalne „petlje“. Geofizička su istraživanja provedena tijekom rujna 2020. godine te će ovdje biti prikazana njihova interpretacija te će, uzimajući u obzir ostalu postojeću dokumentaciju, biti predložen okolišno prihvatljiv način korištenja ovog resursa.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Istraživanja vezana uz geotermalni potencijal križevačkog područja započinju 1960-ih godina. Dakako, uobičajeno za navedeno vrijeme, radilo se o proučavanju dubinske geološke građe sa ciljem pronalaska novih ležišta ugljikovodika. Između ostaloga, u sklopu tih istraživanja provedena su gravimetrijska snimanja cijelog prostora bivše Jugoslavije, pa tako i današnjeg teritorija Republike Hrvatske. Ti su podatci kasnije i objavljeni kao Gravimetrijska karta SFRJ – Bouguerove anomalije, mjerila 1:500.000, List Zagreb (Geofizika i Zavod za geološka i geofizička istraživanja, 1972), čiji je isječak u okolici Križevaca prikazan na **Slici 1**, kao i njezin tumač (Bilibajkić et al., 1979).



Slika 1. Isječak Gravimetrijske karte SFRJ mjerila 1:500.000, list Zagreb (Geofizika i Zavod za geološka i geofizička istraživanja, 1972), koji prikazuje prostor Grada Križevaca i okolice

Tijekom ovih istraživanja je uočena prostrana pozitivna gravimetrijska anomalija istočno od Križevaca čije je pružanje gotovo okomito na smjer pružanja Bilogore (SZ-II). Ta je anomalija definirana kao „Struktura Križevci“. Zbog toga je na tjemenu dijelu ove pozitivne gravimetrijske anomalije pozicionirana istražna bušotina Križevci-1 (Ki-1) koja se nalazi u Križevačkom Lemešu (Vugrinec, 1962). Pretpostavljalo se da bi bušotinom mogle biti zahvaćene ekvivalentne produktivne serije kao u strukturi Jagnjedovac, koja se nastavlja na strukturu Križevci u smjeru sjeveroistoka. Bušotini je bila predviđena konačna dubina od 1500 m, s time da se na 1450 m očekivao ulazak iz tercijarnih bazenskih sedimenata u mezozojsku ili paleozojsku podlogu tercijara. Međutim, istražno je bušenje polučilo nešto drugačiji rezultat: na dubini od 780,7 m došlo je do propadanja opreme te je u sedam minuta izgubljeno 50 m³ isplake u kavernu. Od toga trenutka nije više bilo moguće postići cirkulaciju isplake te, samim time, ni uzimati fragmente stijene iz isplake. Uspjela se jedino pridobiti jezgra na dubini od 819,7 do 820,0 m. Radilo se o vapnencu svijetlosive do bijele boje kojemu je definirana mezozojska starost (Jurković, 1962). Budući da u bušotini nisu utvrđeni tragovi ugljikovodika ona je, kao negativna, tehnički napuštena/likvidirana ugradnjom cementnog čepa.

Na području samoga Grada Križevaca istraživanja su se nastavila 1985. godine, ovaj put izravno sa ciljem zahvaćanja geotermalne vode. Zbog iskustva sa starijom bušotinom Ki-1, očekivan je ulazak u mezozojske naslage (trijasa ili krede) na dubinama između 800 i 1000 m te je i temperatura vode, u skladu s time, procijenjena na 48-60 °C (Lucić, 1985). U stvarnosti je na navedenim dubinama nabušen miocen pa se nastavilo bušiti. Tek se na dubini od 1404 m ušlo u paleozojske naslage (crvenosmeđi pijesci, škriljavi brečokonglomerati s klastima metamorfnih stijena, kvarca, različitih škriljavaca i gnajsa). Takve su naslage bile prisutne sve do dna bušotine (1469,1 m). Zaključak autora nakon provedenih istraživanja je da geotermalni vodonosnik čine vapnenci, pješčenjaci i breče badena, pijesci i pješčenjaci donjeg miocena te pijesci paleozoika. Budući da je cilj izrade ove bušotine bilo zahvaćanje termalne vode, provedeno je i pokusno crpljenje količinom od 3,2 l/s u trajanju od šest dana. Razina je podzemne vode bila u stalnome opadanju te je na kraju crpljenja pala na dubinu od 33,87 m od razine ušća bušotine, a temperatura vode je iznosila 68 °C (Vojić, 1986).

Nakon izrade ove bušotine ona ostaje kao neiskorišteni potencijal duže vrijeme. Prema dokumentaciji dobivenoj od Naručitelja, radovi sa ciljem iskorištavanja ovog resursa nastavljeni su tek 1989. godine pokusnim crpljenjem nad kojim je hidrogeološki nadzor obavljao Institut za geološka istraživanja (Šarin, 1990). Tim je pokusnim crpljenjem ustanovljena statička razina podzemne vode na 2,3 m od ušća bušotine, potopna crpka spuštена je na dubinu od 49,5 m, dok se nakon puna dva mjeseca crpljenja količinom od 2 l/s razina spustila na 28,9 m (odnosno, sniženje je iznosilo 26,6 m). Autor je proračunao da bi tijekom deset godina crpljenja količinom od 2 l/s razina pala na 32,0 m (odnosno, sniženje bi bilo 29,7 m).

Budući da ova istraživanja nisu dala odgovor na pitanje kolike bi bile moguće količine crpljenja pri dugotrajnoj proizvodnji, INA d.d. provodi nova proizvodna ispitivanja i hidrodinamička mjerenja na bušotini Kža-1 od 22. listopada do 21. studenog 2008. godine, prema „Pojednostavljenom rudarskom projektu osvajanja i ispitivanja bušotine Križevčanka-1“ (Škrlec, 2009). Bušotina je ponovno osvojena te je centrifugalna crpka ugrađena na dubini od 76,4 m. Provedeno je pokusno crpljenje promjenjivim količinama, od 2,0 do 4,5 l/s, tijekom deset dana, uz kontinuirano praćenje tlaka i temperature na dubini od 1.053 m. Proračun autora navodi da bi prema svim dosadašnjim spoznajama bilo moguće više godina proizvoditi između 3,7 i 4,6 l/s u probnom radu, a u slučaju da se zabilježi kontinuirano sniženje razine podzemne vode, bilo bi poželjno izraditi utisnu bušotinu. Valja primijetiti da u ovom izračunu za crpnu količinu od 2 l/s sniženje iznosi oko 23 m (22,7 nakon 150 minuta crpljenja), dok je ranije opisano ispitivanje (Šarin, 1990) pokazalo da se i dugotrajnijim crpljenjem 2 l/s razina u stvarnosti snizila za 26,6 m. Iz toga je vidljivo da dvomjesečno pokusno crpljenje i šestodnevna hidrodinamička mjerenja daju različite rezultate pa bi količine vode koje se mogu koristiti na dugoročno održivi način trebalo pažljivo razmotriti. Osim analize dinamike ovog ležišta, načinjene su i kemijske, izotopne (tricij, ^3H) i balneološke analize, ispitivanje plinskog faktora (*engl. Gas Water Ratio, GWR*), sastav plinova plinskom kromatografijom te je ispitana korozivnost vode četirima različitim metodama.

Istih su godina (tijekom 2008. i 2009.) izrađene još dvije studije po pitanju istraživanja i mogućnosti korištenja geotermalne vode, od strane ugledne islandske konzultantske tvrtke s velikim iskustvom u projektiranju korištenja geotermalnih voda i energije (Efla Orkuverk

ltd., članice specijalizirane za elektrane u sklopu EFLA Consulting Engineers Ltd.). Radi se o „Proceduri preliminarnog ispitivanja geotermalnog izvora u Gradu Križevcima“ (EFLA, 2009a) te o „Implementaciji mjera energetske učinkovitosti korištenjem sustava daljinskog grijanja na geotermalnu energiju u Gradu Križevcima“ (EFLA, 2009b). U srpnju 2009. godine konzultanti EFLA-e (EFLA, 2009a) preporučuju znatno drugačije dizajnirano pokusno crpljenje i hidrodinamička mjerenja nego ona koja su provedena krajem 2008. godine (Škrlec, 2009), uključujući spuštanje potopne crpke na 200 m te crpljenje u koracima s količinama od 2, 4, 6, 8, 10 te, po mogućnosti, i 15 l/s tijekom tri do četiri tjedna. Također, predviđeno je češće uzorkovanje vode i plinova za analize. Pritom konzultanti u završnom dijelu konstatiraju da je provedba ovakvog testiranja „apsolutno nužna kako bi se pripremila dobra osnova za korištenje geotermalne energije“. U izvješću EFLA-e (2009b) analizira se mogućnost korištenja geotermalne energije u Gradu Križevcima za različite objekte, pojedinačno ili za više njih istovremeno.

Do kraja 2009. godine izrađene je i studija „Mogućnosti korištenja geotermalne energije u Gradu Križevcima – konceptijsko rješenje“ od strane tvrtki HEP ESCO d.o. o. i FACTUS d. o. o. (Lučić i Bakale, 2009). U ovom je dokumentu, osim rekapitulacije prethodne dokumentacije, prikazan i pregled regulatornog okvira vezanog uz korištenje geotermalne energije, koji je, nažalost, iz današnje perspektive zastario zbog brojnih zakonskih izmjena u razdoblju od jednog desetljeća.

Maretić (2010) također predstavlja rekapitulaciju opsežne postojeće dokumentacije te navodi da nedostaju „*Geološki model; Hidrodinamički model; Procjena potencijala i rezervi*“. Također, ponavlja da voda zbog svojeg kemijskog sastava nije prikladna za ispuštanje u okoliš te se „*sugerira izgradnja utisne bušotine*“.

Energetski institut Hrvoje Požar je za Naručitelja 2012. godine izradio i „Razvojnu studiju i studiju izvodljivosti grijanja javnih objekata geotermalnom energijom u Gradu Križevcima“ (Karan et al., 2012). Studija prikazuje i ekonomske tokove i analizu osjetljivosti na tržišni rizik.

Regionalna energetska agencija Sjever i Regionalna energetska agencija sjeverozapadne Hrvatske su 2014. godine izradile još jednu energetske-ekonomsku studiju koja se bavi

ekonomskim modeliranjem niskotemperaturne geotermalne energije studija slučajeve Križevaca i Molvi (REGEA i REA-SJEVER, 2014).

Sljedeće je godine u sklopu projekta GeoSEE, financiranog iz EU programa transnacionalne suradnje jugoistočne Europe izrađena „Termodinamička analiza niskotemperaturnih izvora geotermalne energije u Križevcima i Molvama“ (Filipan i Dejanović, 2015). Radi se o studiji mogućnosti proizvodnje električne struje u binarnim geotermalnim elektranama korištenjem široko prihvaćenog ORC procesa ili, eventualno, slabije zastupljenog Kalina procesa. Očekivano, s obzirom na dokazanu temperaturu geotermalne vode od 68 °C, proizvodnja se električne struje ne smatra ekonomski opravdanom u slučaju Križevaca te se sugerira izravno korištenje geotermalne topline kao energetske i ekonomski povoljnije rješenje.

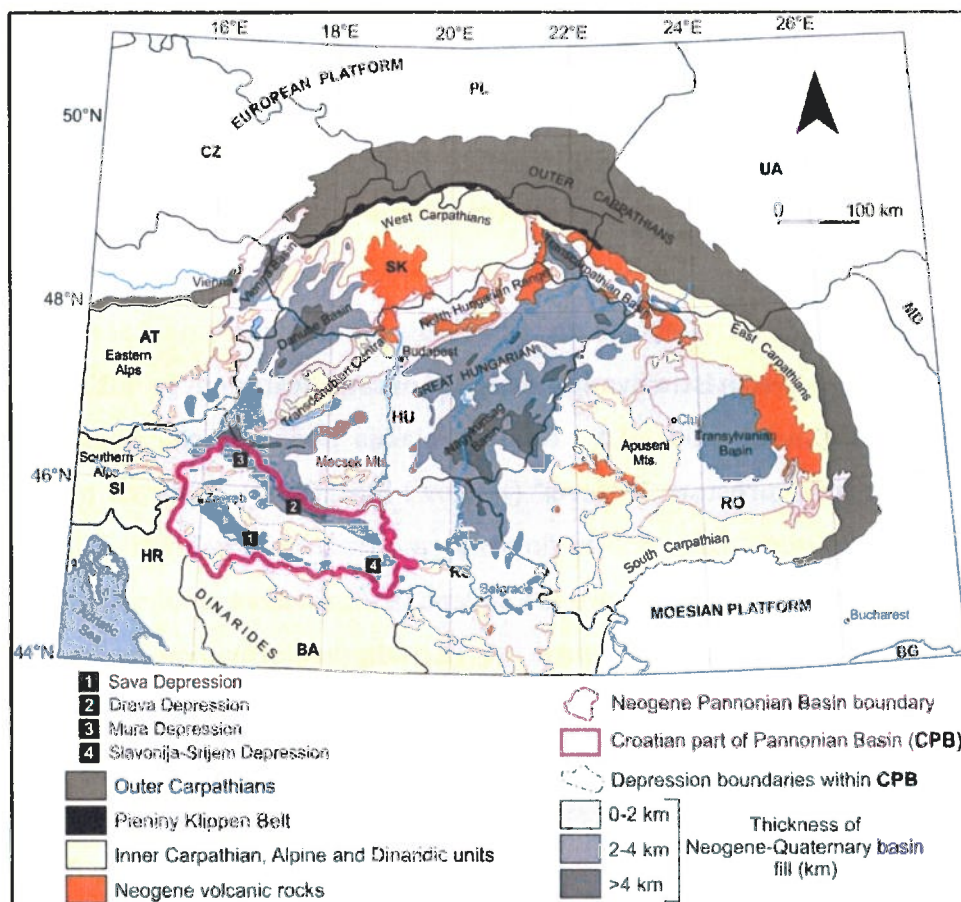
Rudarsko – geološka studija Koprivničko – križevačke županije u zaključcima i preporukama vezanim uz geotermalnu energiju navodi da je ukupni geološki potencijal energetske mineralne sirovine geotermalne vode utvrđen na gotovo cijelom prostoru županije te je, kao takav, u cijelosti interesantan za istraživanje i korištenje (Kruk et al., 2014).

U kolovozu 2020. izrađena je za naručitelja Komunalno poduzeće d.o.o. Križevci i rekapitulacija postojećih istraživanja, „Analiza i obrada dostupnih geoloških, geokemijskih, geofizičkih bušotinskih podataka i reinterpretacija podataka snimljenih 2D seizmičkih profila u istražnom prostoru Križevci“ (Jankov i Bilić, 2020), nastavno na činjenicu da je Komunalno poduzeće d.o.o. dobilo dozvolu za istraživanje geotermalnih voda u ovom istražnom prostoru, a time je preuzelo i obvezu izrade ovakve studije. U studiji su, između ostaloga, predložene i dvije lokacije za razradu geotermalnog polja, pod nazivima Križevčanka Geotermalna-1 (KžaGT-1), planirane dubine od 1300 ± 100 m i Križevčanka Geotermalna-2 (KžaGT-2), planirane dubine 1555 ± 100 m. Budući da postoje prijedlozi lokacija budućih bušotina, magnetotelurska su istraživanja u rujnu 2020. (Borović, 2020) locirana na način da budu u blizini tih lokacija, naravno, onoliko koliko su dopuštale fizičke okolnosti, budući da se radi o urbaniziranom području.

3. GEOLOŠKA GRAĐA PODRUČJA GRADA KRIŽEVACA I OKOLICE

Geološka je situacija ovog prostora opisivana u brojnim publikacijama koje su već navedene u prethodnom poglavlju te nije cilj ove studije te činjenice ponavljati. S ciljem olakšavanja praćenja rezultata magnetotelurskih sondiranja, prikazuju se samo osnovne karakteristike prostora te opis naslaga direktno identificiranih postojećom bušotinom Križevčanka-1.

3.1. REGIONALNE GEOLOŠKE ZNAČAJKE



Slika 2. Karta glavnih tektonskih i geografskih jedinica Alpa, Karpata i Dinarida te Panonskog bazenskog sustava s izdvojenim depresijama (iz Pavičić et al., 2019 prema Dolton, 2006 s referencama iz Schmid et al., 2008). Hrvatski dio Panonskog bazenskog sustava označen je ružičastom bojom

Grad Križevci se nalazi u sjevernoj Hrvatskoj te se u regionalno-geološkom smislu nalazi se na rubu Dravske depresije unutar hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava (PBS) (Velić, 2007). Panonski bazen je najveći miocensko-kvartarni taložni bazen u Alpsko - karpatsko - dinaridskom orogenetskom sustavu (**Slika 2**, Prelogović et al., 1998; Lučić et al., 2001; Saftić et al., 2003).

Samo se mali jugozapadni dio PBS-a nalazi na području Republike Hrvatske. Tektonska evolucija PBS-a započela je prije otprilike 66 milijuna godina kredno-paleogenskom kolizijom Jadranske mikroploče i Europske ploče te lateralnom ekstruzijom ALCAPA mega-jedinice (*od engl- Alps, Carpathians and Pannonian Basin*) u smjeru istoka i rotacijom južnije položene mega-jedinice Tisije uz glavne smične (*transkurentne*) rasjedne zone (npr. Ratschbacher, et al., 1991; Csontos & Nagymarosy, 1998; Ustaszewski et al., 2008).

Od donjeg do gornjeg miocena, *roll-back* subdukcija Europske ploče inducirala je zalučnu (*engl. back-arc*) ekstenziju u području današnjeg PBS-a (Cloetingh et al., 2006; Schmid et al., 2008 i reference u tom radu). Ekstenzija, odnosno razvoj Panononsg bazenskog sustava, tako je započeo prije otprilike 20 milijuna godina uz regionalne listirčke rasjede pružanja SSZ, uz čiju su se aktivnost formirale duboke tektonske polugrabe, odnosno depresije (Fodor et al., 1999; Tari et al., 1992; Schmid et al., 2008).

U području hrvatskog dijela Panonskoga bazena izdvojene su četiri depresije: Murska, Dravska, Savska te Slavonsko-srijemska. Glavna je karakteristika svih depresija to što su postale mjesta intenzivnog taloženja tijekom dugoga geološkog vremena te su na predtercijarnu podlogu (mezozojske i paleozojske stijene) istaloženi kilometri materijala, osobito u dijelovima depresija koji su doživjeli najveće spuštanje. Ti se dijelovi nazivaju depocentrima i tu je zbog velikog raspoloživog akomodacijskog prostora istaloženo do pet i više kilometara tercijarnih i kvatarnih naslaga.

3.2. GEOLOŠKA GRAĐA ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

Pri razmatranju geoloških značajki često se iz praktičnih razloga razlikuje površinska i dubinska geološka građa. Površinska geološka građa obuhvaća stijene i strukture koje izgrađuju površinu ispod koje se nalaze potencijalni geotermalni vodonosnici, a dubinska

geološka građa obuhvaća stijene i strukture koje izgrađuju podzemlje u kojem se nalaze potencijalni geotermalni vodonosnici.

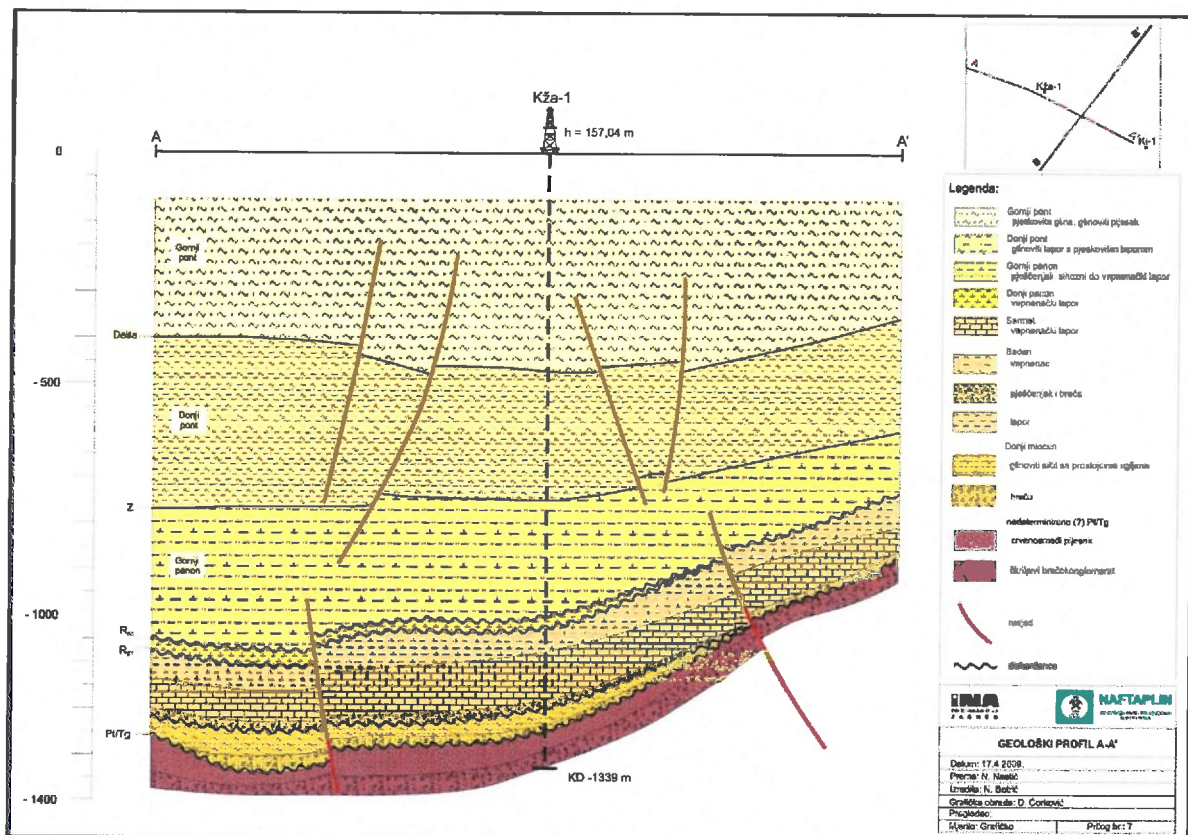
Površinska geološka građa ovoga prostora prikazana je na Osnovnoj geološkoj karti mjerila 1:100,000, list Koprivnica (Šimunić et al., 1990a) te je opisana u pripadajućem tumaču (Šimunić et al., 1990b). Budući da površinske kartirane jedinice nisu od interesa za predmetnu raspravu, ovdje će se prikazati samo dubinska geološka građa prostora utvrđena na temelju istražnog bušenja.

Istraživano područje nalazi se u zapadnom dijelu Dravske depresije. Shematski prikaz najčešćeg rasporeda facijesa i pripadajućih sedimenata u različitim depresijama PBS-a na prostoru Hrvatske prikazan je na **Slici 3**.

Rögl (1996)		Zapadni dio			Centralni dio		Facijesi i sedimenti
Stratigrafske jedinice		Murska depresija	Mali bazeni Hrvatskog zagorja	Zapadni dio dravske depresije	Savska depresija	Dravska depresija i bjelovarska subdepresija	
Pliocen	Pleistocen						Riječni, kopneni šljunci, pijesci, gline, ugljen
	Romanij						Jezerski, riječni pješčenjaci, pijesci, šljunci gline, ugljen
Miocen	Dacij						Jezerski, delte pješčenjaci i lapori
	Pont						Prijelazni, delte pješčenjaci i lapori
	Panon						Prijelazni, marinski kalcični lapori, laporoviti vapnenci
	Sarmat						Marinski litotamnijski vapnenci, pješenjaci, lapori
	Baden						Prijelazni Konglomerati, breče, lapori
	Karpat						Marinski konglomerati, lapori maceljski pješčenjaci
	Otnang						Paralički konglomerati, breče, glina lapori, pješčenjaci, ugljen
	Egenburg						
	Eger						
	Oligocen						

Slika 3. Prikaz distribucija facijesa i okoliša u zapadnom i centralnom dijelu hrvatskog dijela Panonskog bazena (modificirano prema Lučić et al., 2001)

Prostor gdje se nalaze sami Križevci ponekad se naziva i Križevačko – bjelovarsko – bilogorskim masivom Dravske depresije. Na području Križevaca debljina terciarnih i kvartarnih naslaga dokazano iznosi od 780 m u Križevačkom Lemešu (bušotina Ki-1) do 1404 m u Križevcima (Kža-1) (Slika 4).



Slika 4. Geološki profil preko bušotine Kža-1 (preuzeto iz Škrlec, 2009)

3.3. POTENCIJALNI I DOKAZANI GEOTERMALNI VODONOSNICI

U istraživanom području, na temelju postojeće geološke dokumentacije, mogu se očekivati različiti geotermalni vodonosnici, odnosno stijene s povoljnim svojstvima za uskladištenje i crpljenje geotermalnih voda. Oni se mogu pojavljivati u različitim stratigrafskim nivoima. Od starijih prema mlađima, to mogu biti (a) paleozojske stijene podloge bazena (magmatske i metamorfne), (b) mezozojski karbonatno-sedimentni kompleks, (c) srednjomiocenski i donjomiocenski karbonatno - siliciklastični kompleks ili (d) gornjomiocenski siliciklastični sedimenti.

Cirkulacija geotermalnih voda se često odvija kroz zone veće propusnosti povezane s rasjednim zonama uz kristalinsku podlogu, gdje u kontakt mogu biti dovedene stijene različite stratigrafske pripadnosti (starosti). Sve navedeno može uzrokovati složenu građu vodonosnika ili njegovu razlomljenost u manje i međusobno nepovezane vodonosnike.

a) Stijene kristalinske podloge

Stijene kristalinske podloge su sve magmatske, sedimentne i metamorfne stijene koje se pojavljuju na području Dravske depresije. Magmaške, sedimentne, i s njima asocirane metamorfne, stijene mogu biti različite starosti. U bušotini Kža-1 identificirani su crvenosmeđi pijesci, škriljavi brečokonglomerati s klastima metamorfnih stijena, kvarca, različitih škriljavaca i gnajsa. U neporemećenom stanju ove stijene imaju slaba svojstva u smislu formiranja vodonosnika (lošu propusnost). Ipak, zbog izražene tektonske aktivnosti tijekom geološke prošlosti, pretpostavlja se njihova tektonski uvjetovana razlomljenost, a time i povoljnija svojstva propusnosti.

b) Mezozojski karbonatno-sedimentni kompleks

Stijene mezozojske starosti također predstavljaju podlogu dubokih sedimentacijskih (tercijarnih) bazena. Ove stijene nisu nabušene bušotinom Kža-1, ali su zato identificirane u bušotini Ki-1 u Lemešu. Nažalost, ta je bušotina odmah tehnički napuštena kad se utvrdila negativna prognoza po pitanju prisutnosti ugljikovodika. Ovdje je potrebno istaknuti da srednjotrijaski i gornjotrijaski karbonati često predstavljaju geotermalne vodonosnike u sjeverozapadnoj Hrvatskoj.

c) Karbonatno-siliciklastični kompleks donjeg i srednjeg miocena

Ovaj je vodonosnik široko rasprostranjen, često s izdancima kilometarskih dimenzija, ali i sa čestim lateralnim i vertikalnim prijelazima u litotipove nepovoljnijih hidrogeoloških svojstava. Geometrija i strukturni položaj ovog vodonosnika prvenstveno zavise od paleookoliša i načina njegovog postanka. Petrografski sastav ovog vodonosnika, kako proizlazi iz samog naziva, vrlo je raznolik. U karbonatnom dijelu vodonosnika prevladavaju različiti tipovi plitkomorskih vapnenaca, gotovo isključivo biogenog podrijetla. Prevladavaju biohermalni i biostromalni koralinacejsko - briozojsko - koraljni vapnenci (vapnenci nastali taloženjem vapnenačkih dijelova skeleta različitih biljaka i životinja) kao i produkti njihovog trošenja energijom morske vode. Klastični dio vodonosnika

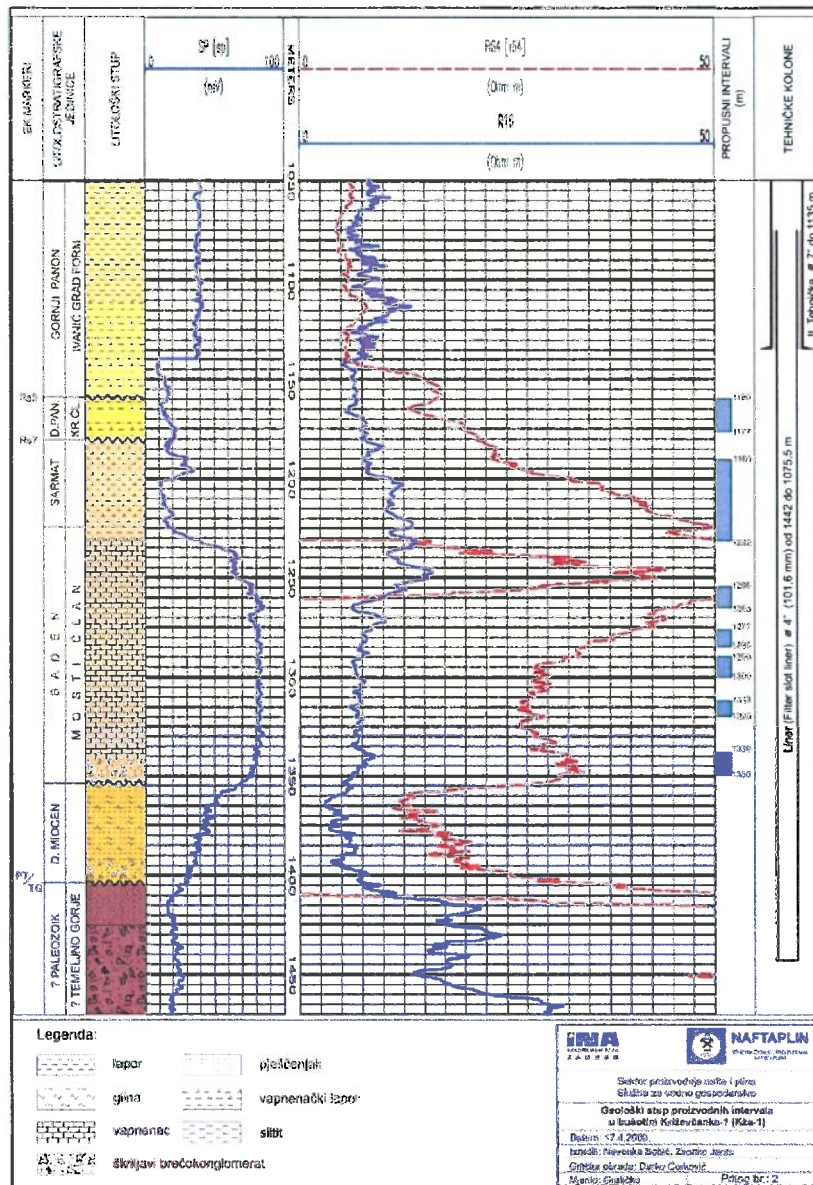
predstavljaju najčešće bazalni polimiktni konglomerati i breče. Njihov sastav odgovara petrografskom sastavu podine na koju su transgresivni. U zamršenim paleogeografskim odnosima na relaciji kopno - obalna linija - plitko more često se susreću u različitim omjerima pomiješani litoklasti karbonatnog i klastičnog razvoja. U vapnenačkom dijelu vodonosnika prisutne su sve vrste primarne i sekundarne poroznosti karakteristične za vapnence. Stijene ovog kompleksa predstavljaju poznate kolektorske stijene sa stanovišta ležišta ugljikovodika i vodonosnika pitke i termalne vode. Na primjeru ležišta Beničanci (u Dravskoj depresiji) stijene koje pripadaju ovom kompleksu imaju poroznosti prosjeku do oko 10 % (Velić, 2007), što je povoljno.

d) Gornjomiocenski siliciklastični sedimenti

Stijene ovog mogućeg vodonosnika predstavljene su uglavnom panonskim pješčenjacima, najčešće u formi *Abichi* naslaga. Ovi sedimenti predstavljaju dobro poznate kolektorske stijene ugljikovodika u svim depresijama u Hrvatskoj. Gornjomiocenske stijene se obično nalaze u manje složenim tektonskim odnosima za razliku od mogućih vodonosnika navedenih pod c). Gornjomiocenski pješčenjaci unutar litostratigrafskih jedinica Ivanić-Grad, Kloštar Ivanić i Široko Polje predstavljaju najčešće kolektorske stijene nafte i plina u zapadnom dijelu Dravske depresije. Vrijednosti poroznosti Iva pješčenjaka unutar jedinice Ivanić-Grad je u rasponu od 11 - 25 % (Velić, 2007), što je izrazito povoljno.

Točno rasprostiranje ovih potencijalnih geotermalnih vodonosnika nije moguće rekonstruirati iz postojećih istraživanja, a razlozi su višestruki. Hrvatski je dio Panonskog bazena područje koje je prošlo kroz nekoliko različitih faza deformacije tijekom geološkog vremena te je na regionalnoj skali ispresijecan brojnim rasjedima. Zatim, idući iz sitnijeg u krupnije mjerilo, sam je Grad Križevci položen u Dravskoj depresiji rubno, a idući prema rubu bazena, očekivano je da se naslage *neogenske ispune bazena* stanjuju, dakle, da su predneogenske naslage bliže površini (kao idući od bušotine Kža-1 prema Ki-1). Iz profila na Slici 4 je vidljivo da su bazenski sedimenti i kristalinska podloga razlomljeni rasjedima. Zbog te vrste struktura također nije moguće pretpostaviti koliko su potencijalni vodonosnici povezani ili odvojeni: moguće je da su *kompartmentalizirani*, tj. tvore odjeljke među kojim nema cirkulacije vode, a moguće je i suprotno - da su litološki različiti vodonosnici povezani te imaju veliko lateralno rasprostiranje. Budući da postojeća

površinska geofizička istraživanja nisu dala odgovor na ta pitanja, situaciju u podzemlju Grada Križevaca svakako je bilo poželjno dodatno istražiti, što je u ovom slučaju učinjeno magnetotelurskim istraživanjima.



Slika 5. Kompozitni log bušotine Kža-1 (preuzeto iz Škrlec, 2009)

Za sada je jedini dokazani geotermalni vodonosnik (ili više povezanih vodonosnika) onaj koji je nabušen u bušotini Kža-1. Na Slici 5 je prikazana njegova litostratigrafska i koronostratigrafska odredba te rezultati geofizičkih istraživanja u bušotini.

4. REZULTATI MAGNETOTELURSKIH ISTRAŽIVANJA

Magnetotelurska su istraživanja na području Grada Križevaca provedena u rujnu 2020. godine. Teorijske postavke metode, korišteni instrumentarij, prednosti i nedostaci ove metode, odabir lokacija i tijek istraživanja te pritom provedena edukacija studenata koja je bila predviđena radnim planom projekta HealingPlaces opisani su u izvješću o provedenim istraživanjima (Borović, 2020) te se ovdje neće ponavljati, već će se prikazati obrada prikupljenih podataka, njihova inverzija te interpretacija dobivenih rezultata u kontekstu postojećih spoznaja i novih mjerenja.

4.1. OBRADA PODATAKA

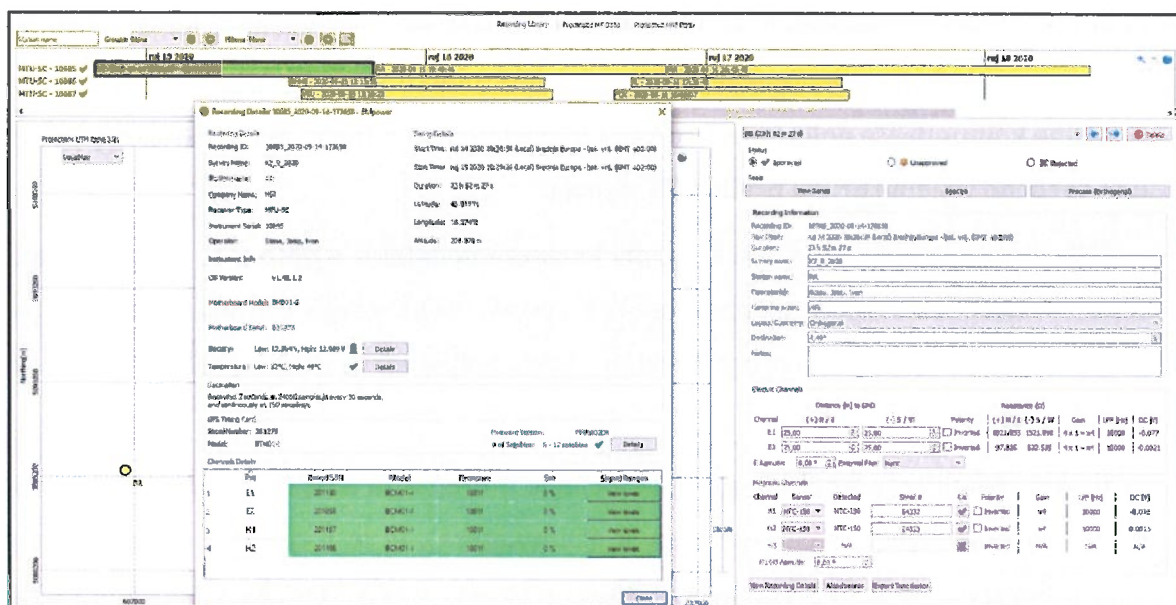
Kao što je navedeno u opisu magnetotelurske metode istraživanja, podatci o trima komponentama magnetskog i dvjema komponentama električnog polja prirodnoga elektromagnetskog polja Zemlje prikupljaju se u obliku vremenskih nizova. Fluktuacija pojedine komponente polja bilježi se kao funkcija vremena [$E_x(t)$, $E_y(t)$, $H_x(t)$, $H_y(t)$ i $H_z(t)$], dok se točno vrijeme prima preko GPS signala.

Nakon snimanja prvo se vrši kontrola kvalitete podataka, a potom se zadovoljavajući dijelovi vremenskih nizova magnetotelurskih podataka obrađuju. Obrada podataka u ovom je istraživanju provedena u programskom paketu EMpower v1.48.1.3 proizvođača Phoenix Geophysics Ltd.

U sklopu kontrole kvalitete provjerava se je li uređaj za akviziciju u svakom trenutku imao zadovoljavajuće napajanje (napon akumulatora), te je li njegova temperatura bila zadovoljavajuća, je li GPS antena u svakom trenutku imala kontakt s dovoljnim brojem satelita za točnu sinkronizaciju vremena te je li tijekom snimanja dolazilo do saturacije. Saturacija je pojava kod pretvaranja signala polja u elektronički zapis u kojoj je signal prejak te pri konverziji generira napon veći od zadane granice. To u praktičnom smislu znači da nije bilo moguće realnu vrijednost signala pretvoriti u elektronički zapis i, samim time, ona nije mogla biti registrirana. Pojava saturacije je, evidentno, nepoželjna jer nam

ukazuje da dio podataka nije prikupljen. Analizirajući vremenske nizove podataka sa svih lokacija mjerenja utvrđeno je sljedeće:

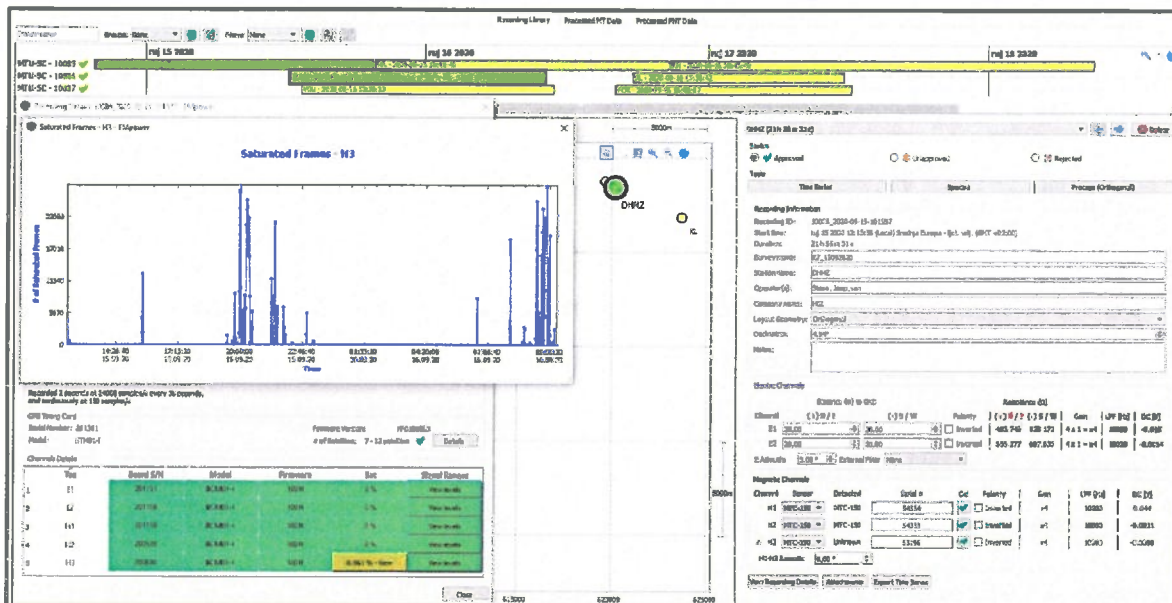
- Na udaljenoj je referentnoj točki (**RR**) situacija, očekivano, vrlo povoljna. Naime, kako je opisano u izvještaju o samim mjerenjima, udaljena se referentna točka smješta na udaljenosti 10 – 100 km od točke od interesa na području sa što manje elektromagnetskog šuma te služi za korekcije snimki točaka od interesa pri njihovoj obradi (Unsworth, 2013). Za potrebe ovog istraživanja takva je točka smještena u blizini Vrbovca, dvadesetak kilometara od mjernih točaka. Snimljeno je ukupno tri i pol dana podataka. Cijelo je vrijeme bio odličan status napona, temperature i komunikacije s GPS satelitima, te su zabilježena ukupno 22 saturirana okvira, od toga samo dva noću. S obzirom na to da je akvizicija bila podešena na način da se svakih 30 sekundi snima po dvije sekunde učestalošću od 24.000 mjerenja po sekundi plus kontinuirano 150 mjerenja po sekundi, jasno je da se radi o izrazito niskom postotku mjerenja koja nisu registrirana (što i sam uređaj registrira kao saturaciju od “ $\approx 0\%$ ”). Na Slici 6 prikazan je dio snimke u kojem je situacija idealna i uopće nema saturacije.



Slika 6. Karakteristike snimke vremenskoga niza na udaljenoj referentnoj točki, iz programa EPower za upravljanje podatcima i njihovu obradu

- Na točki najbližoj bušotini Križevčanka-1, koja je radi zaštite postavljena s druge strane makadamskog puta gdje DHMZ ima ograđenu meteorološku postaju (DHMZ), također očekivano, saturiranih je okvira bilo mnogo više. No, kada se pogleda udio saturiranih okvira u ukupnom broju prikupljenih podataka, on je još uvijek izrazito nizak (0,961 %).

Bitno je i što se saturacija pojavljuje tijekom dana, dok je u noćnom dijelu snimke gotovo nema. Svi su ostali parametri mjerenja zadovoljavajući kao i kod RR (Slika 7).



Slika 7. Karakteristike snimke vremenskoga niza na točki DHMZ, iz programa EMpower za upravljanje podatcima i njihovu obradu

- Na točki VGU, snimljenoj na poljoprivrednom zemljištu Visokoga gospodarskog učilišta, udaljenom od točke DHMZ oko 350 m, također su zadovoljeni svi parametri mjerenja, saturacija je zabilježena također samo na jednom magnetskom kanalu te iznosi 0,148 % i ne pojavljuje se u noćnom dijelu snimke.
- I na točki u Križevačkom Lemešu (KL) su zadovoljeni svi parametri mjerenja, a saturacija, iako zabilježena, je malena kao i na udaljenoj referentnoj točki (ukupno 11 saturiranih okvira, ono što se definira kao $\cong 0$ % saturacije). To je očekivana situacija budući da se, za razliku od ostalih točaka, ova nalazi izvan urbaniziranog prostora Križevaca, te je elektromagnetski šum manji.
- Četvrta je točka (FOK) snimljena na livadi u dolini potoka, zapadno od Križevačke grkokatoličke katedrale, na zemljištu pokreta fokolara. Udaljena je od bušotine Kža-1 oko 500 m u smjeru sjeverozapada. Lokacija je interesantna jer se nalazi u blizini lokacije predložene za bušotinu KžaGT-2, koja bi mogla služiti kao utisna.

Osim navedenih kriterija kojima se ocjenjuje kvaliteta snimke, važno je razmotriti i kakva je bila kontaktna otpornost. Naime, kako je upisano u Borović (2020) svi se senzori (depolarizirajuće elektrode i zavojnice) ukopavaju u tlo. Kontaktne otpornosti je parametar koji nam pokazuje koliko je dobar električki kontakt između instrumenata i početnog dijela

podzemlja. Ukoliko su prisutne velike kontaktne otpornosti ($> 20.000 \Omega\text{m}$), to će značiti loš kontakt između senzora električnog polja i instrumenta, što svakako treba izbjeći. Na svim točkama mjerenja kontaktne su otpornosti bile daleko ispod navedenog praga, a kretale su se u rasponu od 67,6 do 7.018,0 Ωm .

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 . Na taj način prikazani podatci se potom obrađuju matematičkim postupcima kojima se otklanjaju vrijednosti amplitude i razlike u fazi za koje je jasno da nisu posljedica prirodnog polja već ostalih EM šumova. Kada se podatci na taj način očiste, predstoji provesti inverziju tih podataka kako bi se dobio raspored električnih otpornosti u podzemlju na promatranoj lokaciji.

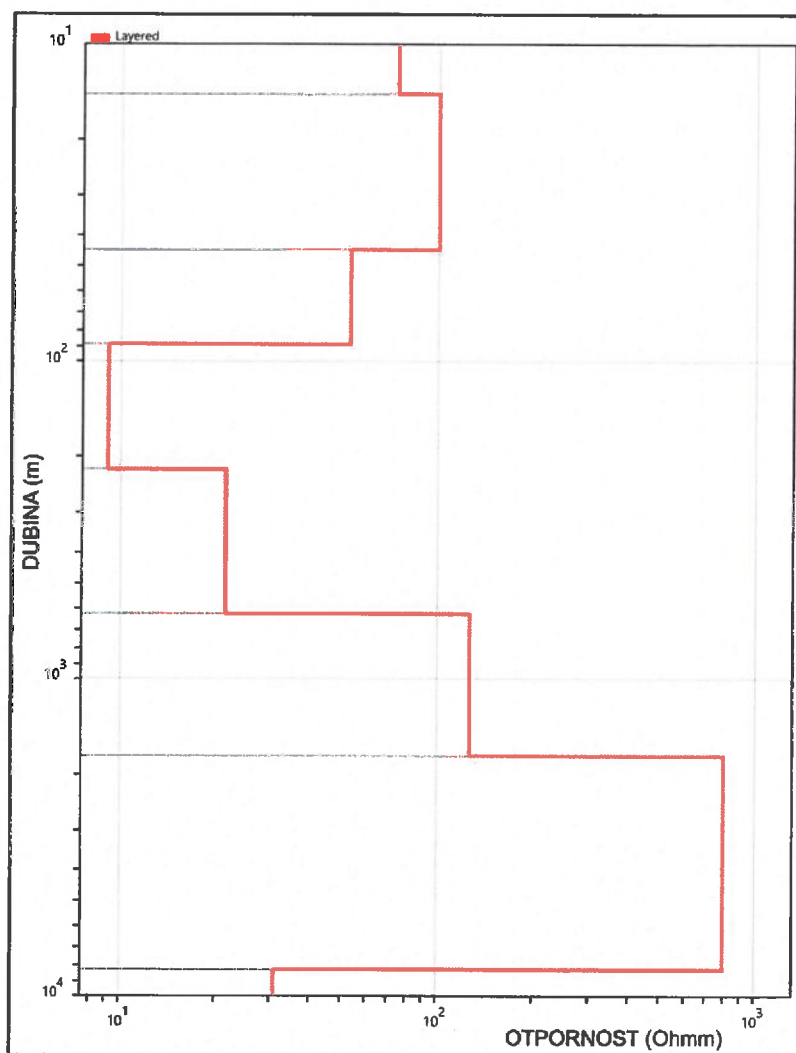
4.2. INVERZIJE PODATAKA

Inverzija je postupak koji se primjenjuje kod svih geofizičkih istraživanja, pa tako i kod elektromagnetskih. Obradom podataka dobivaju se vrijednosti prividne otpornosti (*engl. Apparent Resistivity*). To znači da je vidljivo kakav je otprilike raspored otpornosti, npr. na nekim se dubinama vidi jasni trend povećanja ili smanjenja otpornosti. Kako bi se dobila raspodjela stvarnih otpornosti u podzemlju, potrebno je načiniti inverziju: pronaći koji raspored otpornosti u podzemlju, u smislu debljina slojeva i otpornosti pojedinih slojeva, daje sliku prividnih otpornosti kakva je snimljena u istraživanju. U prijašnjim vremenima radilo se o znatno kompleksnijem poslu jer se raspored tražio ručno, usporedbom s tipskim krivuljama kakve generiraju određeni rasporedi otpornosti u podzemlju. U današnje vrijeme to je jednostavnije utoliko što usporedbu mjerenih podataka i tipskih krivulja provode računalni programi. Bez obzira na to provodi li se inverzija ručno ili računalno, uvijek je prisutna tzv. *električna višeznačnost*. Naime, isti signal prividnih otpornosti mogu dati, primjerice, debeli sloj osrednje otpornosti i tanki sloj vrlo visoke otpornosti. Jedini način ograničavanja električne višeznačnosti je korištenje ostalih postojećih podataka o nekom prostoru (Šumanovac, 2007). U tu su svrhu ovom prilikom korišteni različiti podatci

navedeni u drugom poglavlju ovog izvješća. Za provedbu inverzije korišten je programski paket Geotools verzija 1.9.3.12329 proizvođača CGG Electromagnetics Srl.

4.2.1. Sondiranje uz bušotinu Kža-1 (sonda DHMZ)

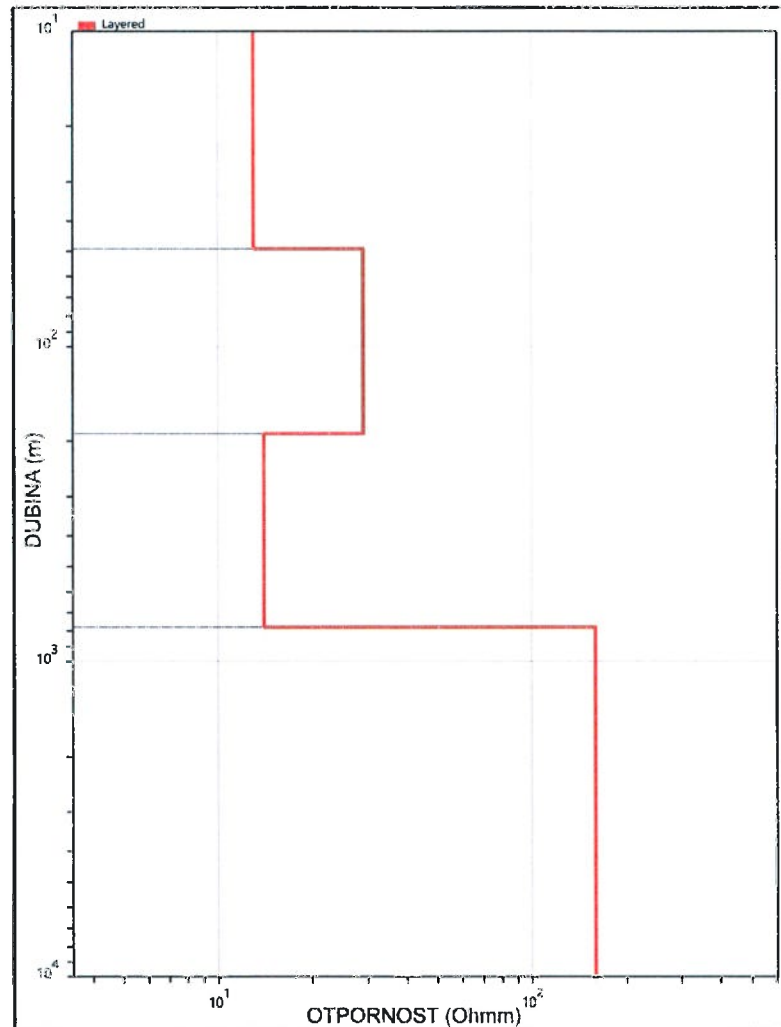
Kao što je opisano u Borović (2020), sondiranje nije provedeno na parceli same bušotine, već dvadestetak metara dalje zbog povoljnije situacije za ovu vrstu istraživanja. Inverzijom podataka dobiveni su rezultati prikazani na **Slici 8** te u **PRILOGU 1**.



Slika 8. Rezultati inverzije podataka sonde DHMZ

4.2.2. Sondiranje na zemljištu Visokoga gospodarskog učilišta (sonda VGU)

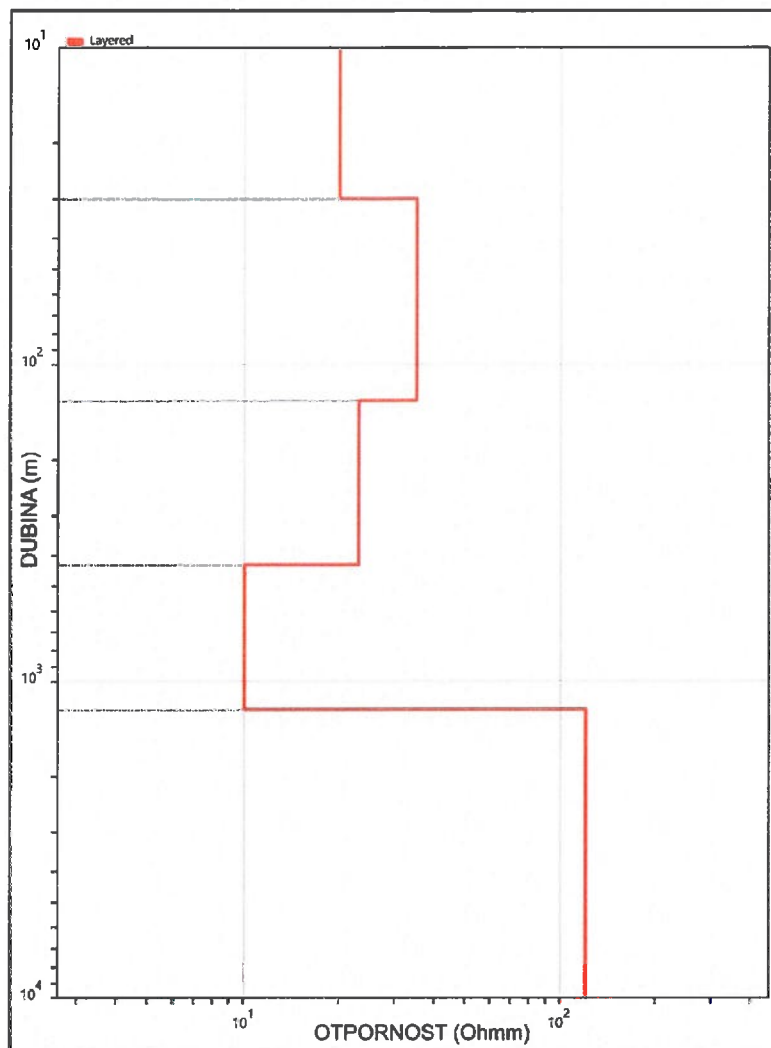
Ovo je sondiranje provedeno na parceli Visokoga gospodarskog učilišta, oko 350 m u smjeru istoka-jugoistoka od sonde DHMZ. Inverzijom podataka dobiveni su rezultati prikazani na **Slici 9** te u **PRILOGU 2**.



Slika 9. Rezultati inverzije podataka sonde VGU

4.2.3. Sondiranje na zemljištu pokreta fokolara (sonda FOK)

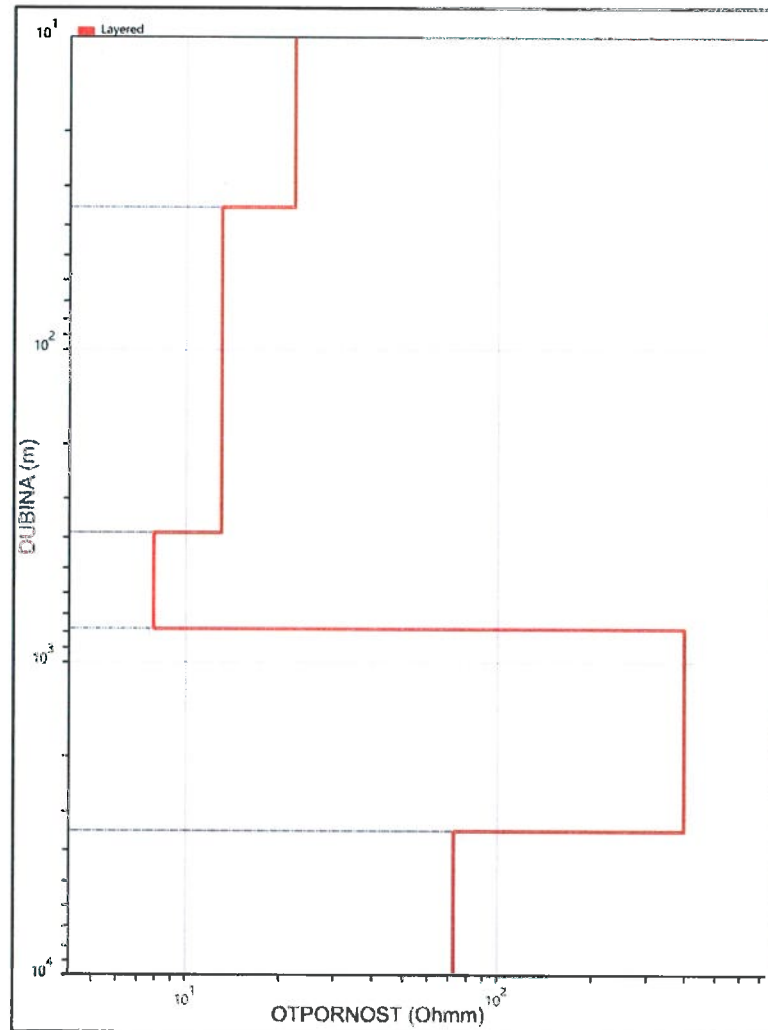
Sondiranje je na ovoj lokaciji provedeno jer ona otprilike odgovara lokaciji predložene bušotine KžaGT-2 (Jankov i Bilić, 2020), a mogla bi se koristiti bilo kao druga proizvodna ili kao utisna bušotina. Inverzijom podataka dobiveni su rezultati prikazani na **Slici 10** te u **PRILOGU 3**.



Slika 10. Rezultati inverzije podataka sonde FOK

4.2.4. Sondiranje u Križevačkom Lemešu (sonda KL)

Sondiranje u Križevačkom Lemešu je uključeno u istraživanje budući da je tamo rađena i prva duboka bušotina na ovom području (Ki-1), kao što je objašnjeno u Borović (2020) i u uvodnom dijelu ovog izvješća. Inverzijom podataka dobiveni su rezultati prikazani na Slici 11 te u PRILOGU 4.



Slika 11. Rezultati inverzije podataka sonde KL

4.3. INTERPRETACIJA PODATAKA

Podatci su interpretirani u svjetlu prethodnih istraživanja koja su korištena i za uklanjanje višeznačnosti prilikom inverzije. Kako bi se u potpunosti stekao uvid u problematiku, čitatelj se upućuje da pogleda i rezultate inverzije u priložima, jer se tamo osim prikaza otpornosti po dubini mogu vidjeti i ostale informacije na temelju kojih je rađena interpretacija.

Unatoč redosljedu pri akviziciji, obradi i inverziji podataka, interpretacija će biti dana drugačijim redom, što je usko povezano s kvalitetom prikupljenih podataka. Kao što je detaljno objašnjeno u Borović (2020), budući da se magnetotelurskom metodom snimaju komponente prirodnog elektromagnetskog polja Zemlje, ona je osjetljiva na sve vidove EM

šuma (prvenstveno antropogenog porijekla). Stoga je očekivano da su podatci to kvalitetniji što smo dalje od urbaniziranog područja, pa će interpretacija biti izložena tim redom.

U slučaju istraživanja na području Križevaca sonda s najmanje EM šuma je KL u Križevačkom Lemešu. Kao što je moguće zapaziti na u **PRILOGU 4**, točke koje prikazuju mjerene MT podatke nakon obrade su pravilno poredane na oba grafikona s lijeve strane (prividna otpornost i faza) i to sve od frekvencija 10 kHz pa do gotovo 1000 sekundi. To u praksi znači da je snimka dobra, bez mnogo šuma, da se mogla koristiti cijela snimka, a ne samo njezin noćni dio, te da je prikupljeno dovoljno podataka da bi interpretacija bila pouzdana i pri niskim frekvencijama, dakle, na većim dubinama. Primjerice, snimka nije opterećena EM šumom minimalno do frekvencije od 0,2 Hz, a budući da je na tom dijelu snimke prividna otpornost 6 Ωm , znači da se snimka odnosi na dubinu od 3 km, što je dovoljan zahvat za potrebe ovog istraživanja. Snimka je čak zadovoljavajuća sve do perioda od 1000 s (odnosno frekvencije od 10^{-3} Hz) što nije očekivano s obzirom da je cijela snimka duga nešto manje od 15 h. Iako je na temelju podataka o električnim otpornostima nezahvalno ekstrapolirati litologiju pojedinih dijelova podzemlja, s obzirom na to da u blizini postoji i likvidirana bušotina (Ki-1), moguće je pretpostaviti da na ovoj snimci površinski sloj s otpornostima oko 22 Ωm predstavljaju kvartarne naslage, slojevi otpornosti nižih od 20 Ωm su sedimenti i/ili slabo litificirane sedimentne stijene, građene od čestica veličina gline, praha i pijeska, čije otpornosti rastu s udjelom krupnije frakcije. Stoga je moguće pretpostaviti da s povećanjem dubine sedimenti postaju fino zrnatiji, otprilike od 35 do 380 m dominira pjeskovita komponenta, a od 380 do 780 glinovita komponenta. Nakon toga slijedi veliki porast otpornosti, na 300 Ωm , što predstavlja ulazak u čvrstu stijenu. U ovom je slučaju, zahvaljujući bušotini Ki-1, poznato da se radi o raspucalim i, moguće okršnim, mezozojskim vapnencima. Ove su visoke otpornosti interpretirane sve do dubine od 3500 m, a nakon toga se otpornost smanjuje na otprilike 70 Ωm . Budući da je ranije konstatirano da je snimka zadovoljavajuće kvalitete do otprilike 3 km, ne bi bilo uputno nagađati na koju litologiju upućuje ova značajna promjena otpornosti na većoj dubini.

Po kvaliteti snimke nakon sonde KL slijedi VGU, dakle, sonda koja se nalazi u blizini postojeće bušotine Kža-1 (podatci detaljnije prikazani u **PRILOGU 3**). Prvi dio snimke, do otprilike 50 m čine naslage otpornosti oko 12 Ωm koje je, sudeći prema debljini i postojećoj

determinaciji u Kža-1, moguće definirati kao kvartar i pliokvartar. Nakon toga se do otprilike 190 m nalaze otpornosti od 29 Ω m, što bi odgovaralo sedimentima kako je opisano kod prethodne sonde, a u kojima dominira pjeskovita komponenta. Nakon toga sve do dubine od gotovo 800 m slijede opet niže otpornosti (oko 13 Ω m), koje upućuju na sitnozrnatiye sedimente i/ili sedimentne stijene. Analogijom s bušotinom Kža-1 moguće je pretpostaviti da se radi o laporima i glinovitim laporima, pa i ugljenima, kojih je nađeno mnogo slojeva, a karakterizira ih niska otpornost. Nakon toga slijedi porast otpornosti na 170 Ω m, što je moguće protumačiti kao ulazak u drugu litologiju, iako analogija s bušotinom Kža-1 to ne nalaže. Na ovoj lokaciji ili je zbog tektonskih pokreta podloga tercijara pomaknuta u odnosu na svoju poziciju u Kža-1, ili su sedimentne stijene u potpunosti litificirane na način da mogu stvoriti ovakav kontrast otpornosti. Ovaj se iznos otpornosti može ekstrapolirati do dubine za koju smatramo snimku pouzdanom, a to je, s obzirom na to da se veći poremećaji u snimci javljaju pri frekvenciji od 0,1 Hz, a prividna je otpornost u tom dijelu snimke 4,6 Ω m, dubina od 3.400 m. Na nižim su frekvencijama mnogi podatci odbačeni zbog šuma te ima premalo podataka kako bi se donosili zaključci o većim dubinama od ove.

Na lokaciji sonde FOK (**PRILOG 2**), koja se nalazi u blizini predložene lokacije bušotine KžaGT-2 jasno se zapaža da je smještena unutar jače urbaniziranog prostora, EM šum je jači te su rezultati također lošije kvalitete, a time i pouzdanosti. Do dubine od otprilike 30 m nalaze se naslage koje bismo mogli prema otpornostima od 19 Ω m smatrati kvartarnim naslagama aluvijalnog porijekla. Nakon toga otpornost raste na otprilike 35 Ω m što bi bili sedimenti u kojima dominira pjeskovita komponenta, do dubine od 120 m. Nakon toga otpornosti padaju te do 420 m iznose 11 Ω m, a ispod toga sve do 1200 m oko 10 Ω m, što znači da je povećan udio sitnozrnatiye komponente u sedimentima ili sedimentnim stijenama. Nakon toga dolazi do karakterističnog porasta otpornosti na otprilike 110 Ω m što analogijom s bušotinom Kža-1 može predstavljati predtercijarne stijene. Ukoliko je to slučaj, tada bi predložena dubina bušotine KžaGT-2 od 1555 m (te prognoza o krovini ležišta na 1185 m) (Jankov i Bilić, 2020) bile u potpunosti odgovarajuće. Prema interpretaciji, ova se otpornost nastavlja do kraja snimke, no, kao što je navedeno, ova snimka na većim dubinama nije pouzdana. Moguće je zapaziti da su podatci loši već pri frekvenciji od 0,2 Hz, gdje prividna otpornost iznosi 7 Ω m, što daje dubinski zahvat od 2.980

m. Stoga je moguće konstatirati da je do te dubine prisutna istovjetna litologija. Iz inverzije je moguće pretpostaviti da se ista nastavlja i prema većim dubinama, no to se ne može iščitavati iz snimke jer kvaliteta nije zadovoljavajuća.

Na kraju, svakako će se dati i osvrt na sondu DHMZ koja se nalazi neposredno uz bušotinu Kža-1. Ipak, budući da je ova snimka opterećena velikom količinom EM šuma, njezin značaj ne dolazi u potpunosti do izražaja. Kako ova bušotina ima kvalitetnu determinaciju te provedenu bušotinsku karotažu, najlogičnije bi bilo koristiti njezine podatke za interpretaciju svih ostalih sondiranja u blizini. Ipak, činjenica da se u neposrednoj blizini sonde nalaze i prometnice i strujni vodovi učinila je ovaj tijek interpretacije nepreporučljivim. Za potrebu inverzije podataka ove sonde korištena je litostratigrafska determinacija bušotine koja je detaljno prikazana u Hećimović i Šimunić (1986). Ipak, ako se razmotre grafikoni prividne otpornosti i faze u **PRILOGU 1**, jasno je da čak ni unosom realnih podataka iz bušotine koja je udaljena svega dvadesetak metara ne dolazi do zadovoljavajućeg podudaranja interpretiranih otpornosti (crvena linija) i mjerenih podataka (plave točke). Budući da za ovu lokaciju postoje tzv. *hard data*, čvrsti podatci kao što su uzorci jezgre, bilo bi pogrešno oslanjati se na podatke iz sondiranja, koji ipak predstavljaju tzv. *soft data*, posredno dobivene podatke o podzemlju. Ono što je interesantno prokomentirati je da postoji i veliki nesrazmjer u odnosu na bušotinske podatke. Naime, na MT snimci se vrlo visoka otpornost (300 Ω m) pojavljuje na dubinama od 580 do gotovo 3.000 m, dok karotaža otpornosti u bušotini pokazuje otpornosti oko 100 Ω m na dubinama od 1.240 do 1.260 m te na većim dubinama, od 1.420 do dna bušotine to iznosi 100-200 Ω m, no ni na kojem dijelu ne doseže 300 Ω m. Što se tiče intervala u kojima se javljaju veće otpornosti, svakako bi trebalo smatrati relevantnima podatke karotaže, ali promatrajući veće volumene stijene u podzemlju, vjerojatno je otpornost viša. Nažalost, zbog loše kvalitete snimke na ovoj lokaciji nije moguće preporučiti ove vrijednosti za buduću upotrebu, već ih se samo može promatrati okvirno.

5. NUMERIČKO MODELIRANJE

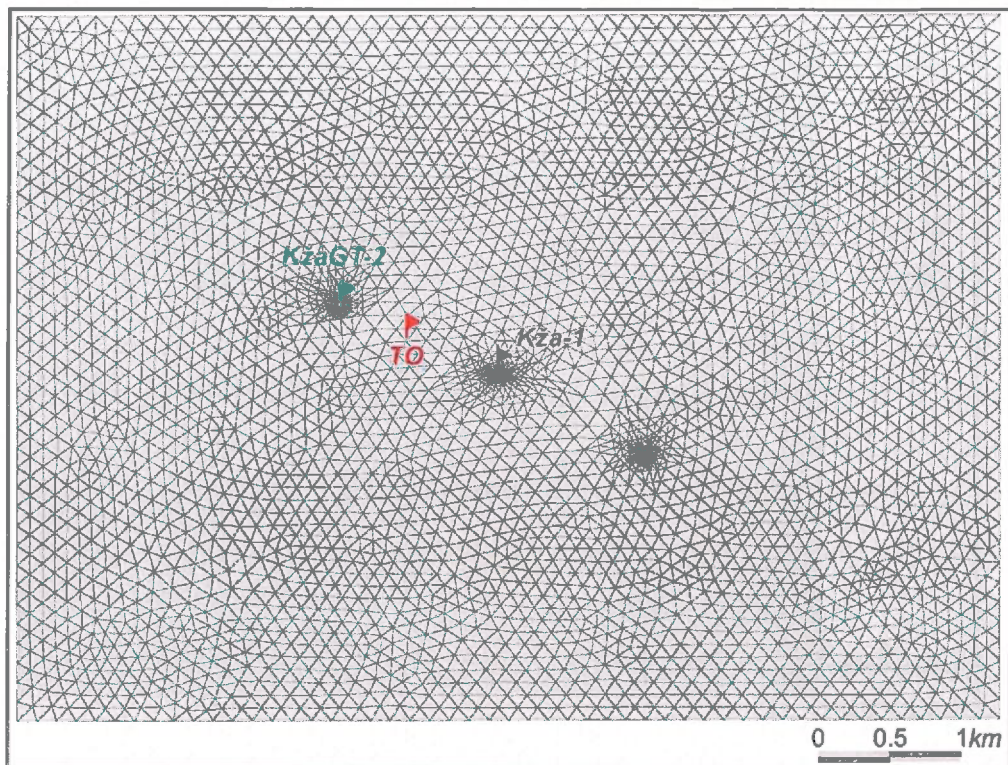
U današnje vrijeme postoji veliki broj alata koji nam omogućuju *oponašanje* funkcioniranja nekog sustava. Budući da se oponaša ili simulira funkcioniranje sustava na temelju postojećih mjerenih ili pretpostavljenih podataka o sustavu, takvi se alati nazivaju simulatorima.

Za simulacije toka fluida u podzemlju postoje, što na tržištu, što kao programi otvorenog koda, brojni programi koji koriste različite pristupe po pitanju dimenzionalnosti simulacija (1D, 2D i 3D), diskretizacije domene (tzv. *mesh*), te algoritama rješavanja jednadžbi (tzv. *solvera*).

5.1. KONSTRUKCIJA MODELA I OPIS SIMULACIJA

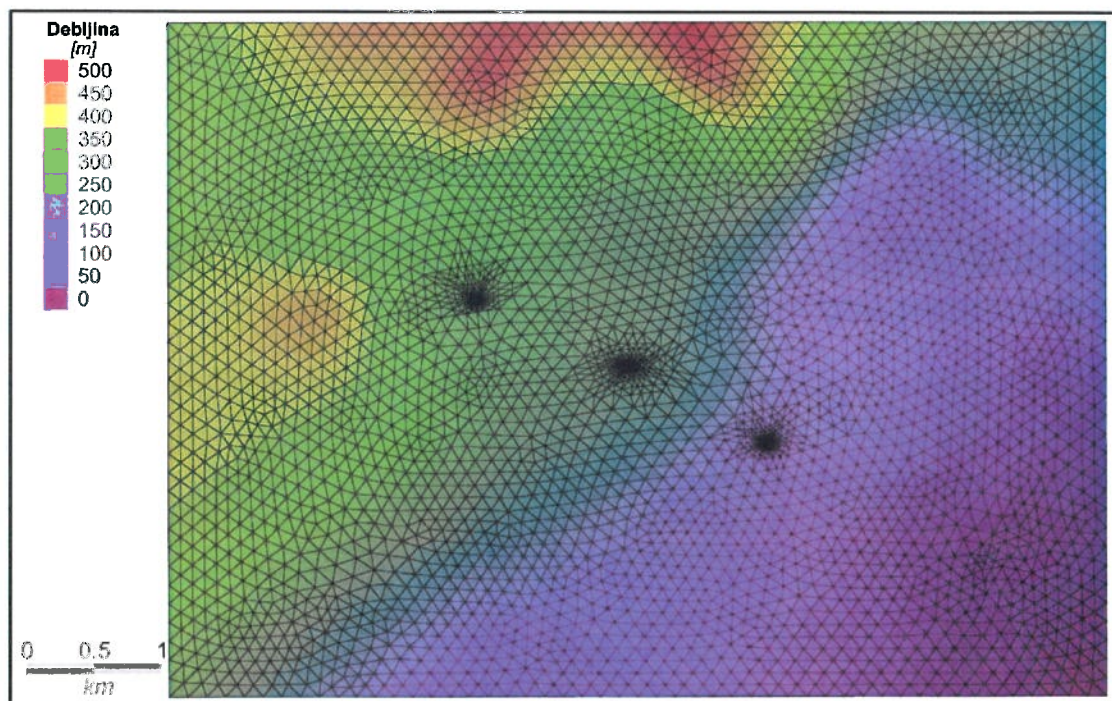
Pri simulacijama toka fluida u ovom smo se istraživanju oslonili na komercijalni softver FEFLOW 7.1 proizvođača DHI WASI (Diersch, 2014). To je simulator koji se koristi metodom konačnih elemenata kako bi proračunao procese toka i transporta u zasićenoj poroznoj ili razlomljenoj sredini (mediju). Osnovne jednadžbe koje opisuju tok fluida derivirane su iz zakona očuvanja mase i zakona očuvanja momenta. Domena se diskretizira u triangularnu mrežu, a jednadžbe koje upravljaju simulatorom se rješavaju za svaki čvor u svakom vremenskom koraku.

Provedene su prijelazne simulacije, što znači da je polje primarne varijable (razina podzemne vode) promjenjivo u vremenu. Simulacije su osmišljene na način da reproduciraju pokusna crpljenja i hidrodinamička mjerenja provedena 1989. godine (Šarin, 1990) i 2008. godine (Škrlec, 2009).



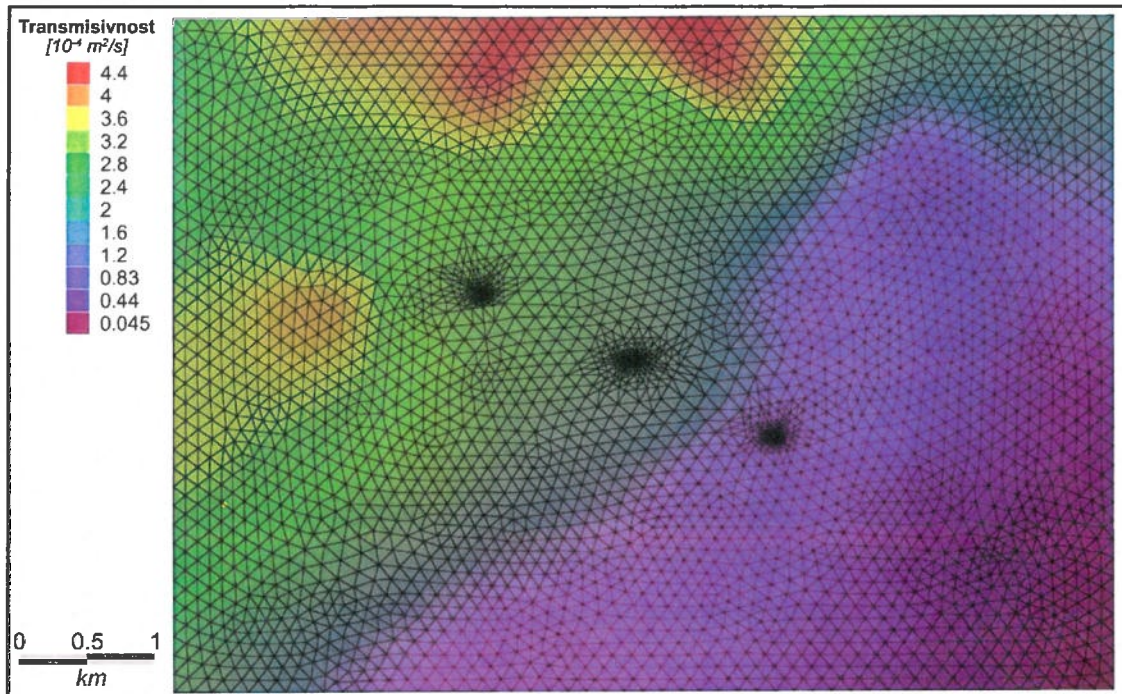
Slika 12. Veličina domene, izgled mreže i položaji objekata korišteni za modeliranje križevačkog geotermalnog vodonosnika

Termalni je vodonosnik rekonstruiran kao zatvoreni vodonosnik koristeći dvodimenzionalni ravninski (planarni) model, budući da se tok fluida između termalnog vodonosnika i njegove krovine i podine može zanemariti. Veličina domene modela je definirana kao 5 km x 7 km, u skladu s podacima prezentiranim u Jankov i Bilić (2020). U središtu domene postavljena je postojeća bušotina Kža-1, kao i dvije buduće bušotine koje su predložene u istom elaboratu (KžaGT-1 i KžaGT-2). Domena je diskretizirana u 7.376 triangularnih elemenata, što je rezultiralo sa 3.775 čvorova. Površina pojedinog elementa varira u rasponu od 11,92 m² do 10.084,30 m², jer je mreža utočnjena (*rafinirana*) u blizini postojeće i mogućih budućih bušotina (Slika 12).



Slika 13. Debljina vodonosnika korištena za modeliranje križevačkog geotermalnog vodonosnika

Debljina vodonosnika (prikazana na **Slici 13**) je digitalizirana iz karata po krovini i podini geotermalnog ležišta, odnosno karte debljine ležišta u Jankov i Bilić (2020) te je korištena za izračun transmisivnosti vodonosnika iz njegove hidrauličke vodljivosti (transmisivnost je umnožak hidrauličke vodljivosti i debljine vodonosnika). Budući da je debljina vodonosnika promjenjiva (smanjuje se od sjeverozapada prema jugoistoku), također je promjenjiva i njegova transmisivnost (prikazana na **Slici 14**) te je hidraulička vodljivost kalibrirana kroz postupak modeliranja kako bi numeričke simulacije ispravno reproducirale rezultate dobivene pokusnim crpljenjima.



Slika 14. Transmisivnost vodonosnika korištena za modeliranje križevačkog geotermalnog vodonosnika

U modelu je potrebno postaviti i specifično uskladištenje, budući da se radi o zatvorenom vodonosniku. Specifično je uskladištenje izračunato iz poroznosti od 20 % koja je navedena u Škrlec (2009), te je podešeno na $1E-4 \text{ m}^{-1}$.

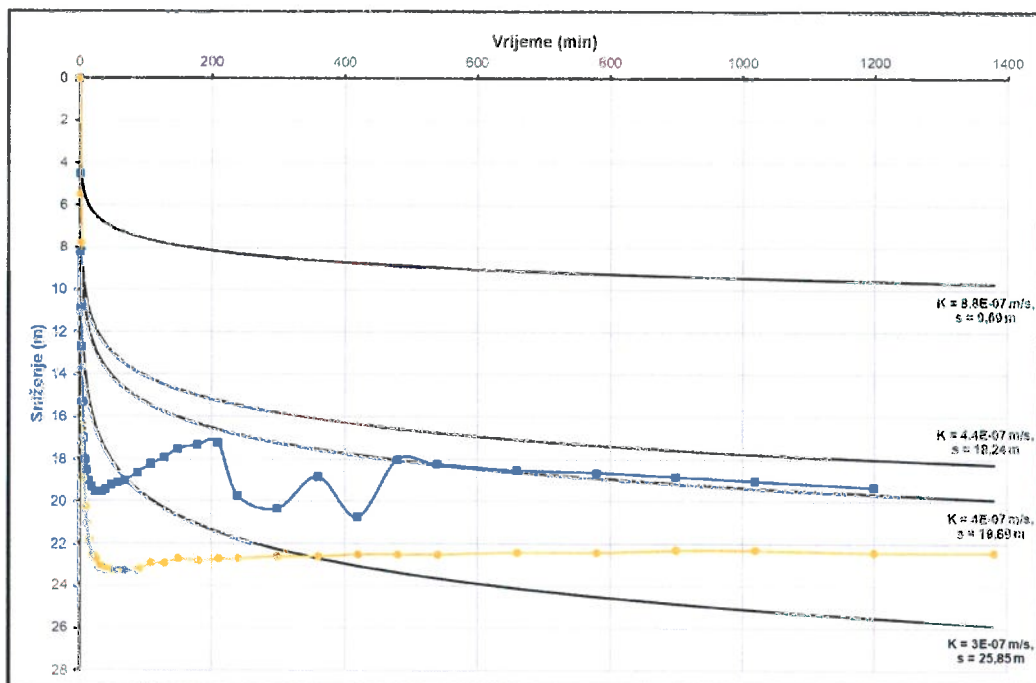
Uz to, u modelu je potrebno postaviti početne i granične uvjete. Početna vrijednost razine podzemne vode je postavljena kao konstanta za cijelu domenu, a jednaka je 133,9 m, što predstavlja razinu podzemne vode na početku pokusnog crpljenja u 2008. godini. Granični su uvjeti postavljeni kao granični uvjeti prvog tipa na granicama domene modela. To znači da predstavljaju stalnu razinu podzemne vode tijekom vremena. U središtu domene je dodan granični uvjet zdenca (*well*), što predstavlja element iz kojeg se voda crpi tijekom pokusnog crpljenja. Vrijednost graničnog uvjeta prvog tipa je postavljena jednako inicijalnoj vrijednosti razine podzemne vode, dok je količina crpljenja u zdencu postavljena kao promjenjiva, kako bi se reproducirale promjene u crpnim količinama koje su bile prisutne prilikom obaju pokusnih crpljenja.

5.2. REZULTATI NUMERIČKIH SIMULACIJA

U ovom će se dijelu opisati rezultati niza simulacija realnih pokusnih crpljenja, prvo onog novijeg i kraćeg iz 2008., potom duljeg iz 1989., te na kraju i prediktivnih simulacija za razdoblje od deset godina uz različite crpne količine te sa i bez utisne bušotine.

5.2.1. Simulacije pokusnog crpljenja iz 2008. godine

Inicijalna je simulacija provedena za vrijeme simulacije od 1.380 min, koliko su trajala i pokusna crpljenja 8.-9. studenoga 2008. godine te 11.-12. studenoga 2008. godine. Ova su crpljenja provedena s otprilike stalnom crpnom količinom od 2 l/s, dok je u modelu ona podešena na točno 2 l/s. Inicijalna je simulacija provedena s vrijednošću propusnosti od 88 mD koja je dobivena analizom istoga pokusnog crpljenja, što preračunato u hidrauličku vodljivost iznosi $8,8E-7$ m/s.



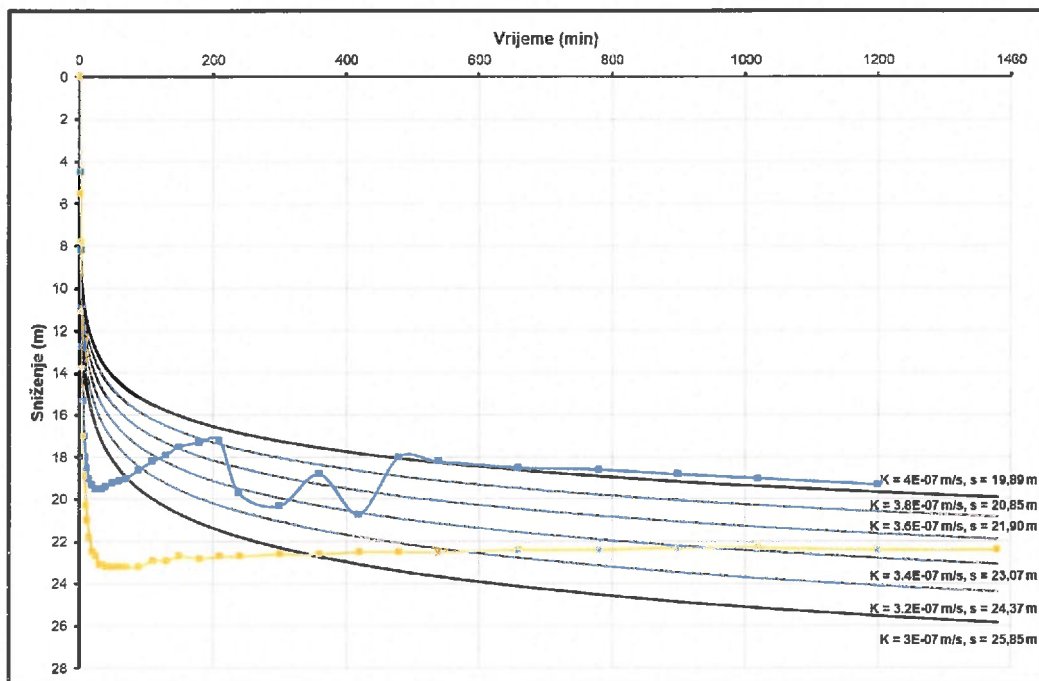
Slika 15. Rezultati simulacije crpljenja stalnom crpnom količinom od 2 l/s, s vrijednošću hidrauličke vodljivosti (K) od $3,0-8,8E-7$ m/s (crne linije). Za usporedbu su prikazana i sniženja pri realnom crpljenju 8.-9. 11. 2008. (plava linija) i 11.-12. 11. 2008. (žuta linija)

Rezultati ovih simulacija (**Slika 15**) pokazuju da je do kraja pokusnog crpljenja došlo do sniženja (s) razine podzemne vode od 9,61 m, što je 10-12 m manje sniženje negoli je

zabilježeno u stvarnom pokusnom crpljenju (redom 19,30 m i 22,40 m u dva navedena crpljenja).

Budući da rezultati simulacije nisu odgovarali opažanjima za vrijeme pokusnog crpljenja hidraulička je vodljivost umanjena za 50 % (na $4,4E-7$ m/s) te je simulacija ponovno provedena. Uz takvu hidrauličku vodljivost u simulaciji je dobiveno sniženje od 18,24 m (dakle, malo manje nego u stvarnom opažanju, ali mnogo bolje simulira stvarne uvjete).

Kako bi se uvjeti simulacije još bolje približili opažanjima, provedene su s različitim hidrauličkim vodljivostima, u rasponu od $3E-7$ do $4E-7$ m/s. One koje su najbolje reproducirale rezultate stvarnog pokusnog crpljenja bile su s hidrauličkim vodljivostima od $3,6E-7$; $3,8E-7$ i $4,0E-7$ m/s, koje su dale završna sniženja od 21,90; 20,85 i 19,89 m (Slika 16).



Slika 16. Rezultat simulacije crpljenja stalnom crpnom količinom od 2 l/s, s vrijednostima hidrauličke vodljivosti od $3,0E-7$ do $4,0E-7$ m/s (crne linije). Plava i žuta linija kao na Slici 15

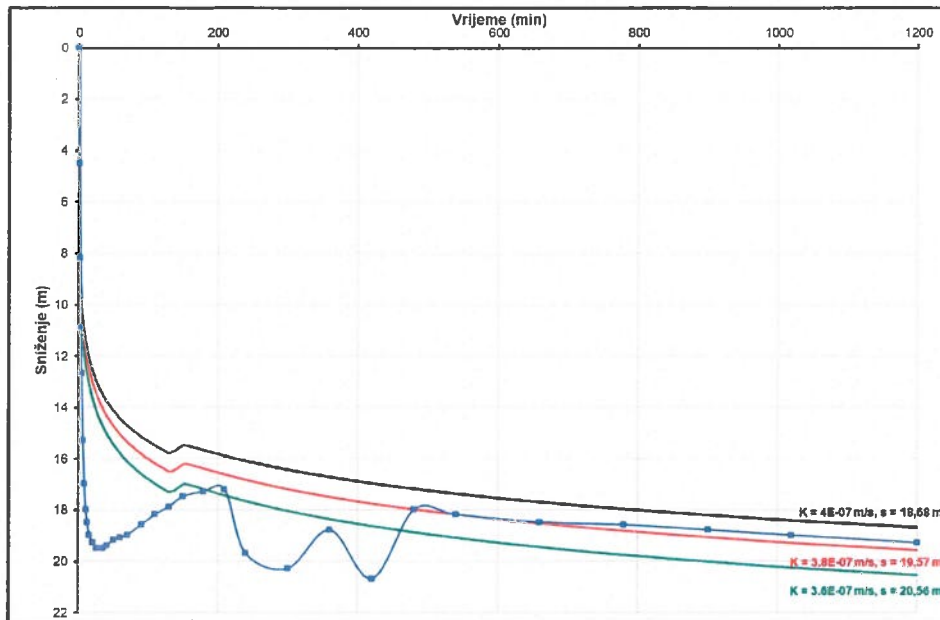
Do razlika u vrijednosti hidrauličkih vodljivosti koje su dobivene analizom istih podataka o pokusnom crpljenju dolazi zbog različitih metodologija korištenih za procjenu ovog parametra. U prvom se slučaju (kako je prikazano u Škrlec, 2009) vrijednost računa analitički iz podataka mjenjenih za vrijeme pokusnog crpljenja. Ovakav izračun uzima u obzir razinu podzemne vode

u bušotini, kao i promjenu hidrauličke vodljivosti u pribušotinskoj zoni, što je posljedica oštećenja za vrijeme bušenja. U drugom slučaju (kakav se ovdje prezentira) numerički model reproducira vodonosnik i bušotinu kao homogeni i izotropni kontinuum i ne uzima u obzir promjene polja hidrauličke vodljivosti koje nastaje zbog bušenja i prisutnosti bušotine u domeni. Hidraulička se vodljivost procjenjuje te se numerički simulira crpljenje s procijenjenim parametrom, a rezultati simulacija se uspoređuju s mjerenim podacima dok se ne dobije najbolje moguće podudaranje.

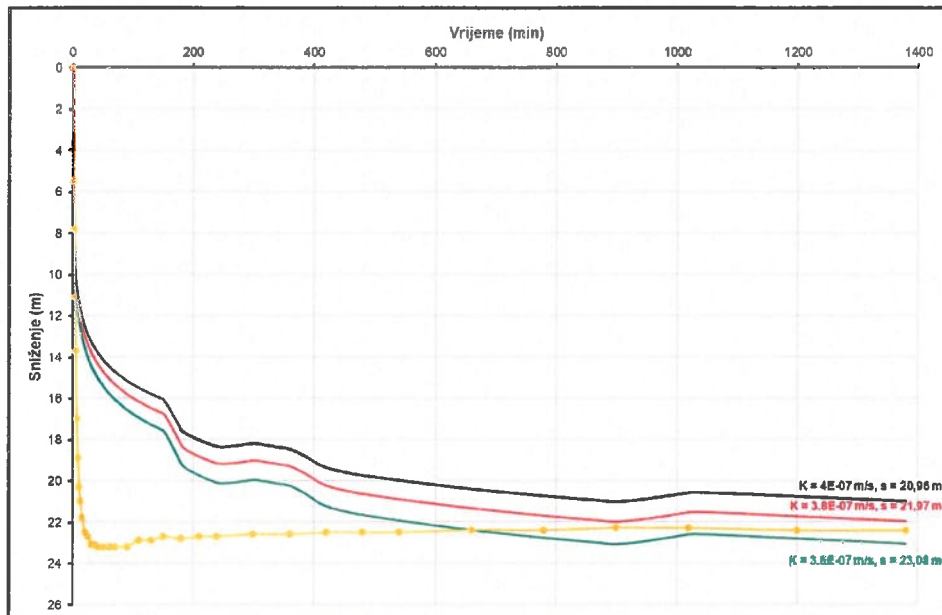
Razliku između stvarnih podataka pokusnog crpljenja i načina na koji numerički model simulira pokusno crpljenje vrlo dobro ilustrira početni dio grafikona na **Slikama 15 i 16**. Vidljivo je da kod stvarnog crpljenja na početku dolazi do naglih oscilacija u razini podzemne vode, što je posljedica promjena u polju hidrauličke vodljivosti uzrokovanih bušenjem, kao i uskladištenja same bušotine. Na svim ostalim krivuljama u grafikonu (koje su derivirane iz simulacija) takvih oscilacija nema, naprosto jer model ne simulira tu vrstu efekata.

Iako se razlike dobivenih hidrauličkih vodljivosti čine velikima u postotku, to je zapravo očekivana situacija kada se radi o procjeni ovog parametra. Dok su god procjene u istom redu veličine (10^{-7} m/s) jasno je da se u oba slučaja radi o odgovarajućim vrijednostima.

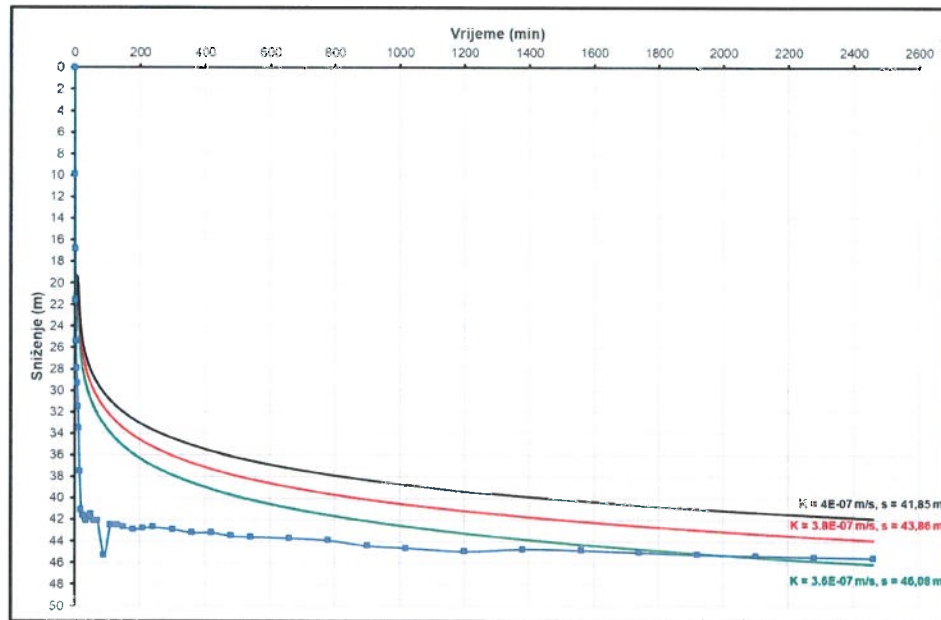
Nakon što je u inicijalnim simulacijama dobiven odgovarajući raspon hidrauličkih vodljivosti, čija je primjena rezultirala dobrim reproduciranjem stvarnih crpljenja, pristupilo se simulacijama cjelokupnog pokusnog crpljenja iz 2008. godine koristeći stvarne podatke o crpnim količinama. Rezultati simulacije sa crpnom količinom od 2 l/ prikazane su na **Slikama 17 i 18**, a rezultat simulacija sa 4-5 l/s na **Slikama 19 i 20**.



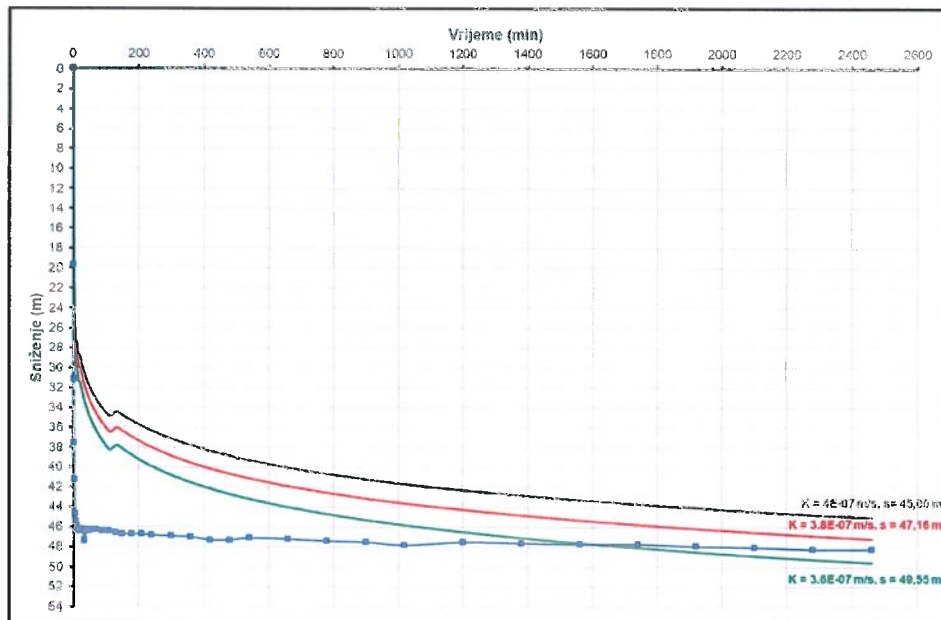
Slika 17. Rezultat simulacije crpljenja realnim crpnim količinama oko 2 l/s, s vrijednostima hidrauličke vodljivosti od $3,6E-7$, $3,8E-7$ i $4,0E-7$ m/s. Plava linija kao na Slici 15



Slika 18. Rezultat simulacije crpljenja realnim crpnim količinama oko 2 l/s, s vrijednostima hidrauličke vodljivosti od $3,6E-7$, $3,8E-7$ i $4,0E-7$ m/s. Žuta linija kao na Slici 15



Slika 19. Rezultat simulacije crpljenja realnim crpnim količinama 4-5 l/s, s vrijednostima hidrauličke vodljivosti od $3,6E-7$, $3,8E-7$ i $4,0E-7$ m/s. Plava linija prikazuje realno sniženje za crpljenja 9.-10. 11. 2008.

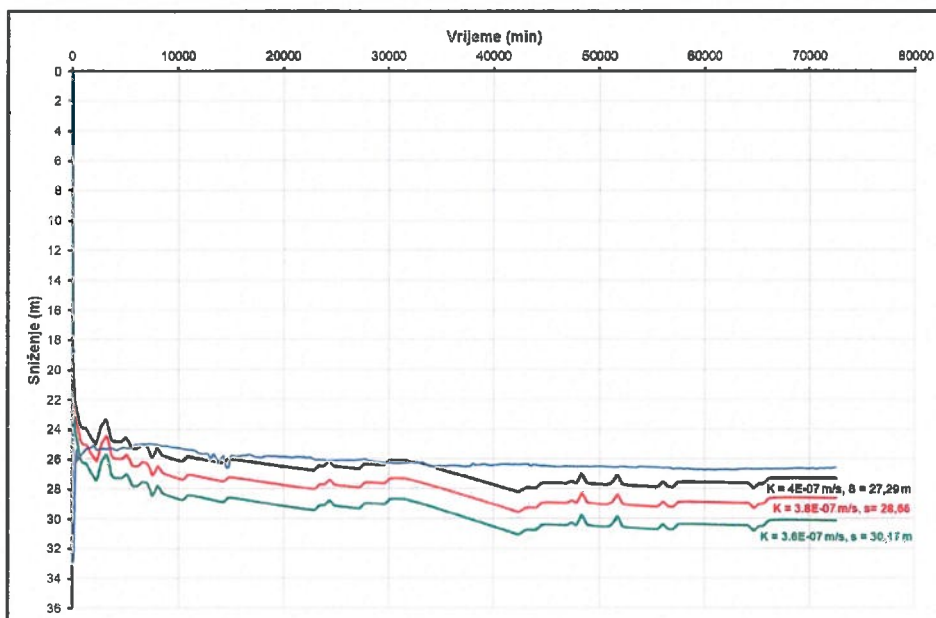


Slika 20. Rezultat simulacije crpljenja realnim crpnim količinama 4-5 l/s, s vrijednostima hidrauličke vodljivosti od $3,6E-7$, $3,8E-7$ i $4,0E-7$ m/s. Plava linija prikazuje realno sniženje za crpljenja 14.-16. 11. 2008.

Moguće je zaključiti da crpljenje s 2 l/s (otprilike 1.300 min) najbolje reproducira simulacija s hidrauličkom vodljivošću od $3,8E-7$ m/s, crpljenje s 4-5 l/s (2.460 min) simulacija s hidrauličkom vodljivošću od $3,6E-7$ m/s. Crpljenja s 4-5 l/s su trajala duže pa je jasno da su promjene zahvatile veći dio vodonosnika te utjecaj karakteristika samoga vodonosnika postaje veći od utjecaja bušotine.

5.2.2. Simulacije pokusnog crpljenja iz 1989. godine

Budući da je krajnji cilj ovih simulacija provesti simulaciju učinka dugotrajnog crpljenja na termalni vodonosnik, pristupilo se i analizi starijeg, ali najdugotrajnijeg pokusnog crpljenja na bušotini Kža-1. U ovim je simulacijama reproducirano pokusno crpljenje koje je trajalo od 13. travnja 1989. do 2. lipnja 1989. crpnim količinama od otprilike 2 l/s. Prema originalnim je podacima crpljenje trajalo do 12. lipnja 1989., no zadnji dio nije korišten jer je u tom razdoblju zbog kvarova dva puta došlo do prekida crpljenja i pet dana razine uopće nisu registrirane te se stoga ne radi o reprezentativnim podacima. To je, u svakom slučaju, najdugotrajnije pokusno crpljenje te ga je stoga korisno razmotriti unatoč navedenim nedostacima.

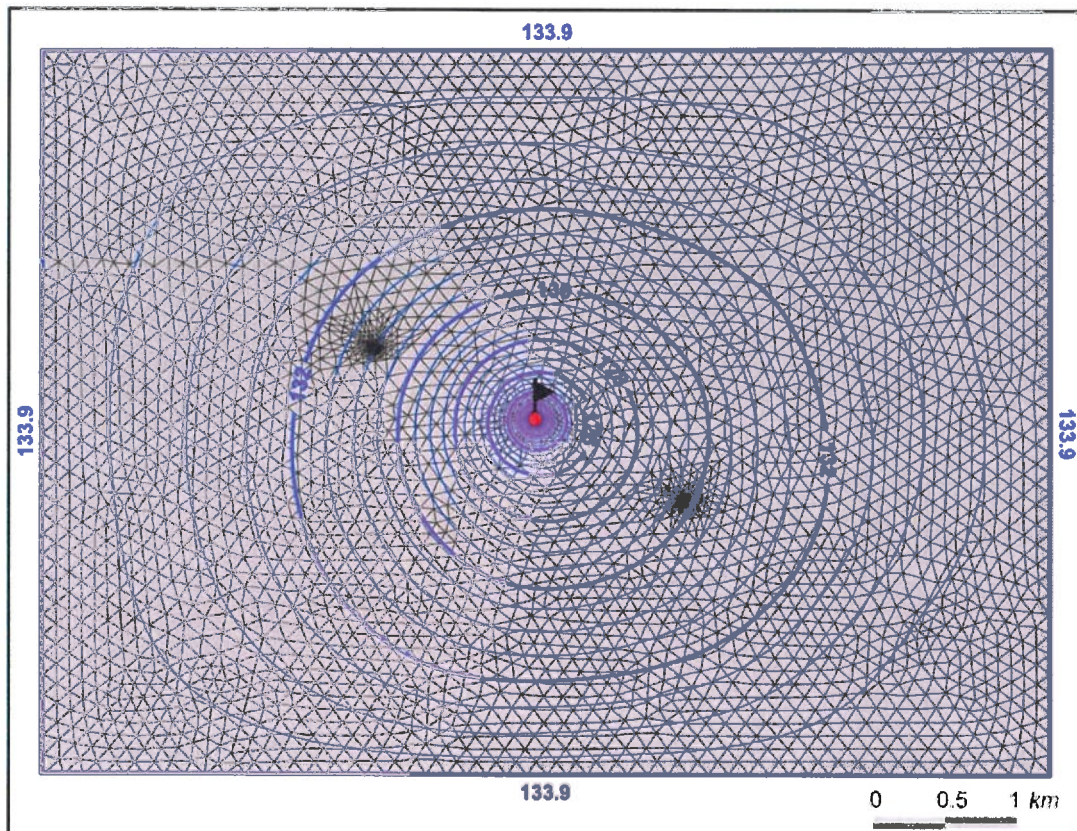


Slika 21. Rezultat simulacije crpljenja realnim crpnim količinama 2,6 - 2,0 l/s, s vrijednostima hidrauličke vodljivosti od $3,6E-7$, $3,8E-7$ i $4,0E-7$ m/s. Plava linija prikazuje realno sniženje za crpljenja.

U inicijalnoj fazi ovoga crpljenja crpilo se količinom od 2,6 l/s, dok je kasnije količina smanjena na 2 l/s. Simulacija je provedena za razdoblje od 72.550 min, što odgovara broju od 50,38 dana. Rezultati simulacija su prikazani na **Slikama 21 i 22**.

Grafikon na **Slici 21** pokazuje da simulacija provedena s hidrauličkom vodljivošću od $4E-7$ m/s najbolje reproducira rezultate realnog pokusnog crpljenja, ali do otprilike polovice simuliranog vremena, nakon čega se sniženje u simulaciji povećava u odnosu na mjerene podatke te je na kraju simulacije za 70 cm veće negoli ono opažano pri realnom crpljenju.

Ovaj nesrazmjer je moguće posljedica toga što je u periodu od 32.000 – 42.000 minuta model simulirao naglo sniženje razine podzemne vode od 2 m, što je uvjetovalo i krajnji rezultat simulacije. U istom je vremenskom periodu za stvarnog pokusnog crpljenja došlo do kvara mjerača protoka te nije moguće znati koja je zapravo bila točna crpna količina, ali je zabilježeno konstantno sniženje. To su situacije u realnom crpljenju koje je kasnije vrlo teško rekonstruirati ukoliko ne postoje vrlo detaljni zapisnici.

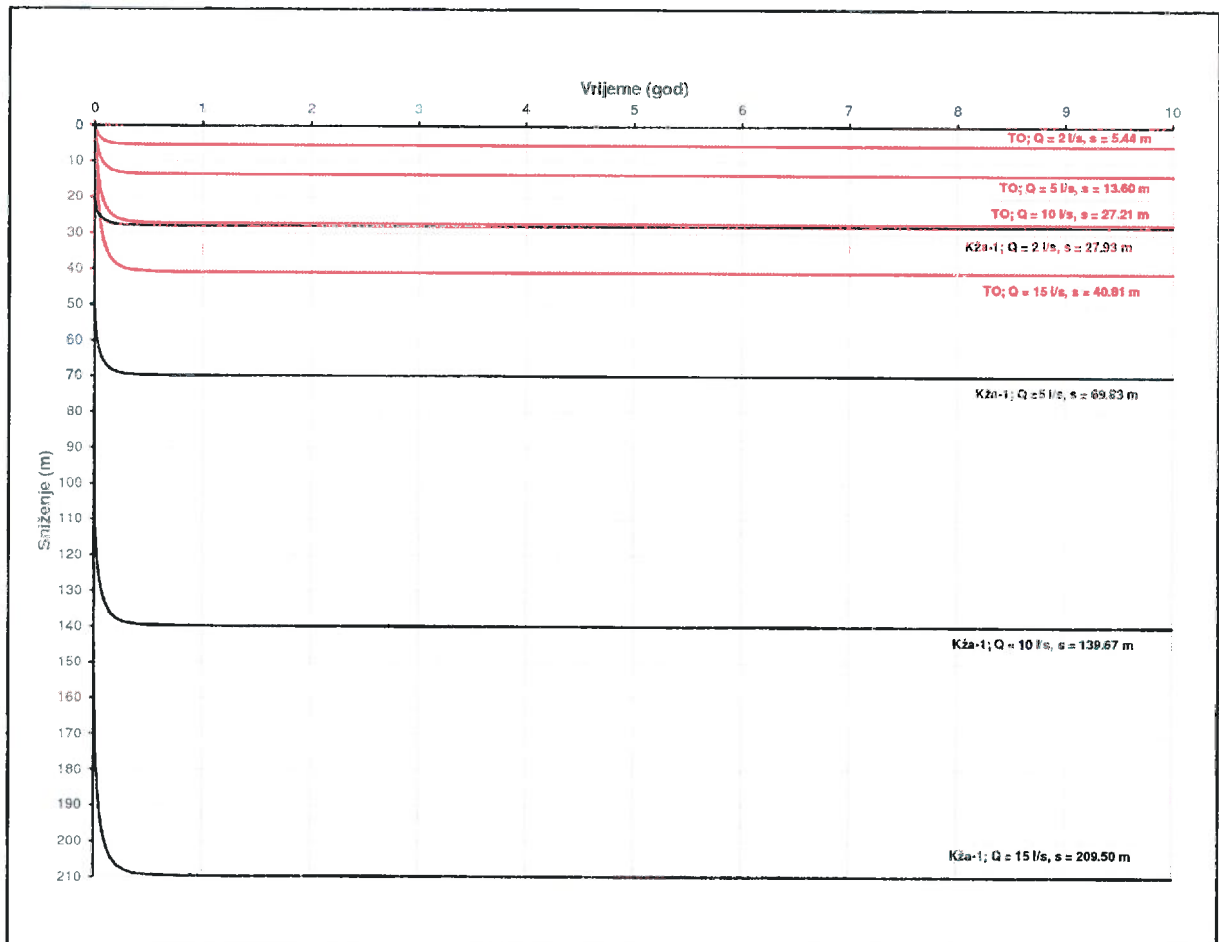


Slika 22. Karta razina podzemne vode na kraju simulacije provedene realnim crpnim količinama 2,6 - 2,0 l/s, s vrijednošću hidrauličke vodljivosti od $4,0E-7$ m/s. Crvena točka predstavlja proizvodnu bušotinu Kža-1

Na **Slici 22** je prikazano sniženje dobiveno simulacijom koja je najtočnije reproducirala realno crpljenje. Razina podzemne vode pada idući od granice domene prema lokaciji crpljenja te kod bušotine Kža-1 iznosi 106,61 m na kraju simulacije. Stalna vrijednost razine podzemne vode na granici domene uzrokovana je postavljanjem graničnog uvjeta prvog tipa koji je tamo primijenjen s vrijednošću 133,9 m (kako je opačeno u Kža-1 prije početka crpljenja). Budući da iz postojećih istraživanja nije moguće odrediti stvarnu veličinu ležišta (Škrlec, 2009), nije poznato je li veličina domene ovog modela dovoljno velika kako bi se izbjegle pogreške koje se neminovno javljaju u graničnim dijelovima domene.

5.2.3. Prediktivne simulacije za desetogodišnji period

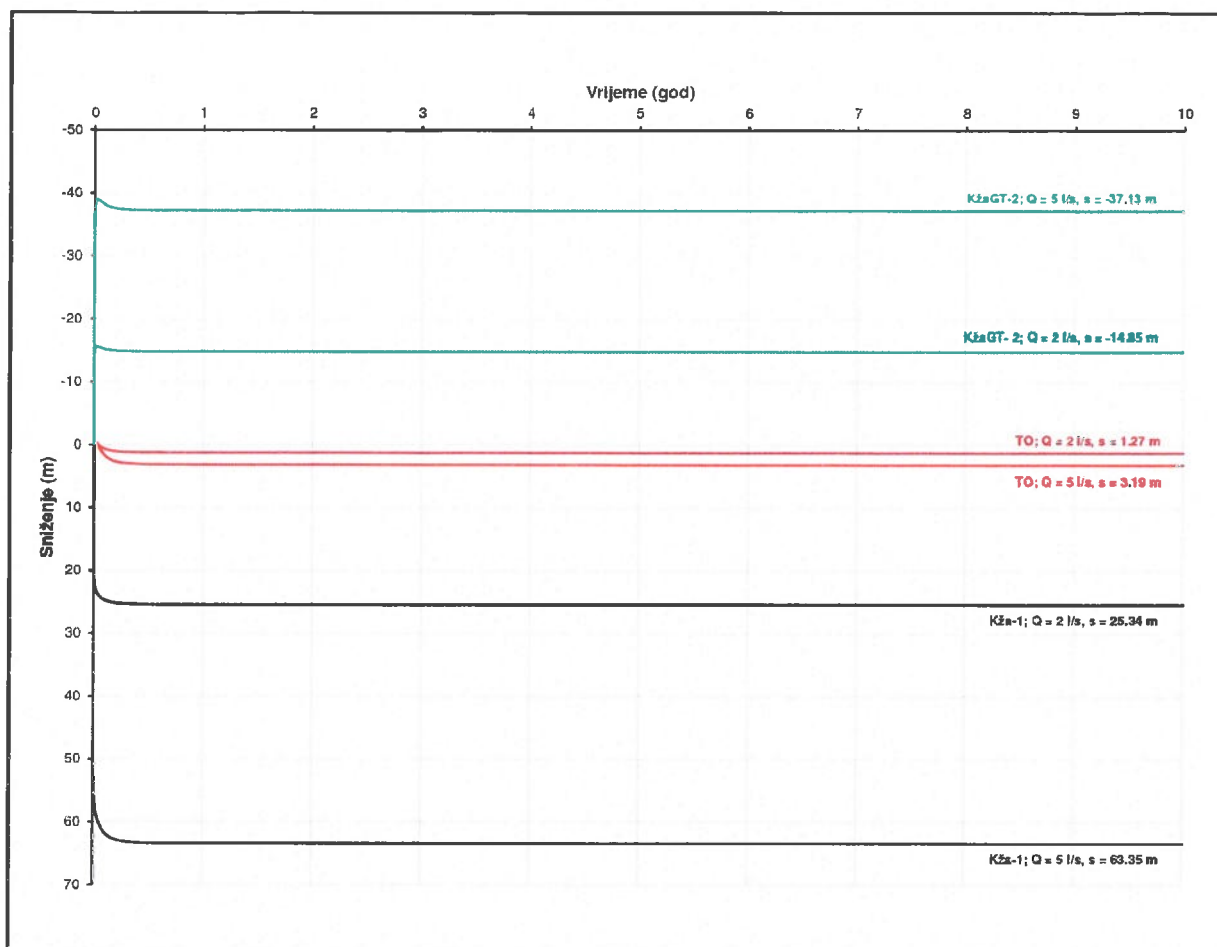
Prediktivne su simulacije za desetogodišnji period provedene su za crpne količine od 2, 5, 10 i 15 l/s, što su sve vrijednosti koje su se navodile kao mogućnosti u postojećim elaboratima navedenim u drugom poglavlju ovog izvješća. Na temelju uspješne simulacije dugotrajnog crpljenja iz 1989. godine za desetogodišnje je simulacije odabrana hidraulička vodljivost od $4E-7$ m/s. Sve simulacije pokazuju da sustav postiže kvazistacionarno stanje nakon otprilike pola godine crpljenja. To je stanje u kojem razina podzemne vode ostaje gotovo konstantna na nekoj dubini nižoj od početne, dakle, više ne pada bez obzira na konstantno crpljenje određenom količinom. To se sniženje, dakako, povećava s povećanjem crpne količine te varira u rasponu od minimalnih 27,93 m za crpljenje 2 l/s do maksimalnih 209,5 m za 15 l/s. Interesantno je uočiti da je sličnu vrijednost za sniženje nakon deset godina crpljenja količinom od 2 l/s, u iznosu od 29,70 m, proračunat analitičkim rješenjem (ekstrapolacijom iz dvomjesečnog niza podataka) u elaboratu Šarina (1990).



Slika 23. Sníženja u bušotini Kža-1 (crne linije) i u udaljenoj točki opažanja (TO) (crvene linije) u simulacijama za različite crpne količine tijekom deset godina. Lokacija TO prikazana je na **Slici 12**

Kretanje sníženja u bušotini Kža-1 za različite crpne količine prikazano je na **Slici 23**. U sklopu simulacija sníženja su praćena i na udaljenoj točki opažanja (TO) te u potencijalnoj utisnoj bušotini na lokaciji KžaGT-2. Logično, udaljavanjem od crpnog objekta, maksimalni se iznosi sníženja smanjuju.

Za crpne količine od 2 l/s i 5 l/s provedene su i simulacije s proizvodnom i utisnom bušotinom, s time da se utiskivalo 80 % proizvedenog fluida, budući da se u realnim uvjetima rijetko postiže utiskivanje 100-postotnom učinkovitošću. Utisna je bušotina bila locirana na KžaGT-2 jer je na tome dijelu vodonosnik deblji te time ima i veću transmisivnost. Rezultati ovih simulacija prikazani su na **Slici 24**.



Slika 24. Snižnja u bušotini Kža-1 (crne linije), u udaljenoj točki opažanja (TO) (crvene linije) te u utisnoj bušotini KžaGT-2 (zelene linije) u simulacijama za različite količine crpljenja i utiskivanja tijekom deset godina. Lokacija TO prikazana je na Slici 12

U ovim je uvjetima sniženje u proizvodnoj bušotini blago umanjeno, dok se u utisnoj bušotini opaža porast razine podzemne vode (negativni iznos sniženja na Slici 24). U točki opažanja (TO) koja se nalazi između proizvodne i utisne bušotine opaža se 4,17 m manje sniženje za 2 l/s te 10,41 m za 5 l/s, u odnosu na scenarij u kojem se samo crpi. U točki crpljenja (Kža-1) opaža se 2,59 m manje sniženje za 2 l/s te 6,48 m za 5 l/s, u odnosu na scenarij u kojem se samo crpi.

Rezultate razine podzemne vode simulirne za utisnu bušotinu je potrebno promatrati s oprezom jer model ne prikazuje uskladištenje zdenca ni poremećaje u toku vode u blizini zdenca, već prikazuje zdenac i vodonosnik kao kontinuum. S druge strane, promatranja u točki

između proizvodne i utisne bušotine su pouzdanija i jasno ukazuju da bi utiskivanje doprinijelo smanjenju utjecaja cpljenja na kvantitativno stanje termalnog vodonsnika.

6. MOGUĆNOSTI KORIŠTENJA ENERGIJE GEOTERMALNIH VODA

Prema podacima Međunarodne energetske agencije (*engl. International Energy Agency, IEA*) ukupna godišnja proizvodnja primarne energije na svjetskoj razini iznosila je 2017. godine 585 EJ ($585 \cdot 10^{18}$ J), a finalna potrošnja energije 407 EJ (IEA, 2019). U **Tablici 1** se nalazi pregled tehničkog potencijala obnovljivih izvora energije, to jest, udio resursa koji su fizički dostupni, a očekuje se da će njihovo korištenje postati rentabilno u sljedećih 40 do 50 godina.

Tablica 1

Tehnički potencijal obnovljivih izvora energije

IZVOR ENERGIJE	EJ / god.
Hydroenergija	50
Biomasa	276
Solarna	1575
Vjetar	640
Geotermalna	5000
UKUPNO	7541

Izvor: Rogner, 2000

Gledajući **Tablicu 1**, postaje jasno da će na globalnoj razini, zbog demografskog rasta i rasta potrošnje energije, iskorištavanje ogromnog potencijala obnovljivih izvora energije postati neophodno. Vidljivo je i da geotermalna energija čini dvije trećine ukupnog potencijala obnovljivih izvora energije, a osim same količine, ona ima i druge prednosti kao što su sveprisutnost i nezavisnost od atmosferskih pojava koje karakteriziraju ostale obnovljive izvore energije. Uz navedeno, i procijenjene rezerve geotermalne energije (udio dostupnog resursa koji će postati rentabilan u sljedećih 10 do 20 godina) iznose 500 EJ (Rogner, 2000), dakle, gotovo su jednake ukupnoj godišnjoj proizvodnji energije na planetu.

S obzirom na smještaj Republike Hrvatske u Panonskom bazenu, moguća proizvodna snaga iz postojećih geotermalnih resursa procijenjena je u studiji Geoen (EIHP, 1998). Prema tim izračunima, uz faktore iskorištenja od 90 % za proizvodnju električne struje i 70% za izravno korištenje topline, što su ujedno i maksimalni ostvarivi faktori iskorištenja na globalnoj razini prema Fridleifssonu (2003), uz potpunu razradu postojećih

geotermalnih ležišta moglo bi se pokriti 1.8 % potražnje za električnom strujom i 13.2 % potražnje za grijanjem i hlađenjem u RH, isključujući pritom dizalice topline (Borović & Marković, 2015). Iz ovih podataka može se iščitati da, iako na pojedinim lokacijama u RH zaista postoji potencijal za proizvodnju električne struje, u ovoj bi fazi razvoja prioritet trebalo dati integraciji geotermalne energije u opskrbu toplinskom energijom.

6.1. IZRAVNO KORIŠTENJE TOPLINE

Izravno korištenje geotermalne energije bez konverzije u električnu struju ima dugu tradiciju diljem svijeta te su tehnologije dobro proučene i manje-više konvencionalne. Ipak, svaka je regija, a osobito uža lokacija, veoma specifična prema geološkim, hidrogeološkim i termodinamičkim uvjetima. Osim prirodnih prednosti ili nedostataka, barijera korištenju geotermalne energije su i zakonska, institucionalna te okolišna ograničenja, koja nerijetko sprječavaju izravno korištenje geotermalne energije na mjestima gdje bi ono s tehnološkog aspekta bilo sasvim rentabilno. Rješenja poput grijanja na plin ili struju generalno su ljudima bliža, negoli rjeđa i slabo razumljiva geotermalna opcija. Isto tako, kupovina plina, nafte ili struje se ne percipira kao rizična operacija, za razliku od bušenja u potrazi za geotermalnom vodom. Dakako, glavna privlačnost geotermalne energije u sustavima izravnog korištenja je što, nakon pronalaska, energija desetljećima ima zanemarivu cijenu u odnosu na, primjerice, fosilna goriva. To dobro ilustrira primjer poljoprivrednog poduzeća iz Bošnjaka kraj Županje, koje je samostalno, bez ikakvih poticaja, financiralo bušenje duboke bušotine kako bi se dobila geotermalna voda za grijanje staklenika. Cijela investicija, uključujući bušotinu, strojarnicu i izmjenjivač topline, iznosila je oko 14 milijuna kuna, dok je do tada godišnji trošak plina iznosio milijun kuna (podatci dobiveni usmeno od vlasnika). U takvoj situaciji se investicija očito može isplatiti veoma brzo.

Iako je na globalnoj razini potencijal geotermalne energije veoma velik, dio potencijala koji se može privesti izravnom korištenju je ograničen. Ograničenja su najčešće tehnička, ekonomska ili vezana uz samu lokaciju. Drugim riječima, korištenje identičnog geotermalnog resursa može na jednoj lokaciji biti rentabilno, a na drugoj ne. Sustav daljinskog grijanja istim količinama geotermalne vode iste temperature prije će se isplatiti na Islandu, gdje sezona grijanja traje 10 - 12 mjeseci, nego na jugu Italije gdje traje 0 - 2

mjeseca. Pitanje rentabilnosti nije, dakle, samo pitanje resursa, već i pitanje potencijalne primjene.

Za izravno je korištenje geotermalne energije iznimno važna i lokacija bušotine, odnosno njezina udaljenost od potencijalnih korisnika. U svakom slučaju, geotermalni resursi unutar naselja imaju daleko veći potencijal iskorištenja nego resursi izvan naselja.

Blizina resursa i korisnika postaje manje bitna ako su visoki troškovi energije glavna motivacija za izvođenje projekta. Ta se zakonitost također iznimno dobro uočava na Islandu: zbog duge sezone grijanja grade se sve duži izolirani visokotemperaturni vrelovodi, što bi u drugim dijelovima svijeta bilo sasvim nerentabilno. U Republici Hrvatskoj, slično kao u SAD-u, jednu od najvećih prepreka široj uporabi geotermalne energije predstavlja razgranatost plinovodne mreže. Naime, može se reći da u panonskom dijelu RH, gdje se nalazi i većina dubokog geotermalnog potencijala, pristup priključku na plin ima svako selo. U skladu s tim, graditi izolirani vrelovod od bušotine koja je od naselja udaljena više kilometara jednostavno nije isplativo. Broj korisnika bio bi premalen, a cijena plina kao energenta je još uvijek dovoljno povoljna da stanovništvo ne traži alternative, osobito ne u vidu tehnologije koja je slabo etabrirane na hrvatskom tržištu.

Geotermalna energija se, u usporedbi s termalnom energijom koja se dobiva sagorijevanjem fosilnih goriva, nalazi na mnogo nižem energetske stupnju. Dok se sagorijevanjem fosilnih goriva lako i brzo postižu temperature do 1500 °C, odnosno temperature radnog fluida i procesne temperature od 500 do 1000 °C, najviše temperature geotermalnih fluida u uporabi su do otprilike 250 °C. Upravo je zbog tih razlika u temperaturi (odnosno stupnju toplinske energije) važno odabrati najpovoljnije modalitete korištenja geotermalne energije.

Tri su glavna razloga raširenosti izravnog korištenja geotermalne energije. Prvo, iako je proizvodnja električne struje tehnološki moguća i pri niskim do srednjim temperaturama fluida, proizvodnja ispod određene temperature postaje ekonomski neodrživa, što zavisi od temperature resursa, učinkovitosti proizvodnog postrojenja te stanja na tržištu (dostupnosti i cijene struje na promatranoj lokaciji te eventualnih poticaja). Drugo, opskrba toplinskom energijom niskih do srednjih temperatura za grijanje iz fosilnih goriva ima vrlo loše termodinamičke performanse, a može se osigurati iz geotermalnih resursa, čime se

energetska učinkovitost sustava grijanja nemjerljivo povećava, dakle postižu se i značajne uštede. Treće, pokazalo se da su u suvremenim industrijskim i uslužnim društvima najveći zahtjevi upravo za niskotemperaturnim i srednjotemperaturnim grijanjem. Kad se usporede potrebe za opskrbom toplinskom energijom prema temperaturi, u širokom rasponu od 25 do 250 °C (što se može osigurati iz geotermalnih resursa), najveća je potražnja za grijanje stambenih i poslovnih prostora sustavima u režimu rada 50 - 75 °C, koja čini više od polovice ukupne potražnje. Takva je situacija prisutna i u Republici Hrvatskoj i u cijeloj Europskoj uniji.

Osim za sustave grijanja, geotermalna energija može se koristiti na mnoge načine, što se najčešće ilustrira Líndalovim dijagramom (prema Líndal, 1973). Od 1970-ih, kada je prvi puta prikazan na taj način, doživio je brojne modifikacije, kako su se nalazili inovativni načini korištenja energije (Slika 25). Navedeni načini korištenja su usavršavani tijekom posljednjih nekoliko desetljeća te se smatraju konvencionalnim geotermalnim operacijama: ribnjačarstvo, rekreacija i balneologija, grijanje prostora (stambenih i poslovnih objekata te staklenika), razna sušenja i evaporacije te proizvodnja električne energije. Kao što se vidi na dijagramu, zasićena para se koristi u konvencionalnim elektranama, dok se vruća voda može koristiti u binarnim. Ipak, direktno korištenje topline ima mnogo raznovrsniju primjenu širom cijelog dostupnog temperaturnog spektra.

Osim toga, dijagram zorno pokazuje dva suprotna aspekta izravnog korištenja topline geotermalnih resursa. S jedne strane kaskadno korištenje topline za različite namjene s padom temperature omogućava povećanje rentabilnosti geotermalnih projekata. S druge pak strane, temperatura resursa ograničava moguće primjene. Dakle, moguć je problem u kojem postoje subjekti koji koriste različite toplinske procese, ali na njihovoj lokaciji ne postoji geotermalni resurs kojima bi se mogli namiriti, dok s druge strane za stupanj topline koji postoji jednostavno ne postoje potrošači. Jasno je da se taj problem može javiti na mnogim lokacijama jer su pogoni projektirani ranije, za neki drugi energent.

		TEMPERATURA (°C)	MOGUĆA PRIMJENA	
ZASIĆENA PARA		200		KONVENCIONALNA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE STRUJE
		190		
		180	Evaporacija koncentriranih otopina	
			Rashlađivanje apsorpcijom amonijaka	
			Razgradnja pulpe u proizvodnji papira Kraftovim procesom	
		170	Proizvodnja teške vode procesom sumporovodika	
			Sušenje dijatomejske zemlje	
		160	Sušenje ribljih obroka	
			Sušenje drvene građe	
		150	Proizvodnja aluminijske Bayerovim procesom	
140	Brzo sušenje poljoprivrednih proizvoda			
	Konzerviranje hrane			
130	Evaporacija kod rafiniranja šećera			
	Ekstrakcija soli evaporacijom i kristalizacijom			
	Desalinizacija vode destilacijom			
TOPLA I VRUĆA VODA		120	Većina industrijskih evaporacija i koncentriranja otopina soli	
		110	Sušenje lakih cementnih ploča	
		100	Sušenje organskih materijala, trave, morske trave, povrća itd.	
			Pranje i sušenje vune	
		90	Sušenje ribe iz uzgoja	
			Operacije intenzivnog odleđivanja	
		80	Zagrijavanje prostora (zgrade, staklenici)	
		70	Rashlađivanje (donja temperaturna granica)	
		60	Stočarstvo	
			Kombinirano grijanje staklenika (zrak + supstrat)	
50	Uzgoj gljiva			
	Balneologija			
40	Zagrijavanje tla			
30	Bazeni			
	Biodegradacija			
	Fermentacije			
	Topla voda za cjelogodišnje rudarske operacije u hladnim klimama			
20	Odleđivanje			
	Ribnjačarstvo			

Slika 25. Línđalov dijagram modificiran prema Gudmundsson & Lund (1987)

Odluka o investiranju u geotermalni projekt zavisi prvenstveno od godišnjih ušteda u odnosu na neko drugo gorivo, uzimajući u obzir životni ciklus projekta, održavanje sustava, cijenu kapitala i projekcije cijena goriva. Projekti izravnog korištenja geotermalne energije zahtijevaju velika inicijalna kapitalna ulaganja, a potom slijede niski godišnji operativni troškovi. Izrada eksploatacijskih bušotina, cjevovoda, izmjenjivača topline i utisnih bušotina stoji mnogo više nego početna investicija u sustav koji koristi fosilna goriva. S druge strane, kod sustava koji koristi fosilna goriva potrebno je kontinuirano kupovati naftu / plin / ugljen po često visokim i nepredvidljivim cijenama (osobito tijekom cijelog životnog ciklusa sustava). Godišnji troškovi održavanja su podjednaki za obje vrste sustava. Dakle, kako bi se utvrdila isplativost projekta izravnog korištenja geotermalne energije potrebno je razmotriti dvije vrste sustava: jedan s visokom inicijalnom investicijom i drugi s visokim godišnjim operativnim troškovima.

Ekonomičnost projekta izravnog korištenja geotermalne energije određena je nekolicinom čimbenika, uključujući lokaciju resursa i korisnika, učinkovitost ekstrakcije topline, godišnje opterećenje sustava, cijenu kapitala, razdoblje amortizacije te stopu inflacije. Te je faktore moguće grupirati u tri glavna razmatranja:

1. SMJEŠTAJ I POSEBNOSTI LOKACIJE. Projekti izravnog korištenja geotermalne energije su zavisni od lokacije jer obilježja i lokacija geotermalnog resursa moraju biti kompatibilni sa željenom uporabom. Moguće alternative pritom su preseljenje novih potencijalnih korisnika i/ili preinake sustava kod postojećih potencijalnih korisnika. Duljina transmisijskih i distribucijskih cjevovoda je jedna od značajnih cjenovnih stavki i ograničavajući je čimbenik u razvoju svih geotermalnih projekata. Ta se stavka može planski smanjiti smještanjem potrošača što bliže resursu (geotermalnoj bušotini) ili promišljenim lociranjem bušotine. Dubina bušenja diktira cijenu crpnih (eksploatacijskih) i utisnih (injekcijskih) bušotina. Često se stoga mora napraviti kompromis između korištenja plićih bušotina uz dizalice topline ili dubljih bušotina uz izravno korištenje. Kemijski sastav geotermalnih otopina utječe na dizajn i troškove održavanja sustava. U sustavima niskih i umjerenih temperatura važna je i dubina na kojoj se nalazi razina podzemne vode, jer od toga zavisi koliki će biti troškovi crpljenja. Hidrodinamički i termodinamički uvjeti (brzine snižavanja tlaka i temperature)

geotermalnih vodonosnika svih temperatura su također posebnost lokacije te će na različitim lokacijama za isti termalni učinak biti potrebno izbušiti različiti broj bušotina.

2. UČINKOVITOST I OPTEREĆENJE SUSTAVA. U sustavima izravnog korištenja topline geotermalnih voda trošak energije se smanjuje ukoliko se poveća količina ekstrahirane topline. Drugim riječima, budući da je pronalaženje geotermalne vode i njeno dovođenje na površinu skup proces, jednom kad je ona na površini iz nje treba uzeti što je moguće više topline prije vraćanja u podzemlje. Korištenje geotermalne toplinske energije obično zahtijeva složenije i skuplje toplinske sustave, nego što je slučaj sa sustavima na fosilna goriva, no time se smanjuje i broj potrebnih eksploatacijskih bušotina. Najčešći način povećanja učinkovitosti korištenja toplinske energije iz geotermalnih izvora je kaskadno korištenje topline s padom temperature. Korisnici s većom gustoćom termalnog opterećenja trebaju manje distribucijske sustave, čime se smanjuju i troškovi cijele operacije. Faktor opterećenja kod sustava izravnog korištenja topline je zapravo omjer prosječnog godišnjeg opterećenja i vršnog opterećenja sustava. S porastom tog faktora povećava se i ekonomska isplativost geotermalnog projekta. Kako bi se taj omjer popravio, vršna opterećenja se kod geotermalnih sustava često pokrivaju pričuvnim sustavom (dizalicom topline ili plinskim kotlom), što također smanjuje broj potrebnih bušotina. Za to će se navesti primjer gradića Lendave na sjeveroistoku Slovenije. Bušotina Le-2g duboka je 1500 m i daje 25 l/s vode temperature 66 °C. Koristi se za grijanje oko 55 000 m², a snaga potrebna za vršnu potrošnju (pri temperaturi od -15 °C) je 8.3 MW_t. Zavisno od temperature zraka, voda se u procesu sa 66 °C ohladi na minimalno 40 °C. Cijeli se sustav nalazi u podrumu poslovne zgrade Petrol Geoterma te je u potpunosti centraliziran, informatiziran i automatiziran tako da nema zaposlenika koji bi se njime bavili. Pri nižim temperaturama zraka uključuje se visokotemperaturna dizalica topline (COP = 6.4), dakle, dobiva se 6.4 puta više toplinske energije, nego što se troši električne energije. Tek druga pričuva su dva kotla na plin za dogrijavanje vode, no od instalacije dizalice topline to nije bilo potrebno nijednom. Što se tiče ekonomike grijanja na geotermalnu energiju, ona je pozitivna, ali ne osobito profitabilna. Poduzeće drži cijenu 10 % jeftinijom od najjeftinijeg energenta (u njihovom slučaju plina), iako su, neočekivano, istraživanja javnog mnijenja u samoj Lendavi pokazala da bi ljudi bili spremni platiti i jednako ili čak malo više za korištenje *zelene* energije.

3. CIJENE KAPITALA I GORIVA. Ekonomska održivost projekta se smanjuje s porastom kamata, odnosno cijenom kapitala. U studijama isplativosti životni ciklus projekta se obično uzima kao 20 godina ili manje, iako većina geotermalnih operacija traje mnogo duže (neke već i preko stoljeća: Larderello u Italiji, Wairakei na Novom Zelandu i Geysers u SAD-u). Isto tako, pri izračunima je uobičajeno držati porast cijena fosilnih goriva u konzervativnim granicama (relativno niske stope rasta), kada se vrši usporedba s geotermalnim resursima. Trgovina emisijama CO₂ i porez na ugljik se najčešće ne uključuju, iako bi to u današnje vrijeme bilo sasvim logično, osobito za države poput naše, kojima je emisija CO₂ utvrđena nakon što je država opustošena ratom i emisije kojih se moramo pridržavati su utvrđivane u točki povijesnog minimuma. Klasična je zamka kod planiranja geotermalnog projekta uzimanje dugačkog životnog ciklusa sustava uz visoku inflaciju cijena fosilnih goriva, čime se on na papiru čini izuzetno isplativim, da bi u stvarnosti poslovao na granici rentabilnosti. Ipak, u današnje je vrijeme trgovina emisijama stvarnost, globalni porez na ugljik pitanje vremena, a ne treba zaboraviti ni razne oblike poticaja za korištenje obnovljivih izvora energije.

Glavne komponente studije isplativosti geotermalnog projekta su:

1. dokazati postojanja resursa;
2. osigurati da je željena primjena kompatibilna s temperaturom i količinom dostupnog geotermalnog resursa;
3. utvrditi je li projekt ekonomski isplativ.

Obično se za utvrđivanje ekonomske isplativosti koristi metoda analize troškova tijekom životnog ciklusa projekta. Ona uključuje troškove kapitalnih ulaganja, godišnjeg održavanja, operativne troškove, troškove financiranja, poreze i naknade, osiguranje, ali i moguće olakšice kao što su poticaji za korištenje energije iz obnovljivih izvora i povoljnije financiranje takvih projekata. Analize ove vrste već su načinjene za Križevce, kao što je navedeno u drugom poglavlju ove studije.

6.2. PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

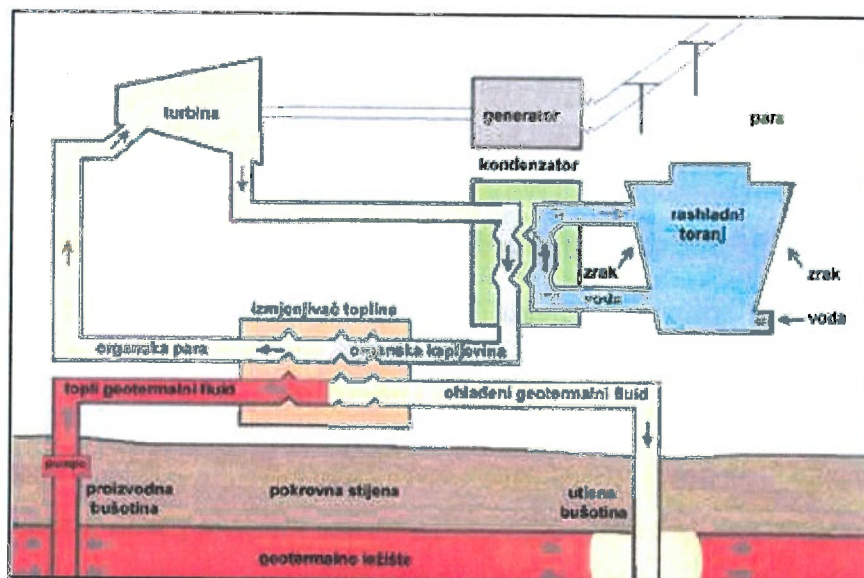
Električna struja je prvi put proizvedena korištenjem geotermalne vode početkom 20. stoljeća u Larderellu (Toskana, Italija) gdje je Piero Ginori Conti 1904. godine iskoristio

paru za pokretanje male parne turbine koja je napajala strujom pet žarulja. Već 1914. godine tamo je puštena u pogon prva komercijalna geotermalna elektrana instalirane snage 250 kW, a danas je u na području Larderello - Travale - Monte Amiata instalirana snaga 875.5 MW_e te proizvodi oko 5.7 TWh električne energije godišnje (Razzano & Cei, 2015). To je, za usporedbu, trećina ukupne godišnje potrošnje struje u Republici Hrvatskoj.

Kad se spominje proizvodnja električne struje iz geotermalnih izvora, potrebno je imati na umu ranije prikazani Línđalov dijagram (**Slika 25**). Naime, proizvodnja električne struje u više opisanim razmjerima moguća je samo u područjima vulkanske aktivnosti gdje se na površini ili jako blizu površine pojavljuju vode veoma visokih temperatura (do 250 °C). Na takvim lokacijama se za proizvodnju struje koriste klasična parna turbina i generator, s time da se koristi para nastala izravno od geotermalne otopine. Ta je tehnologija vrlo učinkovita i povoljna za okoliš, no izrazito ograničena na specifična mjesta na Zemlji.

Osim ovim tehnološkim procesom, električna struja se može proizvoditi i na druge načine koristeći geotermalne resurse nižih temperatura, no u znatno manjim količinama i znatno složenijim (i skupljim i manje rentabilnim) procesima. Struja se proizvodi na geotermalnim lokalitetima u rasponima temperatura od „vrlo niskih“ 67 °C pa sve do 170 °C (Lund i Boyd, 1999) i više, raznim tipovima binarnih geotermalnih elektrana. Binarne elektrane se kao oblik kaskadnog korištenja geotermalne energije često postavljaju i kao niži stupanj nakon korištenja vode u klasičnim geotermalnim elektranama.

Sam naziv „binarna“ elektrana proizlazi iz njezinog osnovnog obilježja: sastoji se od dvaju odvojenih ciklusa i ima dva odvojena radna fluida, a između njih se nalazi izmjenjivač topline (shematski prikaz na **Slici 26**).



Slika 26. Shematski prikaz geotermalne elektrane s binarnim ciklusom (izvor: <http://www.obnovljivi.com/geotermalna-energija>).

Prvi je krug geotermalni: voda iz geotermalne bušotine dolazi u sustav, prolazi kroz izmjenjivač toplote gdje predaje toplinu drugom krugu te se utiskuje natrag u podzemlje kroz drugu (utisnu/injekcijsku) bušotinu. U drugom se krugu/ciklusu, nalazi drugi radni fluid. To su različite tekućine čije je glavno obilježje nisko vrelište. Temperatura koja vodi nije dovoljna za stvaranje zadovoljavajućeg tlaka para koji bi mogao pokretati parne turbine, ovim je tekućinama dovoljna, te one isparavaju i njihova para pogoni parnu turbinu te generator. Nakon toga radni fluid prolazi kroz ekspanzijski ventil, pri ekspanziji se hladi i prelazi natrag u tekuće stanje, odnosno ciklus se može ponoviti.

Zavisno od izbora radnog fluida u drugom (dakle, proizvodnom) ciklusu takve elektrane, one imaju i različita imena. Izvedba binarne geotermalne elektrane najčešće uključuje tzv. ORC (Organski Rankineov Ciklus), koji se tako zove jer u proizvodnom ciklusu koristi razne organske tekućine (ugljikovodici i klorofluorouglijci/freoni). Osim ORC-a, u svijetu je izgrađeno i nekoliko geotermalnih elektrana koje koriste tzv. Kalina ciklus, u kojem je radni fluid mješavina vode i amonijaka. Na temelju termodinamičkih analiza Kalina ciklusa smatralo se da bi on za geotermalne resurse nižih temperatura mogao biti 30 do čak 50 % učinkovitiji, no to se u praksi nije obistinilo. Neka su mjerenja pokazala za nekoliko postotaka veću učinkovitost od ORC-a, dok su druga pokazala čak i manju učinkovitost.

U svojim radovima Guzović et al. (2010, 2012) analiziraju mogućnosti primjene ovih dvaju ciklusa proizvodnje električne energije na primjerima hrvatskih geotermalnih lokaliteta dubokih bušotina Velika Ciglena ($T = 175\text{ °C}$) kod Koprivnice i Lunjkovec-Kutnjak (125 °C) kod Legrada. Očekivano, za proizvodni proces pri 175 °C povoljnijim se pokazao ORC za 8 %. Međutim, i za proces pri 125 °C ORC je bio povoljniji za 0.7 % od Kalina ciklusa.

Zaključno, Kalina ciklus je mlada tehnologija koju koriste svega tri elektrane i to u vrlo hladnim klimatskim uvjetima, a zabilježeno je da su se za vrijeme pokretanja elektrana javljali i razni problemi. S druge strane, ORC je zrela tehnologija kojom se diljem svijeta proizvodi električna struja. Budući da se u termodinamičkim analizama pri postojećim temperaturama u Republici Hrvatskoj ORC pokazao isplativijim, a osobito uzimajući u obzir probleme kroz koje sve nove tehnologije neminovno prolaze dok se ne usavrše, autori više navedenih studija preporučili su upotrebu binarnih elektrana s ORC ciklusom za sve geotermalne resurse zadovoljavajućih temperatura u Republici Hrvatskoj.

U skladu s opisanim temperaturama koje omogućuju relativno rentabilnu proizvodnju električne struje korištenjem energije geotermalnih voda, vidljivo je da to ne bi trebala biti primalna orijentacija pri razmatranju korištenja geotermalne vode u Križevcima (kao što je i prethodno pokazala analiza Filipana i Dejanovića (2015), prikazano u pregledu postojećih istraživanja).

6.3. KORISTI ZA LOKALNU SREDINU

U usporedbi s ostalim obnovljivim izvorima energije, korištenje geotermalne energije ima znatno manji učinak na krajobraz, budući da je manji konzument prostora i uzrokuje manje vizualne degradacije, u usporedbi s, primjerice, vjetrenjačama ili solarnim panelima (Sullivan et al., 2014). To smanjuje utjecaj geotermalnih postrojenja na vizure, što je osobito značajno u prostorima očuvanog krajobraza (BLM, 2013).

Što se tiče korištenja prostora, moguće je da se pojavi sukob između razvoja geotermalnih projekata s jedne strane i turističkih i građevinskih projekata sa suprotne. Potonji često tvrde da buka, površinske instalacije i vodovi negativno utječu na cjelokupni dojam lokacije, no činjenica je da čak i turisti rado posjećuju geotermalne instalacije, i to u tisućama (Albertsson et al., 2010). Na Novom Zelandu i Islandu istraživanja su pokazala da

čak petina turista dolazi upravo iz razloga što žele posjetiti geotermalna postrojenja (Insights Team, 2014; Óladóttir, 2014).

Brojke pokazuju da geotermalna postrojenja, zavisno od vrste resursa koji koriste, zauzimaju veoma različite površine u prostoru: od veoma suptilnih binarnih elektrana (1.4 m²/MWe za elektrane instalirane snage 20 MWe), pa do čak pet puta više za visokotemperaturna geotermalna postrojenja (Goldstein et al., 2011). Za usporedbu, termoelektre na ugljen zauzimaju u prosjeku 30.2 m²/MWe, a vjetroelektre 11.1 m²/MWe (Lund & Boyd, 1999). Vidi se da je odnos proizvedene električne energije i zauzetog prostora za geotermalne elektrane zapravo vrlo povoljan, osobito ako se građevinski ili turistički projekti od početka planiraju za korištenje geotermalnog postrojenja, a ne prilagođavaju mu se naknadno.

Energetske uštede i povećanje održivosti mogu se postići i korištenjem geotermalnih voda najnižeg temperaturnog stupnja – subtermalnih i hipotermalnih (13 - 34 °C), koje se obično zanemaruju jer se njihova toplina ne može izravno koristiti za grijanje. Međutim, uz upotrebu odgovarajućih dizalica topline (Antonijević & Komatina, 2011) i ove vode mogu doprinijeti energetske samodostatnosti. Za to se koriste različite sheme „energije u mom dvorištu“ (*engl. Energy In My Yard, EIMY*), u kojima najčešće upravo geotermalna energija ima primarnu ulogu, dok se ostali obnovljivi izvori (fotonaponske ćelije ili vjetrogeneratori) koriste za stvaranje električne struje koja služi za pogon cirkulacijskih i toplinskih crpki (Niitsuma & Nakata, 2003).

Razvoj ruralnoga turizma na područjima izdvojenim iz velikih energetske mreže također može imati značajnu podršku u geotermalnoj energiji. Uz to dolazi i elektrifikacija udaljenih naselja ili izdvojenih turističkih kompleksa. Neki od primjera su Kina (Lund & Boyd, 1999), Meksiko (Sanchez-Velasco et al., 2003), Tajland (Lund & Freeston, 2005), ali i nama bliska Austrija (Legmann, 2003). Takvi lokaliteti koriste binarne elektrane instalirane snage od 50 kW do 5 MW.

Koristi geotermalnih projekata za lokalnu zajednicu najveće su u slučaju kaskadnog korištenja geotermalnog resursa, jer ono vodi ka diverzifikaciji lokalne ekonomske baze. Razvoj geotermalnih projekata u prosjeku izravno stvara 1.7 novih radnih mjesta na neodređeno vrijeme plus 6.4 radnih mjesta godišnje po MW instalirane snage. Uz to,

indirektno i inducirano zapošljavanje iznosi dodatnih 2.5 puta više nego izravno stvorena radna mjesta. U usporedbi s prirodnim plinom, koji u mnogim zemljama (i u Hrvatskoj) predstavlja glavnu konkurenciju, geotermalni projekt stvara četiri puta više radnih mjesta u fazi izgradnje te više nego deseterostruko u fazi rada i održavanja (Jennejohn, 2010). Osim što generira brojčano više radnih mjesta nego postrojenja koja koriste fosilna goriva, isto istraživanje je pokazalo da se radi o iznadprosječno plaćenim poslovima, te u 95 % slučajeva o radu na neodređeno vrijeme. To su podatci koje je također potrebno uzeti u obzir u vrijeme globalnog trenda smanjenja sigurnosti zaposlenja.

7. ODRŽIVO KORIŠTENJE GEOTERMALNIH VODA

7.1. OPĆE POSTAVKE ODRŽIVOGA KORIŠTENJA

Pojam održivog razvoja u široku je uporabu ušao 1987. godine, kada ga je u svom radu opisala komisija Ujedinjenih naroda pod vodstvom Gro Harlem Brundtland (WCED, 1987). Održivo korištenje bilo kojeg resursa podrazumijeva zadovoljavanje potreba trenutnih korisnika bez ugrožavanja mogućnosti budućih korisnika da namire svoje potrebe. O održivom se korištenju geotermalne energije posljednjih godina raspravlja učestalo i u znanstvenoj literaturi, dijelom stoga što je „održivost“ postala riječ koja se često pojavljuje u javnome diskursu u različitim kontekstima. Ipak, opća i logična definicija održivog korištenja geotermalnog resursa ne postoji te se pojam često koristi arbitrarno. Također, često dolazi do brkanja pojmova „obnovljivog“ i „održivog“, što dodatno usložnjava rasprave na ovu temu (bilo da se radi o geotermalnoj energiji ili kojem drugom resursu). Za sada najprihvaćeniju definiciju održive proizvodnje geotermalne energije iz pojedinog geotermalnog sustava dao je Axelsson (2001):

„Za svaki geotermalni sustav, i za svaki oblik proizvodnje geotermalne energije, postoji određena razina maksimalne proizvodnje energije (E_0) ispod koje je moguće održavati trajnu proizvodnju energije tijekom dugih vremenskih perioda (100 – 300 godina). Ukoliko je proizvodnja energije veća od E_0 , nije ju moguće održavati tijekom navedenog dužeg vremenskog perioda. Proizvodnja geotermalne energije koja je manja ili jednaka E_0 naziva se *održivom proizvodnjom*, dok se proizvodnja iznad E_0 naziva *prekomjernom proizvodnjom*.“

U gotovo svim projektima korištenja geotermalne energije diljem svijeta brzina eksploatacije topline iz podzemlja putem geotermalne vode kao medija je viša nego moguća brzina obnavljanja resursa putem toplinskog toka iz unutrašnjosti Zemlje (O'Sullivan et al., 2010). Ipak, geotermalni se resursi smatraju obnovljivima budući da bi se toplina obnovila nakon produženog perioda zatvaranja/nekorištenja, čija je duljina sumjerljiva periodu korištenja (istog je reda veličine). Primjerice, isti autori opisuju modeliranje u kojem se geotermalno polje koristi sto godina, a nakon prekida korištenja potrebno je četiri puta

toliko da bi se temperatura geotermalnog ležišta vratila na početne razine. Do istog je zaključka proučavanjem povijesti korištenja geotermalnih polja diljem svijeta i provedbom numeričkih simulacija došao i doajen geotermije, prof. emeritus Ladislaus Rybach (2003): „Stoga se geotermalni resursi mogu smatrati obnovljivima na vremenskim skalama tehnoloških i društvenih sustava, dok se zalihe fosilnih goriva (ugljena, nafte i plina) obnavljaju isključivo na skali geološkog vremena.“

Unatoč navedenom, višedesetljetna eksploatacija geotermalne energije na mnogim lokalitetima pokazuje da je održavanjem crpnih količina ispod određenih razina moguće koristiti geotermalno ležište između sto i tri stotine godina bez značajnih smanjenja u temperaturi i izdašnosti resursa. Zahvaljujući dugim nizovima podataka prikupljenim tijekom višedesetljetnog rada mnogih i raznovrsnih geotermalnih polja diljem svijeta razvijeni su modeli koji na zadovoljavajući način mogu provesti simulacije dugotrajne proizvodnje, kao i obnavljanja topline u geotermalnim ležištima (Axelsson, 2010).

Istraživanjem studija slučajeva dugotrajne eksploatacije geotermalnih polja diljem svijeta te modeliranjem scenarija, došlo se do nekoliko varijanti kojima je moguće održavati tlak i temperaturu geotermalnog vodonosnika na zadovoljavajućim/željenim/potrebim razinama:

1. Stalnom proizvodnjom ispod maksimalnih mogućih crpnih količina;
2. Proizvodnjom koja se povećava u koracima;
3. Isprekidanom prekomjernom proizvodnjom uz povremenu obustavu crpljenja;
4. Izmjenom razdoblja prekomjerne proizvodnje i razdoblja sa smanjenim crpnim količinama.

Također, rasprave o održivoj proizvodnji geotermalne energije se kompliciraju ako se u proračun uzme i utiskivanje pothlađene geotermalne vode natrag u vodonosnik. Naime, time se svakako doprinosi očuvanju tlaka u ležištu u većoj ili manjoj mjeri (zavisno od karakteristika ležišta), ali također postoje bojazni u vidu (i) prodora hladne fronte od utisne prema proizvodnoj bušotini/bušotinama te (ii) inducirane seizmičnosti, koja se obično pojavljuje ukoliko je potrebno utiskivanje pod velikim tlakom, a posljedica je promjena u pnom tlaku i polju stresa u podzemlju.

Budućnost proizvodnje geotermalne energije zasigurno će biti uvjetovana i čimbenicima vezanima uz zaštitu okoliša. Taj je aspekt također obrađivan u literaturi te na generalnoj razini postoji određeni broj mogućih situacija nepoželjnih za okoliš (i okolinu) koji su ovdje sumarno prikazani kroz **Tablicu 2**.

Tablica 2

Potencijalni učinci na okoliš pri izravnom korištenju geotermalne energije; vjerojatnost i težina posljedica

UČINAK	VJEROJATNOST ^b	TEŽINA POSLJEDICA ^b
Onečišćenje zraka ^a	N	S
Onečišćenje površinskih voda ^a	S	S
Onečišćenje podzemlja ^a	N	S
Slijeganje terena	N	N/S
Visoke razine buke	V	N/S
Erupcija bušotine	N	N/S
Konflikti s kulturnim i arheološkim dobrima	N/S	S/V
Socioekonomski problemi	N	N
Odlaganje krutog otpada	S	S/V

Izvor: Rybach, 2003

^a onečišćenje može biti kemijsko i/ili termalno

^b N = niska; S = srednja; V = visoka

Kao što je vidljivo iz gornje tablice, vjerojatnosti onečišćenja zraka i podzemlja, slijeganja terena (supsidencije), erupcije bušotine i socioekonomskih problema su niske pri izravnom korištenju geotermalne energije te je predviđena težina posljedica u skladu s time također niska do srednja. Srednju razinu vjerojatnosti pri ovakvom modalitetu korištenja imju onečišćenje površinskih voda i problemi s odlaganjem krutog otpada te je težina mogućih posljedica sukladno tome srednja do visoka. Najveća pak je vjerojatnost onečišćenja bukom. Unatoč tome, posljedice nisu toliko izražene, budući da se bilo kakvo proizvodno postrojenje obično nalazi izvan gusto naseljenih zona, poglavito zbog svoje veličine.

Jasno je da svaka intervencija u prirodni ambijent dovodi do promjena u stanju okoliša. Osobito je to slučaj kada se fluid (geotermalna voda) koji se prirodno nalazi u dubokom podzemlju i nema kontakta sa suvremenim hidrološkim ciklusom i okolišem općenito, tehničkim zahvatom dovodi na površinu radi privođenja korištenju. No, kao što je opisano

u šestom poglavlju ove studije, svaki vid opskrbe energijom dovodi do promjena u okolišu te u usporedbi s drugim izvorima geotermalna energija dobro stoji čak i kada se uspoređuje s ostalim obnovljivim izvorima energije, a osobito u usporedbi s fosilnim gorivima, kako po pitanju mogućeg onečišćenja, tako i po pitanju potrošnje prostora (kao jednog od najvrjednijih resursa) i društvenog učinka postrojenja. Sve su to razlozi koji govore u prilog tvrdnjama da je ogromni geotermalni potencijal (kako je prikazano ranije u **Tablici 1**) mogući obnovljivi izvor energije diljem planeta, koji uz to može doprinijeti smanjenju emisije stakleničkih prinova i ublažavanju njihovog učinka na klimatske promjene. Kako takav status geotermalnih postrojenja ne bi bio narušen, svako se korištenje geotermalne energije, bilo da se odvija u naseljenom ili nenaseljenom prostoru, mora brižno planirati, uzimajući u obzir prednosti i nedostatke sa stanovišta samog resursa, kao i sa stanovišta utjecaja na ostale komponente okoliša i okoline.

7.2. ODRŽIVO KORIŠTENJE KRIŽEVAČKOGA GEOTERMALNOG VODONOSNIKA

Kao što je opisano u prethodnom potpoglavljju, održivo korištenje svakoga geotermalnog vodonosnika valja razmatrati kroz prizmu mogućnosti obnavljanja vodonosnika u pogledu fluida i topline, kao i kroz prizmu zbrinjavanja geotermalne vode jednom kada se ona dovede na površinu.

Uzimajući u obzir činjenicu da će se rijetko koji energetska sustav koristiti cijelo stoljeće (najčešće će to biti nekoliko desetljeća), u slučaju Križevaca razumno je pretpostaviti da bi se sustav mogao uz umjereno crpljenje koristiti više desetljeća. Na to jasno ukazuju ishodi provedenih numeričkih simulacija prikazanih u petom poglavlju ovoga izvješća. Vidljivo je iz **Slike 12** da sa svim crpnim količinama za koje su provedene numeričke simulacije (2, 5, 10 i 15 l/s) nakon pola godine dolazi do uspostavljanja kvazistacionarnog stanja, dakle, razina se podzemne vode ne snižava unatoč stalnom crpljenju. Simulacije su provedene za desetogodišnje razdoblje, no provedba bi dugoročnijih simulacija bila nepotrebna jer je vidljivo da sniženje stagnira na određenoj dubini. Ovaj je podatak ohrabrujuć u svjetlu činjenice da u Križevcima trenutno postoji samo jedna bušotina, Kža-1, opremljena kao proizvodna. Dakle, kada bi proizvodnja na ovoj bušotini započela i prije negoli se nađu

sredstva za bušenje druge bušotine, to prema ovim pokazateljima ne bi ugrozilo održivost proizvodnje.

No, čak i kada bi to bila u potpunosti dokazana činjenica, a ne rezultat simulacija, pojavljuje se drugi problem: zbrinjavanje pothlađene geotermalne vode. Zavisno od toga u kojem bi se termalnom režimu koristila geotermalna voda, na kraju tog procesa na površini bi se nalazila visokomineralizirana voda (ukupne mineralizacije 2-3 g/l prema prikazu dosadašnjih analiza koje je sumirao Čepelak, 2009), čija bi temperatura također možda još uvijek bila previsoka za ispuštanje u prirodni recipijent.

Prema Čepelaku (2009) i Karan et al. (2012) voda iz vodonosnika nabušenog u bušotini Križevčanka-1 po više parametara ne zadovoljava zakonske preduvjete za upuštanje u prirodni recipijent prema važećem Pravilniku o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda (NN 26/2020), dakle vjerojatno bi je bilo potrebno zbrinjavati putem uređaja za pročišćavanje i sustava javne odvodnje, što zahtijeva određene kapacitete (možda i prethodno pročišćavanje), kao i sredstva. Iz toga proizlazi da bi i s aspekta održivog korištenja geotermalnog vodonosnika i s aspekta zbrinjavanja otpadne geotermalne vode bilo povoljnije imati utisnu bušotinu.

U skladu s mogućim štetnim događajima za okoliš i okolinu pri izravnom korištenju geotermalnih voda prikazanima u **Tablici 2**, ovdje će se isti prokomentirati koristeći dostupne podatke o bušotini Kža-1.

Što se tiče *onečišćenja zraka*, moguće ga je razmotriti iz analiza prikazanih u Škrlec (2009). Prema tom izvješću na prostoru same bušotine za vrijeme testiranja 2008. godine zabilježena je prisutnost metana (CH_4), sumporovodika (H_2S) i ugljikovog dioksida (CO_2), dok je na lokaciji gradskoga bazena, kamo se voda transportirala radi hlađenja, tek povremeno zabilježena prisutnost CO_2 , no u minimalnim koncentracijama koje nisu štetne. Otplinjavanje iz geotermalne vode zavisi od tlaka pod kojim se voda nalazi, te se u slučaju korištenja zatvorenog sustava cirkulacije geotermalne vode (u kojem se ona crpi na površinu, prolazi kroz izmjenjivač topline te se potom utiskuje natrag u vodonosnik) učinak može minimalizirati. Iako je vjerojatnost za pojavu ovog negativnog učinka na okoliš niska, posljedice su okarakterizirane kao srednje teške, jer je jasno da bi onečišćenje zraka dovelo

do, za početak, otpora lokalnog stanovništva, a potom i do mogućih posljedica u slučaju većih emisija.

Onečišćenje površinskih voda ima srednju vjerojatnost, kao i srednje teške posljedice. Kao što je ranije navedeno, ovaj bi negativni učinak svakako bilo poželjno izbjeći bušenjem utisne bušotine. Time bi se zatvorila petlja korištenja geotermalnog resursa te bi se izbjegli negativni utjecaji kako na kvantitativno stanje geotermalnog vodonosnika, tako i na kvalitativno stanje špovršinskih vodnih tijela. Prema spomenutom važećem pravilniku (NN 26/2020) moguće je privremeno izdavanje vodopravne dozvole za ispuštanje u okoliš otpadnih voda iznad propisanih količina i graničnih vrijednosti emisija, koje ne smije trajati duže od pet godina. To bi moglo biti prijelazno rješenje za situaciju u Križevcima, dok se ne pronađe izvor financiranja i izbuši utisna bušotina.

Onečišćenje podzemlja ima nisku vjerojatnost, a srednje teške posljedice. Do onečišćenja može doći prvenstveno u fazama bušenja i/ili revitalizacije bušotina, kada se one tretiraju različitim kemikalijama. Primjerice, prilikom revitalizacije bušotine Kža-1 za potrebe pokusnoga crpljenja 2008. godine bušotina je tretirana otopinom pirofosfata radi kvalitetnijeg čišćenja pribušotinske zone (Škrlec, 2009). Ta je otopina kasnije nakon 20 sati čišćenja izbačena iz bušotine. No, pri ovakvim operacijama svakako je moguće da dođe do neočekivanih i neželjenih događaja. Također, ukoliko voda ima korozivna svojstva ili padom tlaka dolazi do precipitacije nekih minerala, moguće je da se (ponovno zavisno od strojarske izvedbe sustava) moraju koristiti određeni kemijski inhibitori koji također predstavljaju onečišćivala, bilo kod ispuštanja u površinski recipijent ili kod utiskivanja u podzemlje.

Do *slijeganja terena* može doći pri prekomjernom crpljenju iz zatvorenog vodonosnika. To znači da je crpna količina prevelika s obzirom na transmisivnost i uskladištenje vodonosnika te se dio pora (šupljina u vodonosnoj stijeni) isuši pa se time omogućuje kompakcije sedimenta ili stijene. Tako se smanjuje volumen stijene u podzemlju te, ukoliko se radi o velikim iznosima, može doći do uništavanja opreme u podzemlju ili, u slučaju da proces uznapreduje, i do slijeganja terena na površini. Vjerojatnost ovakvih događaja je niska, a posljedice su niske do srednje težine. Ovakve se pojave češće očekuju kod pliće smještenih vodonosnika, vodonosnika koji nisu u potpunosti litificirani ili kod izuzetno

velikih crpnih količina koje su u nesrazmjeru sa svojstvima vodonosnika. S obzirom na do sada provedena istraživanja bušotine Kža-1 i na litološki sastav naslaga, ne očekuju se pojave ovoga tipa.

Visoke razine buke često prate energetska postrojenja, nezavisno od toga koji im je pogonski energent. Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, zabilježene su slične pritužbe i za geotermalna postrojenja. Svakako, buka je znatnija ukoliko se radi o geotermalnim elektranama, a ne sustavima izravnog korištenja topline. U svakom slučaju, rad crpki jest bučan, no one se koriste i u cijelom nizu postrojenja koja se smještaju u naseljima.

Erupcija bušotine predstavlja akcidentni događaj na bušotini. Kako bi se mogućnost iste svela na minimum, montiraju se erupcijski uređaji (*engl. blowout preventer*) čija je funkcija da u slučaju nekontrolirane erupcije u bušotini registriraju povećanje tlaka te momentalno zatvore ili, u ekstremnom slučaju, presijeku kanal bušotine. Time se štiti postrojenje, i radnici na postrojenju, te oprema i okoliš. Takav je uređaj montiran na bušotini Kža-1 (Škrlec, 2009) te ga je, naravno, potrebno u predviđenim intervalima nadzirati i servisirati. Vjerojatnost ovakvog neželjenog događaja je niska, no zbog mogućih velikih šteta uobičajeno se provode preventivne mjere zaštite kako je opisano.

Konflikti s kulturnim i arheološkim dobrima najčešće su prisutni na lokalitetima gdje postoje i prirodna izvorišta termalne vode. Budući da su ih ljudi koristili od davnina, područja često imaju veliku arheološku vrijednost te može doći do konflikta između valorizacije kulturnih dobara i energetskeg potencijala neke lokacije. Budući da u predjelu Ratarne u Križevcima voda prirodnim putem nije izlazila na površinu te ne postoje naznake da bi se radilo o arheološkom nalazištu, ova se vrsta problema u Križevcima ne očekuje. No, kako takva problematika izgleda mogu posvjedočiti mnoge toplice u Hrvatskoj (npr. Varaždinske, Daruvarske, Topusko).

Socioekonomski problemi obuhvaćaju cijeli niz mogućih situacija čija je vjerojatnost niska, a posljedice, iako nisu osobito teške, mogu biti neugodne i usporiti proces razvoja resura. U tom je pogledu važno biti proaktivan te provoditi kampanje informiranja lokalnog stanovništva u svim fazama realizacije geotermalnog projekta, bilo da se radi o fazama istraživanja ili proizvodnje. Vrlo je nepoželjno da se pojavi situacija u kojoj stanovništvo ne

raspolaže dovoljnom količinom znanstveno utemeljenih podataka pa dolazi do nepovjerljivosti prema cijelom projektu. U tom su smislu važne kampanje informiranja zainteresirane javnosti putem konvencionalnih medija (tiskovni mediji, radio, televizija), društvenih mreža te održavanjem informativnih događanja i/ili posjeta samim lokacijama istraživanja i proizvodnje. Najbolji je put za dobivanje društvenog pristanka u svakom slučaju pravodobno i utemeljeno informiranje najšireg kruga zainteresiranih dionika.

Što se tiče problema *odlaganja krutog otpada*, vjerojatnost njegove pojave je srednja, a učinak srednje do visoke težine. Važno je da se odlaganje te vrste otpada pomno planira u fazi pripreme projekta, da se ispituju količine otpada koje će se stvarati, kao i njegova klasifikacija. Zbrinjavanje nekonvencionalnog otpada može biti financijski i logistički zahtjevno. Važno je da se i taj aspekt projekta dobro isplanira kako ne bi zbog nerješavanja doveo hvalevrijedan projekt korištenja obnovljivog izvora energije u poziciju da s druge strane predstavlja onečišćivača okoliša. Prema dostupnim podacima o situaciji u Križevcima nije očekivano da bi zbrinjavanje krutog otpada moglo biti problem projekta korištenja geotermalne energije.

8. ZAKLJUČCI I PREPORUKE

Ciljevi ovog istraživanja bili su provedba novih neinvazivnih geofizičkih istraživanja metodom magnetotelurike na prostoru Grada Križevaca kako bi se prikupile nove spoznaje o građi podzemlja te izrada multidimenzionalne studije koja obuhvaća interpretaciju podataka provedenih geofizičkih istraživanja, kao i proučavanje modaliteta održivog korištenja križevačkoga geotermalnog vodonosnika, kako po pitanju održavanja dobrog kvantitativnog stanja vodonosnika, tako i po pitanju zaštite okoliša.

Geofizička su istraživanja provedena u rujnu 2020. godine te opisana u izvješću o provedbi prve faze ovoga projekta (Borović, 2020). U ovoj se studiji predstavlja obrada i interpretacija prikupljenih podataka, te su oni stavljeni u kontekst postojećih istraživanja različitih aspekata geotermalnog resursa identificiranog u Križevcima (geoloških, hidrogeoloških, hidrodinamičkih, hidrokemijskih, balneoloških, termodinamičkih i tehnoeekonomskih).

Iz opće geološke građe Panonskog bazenskog sustava i njegovog dijela, Dravske depresije, identificirani su potencijalni geotermalni vodonosnici. Na temelju magnetotelurskih istraživanja prikupljene su spoznaje o raspodjeli električnih otpornosti u podzemlju koje ukazuju na prisustvo određenih litologija i/ili zasićenost medija fluidima. Nakon digitalizacije i ponovne analize podataka o pokusnim crpljenjima iz 1989. i 2008. godine proveden je niz numeričkih simulacija kako bi se utvrdilo najvjerojatnije ponašanje vodonosnika tijekom sljedećih deset godina u slučaju crpljenja i crpljenja s utiskivanjem. Razmotreni su mogući načini korištenja geotermalne vode, kao i okolišni aspekti korištenja geotermalnih voda u općem smislu i u slučaju konkretne bušotine Križevčanka-1.

Nova su magnetotelurska istraživanja dovela do interesantnih spoznaja na nekoliko lokacija. Nažalost, podatci sonde kraj najbolje istraženog objekta, bušotine Kža-1, zbog značajnog EM šuma nisu bili prikladni za prijenos spoznaja o vrijednostima otpornosti na druge lokacije. S druge strane, snimka je odlične kvalitete na lokaciji druge (tehnički napuštene) bušotine, Ki-1, te je dobro poslužila za uspostavljanje korelacija između litologije i električnih otpornosti u podzemlju. Najinteresantnija nova spoznaja vezana je

uz lokaciju moguće buduće bušotine, KžaGT-2 (prema Jankov i Bilić, 2020). Magnetotelurskim istraživanjima došlo se do iste spoznaje koju su kolege izveli iz postojećih istraživanja, s time da je magnetotelurskim istraživanjima pretpostavljena velika debljina vodonosnika na toj lokaciji te je moguće konstatirati da bi ona bila povoljna za izradu buduće bušotine.

Numeričke su simulacije ukazale da bi korištenje geotermalnog vodonosnika bilo održivije u kvantitativnom smislu, ukoliko bi se koristio na način da postoji i proizvodnja i utiskivanje geotermalne vode (simulacije pokazuju manja sniženja kod scenarija s utiskivanjem geotermalne vode). Također, važno je napomenuti da se kod simulacija dugoročnih scenarija (deset godina) postiže kvazistacionarno stanje nakon otprilike pola godine crpljenja, za količine od 2 l/s, ali i za 5 l/s. To znači da bi bilo moguće pokrenuti pokusnu proizvodnju i u međuvremenu tražiti izvore financiranja za izradu druge bušotine koja bi se opremila kao utisna.

Temperature geotermalnog resursa kao najlogičnije rješenje nameću izravno korištenje topline. Kako bi ono bilo što isplativije, naravno, poželjno je pronaći odgovarajući broj korisnika koji bi toplinu proizvedene geotermalne vode koristili u kaskadnom režimu (bili bi poredani i sustavu u skladu sa sniženjem temperature resursa). Budući da je dovođenje geotermalne vode na površinu kako bi se privela energetsom korištenju financijski zahtjevnija operacija, kad je ona jednom dovedena na površinu, cilj je da se njen energetski potencijal iskoristi u najvećoj mogućoj mjeri, kao što se opisuje u šestom poglavlju ovog izvještaja.

Jedan je od važnih aspekata korištenja geotermalne vode u svakom slučaju, a osobito kada se radi o urbaniziranom prostoru kao u razmatranom slučaju, utjecaj na okoliš i okolinu. Budući da se radi o visokomineraliziranoj vodi, a moguće je da u prvo vrijeme zbog ograničenog broja korisnika ne bi bila u sustavu korištenja ni dovoljno ohlađena, s aspekta hidrogeološke situacije ili situacije u ležištu, ali i s okolišnog aspekta, najpovoljnije bi bilo istraživati mogućnosti za izradu utisne bušotine. U međuvremenu, postoji vjerojatnost da bi se određeno vrijeme (do najviše pet godina) pothlađena geotermalna voda mogla ispuštati i u prirodni recipijent. Takva je situacija dugoročno nepoželjna te se stoga ni u kom slučaju ne preporučuje.

Osim utjecaja na fizički okoliš, u razmatranje je svakako potrebno uključiti i društvenu okolinu u kojoj se odvija istraživanje i korištenje geotermalnog resursa. Kako kratkoročno i/ili dugoročno ne bi dolazilo do nesporazuma i nesuglasja s lokalnom zajednicom, preporučuje se pravodobno i znanstveno utemeljeno informiranje zainteresirane javnosti o svim provedenim i planiranim radovima putem širokog spektra komunikacijskih kanala.

Nakon provedenih istraživanja i dalje postoje aktivnosti koje bi se mogle provesti radi kvalitetnijeg budućeg razvoja resursa. Prije svega, preporučuje se što prije početi s istraživanjima za lociranje i bušenje utisne bušotine. Budući da se radi o značajnim financijskim izdancima, Naručitelju se preporučuje da sredstva pokuša pribaviti korištenjem Europskih strukturnih i investicijskih fondova (ESIF). Od istraživanja se, osim magnetotelurskih, detaljnije na potencijalnoj lokaciji utisne bušotine, preporučuje i uključivanje 3D seizmičkog refleksijskog istraživanja na tom užem prostoru. Kombinacija ovih dviju geofizičkih metoda predstavljala bi odgovarajuće predradnje za odabir točne lokacije utisne bušotine. Također, u slučaju nastavka magnetotelurskih istraživanja preporučuje se dulje vrijeme akvizicije podataka, do tri noći po točki, kako bi se prikupio dovoljan broj podataka i na nižim frekvencijama (kojima se dobivaju informacije o većim dubinama), budući da je značajan dio podataka morao biti odbačen u fazi obrade zbog prisutnosti elektromagnetskog šuma koji je svojstven urbaniziranim područjima.

Numeričke su se simulacije u ovom istraživanju pokazale kao vrlo koristan alat po pitanju utvrđivanja kretanja razine podzemne vode u vodonosniku prilikom crpljenja sa i bez utiskivanja pothlađenog fluida natrag u vodonosnik. Ipak, kod provedbe budućih detaljnijih simulacija potrebno je, uz modeliranje toka fluida, modelirati i prijenos topline, osobito ukoliko se razmatra izrada utisne bušotine, jer je jasno da utiskivanje pothlađene vode može dovesti do smanjenja temperature termalne vode u vodonosniku (pa i u crpnoj bušotini). Također, iako korišteni program omogućuje modeliranje u trodimenzionalnom prostoru, to u ovoj studiji nije bilo moguće provesti za prostor Križevaca zbog nedostatka brojnih potrebnih ulaznih podataka. Kako bi se to moglo učiniti u budućnosti potrebni preduvjeti su (i) detaljna 3D geološka rekonstrukcija prostora; (ii) hidraulička i termalna parametrizacija svih članova strukturnog sklopa te (iii) poznavanje graničnih uvjeta sustava. Budući da takvih informacija nema u postojećoj dokumentaciji, rezultat svakog složenijeg

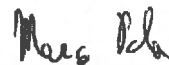
modeliranja bi, s postojećim podacima, više bio matematički konstrukt, negoli reprezentacija stvarne situacije u podzemlju.

Kao što je vidljivo iz opsežnih već provedenih istraživanja i dokumentacije, te želje za korištenjem geotermalnog resursa, kao i za njegovim temeljitim istraživanjem, Naručitelj posjeduje znatno iskustvo u upravljanju projektima, privlačenju projektnog financiranja te komunikaciji s lokalnom zajednicom. Zahvaljujući tim komparativnim prednostima mišljenja smo da će resurs geotermalne vode biti stavljen u funkciju održivog korištenja u dogledno vrijeme, kao i da će se usporedno s time nastaviti potrebni istražni radovi za daljnji razvoj geotermalnog resursa u Križevcima.

Zagreb, 30. studenoga 2020.



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



Dr. sc. Marco Pola, dipl. ing. geol.

LITERATURA

- Albertsson, A., Blondal, A., Barkarson, B. H., Jonsdottir, S. & Thors, S. G. (2010): *Environmental impact assessment of geothermal projects in Iceland*. U: Lund, J. & Freeston, D. (urednici): *Proceedings of World Geothermal Congress. Bali, Indonesia, April 25-29th 2010*, pdf 0252.
- Antonijević, D. & Komatina, M. (2011): *Sustainable sub-geothermal heat pump heating in Serbia*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3534-3538.
- Axelsson, G. (2010): *Sustainable geothermal utilization – Case histories; definitions; research issues and modelling*. *Geothermics*, 39, 283-291.
- Axelsson, G., Gudmundsson, Á., Steingrímsson, B., Pálmason, G., Ármannsson, H., Tulinus, H., Flóvenz, Ó.G., Björnsson, S. & Stefánsson, V. (2001): *Sustainable production of geothermal energy: suggested definition*. *IGA-News*, 43, 1–2.
- Bilibajkić, P., Mladenović, M., Mujagić, S. & Rimac, I. (1979): *Tumač za gravimetrijsku kartu SFR Jugoslavije – Gouguerove anomalije – 1:500.000, Geofizika i Zavod za geološka i geofizička istraživanja, Beograd*.
- BLM (2013): *Best practices for reducing visual impacts of renewable energy facilities on BLM-administered lands*. U.S. Bureau of land reclamation, Cheyenne, Wyoming.
- Borović, S. (2020): *Geofizičko istraživanje neinvazivnom metodom magnetotelurike u Gradu Križevcima, 13 str., Hrvatski geološki institut, Zagreb*.
- Borović, S. & Marković, I. (2015): *Utilization and tourism valorisation of geothermal waters in Croatia*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 52-63.
- Cloetingh, S., Bada, G., Matenco, L., Lankreijer, A., Horvath, F. & Dinu, C. (2006): *Modes of basin (de)formation, lithospheric strength and vertical motions in the Pannonian – Carpathian system: Inferences from thermo - mechanical modeling*. *Memoirs*, 32, 207-221, Geological Society, London.
- Csontos, L. & Nagymarosy, A. (1998): *The Mid-Hungarian line: A zone of repeated tectonic inversions*. *Tectonophysics*, 297, 51-71.
- Čepelak, R. (2009): *Balneološko mišljenje o mogućnosti upotrebe termomineralne vode Križevčanka-1. Škola narodnog zdravlja „Andrija Štampar“ – Odjel za balneoklimatologiju, 17 p.*
- Diersch, H.-J. G. (2014): *FEFLOW Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media, Springer, 1018 p.*
- Dolton, G. L. (2006): *Pannonian Basin Province, Central Europe (Province 4808) – Petroleum Geology, Total Petroleum Systems, and Petroleum Resource Assessment (Report No. Bulletin 2204–B)*. U. S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- EFLA (2009a): *Geothermal well preliminary testing procedure Križevcima Croatia. 6 p.*
- EFLA (2009b): *Implementation of energy efficiency measures - with district geothermal heating in the city of Križevcima, Croatia - Preliminary report, 13 p.*
- EIHP (1998): *Geoen – Program korištenja geotermalne energije, Energetski institut “Hrvoje Požar”, 124 str., Zagreb.*

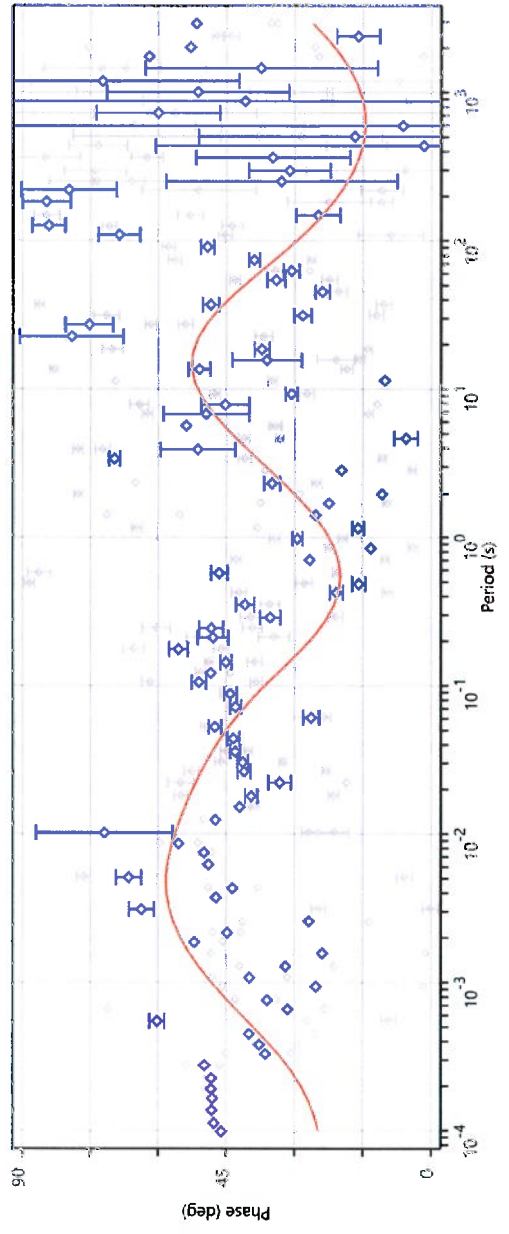
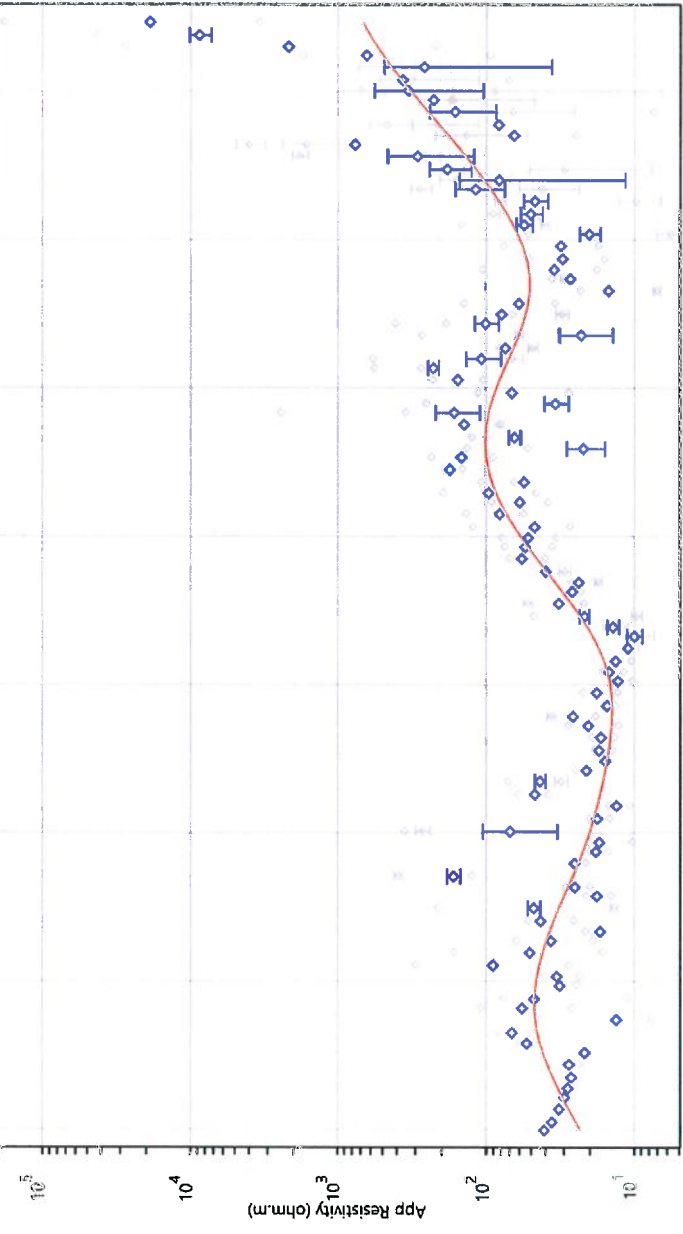
- Europska komisija (2019): *Europski zeleni plan*, https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_hr#documents [pristup 23. ožujka 2020.]
- Fodor, L., Csontos, L., Bada, G., Györfi, I. & Benkovics, L. (1999): *Tertiary tectonic evolution of the Pannonian Basin system and neighbouring orogens: A new synthesis of palaeostress data*. *Special Publications*, 156(1), 295–334, Geological Society, London.
- Fridleifsson, I. B. (2003): *Status of geothermal energy amongst the world's energy sources*. *Geothermics*, 32, 379-388.
- Filipan, V. & Dejanović, I. (2015): *Thermodynamic analysis of low temperature geothermal energy sources in Križevci and Molve*. 41 p.
- Geofizika i Zavod za geološka i geofizička istraživanja (1972): *Gravimetrijska karte SFRJ, list Zagreb, Zagreb, Beograd*.
- Goldstein, B., Hiriart, G., Bertani, R., Bromley, C., Gutierrez-Negrin, L., Huenges, E. et al. (2011): *Geothermal energy*. U: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y. et al. (urednici): *IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation*. Cambridge University Press, Cambridge-New York, 401-436.
- Gudmundsson, J. S. & Lund, J. W. (1987): *Direct uses of Earth heat*. U: Economides, M. & Ungemach, P. (urednici): *Applied Geothermics*, John Wiley & Sons, Chichester, 189-217.
- Guzović, Z., Lončar, D. & Ferdelji, N. (2010): *Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia by means of geothermal energy*. *Energy*, 35, 3429-3440.
- Guzović, Z., Majcen, B. & Cvetković, S. (2012): *Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia from medium-temperature geothermal resources*. *Applied Energy*, 98, 404-414.
- Hećimović, I. & Šimunić, A. (1986): *Istražna bušotina na termalnu vodu Križevčanka-1 (Kža-1) (lociranje bušotine, rezultati bušenja, geološki odnosi)*. Geološki zavod, Zagreb, 20 p.
- IEA (2019): *Key world energy statistics*, IEA, Pariz.
- Insights Team (2014): *Highlights of international visits to New Zealand*. Tourism NZ, Wellington.
- IPCC (2014a): *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (ur.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Ujedinjeno Kraljevstvo i New York, NY, SAD, 1132 p.
- IPCC (2014b): *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (ur.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Ujedinjeno Kraljevstvo i New York, NY, SAD, 688 p.
- Jennejohn, D. (2010): *Green jobs through geothermal energy*. U. S. Geothermal Energy Association, Washington, D. C.
- Jurković, A. (1962): *Geološki izvještaj za duboku bušotinu Križevci-1 (Ki-1)*, 5 p., INA Naftaplin – Geološka dokumentacija.
- Karan, M., Maljković, D., Vorkapić, V., Zidar, M., Živković, S. (2012): *Razvojna studija i studija izvodljivosti grijanja javnih objekata geotermalnom energijom u Gradu Križevcima*. Energetski institut Hrvoje Požar, 81 p.

- Kruk, B., Dedić, Ž., Hećimović, I., Kruk, Lj., Kolbah, S., Škrlec, M., Crnogaj, S. & Kovačević-Galović, E. (2014): Rudarsko – geološka studija Koprivničko – križevačke županije. Hrvatski geološki institut, 487 p.
- Legmann, H. (2003): *The Bad Blumau geothermal project: a low-temperature, sustainable and environmentally benign power plant. Geothermics, 32, 497-503.*
- Líndal, B. (1973): *Industrial and other applications of geothermal energy. U: Líndal, B. (urednik): Industrial and other applications of geothermal energy, UNESCO, Pariz, 135-148.*
- Lucić, M. (1985): *Geološka osnova za istražnu bušotinu za termalnu vodu u Križevcima; Križevčanka-1 (Kža-1), 3 p., INA Naftaplin – Geološka dokumentacija.*
- Lučić, D., Saftić, B., Krizmanić, K., Prelogović, E., Britvić, V., Mesić, I. & Tadej, J. (2001): *The Neogene evolution and hydrocarbon potential of the Pannonian Basin in Croatia. Marine and Petroleum Geology, 18, 133-147.*
- Lučić, G. & Bakale, B. (2009): *Mogućnosti korištenja geotermalne energije u Gradu Križevci – konceptijsko rješenje, HEP ESCP d.o.o. i FACTUS d.o.o., 17 p.*
- Lund, J. W. & Boyd, T. (1999): *Small geothermal power project examples. Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, 20, 9-26.*
- Lund, D. & Freeston, D. H. (2005): *Direct application of geothermal energy: 2005 worldwide review. Geothermics, 34, 691-727.*
- Maretić, S. (2010): *KRIŽEVČANKA (Kža) – 1 Geotermalna bušotina, ležišta i potencijal. Mogućnosti korištenja geotermalne energije. PPT prezentacija i poster, skup „Križevci sutra“, INA Naftaplin.*
- Niitsuma, H. & Nakata, T. (2003): *EIMY (Energy In My Yard) – a concept for practical usage of renewable energy for local sources. Geothermics, 32, 767-777.*
- NN 26/2020: *Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda, MZOE.*
- Óladóttir, O. D. (2014): *Tourism in Iceland in figures – April 2013. Icelandic tourist board, Reykjavík.*
- O'Sullivan, M., Yeh, A. & Mannington, W. (2010): *Renewability of geothermal resources. Geothermics, 39, 314-320.*
- Pavičić, I., Rukavina, D., Matoš B. & Tomljenović, B. (2019): *Interpretation of the tectonic evolution of the western part of the Sava Depression: structural analysis of seismic attributes and subsurface structural modeling. Journal of Maps, 15(2), 733-743.*
- Prelogović, E., Saftić, B., Kuk, V., Velić, J., Dragaš, M., & Lučić, D. (1998): *Tectonic activity in the Croatian part of Pannonian Basin. Tectonophysics, 297, 283-293.*
- Ratschbacher, L., Frisch, W., Linzer, H.-G. & Merle, O. (1991): *Lateral extrusion in the Eastern Alps, Part II: Structural analysis. Tectonics, 10, 257-271.*
- REGEA & REA-SJEVER (2014): *Economic modelling of low-temperature geothermal energy – Case Study Križevci and Molve. 27 p.*
- Rogner, H. H. (2000): *Energy Resources. U: Goldemberg, J. (urednik): World energy assessment – energy and the challenge of sustainability, UNDP, New York, 135-166.*
- Rybach, L. (2003): *Geothermal energy: sustainability and the environment. Geothermics, 32, 463-470.*

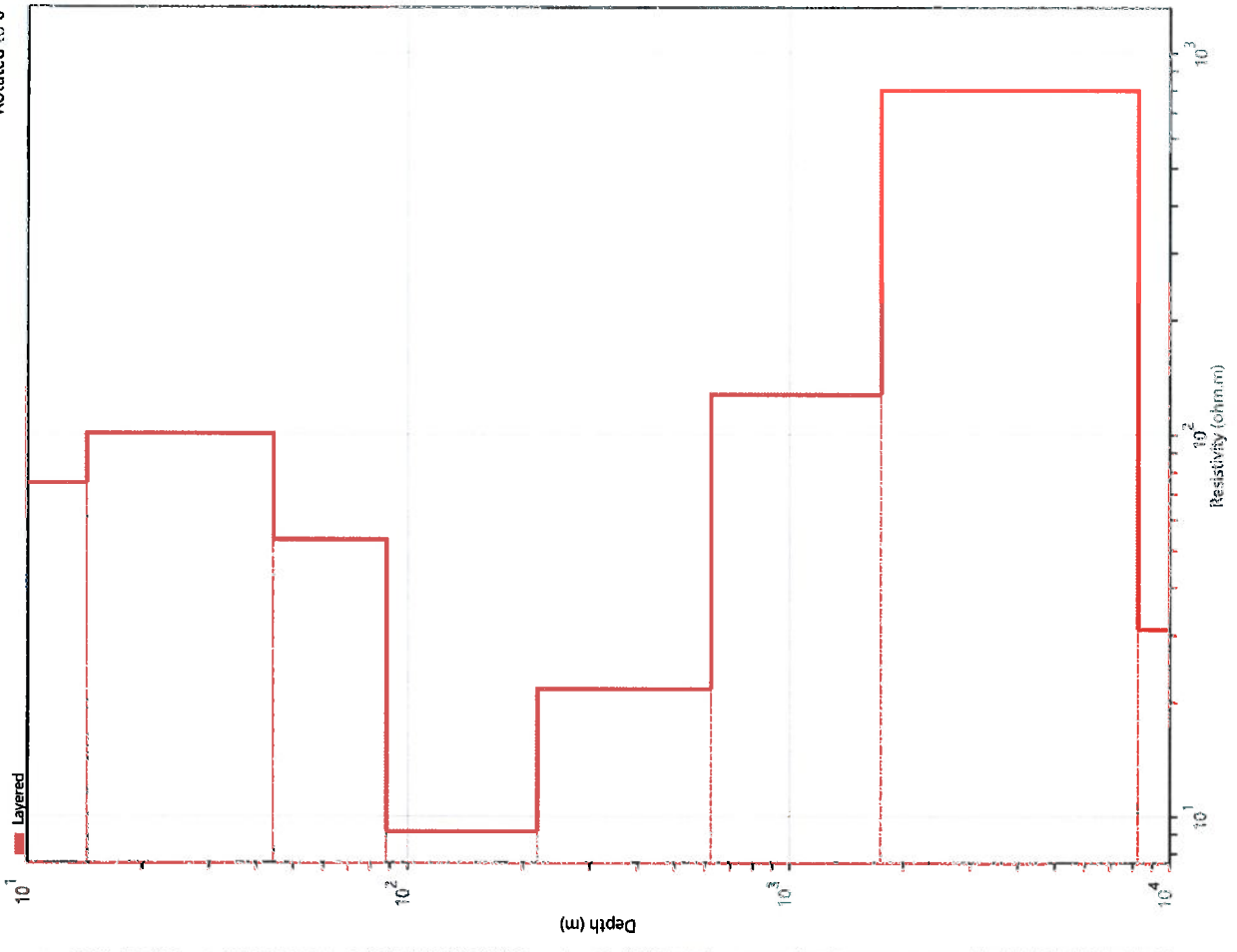
- Saftić, B., Velić, J., Szatano, O., Juhasz, G. & Ivković, Ž. (2003): *Tertiary subsurface facies, source rocks and hydrocarbon reservoirs in the SW part of the Pannonian Basin (northern Croatia and south-western Hungary)*. *Geologia Croatica*, 56(1), 101–122.
- Sanchez-Velasco, R., Lopez-Diaz, M., Mendoza, H. & Tello-Hinojosa, R. (2003): *Magic at Maguarichic*. *Geothermal Resources Council Bulletin*, 1, 67-70.
- Schmid, S. M., Bernoulli, D., Fügenschuh, B., Matenco, L., Schefer, S. Schuster, R., ... Ustaszewski, K. (2008): *The Alpine - Carpathian - Dinaridic orogenic system: Correlation and evolution of tectonic units*. *Swiss Journal of Geosciences*, 101(1), 139–183.
- Sullivan, R. G., Kirchler, L. B., Lahti, T., Roche, S., Beckman, K., Cantwell, B. et al. (2014): *Wind turbine visibility and visual impact threshold distances in Western landscapes*. *US Department of Energy, Washington D.C.*
- Šarin, A. (1990): *Tehnički izvještaj o pokusnom crpljenju u 1989. godini termomineralne bušotine Kža-1 u križevcima*, Institut za geološka istraživanja.
- Šimunić, An., Hećimović, I. & Avanić, R. (1990a): *Osnovna geološka karta RH 1:100.000 list Koprivnica L 33-70*. Hrvatski geološki institut.
- Šimunić, An., Hećimović, I., Avanić, R. & Šimunić, Al. (1990b): *Osnovna geološka karta RH 1:100.000. Tumač za list Koprivnica L 33-70*. Hrvatski geološki institut, 94 p.
- Škrlec, M. (2009): *Izvještaj o rezultatima proizvodnog ispitivanja i hidrodinamičkog mjerenja u bušotini Križevčanka-1 (Kža-1)*, 27 p., INA Industrija nafte d.d.
- Šumanovac, F. (2007): *Geofizička istraživanja podzemnih voda*. Sveučilište u Zagrebu, 244 p.
- Tari, G., Horváth, F. & Rumpler, J. (1992): *Styles of extension in the Pannonian Basin*. *Tectonophysics*, 208(1–3), 2.
- 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.)
- Ustaszewski, K., Schmid, S. M., Fügenschuh, B., Tischler, M., Kissling, E. & Spakman, W. (2008): *A map-view restoration of the Alpine - Carpathian - Dinaridic system for Early Miocene*. *Swiss Journal of Geosciences*, 101(1), 273–294.
- Ustaszewski, K., Kounov, A., Schmid, S.M., Schaltegger, U., Kren, E., Frank, W. & Fügenschuh, B. (2010): *Evolution of Adria-Europe plate boundary in northern Dinarides: From continent-continent collision to back arc extension*. *Tectonics*, 29, 139 -183.
- Velić, J. (2007): *Geologija ležišta nafte i plina*. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko - geološko - naftni fakultet, Zagreb, 342 p.
- Velić, J., Weisser, M., Saftić, B., Vrbanac, B. & Ivković, Ž. (2002): *Petroleum-geological characteristics and exploration level of the three Neogene depositional megacycles in the Croatian part of the Pannonian basin*. *Nafta*, 53 (6–7), 239–249.
- Vojić, I. (1987): *Jurković, A. (1962): Izvještaj o izvedbi istražno-eksploatacionog bunara na termalnu vodu Kž-a-1 u Križevcima*, 11 p., INA Naftaplin – Geološka dokumentacija.
- Vugrinec, J. (1962): *Geološka osnova za duboku bušotinu Križevci-1 (Ki-1)*, 2 p., INA Naftaplin – Geološka dokumentacija.
- World Commission on Environment and Development (WCED)(1987): *Our Common Future*, UN, 247 p.

PRILQ 1: SONDA DHMZ

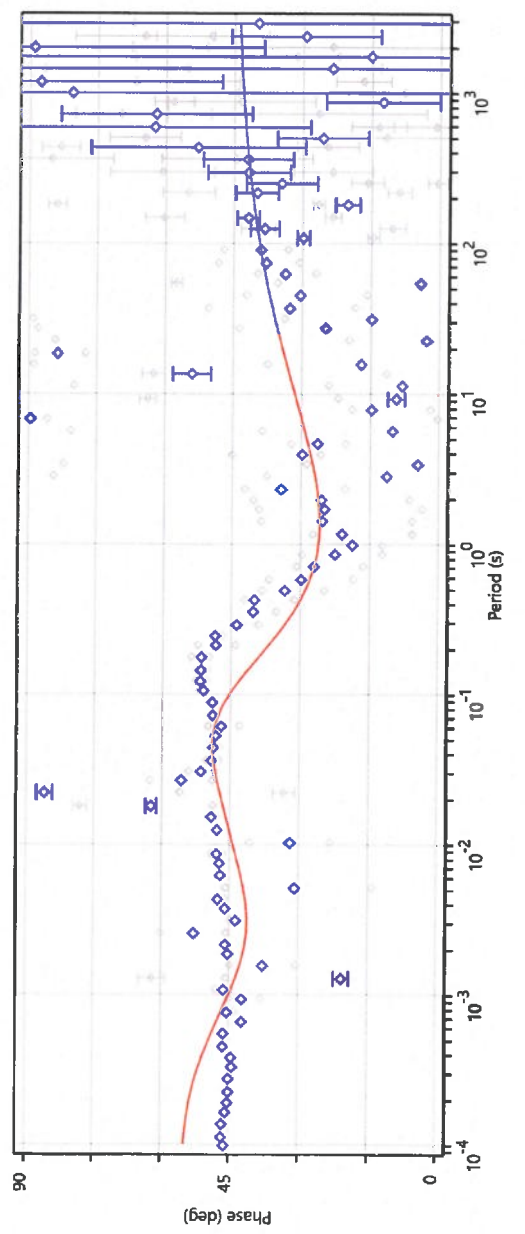
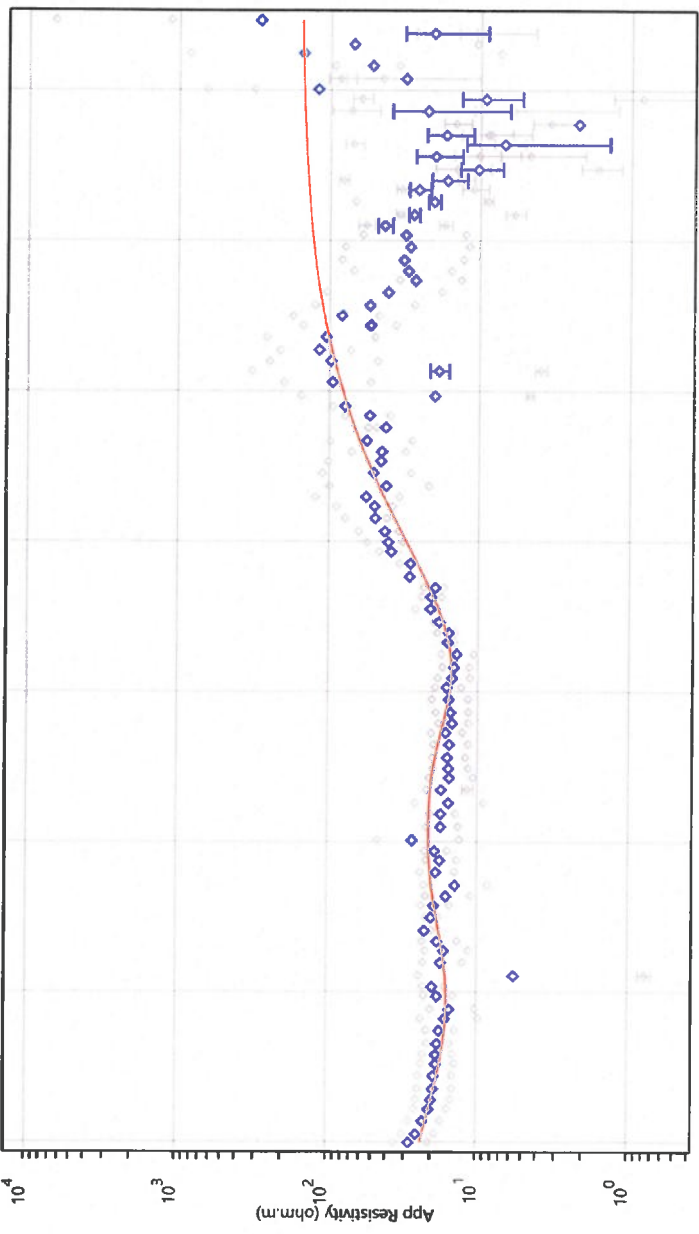
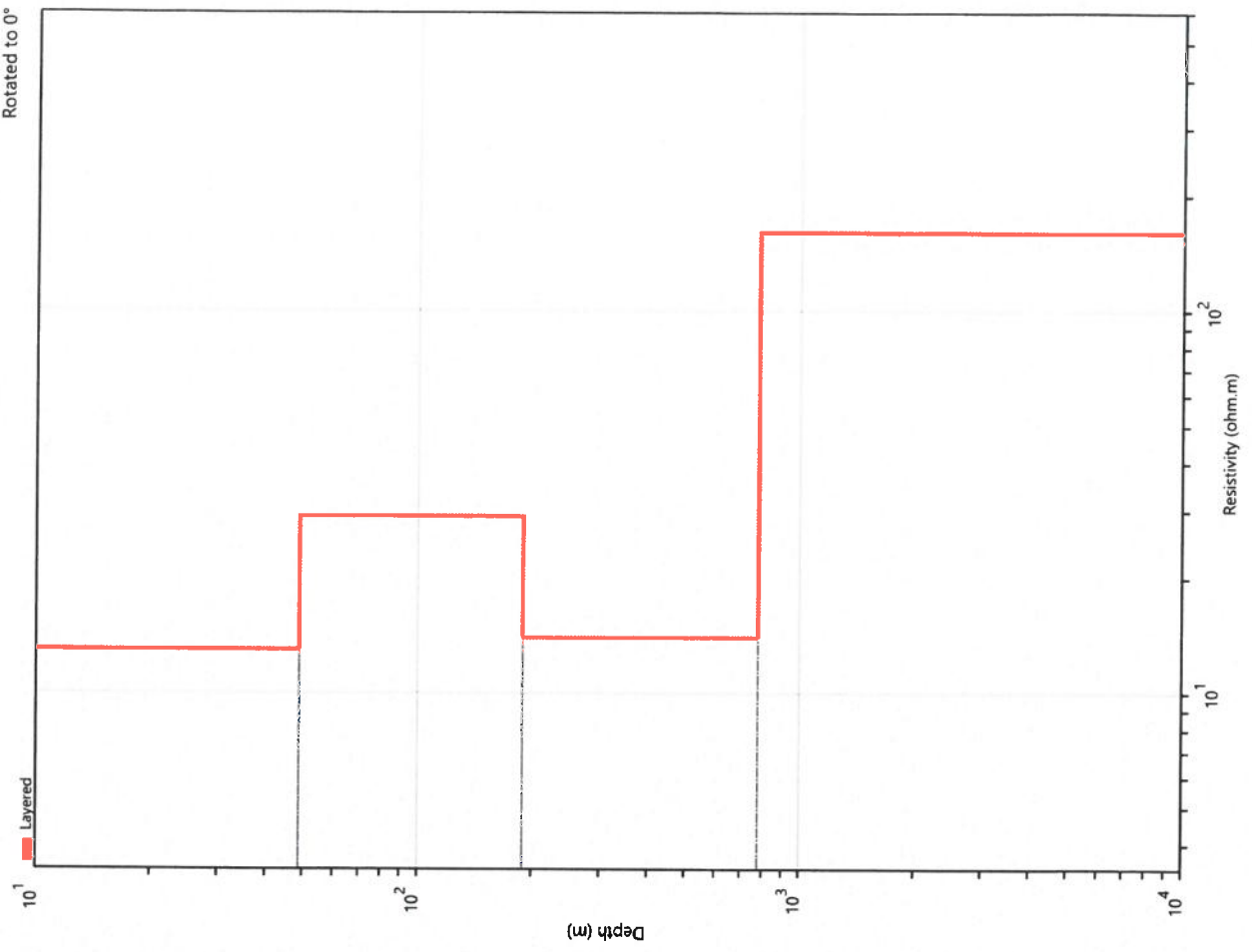
Observed Curve: INV



Rotated to 0°

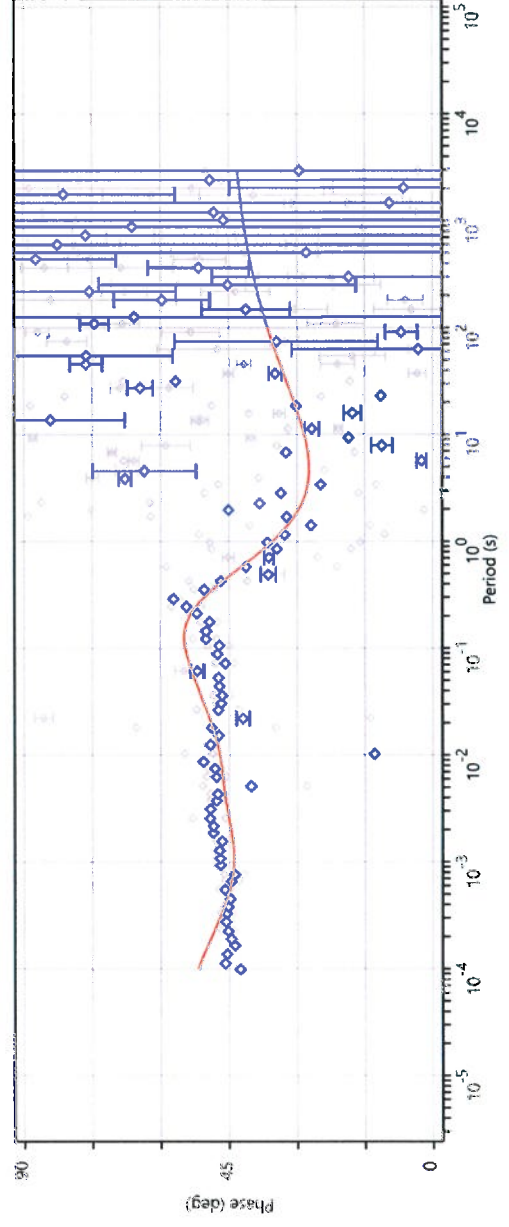
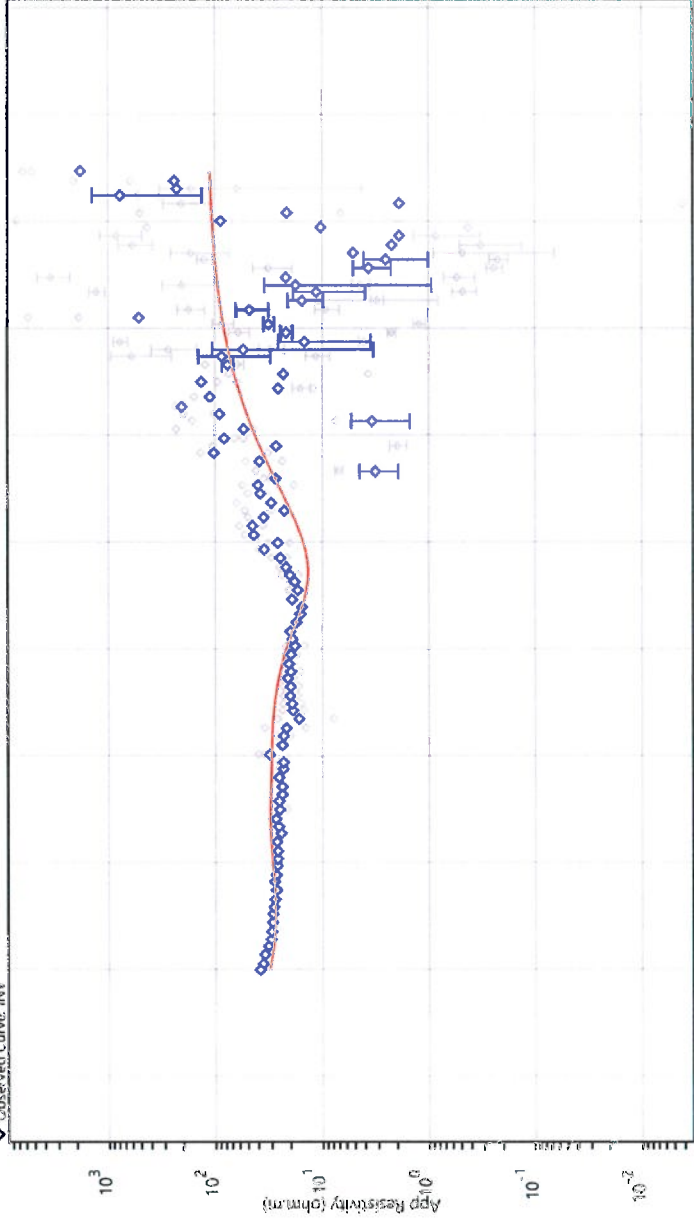


PRIOLOG 2: SONDA VGU

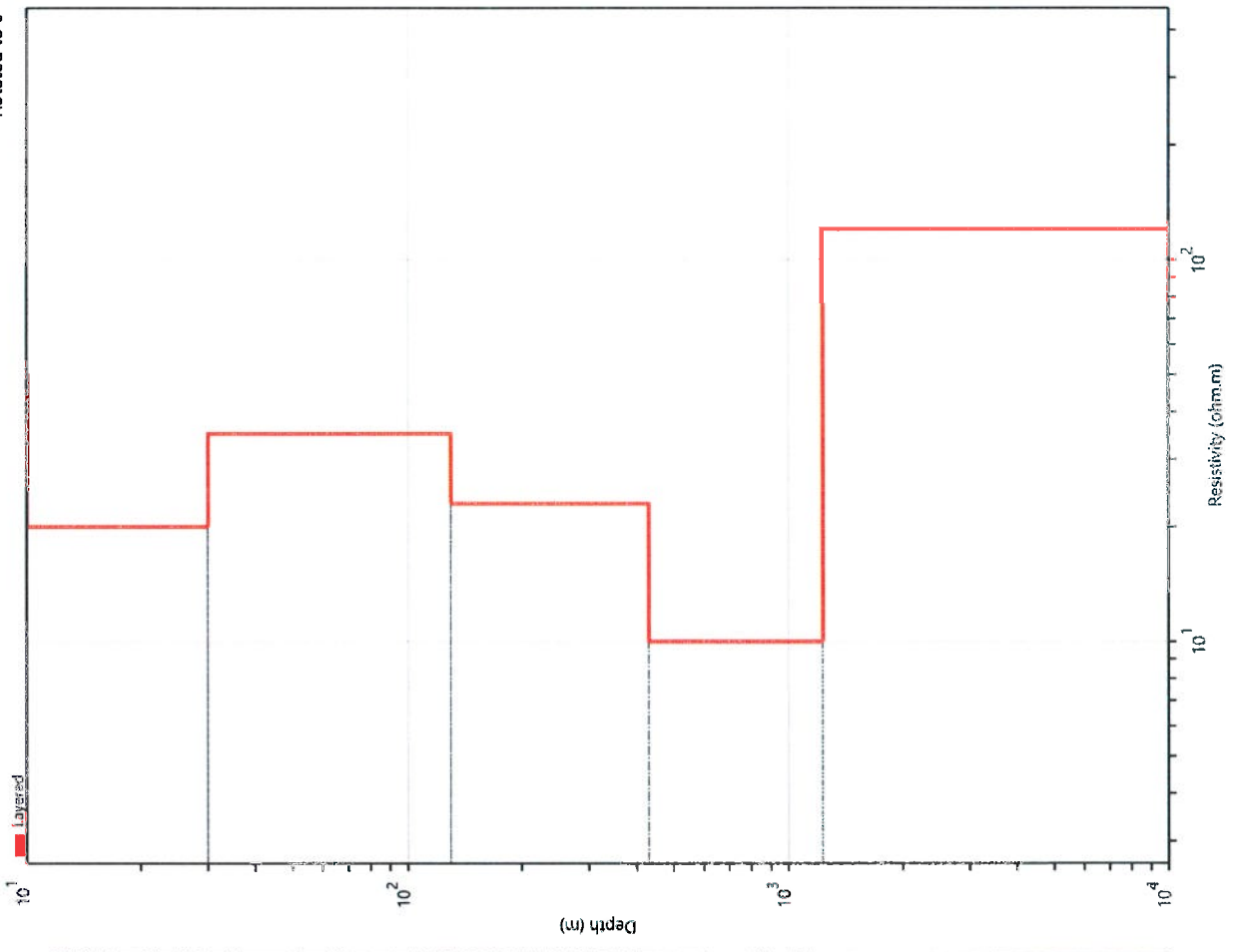


PRILQ 3: SONDA FOK

◇ Observed Curve: INV



Rotated to 0°



PRILOG 4: SONDA KL
Observed Curve: INV

