

Proizvodne značajke hidrotermalnog ležišta Legrad

Fuček, Hrvoje

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:298185>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

**PROIZVODNE ZNAČAJKE HIDROTERMALNOG
LEŽIŠTA LEGRAD**

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2021.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva
za 20.09.2021. u 9 sa
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu
Varaždin, 06.09.2021.

Predsjednik
ispitnog povjerenstva:

izr. prof. dr. sc. Saša Korac

Članovi povjerenstva

- 1) Prof. dr. sc. Miroslav Golub
- 2) Dr. sc. Dragana Dogačić
- 3) Prof. dr. sc. Josip Merez
- 4) izr. prof. dr. sc. Anita Pitek Siračić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

HRVOJE FUČEK

**PROIZVODNE ZNAČAJKE HIDROTERMALNOG
LEŽIŠTA LEGRAD**

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:

HRVOJE FUČEK



MENTOR:

Prof. dr. sc. MIROSLAV GOLUB

NEPOSREDNI VODITELJ:

Dr.sc. Dragana Dogančić



Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet



ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: HRVOJE FUČEK
Matični broj: 285 - 2019./2020.
Smjer: UPRAVLJANJE VODAMA

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

PROIZVODNE ZNAČAJKE HIDROTERMALNOG LEŽIŠTA LEGRAD

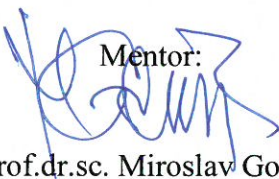
Rad treba sadržati:

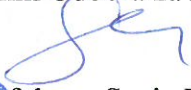
1. Uvod
2. Geološke pretpostavke
3. Geološka građa
4. Općenito o geotermalnoj energiji
5. Geotermalni izvor Legrad
6. Web ankete
7. Diskusija i zaključci
8. Literatura

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 09.03.2021.

Rok predaje: 06.09.2021.

Mentor:

Prof.dr.sc. Miroslav Golub

Neposredni voditelj: *Dragana Dogančić*
Dragana Dogančić
Predsjednik Odbora za nastavu:

Izv.prof.dr.sc. Sanja Kovač



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom **PROIZVODNE ZNAČAJKE HIDROTERMALNOG LEŽIŠTA LEGRAD**, rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom prof. dr. sc. Miroslava Goluba.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 06.09.2021.

IME I PREZIME

Hrvoje Fuček



(Vlastoručni potpis)

IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

Proizvodne značajke hidrotermalnog ležišta Lejvac

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 01.09.2021.

prof. dr.sc. Miroslav Golub
(Mentor)


(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

Dravska depresija ima veliki potencijal za iskorištavanje geotermalne energije zbog izrazito povišenog geotermalnog gradijenta koji je iznad svjetskog prosjeka. U radu se objašnjava kako je geološka prošlost utjecala na razvoj povišenog geotermalnog gradijenta u Dravskoj depresiji. Također, definira se geotermalna energija i navode se razlozi zbog kojih se smatra energijom budućnosti. Na području Općine Legrad postoji ležište geotermalne energije i planira se izgradnja geotermalne elektrane. U radu se objašnjava način njezinoga izvođenja, proces rada i navode se posljedice njezine izgradnje.

KLJUČNE RIJEČI: dravska depresija, geotermalna energija, geotermalna elektrana
Legrad

ABSTRACT

The Drava Depression has great potential for the exploitation of geothermal energy due to a markedly elevated geothermal gradient that is above the world average. The paper explains how the geological past influenced the development of the elevated geothermal gradient in the Drava Depression. It also defines geothermal energy, and states reasons for which it is considered the energy of the future. There is geothermal energy in the area of the Municipality of Legrad and a geothermal power plant is going to be built. The paper describes the way it is going to be built, how it is going to operate and what the consequences of its construction are going to be.

KEYWORDS: Drava depression, geothermal energy, Legrad Geothermal Power Plant

SADRŽAJ:

1. UVOD	1-1
2. GEOLOŠKE PRETPOSTAVKE	4
3. GEOLOŠKA GRAĐA	6
3.1 Geološka građa Dravskog bazena	7
3.1.1 Mezozoik - srednji - gornji trijas - T _{2,3}	8
3.1.2 Neogen - gornji baden - gornji panon	9
3.1.3 Kvartar-Pleistocen.....	10
3.2 Tektogeneza	10
3.2.1 Strukturna jedinica Legradski prag	12
3.2.2 Vrste mineralnih sirovina u izdvojenim litostratigrafskim jedinicama	12
4. OPĆENITO O GEOTERMALNOJ ENERGIJI.....	14
4.1 Geotermalni resursi	14
4.1.1 Klasifikacija geotermalnih resursa prema istraženosti ležišta	15
4.1.2 Kategorizacija prema vrsti geotermalnog ležišta	15
4.2 Termička svojstva ležišnih stijena i fluida	17
4.2.1 Toplinska vodljivost (λ)	18
4.2.2 Specifična toplina (c)	19
4.2.3 Specifična obujamska toplina (c_p).....	19
4.2.4 Temperaturna provodljivost (a)	19
4.2.5 Geotermalni gradijent.....	20

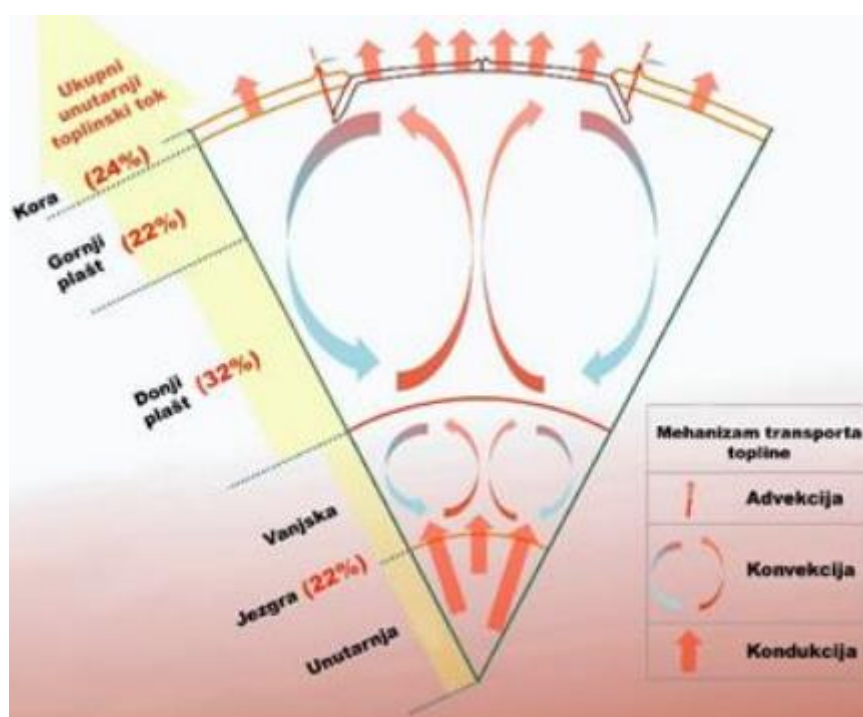
4.2.6	Toplinski tok.....	22
4.3	Zakonski okviri.....	23
5.	GEOTERMALNI IZVOR LEGRAD.....	24
5.1	Organski Rankineov ciklus.....	26
5.2	Tehnologija/proces u geotermalnoj elektrani.....	28
6.	WEB ANKETE.....	32
6.1	Legrad.....	32
6.2	Ferdinandovac.....	34
7.	DISKUSIJA I ZAKLJUČCI.....	36
8.	LITERATURA.....	39

1. Uvod

Toplina je prijelazni oblik energije, a geotermalna energija je energija sadržana u Zemljinoj unutrašnjosti. Geotermalnom energijom može se smatrati energija koja se dobiva iz Zemljine unutrašnjosti, a ta se energija može koristiti u energetske ili u druge svrhe (medicinske) [1].

Geotermalna energije je obnovljiva i fosilna nuklearna energija koja je nastala raspadanjem prirodnih radioaktivnih elemenata (uran, torij i kalij) koji se nalaze u Zemljinoj unutrašnjosti [1].

Najveći dio geotermalne energije raspodijeljeno je u Zemlji, te se od ukupnog volumena Zemlje (prikaz slika 1.) u plaštu nalazi 54 %, zatim 24 % zauzima energija nastala u kori dok se 22 % zauzima energija nastala u jezgri [3].



Slika 1. Raspodjela topline unutar planeta Zemlje i mehanizmi prijenosa topline (Dye, 2012 i Aravelo et al., 2009).

Prvi dokazi o korištenju geotermalne energije seže u 10 000 godinu, gdje su Indijanci koristili izvore vruće vode za kuhanje, kupanje i za grijanje. U antičko doba, Grci i Rimljani koristili su kupke grijane izvorima tople vode, a prvi primjer geotermalnog grijanja prostora zabilježen je u 1. stoljeću nove ere u rimskom gradu Pompeji. Takva uporaba geotermalne energije bila je ograničena jer se koristila samo na mjestima izvora tople vode i pare. Prvi sustav daljinskog grijanja na svijetu izgrađen je u francuskom gradu Chaudes–Aignes u 14. stoljeću, no tek krajem 19. stoljeća sve više gradova počinje koristiti potencijal geotermalne energije u gospodarske svrhe [4].

Najveći i najpoznatiji geotermalni sustav grijanja nalazi se u Reykjavíku na Islandu, gdje 99 % zgrada, kućanstava te industrijskih postrojenja grije svoje prostorije iz geotermalnog izvora, a geotermalni izvor koriste od 1930-tih godina. Prvo postrojenje za dobivanje električne energije iz geotermalnog izvora izgrađeno je 1904. godine u gradu Larderellu (Italija). Princ Piero Ginori Conti je koristio vodenu paru iz geotermalnog izvora za pogon male turbine koja je omogućila rad četiri žarulje, a to je ujedno bila i prva geotermalna elektrana koja je proizvodila električnu energiju. Do 1975. godine u Larderellu se proizvodilo do 405 MW električne energija, a danas ukupno proizvodi oko 10 % svjetske proizvodnje električne energije dobivene iz geotermalne energije što iznosi 4800 GWh godišnje. Za usporedbu, proizvedena količina energije bi zadovoljila četvrtinu ukupne godišnje potrošnje električne energije Hrvatske [5].



Slika 2. Princ Piero Ginori Conti i mala turbina pogonjena parom iz geotermalnog izvora, Lardarello (preuzeto s <https://www.obnovljivi.com/>)

Danas sve više upotrebljavamo obnovljive izvore energije pa se tako geotermalna energija koristi za proizvodnju električne energije, za zagrijavanje prostora, staklenika, bazena, u medicinske svrhe, zatim u ribnjačarstvu i u različitim industrijskim procesima te se iskorištava pomoću geotermalnih toplinskih crpki. Kapaciteti instaliranih snaga geotermalne energije su oko 7000 MW_e, što je nešto manje od 0,5 % ukupne proizvedene električne energije. Godine 1973. dolazi do ubrzanog porasta cijene nafte i sve većih zahtjeva za očuvanje okoliša te iz tog razloga raste primjena geotermalne energije [1]. Tako je u zadnjih par godina došlo do sve veće primjene geotermalne energije u Republici Hrvatskoj. Od različitih vrsta toplinskih dizalica pa sve do izgradnje postrojenja geotermalne elektrane. Jedno takvo postrojenje geotermalne elektrane iz projektirano je na području općine Legrad gdje traju istražna bušenja i ispitivanja.

2. Geološke pretpostavke

Određeni dijelovi Podravine leže uz zonu intenzivnijeg geotermalnog pritoka, a geološka građa omogućava stvaranje ležišta te akumuliranje u dubokim vodnim tijelima (DVT) (Deep Water Bodies - DWB) koji su povoljni za proizvodnju električne energije i korištenje u toplinarstvu [6].

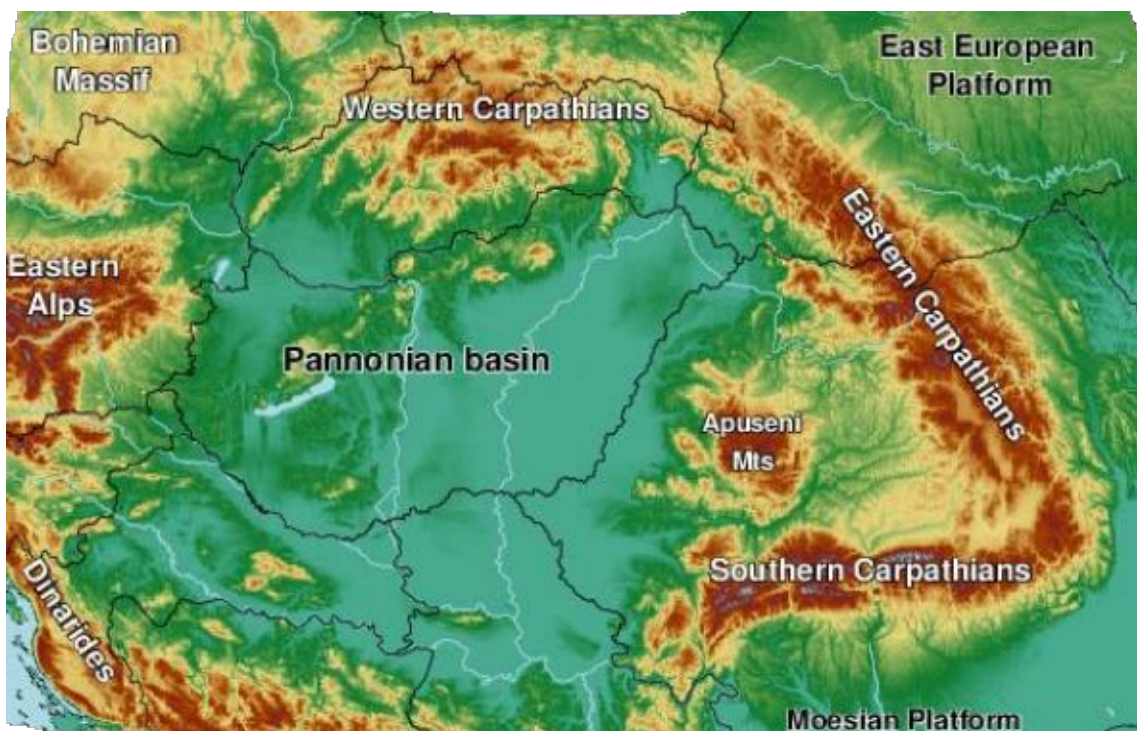
Nestabilna i stanjena kora podno Panonskog bazena rezultira povećanjem regionalnog geotermalnog toka (80 do 100 mW/m²). Dubina Mohorovičićevog diskontinuiteta na dijelovima Panonskog bazena kreće se između 20–30 km, što je znatno manje od dubine u drugim dijelovima Europe gdje se Moho sloj nalazi na dubinama 35-40 km. Zbog zadebljanja kore u orogenim zonama, kao npr. u Dinaridima ili na prostoru sjevernog Urala, dubine do Moho sloja mogu iznositi 45-50 km. Geotermalni tok može biti dodatno pojačan konvekcijskim gibanjima fluida. Geološka građa igra veliku ulogu kod određivanja je li neki prostor perspektivan za iskorištavanje geotermalne energije ili ne. Uzevši to u obzir, kao i vrijednosti geotermalnog toka, najperspektivniji prostor za korištenje geotermalne energije u Hrvatskoj je panonski prostor. Trans-granični projekt između Hrvatske i Mađarske započet je 2006. godine gdje su određena važnija geotermalna duboka vodna tijela (DVT) između tih dviju država. Izradom tog projekta izdvojena su dva tipa vodonosnika - vodonosnici sa sekundarnom pukotinsko-kavernoznim šupljinama pretežno karbonatne građe odnosno krški i porozni vodonosnici s primarnom intergranularnom šupljikavošću u konglomeratima, pješčenjacima i pijescima (Slika 3). U projektu je izdvojeno i sedam geotermalnih DVT koje se nalaze na području RH i četiri na području Mađarske. Poseban naglasak stavljen je na geotermalno DVT HR_kt. 3. 1 jer se ona nalazi na području Legrada [6].



Slika 3. Duboka vodna tijela (DVT) od kojih su neka trans-graničnog karaktera duž Hrvatsko Mađarske granice. Legenda: 1. Puna linija ograničava „porozna“ DVT, 2. Siva boja označava „krška“ DVT (Kolbah 2010)

3. Geološka građa

Panonski bazen smješten je između planinskog lanca Karpata, Alpa i Dinarida (slika 4.). Nastao je tijekom miocena uslijed kontinentalne kolizije i subdukcije Europske ploče pod panonski fragment kore. Panonski bazen često je nazvan Panonskim bazenskim sustavom (PBS) jer se sastoji od desetak manjih bazena odnosno depresija, a to su: Slavonsko – srijemska depresija, Savska depresija, Dravska depresija, Zalski bazen, Štajerski bazen, Dunavski bazen, Bečki bazen, Transkarpatski bazen, Panonski bazen i Transilvanski bazen [7].



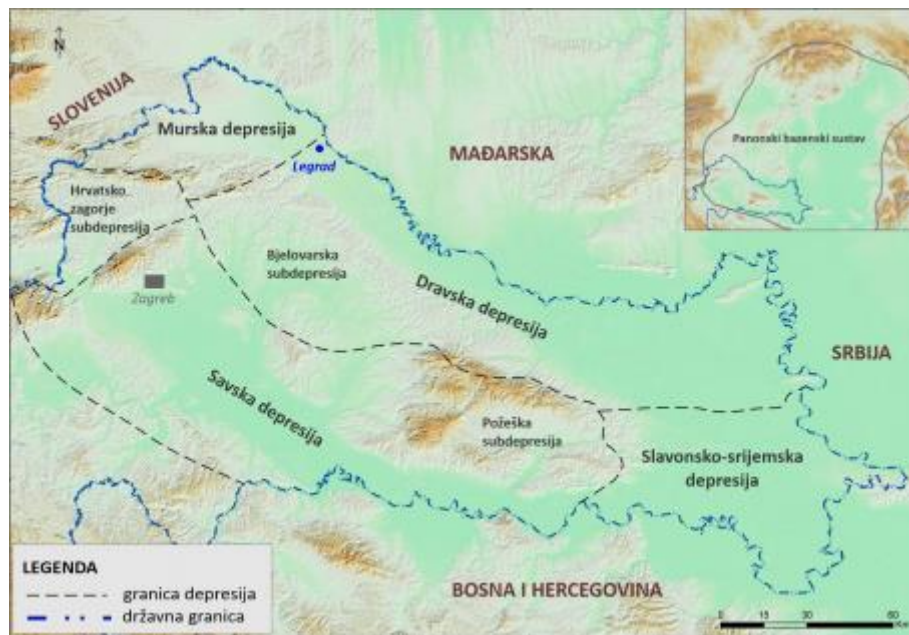
Slika 4. Prikaz Panonskog bazena i planinskih lanaca koji ga okružuju (preuzeto s <https://www.azu.hr/>)

Paleozojski i mezozojski sedimenti su karakteristični za Panonski bazen. Tlačne deformacije, uslijed zatvaranja Tetisa bile su uobičajene u Panonskom bazenu tijekom krede. Tijekom srednjeg miocena dolazi do velikih rasjedanja s pomakom i formiranju bazena koji su kasnije evoluirani u grebene. Prvi bazeni nastali su na sjeveru i zapadu, a mnogi od tih bazena bili su bez sedimentacije. Debljina sedimentata koji su se taložili od paleozoika do danas prelazi 10000 m. Debljina samog neogenskog slijeda iznosi preko 7000 m [7].

Unutar PBS-a smješten je hrvatski dio toga sustava (HPBS). Hrvatskom sustavu pripada oko 30 000 km² pri čemu se više od polovice tog područja procjenjuju kao geološke kategorije neophodne za postojanje ležišta ugljikovodika i geotermalne vode [6].

3.1 Geološka građa Dravskog bazena

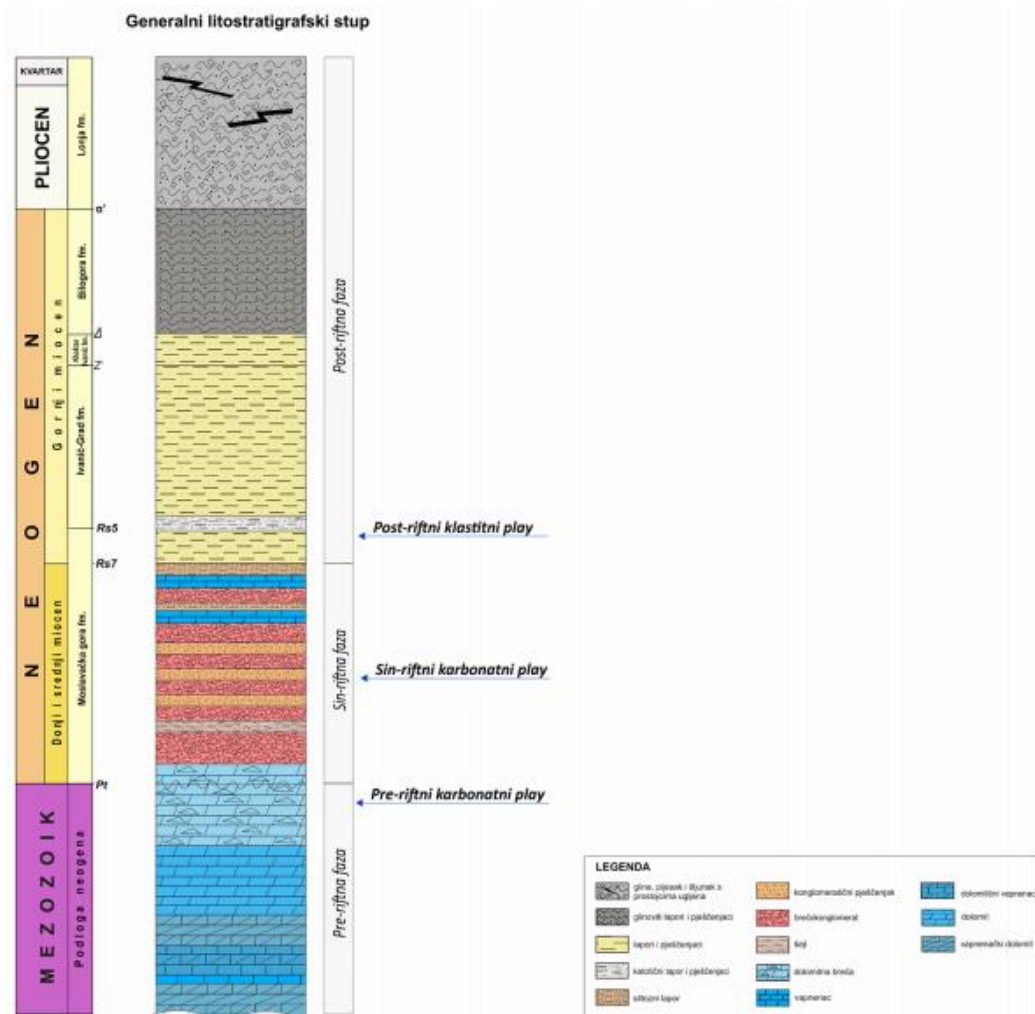
Legrad se nalazi na rubnom sjeverozapadnom dijelu Dravske depresije. Dravska depresija je jedna od četiri glavne depresije hrvatskog područja Panonskog bazena, slika 5. [8].



Slika 5. Područje Legrad u Dravskoj depresiji (preuzeto s: <https://www.azu.hr>)

Dravsku depresiju izgrađuju dva kompleksa stijena koje čine magmatsko – metamorfni kompleks paleozojske starosti te sedimenti mezozojske i paleogenske starosti. Sedimentnu ispunu bazena ispunjavaju naslage neogena i kvartara. Na naslagama neogena nalazi se karbonatno-klastični kompleks koji karakterizira različit litološki sastav: vapnenci, dolomiti, breče, konglomerati te njihovi varijeteti. Na slici 6. prikazan je opći litostratigrafski stup bušotina za područje Legrad koja prikazuje raspored geoloških naslaga koji su nastali u određenom razdoblju mezozoika, kenozoika i neogena. Podloga tercijara u podini je omeđena elektrokarotaznim (EK), a u krovini EK-markerom Pt. Sedimentnu ispunu bazena čine klasiti i lapori iz neogenske i kvartarne starosti. U

podini se mogu pojaviti i litotamnijski vapnenci (litavci) srednjeg miocena (pretežito baden) [8].



Slika 6. Shematski opći litostratigrafski stup bušotine za područje Legrad (preuzeto s: <https://www.azu.hr>)

3.1.1 Mezozoik - srednji - gornji trijas - T_{2,3}

Na osnovi sekundarni blokova i fragmenata koji su pretaloženi u magmatsko-sedimentnu formaciju na području Koprivnice govorimo o srednjem i gornjem trijasu. U dubokim istražnim bušotinama na području Legrada nađeni su površinski izdanci trijaskih naslaga. Pojavljuju se kao vapnenci i dolomiti na dubinama od 2850-3100 m. Također, iz bušotina su nabušeni uzorci vapnenačko-dolomitne breče koji su izgrađeni iz velikih blokova karbonata te najvjerojatnije predstavljaju ekvivalent Kalničkih breča. Breče su tamnosive

do sive boje, sastavljene od fragmenata lapora, međusobno povezanih smeđim srednjezrnatim tinjčastim pješčenjakom. Fragmenti su nepravilnog oblika, promjera i do nekoliko cm. Konglomerat je sastavljen od valutica bjeličaste i zelenkaste boje, čestice konglomerata međusobno su vezani sitno zrnatim pješčanim vezivom. Valutice su slabo zaobljene. Pretežito se radi o kvarcnim valuticama. Pješčenjaci su sivih i smeđasto-sivih boja. Po veličini zrna spadaju u sitnozrnate i srednjezrnate stijene, no mjestimično znaju biti i krupnozrnati sa zrnima promjera do 2 mm [9].

3.1.2 Neogen - gornji baden - gornji panon

Neogen je podijeljen na miocen i pliocen. Razdoblje miocena trajalo je oko 16.4 milijuna godina, a pliocen oko 3 milijuna godina. Tektonskim pokretima prouzročene su velike promjene u sedimentaciji. Miocen je podijeljen na manja razdoblja: eger, egenburg, otnang, karpat, baden, sarmat, panon i pont [9].

Središnja epoha miocena je baden koji je trajao oko 3 milijuna godina (16,5 do 13,6 milijuna godina), ali je tijekom tog razdoblja bilo puno paleogeografskih i tektonskih promjena. U gornjem badenu počinje proces spuštanja čitavog područja sjeverne Hrvatske te marinske transgresije. Time je započeo novi sedimentacijski ciklus koje se uz postupno oslađivanje održao do kraja panta. Od sedimenata na dubinama od 1060 m – 2078 m nalazimo krupnozrnate, polimiktne konglomerate, vapnenačko-dolomitne breče te pješčenjake u kojima dominira kvarc, feldspati, klorit i kalcit. Pješčenjaci su pretežno svijetlosive boje, a mjestimice znaju biti sivozelenkasti. Različite su krupnoće zrna ovisno od lokacije te mogu i biti sitnozrnati, srednjezrnati i mjestimično krupnozrnati. Vezanost zrna je srednja, a ponekad vrlo slaba. Općenito, vezanost se povećava s povećanjem dubine. Siliti dolaze na prijelazu između lapora i pješčenjaka. Kasnijim preplavlivanjem istaknutih dijelova reljefa prestao je donos krupnijeg materijala u bazen čime počinje taloženje litavca i litotamnijskih vapnenaca. Pošto se radi o transgresivnom članu, njegova debljina jako varira. Može iznositi od nekoliko metara, ako je taloženje bilo u priobalju pa čak do 450 metara u bazenskim uvjetima. Badenske naslage dobre su rezervoarske stijene za nakupljanje ugljikovodika, termalne i pitke vode. [9].

3.1.3 Kvartar-Pleistocen

Kvartar je poznat po stalnim i drastičnim promjenama klime. Promjene klime bitno su utjecale na raspored i uvjete sedimentacije te na razvoj života na Zemlji. Kvartar je započeo prije 1,7 milijuna godine, s time da veći dio tog vremena pripada pleistocenu, a manji dio (10-12000 god.) holocenu. Područje Koprivničko-križevačke županije je najvećim dijelom pokriveno kvartarnim naslagama. Zbog nedostatka provodnih fosila naslage nisu podijeljene po stratigrafskoj, već prema litogenetskoj klasifikaciji. U pleistocen su svrstane tvorevine riječno-jezerskog, riječnog, jezersko-barskog i eolskog tipa sedimentacije. Većinom su to bile valutice pijeska i šljunka dubine od cca 700 m. Šljunci i pijesci dolaze u obliku manjih slojeva gline. Pretežito su kvarcni šljunci i pijesci. Gline su sive i sivozelenkaste, mjestimično žućkaste boje. Mekane su i pjeskovite [9].

3.2 Tektogeneza

Sjeverozapadni dio Hrvatske pripada geološkom sastavu velikih bazena (Paleotethysa, Tethysa, Paratethysa i Panonskog bazena) u kojem prevladavaju sedimentne stijene. Taloženje je trajalo više milijuna godina, a izmjenjivali su se dugotrajni sedimentacijski ciklusi. Tijekom geološke prošlosti to područje je bilo pod utjecajem velikih geotektonskih jedinica: Alpa, Dinarida i Panonske mase. Tektogeneza se može pratiti od starijeg paleozoika do kvartara, a na temelju izdanaka stijena zbijanja se mogu pratiti od perioda krede [10].



Slika 7. Tektonska karta lista Koprivnice (preuzeto s: www.hgi-cgs.hr)

Legenda:

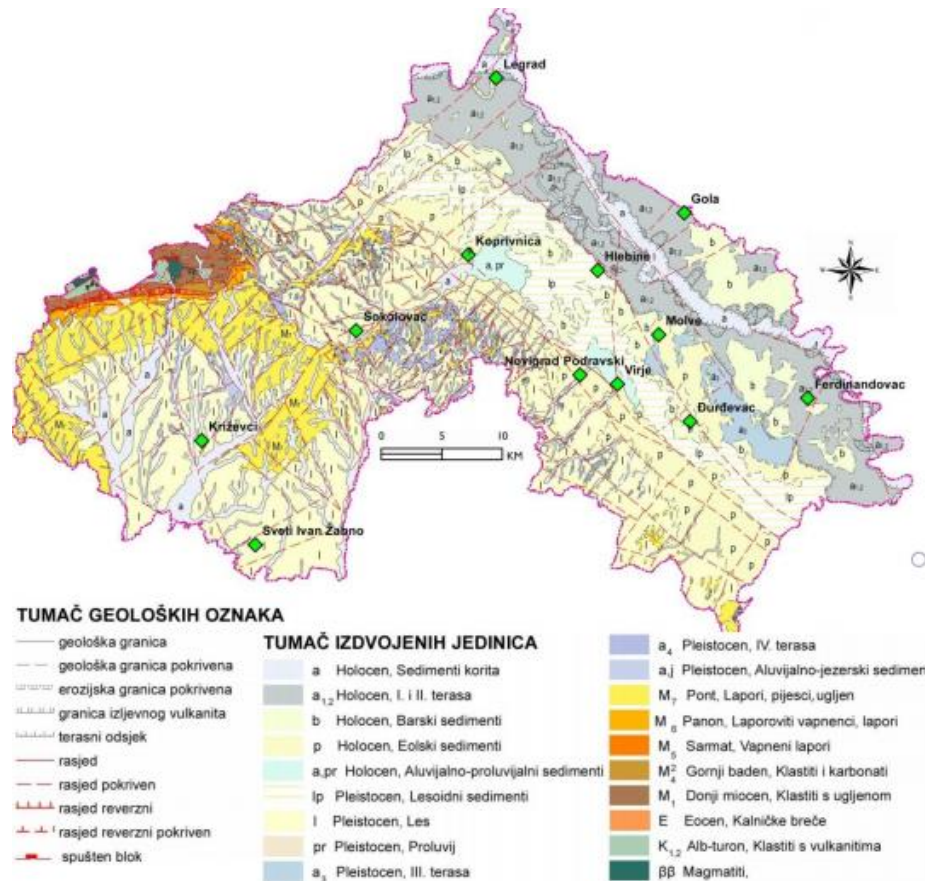
- A. Tektonska jedinica – Varaždinsko-Legradska
 - a) strukturna jedinica: Varaždinska depresija
 - b) strukturna jedinica: antiklinorij - Lijepa Gorica
 - c) strukturna jedinica: Legradski prag
- B. Tektonska jedinica: Kalnik
 - d) strukturna jedinica: horst – Kalničkog gorja
 - e) strukturna jedinica: horst – Veliki Poganec – Subotica
 - f) strukturna jedinica: horst – Torčec
 - g) strukturna jedinica: graba – Duga Rijeka
- C. Tektonska jedinica: Koprivnička rijeka
 - h) strukturna jedinica: antiklinala – Marinovac
 - i) strukturna jedinica: horst – Lepavina
 - j) strukturna jedinica: antiklinala – Jagnjedovec
 - k) strukturna jedinica: graba – Domaji
- D. Tektonska jedinica: horst- antiklinorij Bilogore
- E. Tektonska jedinica: Križevačka depresija
- F. Tektonska jedinica: Dravska potolina

3.2.1 Strukturna jedinica Legradski prag

Legradski prag je borana struktura prekrivena dravskim aluvijem i odvojena poprečnim rasjedom Ludbreg-Koprivnica. Legradski prag izgleda kao „podzemni“ prag koji odvaja Dravsku od Murske potoline. Iako ima izgled „podzemnog horsta“, sastoji se iz nekoliko zasebnih bora (horst-antiklinala) između kojih su uske sinklinale. Najviši nivo ove strukturne jedinice je kod Kutnjaka i Legrada, gdje su kvartarne naslage debele svega 14 m. Prema jugu postupno tone, a prema sjeveru relativno brzo prelazi u Varaždinsku depresiju, što upućuje na mogućnost reverznog rasjedanja. U ovoj strukturnoj jedinici nalaze se naftno-plinska polja Legrad, Veliki Otok i Kutnjak - Đelekovac, a kod Lunjkovca je polje s vrlo visokim geotermalnim anomalijama [10].

3.2.2 Vrste mineralnih sirovina u izdvojenim litostratigrafskim jedinicama

Na području Koprivničko-križevačke županije nalaze se naslage koje pripadaju mezozojskoj i kenozojskoj eri. Iz mezozojske ere zastupljene su stijene iz geološkog perioda krede, a nalaze se na centralnom području Kalničkog gorja. Ostali dio županije izgrađen je naslagama iz kenozoika koji je predstavljen paleogenom, neogenom i kvartarom. Na slikama 8. i 9. prikazane su naslage eocena (E), neogenska miocenski sedimenti (M), katovi egera i egenburga (M₁), gornjeg badena (M₄²), sarmata (M₅), panona (M₆) i ponta (M₇) [10].



Slika 8. Geološka karta Koprivničko-križevačke županije (preuzeto s: <https://kckzz.hr/>)

ERA	PERIOD	EPOHA	OZNAKA NA KARTI I U TUMAČU IZDOJENIH JEDINICA	Trajanje u milijunima godina	Prije sadašnjosti u milijunima godina	
KENOZOIK	KVARTAR	HOLOCEN	apr, p, b, a _{1,2} , a	0,0115	0,0115-0	
		PLEISTOCEN	aj, a ₄ , a ₃ , pr, l, lp	2,5785	2,59-0,0115	
	TERCIJAR	NEOGEN	PLIOCEN		2,74	5,33-2,59
			MIOCEN	M ₁ , M ₄ ² , M ₅ , M ₆ , M ₇	17,67	23-5,33
		PALEOGEN	OLIGOCEN		10,9	33,9-23
			EOCEN	E	21,9	55,8-33,9
PALEOCEN		9,7	65,5-55,8			
MEZOZOIK	KREDA		ββ, K _{1,2}	80,5	146-65,5	
	JURA			54	200-146	
	TRIJAS			51	251-200	

Slika 9. Starost sedimenata koje nalazimo u Koprivničko-križevačkoj županiji (osjenčane zeleno) (preuzeto s: <https://kckzz.hr/>)

4. Općenito o geotermalnoj energiji

Geotermalna energija je energija sadržana u Zemljinoj unutrašnjosti, u stijenama i fluidima, a može nastati raspadanjem radioaktivnih elemenata, egzotermnim kemijskim reakcijama u Zemljinoj kori i trenjem pri kretanju tektonskih masa. Količina geotermalne energije je neiscrpna. Toplina u samoj unutrašnjosti Zemlje nastala je kada se planet Zemlja formirao iz prašine i plinova prije više od četiri milijarde godina, a radioaktivno raspadanje elemenata u stijenama neprekidno regenerira tu toplinu pa je geotermalna energija obnovljivi izvorom energije [1].

4.1 Geotermalni resursi

Geotermalnim resursima smatramo geotermalne vode koje se nalaze u podzemnim ležištima, koje se prolaze kroz podzemna ležišta i napajaju se prirodno ili umjetno utiskivanjem. Danas postoji nekoliko načina klasifikacije geotermalnih resursa:

- Prema stupnju istraženosti ležišta

- Prema vrsti geotermalnih ležišta
- Prema temperaturi ležišnog fluida

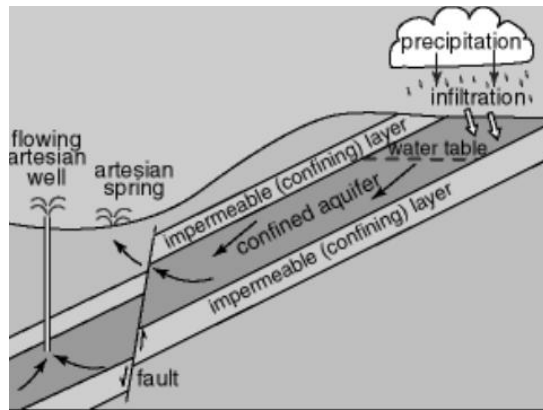
4.1.1 Klasifikacija geotermalnih resursa prema istraženosti ležišta

Prema stupnju istraženosti ležišta, stupnju poznavanja kemijskog sastava, fizikalnih svojstava, poznavanju parametara za utvrđivanje rezervi i pripremljenosti za iskorištavanje, ukupne rezerve mineralne i geotermalne vode svrstavaju se u dvije kategorije: utvrđene i potencijalne mineralne i geotermalne vode. Za svaku kategoriju utvrđeni su uvjeti o istraženosti koje geotermalno ležište mora ispuniti i detaljno su opisani u Pravilniku o prikupljanju podataka, načinu evidentiranja i utvrđivanja rezervi mineralnih sirovina te izradi bilance tih rezervi; IV. Kategorizacija, klasifikacija i evidencija rezervi mineralnih i geotermalnih voda NN 48/92 [2].

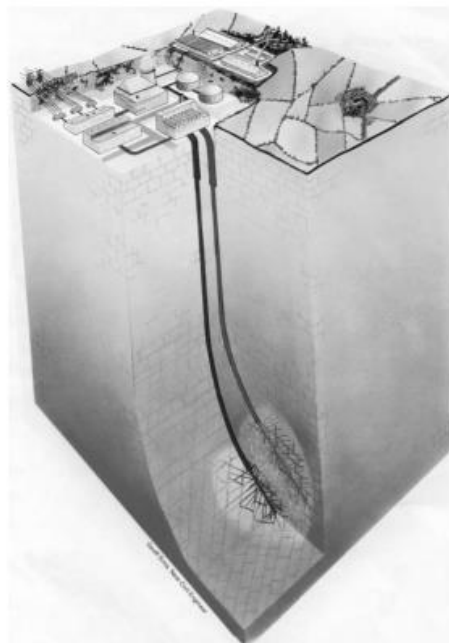
4.1.2 Kategorizacija prema vrsti geotermalnog ležišta

Kategorizacija prema vrsti geotermalnog ležišta se može podijeliti na različite načine, a najvažniji su:

1. Obzirom na način izlaska i ulaska vode iz ležišta
 - a. Ulaz i izlaz su prirodni otvori zastupljeni su u Hrvatskoj, ali zbog izlazne temperature uglavnom niže od 30 °C nisu podobni za energetska iskorištavanje. Izuzetak su Topusko i Varaždinske toplice (sa 60 °C)
 - b. Ulaz je prirodni otvor, a izlaz bušotine (arteški izvor, slika 10.)
 - c. Ulaz i izlaz su bušotine. Koristi se uglavnom zbog visoke temperature (Geotermalna elektrana Legrad planira koristiti takav tip, slika 11.)



Slika 10. Arteški tip ležišta (preuzeto s <https://pdfcoffee.com/>)



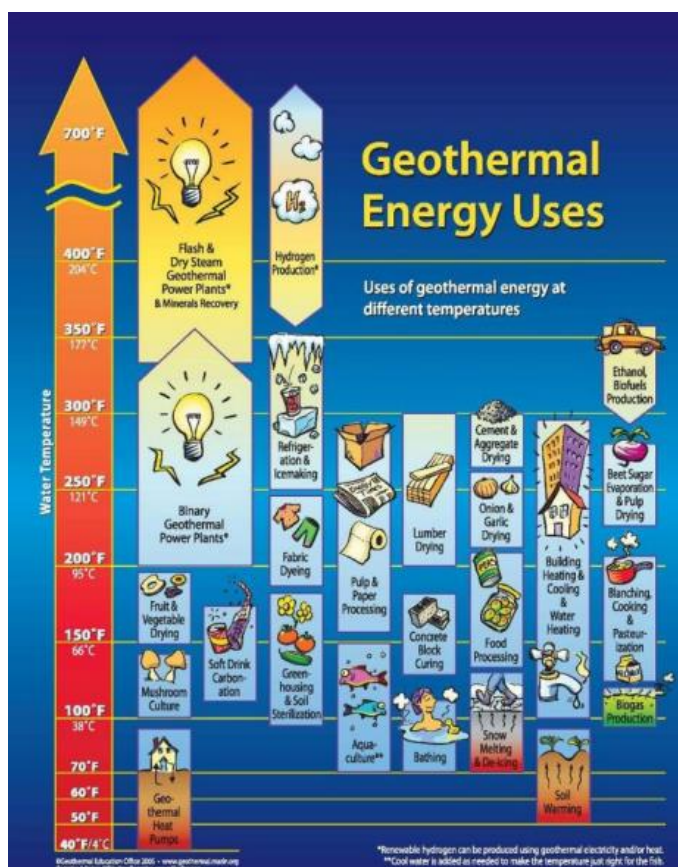
Slika 11. Duboko geotermalno ležište (preuzeto s: <https://pdfcoffee.com/>)

2. Obzirom na termodinamičke i hidrološke osobine
 - a. Hidrogeotermalna ležišta niske entalpije
 - b. Hidrogeotermalana ležišta visoke entalpije
 - c. Geotlačna geotermalna ležišta
 - d. Vruće i suhe stijene na velikim dubinama

3. Kategorizacija prema temperaturi fluida

Ova podjela se najčešće koristi kod geotermalnih ležišta, a podijeljena je na niske ($< 90\text{ }^{\circ}\text{C}$), srednje ($90\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$) i visoke ($> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Visoki temperaturni fluidi koriste se za proizvodnju električne energije, dok se srednje i nisko temperaturni

fluidi koriste u izravnoj upotrebi. Slika 12. prikazuje mogućnost korištenja ovisno o temperaturi fluida [2].



Slika 12. Korištenje geotermalne energije ovisno o temperaturi vode (preuzeto s: https://www.voda.hr/sites/default/files/dokumenti/delineacija_i_karakterizacija_tijela_geotermalnih_podzemnih_voda_u_rh.pdf)

4.2 Termička svojstva ležišnih stijena i fluida

Termička svojstva stijena i fluida međusobno su povezana odnosom:

$$\lambda = a \cdot c \cdot \rho$$

gdje je:

- λ - toplinska vodljivost, [W/mK]
- c - specifična toplina, [J/kg K]
- a - temperaturna vodljivost, [m²/s]
- ρ - gustoća, [kg/m³]

Termička svojstva direktno ne ovise o temperaturi, već promjenom temperature dolazi do fizikalno-kemijskih promjena tvari, koja uzrokuju promjene termičkih svojstava [2].

4.2.1 Toplinska vodljivost (λ)

Tijela ili dijelovi tijela različitih temperatura nastoje međusobnim djelovanjem izjednačiti temperature i tako uspostaviti toplinsku ravnotežu. Toplina s toplijeg tijela prelazi na hladnije. Prijenos topline obavlja se konvekcijom tako da molekule fluida kruže u stijenama ili kondukcijom bez micanja molekula odnosno tvari. Konduktivni prijenos dobiva se kontaktom zagrijanih i manje zagrijanih dijelova stijena. U hidrogeotermalnim ležištima, prijenos topline većinom se ostvaruje konvekcijom fluida u ležištu i kondukcijom kroz stijene. Koeficijent toplinske vodljivosti je bitan faktor geotermalnog parametra jer predstavlja količinu energije koja prođe u sekundi kroz presjek površine 1 m², u pravcu okomit na presjek pri gradijentu temperature od 1 °C/m. Toplinsku vodljivost (λ) određuje se eksperimentalno u laboratoriju, a može se proračunati i prema različitim fizičkim parametrima [2].

$$\lambda = \frac{E \cdot h}{A \cdot (T_2 - T_1) \cdot \tau}$$

gdje je: E- količina topline koja je prošla kroz površinu A, [J]
h- debljina sloja, [m]
A- površina sloja kroz koju prolazi toplinski tok, [m²]
T₂-T₁- razlika temperature na suprotnim plohama sloja, [K]
 τ - vrijeme prolaženja toplinskog toka, [s]

Toplinska vodljivost bitna je za formiranje hidrogeotermalnog ležišta. Starost stijena, zasićenost stijena kapljevitim fluidom (voda, nafta u odnosu na vodenu paru i plin) i toplinska vodljivost stijena utječu na toplinsku vodljivost, a moguće je izraziti odnosom toplinske vodljivosti (λ) i gustoće stijena (ρ) za Panon (Jelić 1997.):

$$\lambda = 0,124 \cdot \rho^{2,86}$$

Gustoća stijena za Dravsku potolinu iznosi (Jelić 1997.):

$$\rho_s = -0,747 \cdot e^{-0,809 \cdot H} + 2,72$$

4.2.2 Specifična toplina (c)

Specifična toplina je termičko svojstvo tvari definirano kao količina energije koja je potrebna da se masi od 1 kg poveća temperatura za 1 K pri konstantnom tlaku. Visoku specifičnu toplinu ima voda (4,187 J/kg K) te je zbog toga najpogodniji medij za akumuliranje geotermalne energije. Specifična toplina različitih stijena je uglavnom ujednačena i iznosi od 835 (± 15 %) J/kg K [2].

4.2.3 Specifična obujamska toplina (cp)

Specifična obujamska toplina je produkt specifične topline i gustoće, a definirana je kao količina energije koja je potrebna da se obujmu od 1 m³ poveća temperatura za 1 K pri konstantnom tlaku. Ona ovisi o specifičnoj obujamskoj toplini matriksa stijene (cp)_m, šupljikavosti stijene Φ i specifičnoj obujamskoj toplini fluida koji ispunjava pore stijene (cp)_f. Mjerna jedinica je [J/m³ K]. Specifična obujamska toplina je direktan parametar za procjene rezervi geotermalne energije [2].

4.2.4 Temperaturna provodljivost (a)

Temperaturnu provodljivost (a) karakterizira brzina izjednačenja temperature pri nestacionarnoj toplinskoj vodljivosti, a jednaka je odnosu koeficijenta toplinske vodljivosti (λ) i specifične obujamske topline (cp).

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}$$

4.2.5 Geotermalni gradijent

Zračenje Sunca uveliko doprinosi o povećanju temperature na Zemlji. Utjecaj tog zračenja zapaža se površinskim dijelovima Zemljine kore pa sve do dubine od 30 m. Neovisno o klimatskim uvjetima na toj dubini temperatura je konstantna, a daljnji porast temperature po jedinici dubine naziva se geotermalni gradijent. Srednji geotermalni gradijent za Europu je 0,03 °C/m, a u Republici Hrvatskoj postoje dva područja gradijenta (slika 13): Dinaridi i Jadran (0,015 - 0,025 °C/m) te Panonski dio (iznad 0,04 °C/m). Formula za izračunavanje geotermalnog gradijenta glasi:

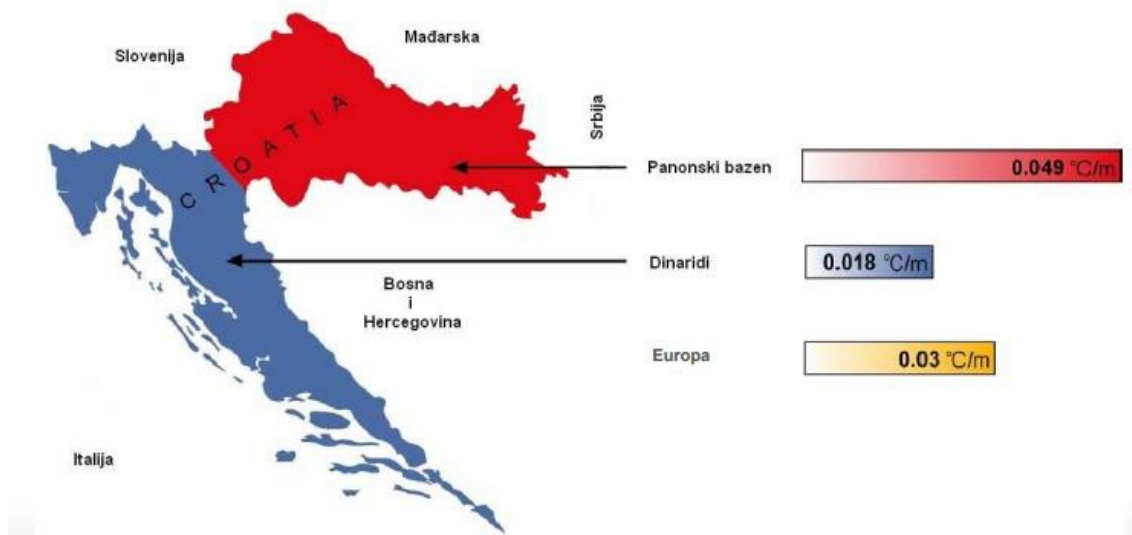
$$G_t = \frac{T - T_0}{H} = \frac{q}{\lambda}$$

gdje je: T- temperatura izmjerena na određenoj dubini, [K]
T₀- srednja godišnja temperatura tla promatranog područja, (za Panon iznosi 11,6 °C)
H- dubina na kojoj se mjeri temperatura, [m]
T₂-T₁- razlika temperature na suprotnim plohama sloja, [K]
τ- vrijeme prolaženja toplinskog toka, [s]

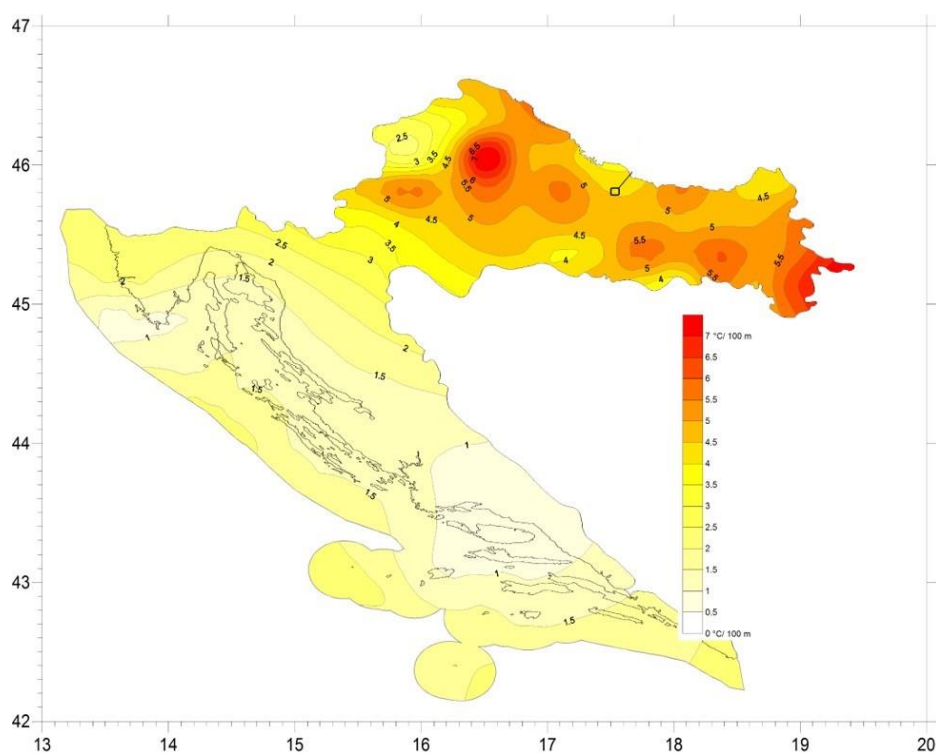
Geotermalni gradijent je direktno proporcionalan toplinskom toku i obrnuto proporcionalan toplinskoj vodljivosti, koja se mijenja s dubinom, a s dubinom se mijenja i gustoća stijena. Odnos porasta temperature s dubinom za Dravsku potolinu iznosi (Jelić 1997.):

$$T_D = \frac{474 \cdot H^{3,86}}{[1,09 \cdot (e^{-0,81 \cdot H} - 1) + 2,72 \cdot H]^{2,86}} + 11,6$$

Na temelju geotermalnog gradijenta vrše se prve procjene o učinkovitosti nekog istražnog polja. U tu su svrhu izrađene karte geotermalnog gradijenta koje ukazuju na lokalne anomalije (slika 14). Posljedice konvekcije i vertikalne propusnosti je pozitivna anomalija koja ukazuje da pored visokog geotermalnog gradijenta i temperature povoljna i protočna svojstva ležišnih stijena [2].



Slika 13. Prikaz gustoće toplinskog toka i geotermalni gradijent u hrvatskim regijama (preuzeto s: <https://www.menea.hr/>)



Slika 14. Prikaz lokalnog geotermalnog gradijenta Republike Hrvatske (preuzeto s: http://escom.rgn.hr/activities/post_Potencijaliskori%C5%A1tavanjetoplinskeenergijeprekonapu%C5%A1tenihbu%C5%A1otina)

4.2.6 Toplinski tok

Toplinski tok je definiran kao količina topline koja prolazi kroz jediničnu površinu u jedinici vremena:

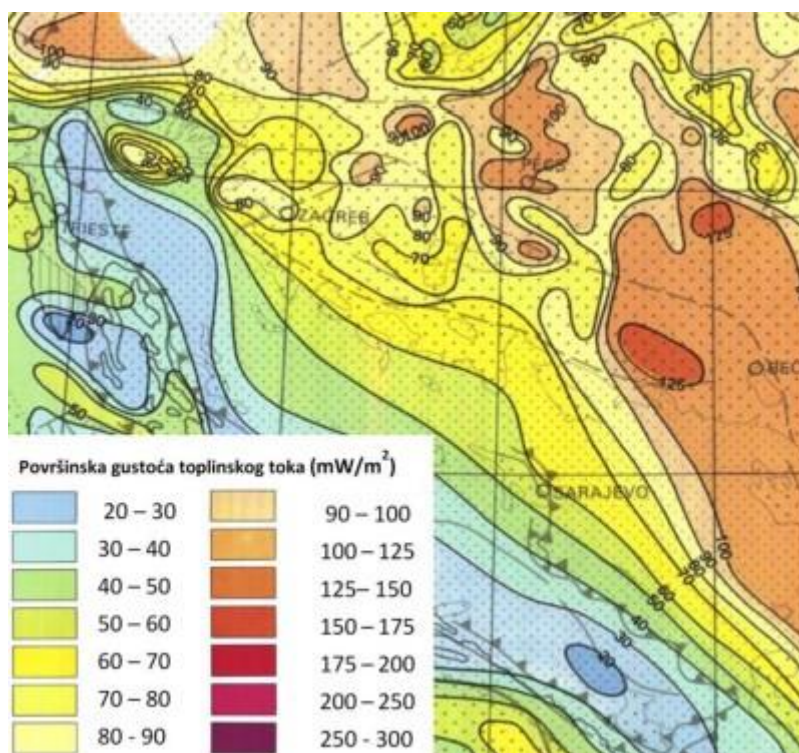
$$q = \lambda \cdot G_t$$

gdje je: G_t - vertikalni geotermalni gradijent [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$]

λ - toplinska vodljivost, [W/mK]

q - toplinski tok [mW/m^2]

Prosječni toplinski tok u područjima Dinarida iznosi $29 \text{ mW}/\text{m}^2$, a u Panonu $76 \text{ mW}/\text{m}^2$ (slika 15). Ovakva razlika može se objasniti dubinom Mohorovičićevog diskontinuiteta (Moho sloj) koji se u Panonu nalazi na 28 km, a Dinaridima na oko 50 km. Prosječni toplinski tok u Dravskoj potolini jednak je $(82,0 \pm 10,9) \cdot 10^{-3} \text{ W}/\text{m}^2$, a u Savskoj iznosi $(67,4 \pm 7,1) \cdot 10^{-3} \text{ W}/\text{m}^2$ [2].



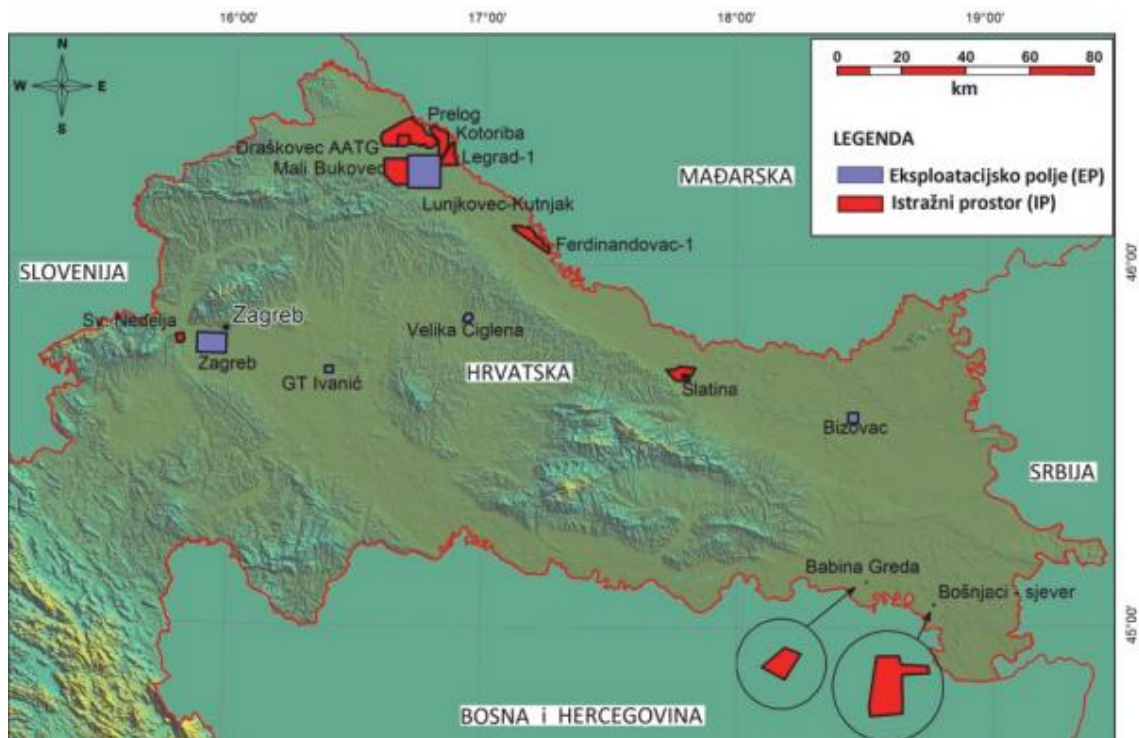
Slika 15. Isječak karte gustoće toplinskog toka (preuzeto s:
<https://www.zagreb.hr/userdocsimages/gu%20za%20strategijsko%20planiranje/ANALI ZA%20SEKTORA%20TOPLINARSTVA-UAZ-Studija.pdf>)

4.3 Zakonski okviri

U Republici Hrvatskoj korištenje geotermalnih vodonosnika definira se prema zakonodavnom okviru, a korisniku država osigurava upravljanje geotermalnim resursima. Geotermalna voda prema Zakonu o vodama (NN 153/09, 63/11, 130/11, 56/13, 14/14) je ona voda koja se koristi u različite rekreacijske, medicinske, balneološke ili se puni u boce i stavlja na tržište. Ako se radi o geotermalnim vodonosnicima te se njezina akumulirana toplina koristi u različite energetske svrhe kao što je primjer u ovom radu za proizvodnju električne energije, tada se upravljanje provodi prema Zakonu o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika (NN 52/18, 52/19). Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja nadležno je za oba zakonodavna okvira. Agencija za ugljikovodike (pod nadležnosti Ministarstva gospodarstva) nadležna je za provedbu natječaja prema Zakonu o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika (NN 52/18, 52/19). Agencija za ugljikovodike raspisuje natječaj za istraživačku koncesiju koja traje 5 godina te se koncesija dodjeljuje zainteresiranom odnosno najboljem koncesionaru. Podnositelj zahtjeva može biti i Agencija odnosno RH ili neki investitor (privatnik, općina, županija). Nakon što se istražnim bušenima dokaže postojanja geotermalnog potencijala, Agencija dodjeljuje eksploatacijsku koncesiju na 25 godina. Uredba o naknadi za istraživanje i eksploataciju ugljikovodika (NN 25/20) izračunava koncesijsku naknadu. Ako se investitor ne pridržava ugovora o koncesiji, (npr. ne koristi geotermalnu vodu za proizvodnju električne energije u trajanju od godine, a potpisano je ugovorom) tada Agencija može prekinuti ugovor ili oduzeti koncesijsko eksploatacijsko pravo [3].

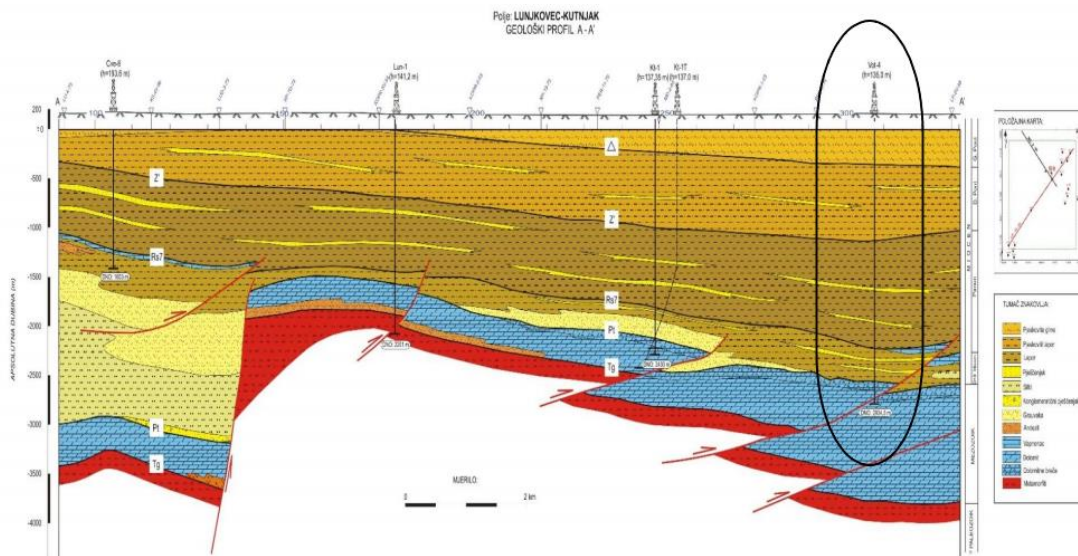
5. Geotermalni izvor Legrad

Sjeverozapadni dio Hrvatske iznimno je bogat geotermalnim resursima pogodnim za proizvodnju električne energije koja je dobivena korištenjem toplinske energije Zemlje. U Podravini je utvrđeno područje za eksploataciju geotermalne energije nazvano Dravska potolina. Prva saznanja o velikom geotermalnom potencijalu otkrivena su početkom 1960-tih i 1970-tih kada je INA radila istražna bušenja za eksploatacije nafte i prirodnog plina. Kada je otkriven geotermalni potencijal dugi niz godina nije se ništa poduzimalo. Prvi koraci napravljeni su 2006. godine kada je vlada Republike Hrvatske dala program o davanju potpore gospodarske uporabe geotermalne energije za područje Lunjkovec – Kutnjak, Legrad. Drugi korak u izgradnji geotermalne elektrane je napravljen 2019. godine kada tvrtka MB Geothermal d.o.o. naručuje izradu elaborata zaštite okoliša pod imenom Zahvat: Izgradnje geotermalne elektrane u općini Legrad. Tvrtka MB Geothermal d.o.o dobila je koncesiju na dvije godine, ali nije ispoštovala svoje uvjete i predviđene rokove pa je ponovno raspisan natječaj za dobivanje koncesije koju je dobila nova turska tvrtka Soyak. Oni su predstavili svoje planove kojima će do svibnja 2023. godine izbušiti dvije bušotine, a nakon toga planiraju izbušiti četiri do šest bušotina te izgradnju elektroenergetskog postrojenja. Soyak je općini Legrad uplatio 2 milijuna kuna kao polog da će ispuniti dogovor do 2025. godine te će 2025. godine općina Legrad dobiti prvu rentu u iznosu od 5 milijuna kuna [12].



Slika 16. Područje istražna bušotina Legrad-1 u kojoj je u planu izgradnja geotermalne elektrane Legrad 1 (Živković et al. 2015).

Istražnim bušenjem izvađeni su uzorci sedimenata neogenske i kvartarne starosti te mezozojski karbonatno-klasični kompleks. Dubina bušotina je od 1975 m do 4600 te su izmjerene temperature od 105 °C do 212 °C. Na slici 17 prikazan je geološki profil koji je napravljen za potrebe geotermalne elektrane Kutnjak, a bušotina Vol-4 je na području općine Legrad. [8].



Slika 17. Prikaz geološkog profila, odnosno bušotine Vol-4 je na području općine Legrad (preuzeto s: <https://www.azu.hr/>)

Planirano je da geotermalna elektrana crpi vodu konstantnu temperaturu od 185 °C u duljem vremenskom razdoblju od 20. godina. Geotermalna elektrana Legrad 1 koristiti će geotermalnu vodu iz bušotina za proizvodnju električne energije. Elektrana će raditi na principu cirkulacije geotermalne vode koja će svoju toplinu davati postrojenju koje će raditi na principu organskog Rankineovog ciklusa te će se fluid nakon toga ponovno vraćati u ležište.

Geotermalna voda nalaziti će se u izmjenjivačima topline te će svoju energiju predavat organskom mediju koji se zagrijava i pritom isparava. Ohlađena voda vraćati će se nazad utisnim bušotinama u ležište. Organski medij expandira u ORC turbini i proizvodi električnu energiju. Predviđena električna snaga u generatoru iznosi 25 MW_e, a 19,9 MW_e će se plasirati u prijenosnu mrežu RH na naponskoj razini od 110 kV [12].

5.1 Organski Rankineov ciklus

Organski Rankineov ciklus ili ORC (eng. Organic Rankine Cycle) je zatvoreni proces koji ulaznu energiju topline pretvara u mehanički rad odnosno pomoću promjene faznih medija u zatvorenom krugu pokreće turbinu dok generator proizvodi električnu energiju, slika 18.

Termodinamička efikasnost za ORC izračunava se po formuli:

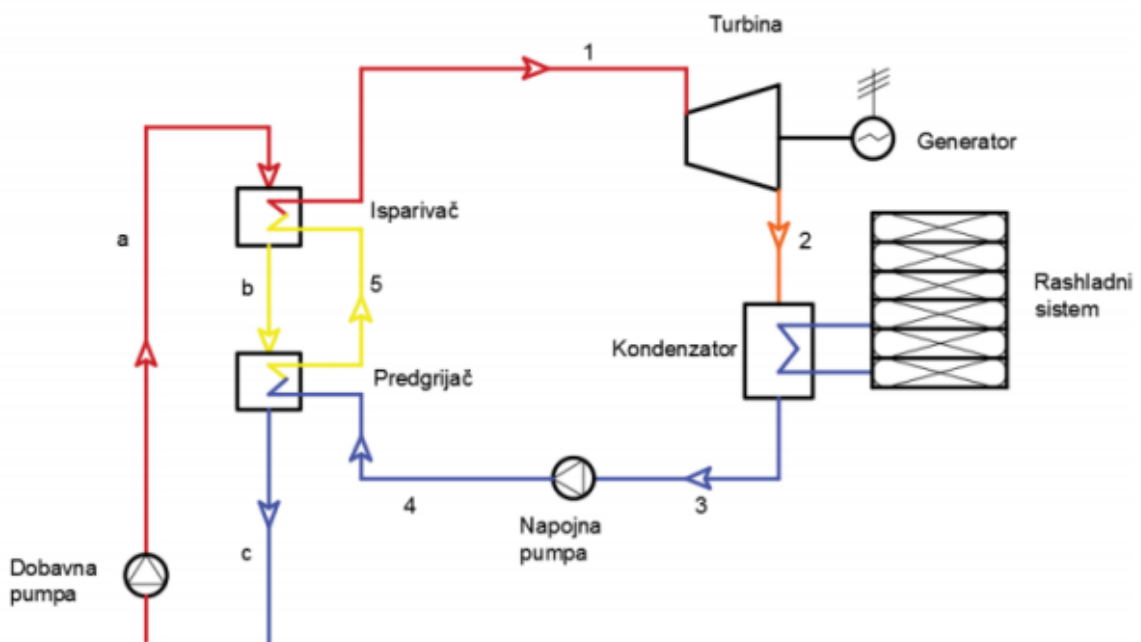
$$\eta_t = \frac{W_t - W_p}{Q}$$

gdje je: indeksi t i p označavaju turbinu i pumpu

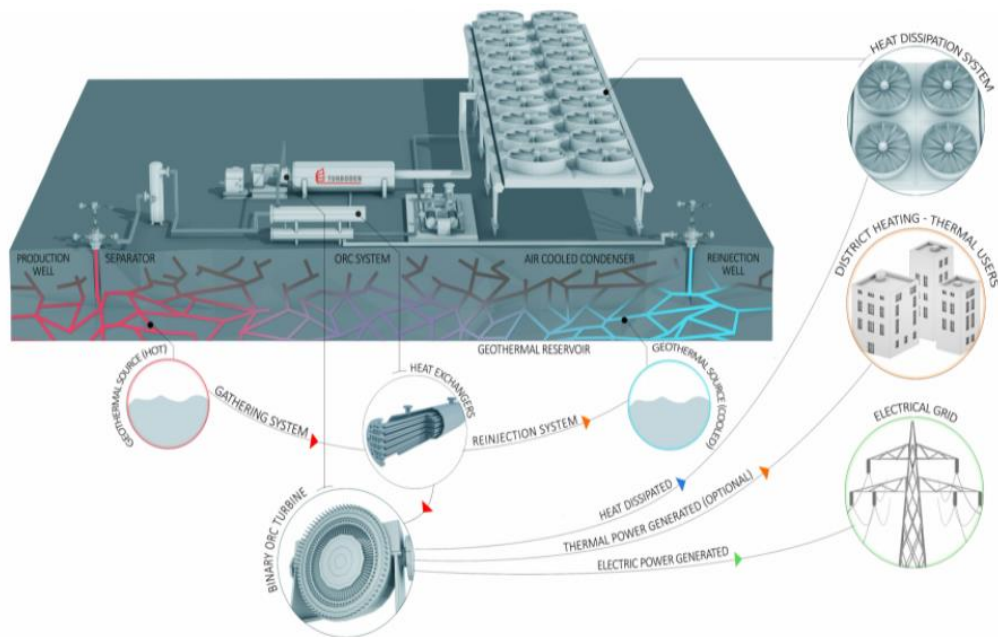
W- snaga [W]

Q – razmijenjenu toplinu u isparivaču [°C]

ORC je proces termodinamičkog prijenosa topline primarnog kruga geotermalne vode ili pare dobivene iz bušotine u sekundarni krug gdje se nalazi medij manje temperature. Organski Rankineov ciklus je kombinacija Rankinovog ciklusa koji umjesto vodene pare kao radni medij koristi neki drugi organski fluid (npr. propan, isobutan, amonijak). U isparivaču, pomoću topline primarnog kruga isparava medij sekundarnog kruga, zatim se para širi prolaskom kroz turbinu. Osovine turbine pokreću generator, a u hlađeni kondenzator se kondenzira para koja se pumpom vraća u isparivač. Ohlađena voda iz primarnog kruga može se vratiti u izvor. Vruća voda se u ležištu može nalaziti u dubinama i do nekoliko kilometara, a to znači veća investicijska ulaganja. Što se medij nalazi na većoj dubini, to je i vrijeme bušenja duže. ORC elektrana pumpanjem radnog medija iz ležišta prema površini potroši 30 % - 50 % proizvedene energije. Snaga postrojenja je od 300 kW do 3 MW_e, ali postrojenja do 10 MW_e se koriste za iskorištavanje geotermalne energije [13].



Slika 18. Shematski prikaz ORC (preuzeto s: <https://repozitorij.vuka.hr/>)



Slika 19. Model ORC (preuzeto s: <https://www.turboden.com/>)

5.2 Tehnologija/proces u geotermalnoj elektrani

Geotermalna elektrana Legrad za rad planira koristiti dvije proizvodne bušotine i dvije utisne bušotine. Rankineov kružni proces će koristiti radni medij ugljikovodik (izobutan C_4H_{10}). U ležištu se nalazi geotermalna voda koja sadrži samo tekuću fazu. Tekuća faza, odnosno voda, sadrži plinove CO_2 i H_2S koji se tijekom proizvodnje izdvajaju iz geotermalne vode u kanalu bušotine kao posljedica pada tlaka. U rudarskom dijelu postrojenja, geotermalna voda se u separatorima razdvaja na tekuću i plinovitu fazu kako bi se dobio što bolji prijelaz topline iz geotermalne vode na organski medij.

Geotermalna voda u tekućem i plinovitom stanju predaje toplinu radnom mediju putem izmjenjivača topline te se nakon toga miješaju plinovita i tekuća faza koje se putem utisnih bušotina vraćaju u ležište. Proizvodit će se električna energija do 19,9 MW koja će dalje biti transportirana na mrežu HOPS-a (Nezavisni operator prijenosa sustava u Republici Hrvatskoj).

ORC tehnologija na geotermalnom postrojenju u Legradu sastojati će se od::

- 2 isparivača (jedan za tekuću, a jedan za plinsku fazu)
- 5 predgrijačaturbine s generatorom
- zračnog kondenzatora
- napojne i kondenzatne pumpe ORC medija

Sustav koji je smješten na otvorenom prostoru čine: isparivači, predgrijači, turbina s generatorom i pumpe. Električnu energiju se proizvodi u turbini koju pokreće ekspanzija ugljikovodika. Ohlađena geotermalna voda utiskivat će se u ležište odnosno podzemlje. Geotermalna voda izlaskom iz proizvodnih bušotina se odvaja u separator gdje se dijeli na tekuću i plinovitu fazu. Tekuća faza svoju toplinu predaje organskom radnom mediju prolaskom kroz isparivač 1. Nakon što prođe isparivač, dodatno se hladi prolaskom kroz predgrijač (ukupno će biti 5 predgrijača). Plinovite faze geotermalne vode, vodena para i CO₂ nakon što prođu separator, dovode se u isparivač 2 gdje se vodena para hladi i kondenzira te se predaje organskom radnom mediju ORC MODUL-a. Kondenzat plinovite faze geotermalne vode i nekondenzirajući dio, nakon izlaska iz isparivača 2, se skupljaju i miješaju s ohlađenom tekućom fazom iz predgrijača 1 te se vraćaju u utisne bušotine i nazad u podzemlje. ORC MODUL toplinsku energiju geotermalne vode upotrebljava za predgrijavanje u predgrijačima i isparivanje u isparivačima 1. Ekspandirana para u ORC turbini odvodi se zračnom kondenzatoru i tamo se kondenzira.

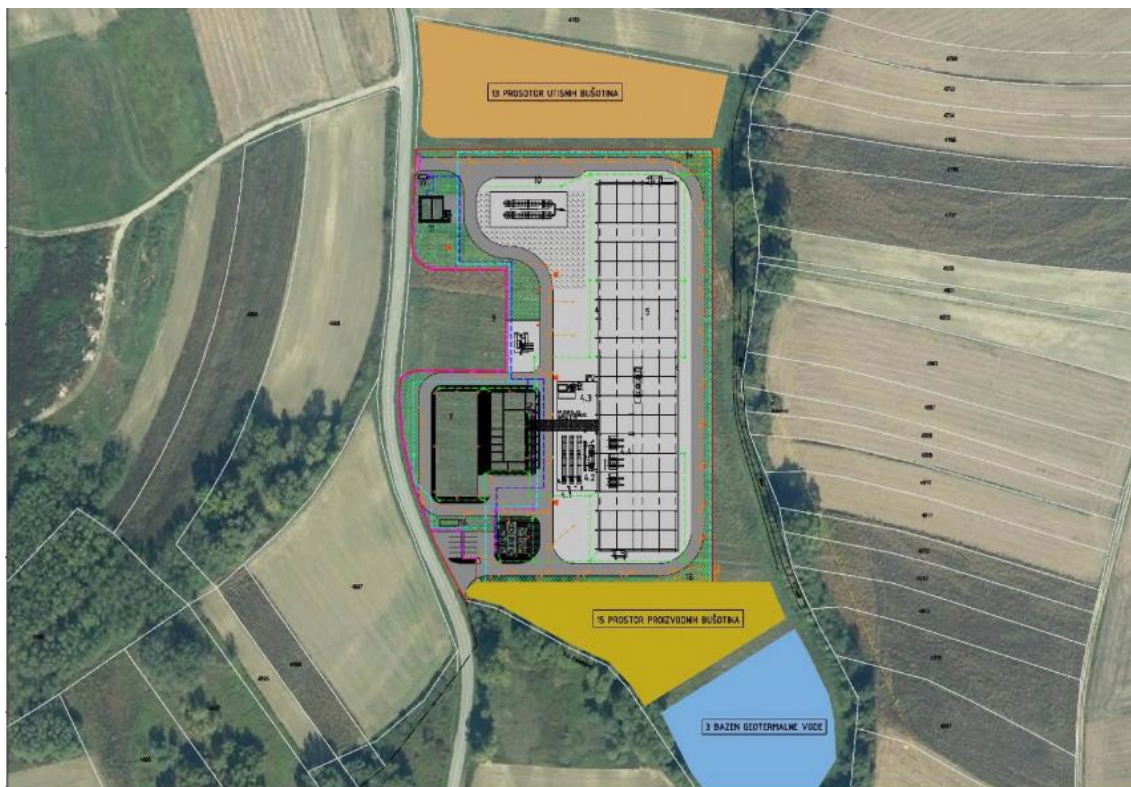
Kondenzator zraka bit će smješten na otvorenom prostoru uz propisnu uporabu modularnih kondenzatorskih jedinica. Njihov broj će se naknadno odrediti ovisno o potrebama rashladne snage i kapacitetu individualnih jedinica. Kondenzatorske jedinice biti će također smještene na otvorenom na visini koja će osigurati neprekidan protok uvjetovane količine zraka. Kondenzator služi za pretvaranje vodene pare u tekuće stanje odnosno služi za hlađenje i ukapljivanje izobutana putem prisilne konvekcije zraka. Zračni kondenzator modularnih jedinica radnog medija prikazan je na slici 20. gdje se pomoću cirkulirajućih crpki kondenzat organskog radnog medija vraća natrag u predgrijače.



Slika 20. Zračni kondenzator modularnih jedinica radnog medija (Geotermalna elektrana Velika Ciglena) (preuzeto s: <https://mingor.gov.hr/>)

Geotermalna elektrana obuhvaća rudarski dio koji se sastoji od proizvodnih bušotina, separatora tekuće i plinovite faze geotermalne vode, cjevovoda, kompresora plinovite faze, utisnih pumpi, utisnih bušotina, sustava za suzbijanje nastanka kamenca, atmosferskog separatora i bazena geotermalne vode. Na dubinama 4000 ± 200 m nalaziti će se proizvodne i utisne bušotine. Projektom su predviđene 4 bušotine, od kojih su 2 proizvodne i 2 utisne. Statički pretpostavljeni tlak na dubini eksploatacije je 360 do 400 bara, a temperatura se kreće između $192 - 200$ °C. Na samoj površini proizvodne bušotine očekuje se tlak geotermalne vode od 25 bara i temperature 185 °C. Prema istražnim bušotinama priželjkivani geotermalni fluid je slojna voda s 50 Nm^3 otopljenog ugljičnog dioksida (CO_2) u 1 m^3 geotermalne vode te 12 ppm otopljenog sumporovodika (H_2S) i bez agresivnih plinova. Salinitet geotermalne vode je 15 g NaCl/dm^3 , a potrebni protok 600 t/h po bušotini što iznosi ukupno 1200 t/h [12].

Glavnim rudarskim projektom odrediti će se ostali radovi kao što su izgradnja kanala bušotine, ispitivanje, obrada i ugradnja eksploracijske opreme, dubina ugradnje zaštitnih cijevi, itd. Lokacija bušotina biti će određena građevinskim projektom, a lokacija proizvodnih i utisnih bušotina prikazana je na slici 21.



Slika 21. Prikaz prostora proizvodnih i utisnih bušotina (preuzeto s: <https://mingor.gov.hr/>)

Sukladno naftno-rudarskim projektima koji su propisani Zakonom o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika (NN 52/18, 52/19) izvodit će se radovi bušenja. Projekti koji se moraju izraditi su: idejni projekt, projekt razrade i eksploatacije, dopunski projekt razrade i eksploatacije, projekt izrade bušotine i pojednostavnjeni projekt [12].

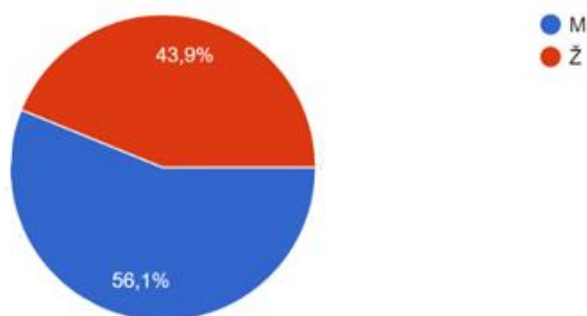
6. Web ankete

Za potrebe ovog rada provedena je web anketa na području dviju općina: Legrad i Ferdinandovac. U Legradu započinju radovi na geotermalnoj elektrani, a u Ferdinandovcu postoji veliki potencijal za iskorištavanje geotermalne energije. U anketiranju je sudjelovalo ukupno 114 ljudi, 57 na području Legrada i 57 na području Ferdinandovca. Ukupno je postavljeno 13 pitanja.

6.1 Legrad

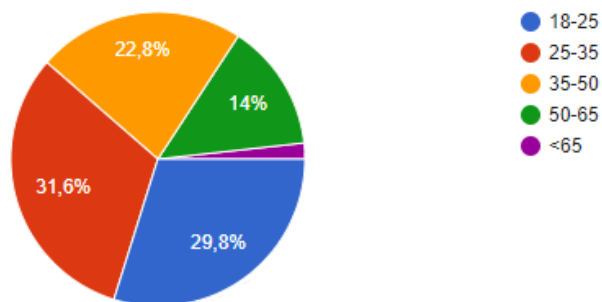
U anketi je sudjelovalo 43,9 % osoba ženskog spola i 56,1 % osoba muškog spola , a slika 23. prikazuje podijeljenost prema dobnim skupinama.

1. Spol
57 odgovora



Slika 22. Prikaz spolne strukture ispitanika

2. Dob
57 odgovora



Slika 23. Prikaz dobne strukture ispitanika

Prema dobivenim rezultatima, 89,5 % stanovništva upoznato je s obnovljivim izvorima energije, od toga je 72,2 % upoznato s pojmom geotermalne energije i mogućnostima korištenja (proizvodnja električne energije, zagrijavanje staklenika, rehabilitacijske svrhe, grijanje zgrada/obiteljskih kuća, itd.). Na pitanje zašto je geotermalna energija obnovljivi izvor energije je odgovorilo 42 ispitanika. Neki od tih odgovora su:

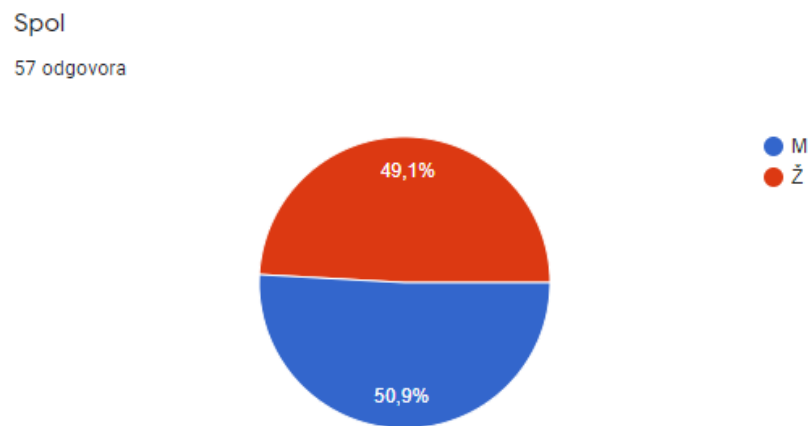
- Zato što uz iskorištavanje prirodnog potencijala topline geotermalnog izvora ne šteti okolini i ne iscrpljujemo vrijedne resurse
- Dolazi iz prirode i prirodnim procesima se obnavlja. Za njenu proizvodnju nije potrebna ljudska aktivnost ni drugi energenti
- Zato što se energija dobiva preko vode
- Priroda ju obnavlja, neiscrpna je
- Zato što se pametnim gospodarenjem ne može iscrpiti
- Ispod Zemljine površine se nalaze velike količine geotermalne energije. To je energija koja se neprestano obnavlja u prirodi - neiscrpna je
- Zato jer nastaje trenjem ispod zemljine površine te se tako zagrijava voda

Istraživanje je pokazalo da je 56,1 % od ukupnog broja ispitanih u Općini Legrad upoznato s projektom izgradnje geotermalne elektrane, a 94,7 % smatra da bi taj projekt bio dobar za Općinu. Izgradnja geotermalne elektrane pomaže u suzbijanju klimatskih promjena smatra 86 % a čak 94,7 % ispitanika smatra da pomaže razvoju ruralnog gospodarstva. Glavnina ispitanika, njih 98,2 %, smatra da je geotermalna elektrana pozitivna i otvara nova radna mjesta. Manje od polovice ispitanika (42,1 %) smatra da bi zbog emisija elektrana mogla imati negativan utjecaj na okoliš, dok 57,9 % smatra da postrojenje neće imati nikakav negativan utjecaj na okoliš. Na pitanje postoji li geotermalna elektrana u Hrvatskoj odgovor nije znalo 36,7 % dok je većina ispitanika, koja je potvrdno odgovorili naveli Veliku Ciglenu kod Bjelovara kao primjer geotermalne elektrane. Uz ovo pitanje, sudionike ankete se pitalo da li su upoznati i sa drugim načinima iskorištavanja geotermalne energije. Oko 47 % ispitanika smatra da ne postoje takva postrojenja/uređaji, dok su ostali odgovorili da postoje toplinske dizalice, Varaždinske toplice, staklenici. Također, većina ispitanika (53,2%) je kao odgovor na pitanje „Koja država u svijetu najviše koristi geotermalnu energiju?“, odgovorila Island dok su druge zemlje lideri na polju geotermalne energije ostale neprepoznate. Tursku je

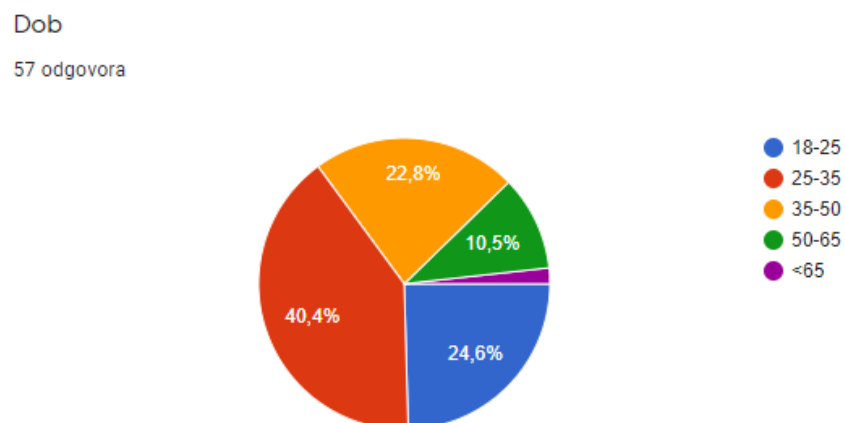
spomenulo samo 4,4 % ispitanika, Englesku 2,2 %, Sloveniju 2,2 %, Dansku 2,2 %, a kao odgovor „Ne znam“ ponudilo je 35,8 % ispitanika.

6.2 Ferdinandovac

U web anketi sudjelovalo je 50,9 % muškaraca i 49,1% žena od ukupno 57 ispitanika (slika 24.), a prema dobnoj granici najviše je u anketi sudjelovalo između 25-35. godina, a najmanje iznad 65. godina (slika 25.)



Slika 24. Prikaz spola



Slika 25. Dobna struktura

Na području Općine Ferdinandovac s obnovljivim izvorima energije upoznato je 89,5 %, a s geotermalnom energijom 70,2 % ispitanika. Da na području Općine Ferdinandovac postoji geotermalni izvor, zna 80,7% ispitanika, a 87,7% bi podržalo izgradnju geotermalne elektrane.

Da izgradnja postrojenja geotermalne elektrane pomaže u suzbijanju klimatskih promjena smatra 80,7%, a čak 89,5 % ispitanika smatra da izgradnja pomaže razvoju ruralnog gospodarstva. Glavnina ispitanika, njih 96,5 %, gleda geotermalnu elektranu u pozitivnom svjetlu budući da otvara nova radna mjesta. Emisije koje proizvodi elektrana i koje bi mogle imati negativan utjecaj na okoliš smatra 36,8%, a da emisije iz elektrane nemaju negativan utjecaj smatra 63,2% ispitanika.

Na pitanje postoji li geotermalna elektrana u Hrvatskoj, odgovor nije znalo 22,8 % dok je većina koji su odgovorili da postoji, naveli kao primjer Veliku Ciglenu kod Bjelovara, uz to pitanje bilo je postavljeno pitanje da li postoji još koje postrojenje osim geotermalne elektrane koje iskorištava geotermalnu energiju. Odgovor da ne postoji dalo je 48,4 % ispitanika, a ostali su odgovorili da postoje toplinske dizalice, vjetrenjače, Varaždinske i Bizovačke toplice, staklenici. Koja država u svijetu najviše koristi geotermalnu energiju odgovorilo je Island 39,7%, a ostale države od kojih su navedene Turska 2,1%, Kina 2,1 %, Finska 2,1%, Njemačka 2,1 %, Norveška 2,1 %, Irska 4,2 % a „ne znam“ odgovorilo je 45,6 % ispitanika.

7. Diskusija i zaključci

S obzirom da je prosječni geotermalni gradijent na području istraživanja iznosi iznad 0,04 °C/m koji je znatno veći od svjetskog prosjeka koji iznosi 0,03°C/m, sjeverozapadni dio Dravskog bazena definitivno ima potencijal za iskorištavanje geotermalne energije u različite svrhe (od proizvodnje električne energije, zagrijavanje staklenika, izgradnja toplica...). Geologija promatranog područja isto nam daje dobar preduvjet za daljnja istraživanja. Istražnim bušenjem na području Dravskog bazena izvađeni su uzorci sedimenta neogenske i kvartarne starosti, te dva kompleksa stijena koji čine magmatsko – metamorfni kompleks palezojske starosti. Na naslagama neogena nalazi se karbonatno-klastični kompleks koji karakterizira različit litološki sastav: vapnenci, dolomiti, breče, konglomerati te njihovi varijeteti. Dubina bušotina je od 1975 m do 4600 tu se izmjerene temperatura od 105 °C do 212 °C. Većina tih istraživanja bila je izrađena početkom 1960-tih i 1970-tih kada je INA radila istražna bušenja za eksploatacije nafte i prirodnog plina. Dana se prvi put počinje govoriti o geotermalnoj energiji. U razgovoru s nadzornim inženjerom koji je vodi remont plinskih i naftnih bušotina tih godina otkrio sam da su bili pozvani inženjeri sa Islanda koji su bolje bili upoznati s geotermalnom energijom. Na Islandu tada su bila izgrađena postrojenja za proizvodnju električne energije iz geotermalnih izvora te su oni s svojim iskustvom došli procijeniti kvalitetu otkrivenog geotermalnog izvora. Njihovi zaključci tih godina bili su da je geotermalni izvor na području Legrada jako dobar i da postoji veliki potencijal iskorištavanje tog izvora. Nažalost nakon odlaska inženjera sve je ostalo samo na papiru te se dugi niz godina nije ništa poduzimalo. Prvi koraci napravljeni su 2006. godine kada je vlada Republike Hrvatske dala program o davanju potpore gospodarske uporabe geotermalne energije za područje Lunjkovec – Kutnjak, Legrad, a zatim 2019. godine kada je napravljen elaborat zaštite okoliša pod imenom „Izgradnje geotermalne elektrane u općini Legrad“. Od 2019. godine do 2020. ništa se nije poduzimalo po pitanju izgradnje geotermalne elektrane. Da bi turska tvrtka Soyak u travnju 2020. godine dobila koncesiju i prava na istraživanje geotermalnog polja u Legradu. Oni su se obavezali da će do svibnja 2023. godine izbušiti dvije bušotine, a nakon toga planiraju izbušiti četiri do šest bušotina te izgradnju elektroenergetskog postrojenja.

Geotermalna energija je energija sadržana u Zemljinoj unutrašnjosti. Geotermalnom energijom možemo smatrati energiju koju možemo dobiti iz Zemljine unutrašnjosti. Geotermalnu energiju smatramo i obnovljivom i fosilnom nuklearnom energijom koja je nastajala raspadanjem prirodnih radioaktivnih elemenata (uran, torij i kalij) koji se nalaze u Zemljinoj unutrašnjosti, a geotermalnim resursima podrazumijevamo geotermalne vode koje se nalaze u podzemnim ležištima koje se napajaju već prolaze kroz podzemna ležišta i napajaju se prirodno ili umjetno utiskivanjem. Prema klasifikaciji postoje prema stupnju istraženosti, prema vrsti geotermalnog ležišta i prema temperaturi ležišnog fluida. Da bi smo govorili o geotermalnoj energiji moramo poznavati termička svojstva stijena i fluida, a oni su međusobno povezani specifičnom toplinom, toplinskom i temperaturnom vodljivosti i gustoćom. Kad su ti svi uvjeti povezani dobivamo dobre parametre za eksploataciju geotermalne energije. Zatim nam slijedi pridržavanje zakonskih okvira koje država definira prema Zakonu o vodama (NN 153/09, 63/11, 130/11, 56/13, 14/14) i Zakonu o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika (NN 52/18, 52/19). Ostvarivanjem tih zakona dobili smo koncesiju i možemo početi istraživanje i daljnja ulaganja.

Geotermalna elektrana Legrad će koristiti geotermalnu vodu iz proizvodnih bušotina za proizvodnju električne energije. Geotermalna elektrana koristi dva kruga radnog medija. Geotermalna voda u izmjenjivačima topline predaju svoju energiju organskom mediju koji se zagrijava i isparava. Ohlađena geotermalna voda se utisnim bušotinama vraća u ležište. Taj proces se naziva Organski Rankineov ciklus. Planirana električna snaga na stezaljkama generatora iznosi 25 MW, od kojih će se 19,9 MW plasirati u prijenosnu mrežu RH na naponskoj razini od 110 kV. Očekuje se da vijek trajanja geotermalne elektrane biti duži od 20 godina s temperaturom vode od 185 °C. Prednosti geotermalne elektrane u odnosu na druga postrojenja koje koriste obnovljive izvore energije su: što geotermalna elektrana može raditi s kapacitetom do 95%, dok vjetroelektrane mogu raditi kapacitetom od 40%, a energija iz energije iz fotonaponskih elektrana otprilike 15%. Geotermalne elektrane zauzmu i manju površinu obradivih prostora od vjetroelektrana i solarni ćelija. u odnosu na ostale obnovljive sustave energije i jedan su od rijetkih izvora koji pruža hlađenje, grijanje i toplu vodu iz iste instalacije. Ekološki je čista, koristi toplinu iz podzemlja, smanjuje emisiju CO₂ i omogućuje uštede na računima. Elektrana u Legradu neće imati bitno onečišćenja za okoliš osim malih količina emisija koji će se dogoditi tokom remonta bušotina. Geotermalna voda na predmetnoj lokaciji sadrži oko 50 Nm³ otopljenog ugljičnog dioksida u m³ geotermalne vode. Osim ugljičnog dioksida

geotermalna voda sadrži oko 12 ppm otopljenog sumporovodika. Privremenim skladištenjem geotermalne vode tijekom probne faze, a uslijed pada tlaka na atmosferski tlak, doći će do oslobađanja otopljenih plinova iz geotermalne vode. Testiranje bušotina je vremenski vrlo ograničeno, stoga će i emisije ugljičnog dioksida i sumporovodika biti kratkotrajne. Postrojenje će raditi na principu binarnog tipa koja eksploatiranu geotermalnu vodu nakon predaje topline radnom mediju sprovodi sa svim svojim primjesama nazad kroz utisne bušotine u ležište geotermalne vode, ne dolazi do emisija u zrak otopljenih plinova u geotermalnoj vodi.

Možemo zaključiti da je geotermalna energija energija budućnosti. Ima najveći rok trajanja i učinkovitost od svih obnovljivih izvora energije. Ne doprinosi drastičnim promjenama prirodne okoline. Zahtjeva veća ulaganja i istraživanja. U ovom radu smo vidjeli koliko je vremena trebalo od istraživanja pa sve do eksploatacije geotermalne energije. Sve više koristimo električnu energiju i bez nje je današnji život nemoguće zamisliti. Zato je važno da shvatimo koliko je važno proizvesti električnu energiju iz obnovljivih izvora energije uz najmanje utjecaje i promjene na okoliš.

8. Literatura

1. GRUPA autora 1998: Geoen - Program korištenja geotermalne energije - prethodni rezultati i ,buduće aktivnosti, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb 1998.
2. Kurevija T., Golub M. (veljača, 2008) *Iskorištavanje geotermijskih ležišta*. Skripta. Rudarsko geološko naftni fakultet. Dostupno na: <https://www.scribd.com/> .03.05.2021.
3. Hrvatski geološki institut. (studeni, 2020.) Delineacija i karakterizacija tijela geotermalnih podzemnih voda u Republici Hrvatskoj. Dostupno na: https://www.voda.hr/sites/default/files/dokumenti/delineacija_i_karakterizacija_tijela_geotermalnih_podzemnih_voda_u_rh.pdf Datum pristupa: 01.03.2021.
4. Britannica. Geothermal energy – History, Dostupno na: <https://www.britannica.com/science/geothermal-energy/History> Datum pristupa: 03.03.2021.
5. Obnovljivi izvori energije. Povijest korištenja geotermalne energije. Dostupno na: <https://www.obnovljivi.com/geotermalna-energija/66-povijest-koristenja-geotermalne-energije> Datum pristupa: 03.03.2021.
6. Kolbah S, Škrlec M, Golub M. (2018.) Kvantifikacija indiciranog geotermalnog potencijala RH za proizvodnju električne energije. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/215209> 15.03.2021.
7. Agencija za ugljikovodike. Geološki pregled kopna. Dostupno na: <https://www.azu.hr/istra%C5%BEivanje-i-eksploatacija/geolo%C5%A1ki-pregled-kopna/> 04.04.2021.
8. Agencija za ugljikovodike. (01.06.2020.) Dokumentacija za nadmetanje u postupku nadmetanja radi odabira najpovoljnijeg ponuditelja za istraživanje geotermalnih voda u istražnom prostoru „Legrad-1“ radi izdavanja dozvole za pridobivanje geotermalnih voda u energetske svrhe. Dostupno na: [Otvorena nadmetanja - Agencija za ugljikovodike \(azu.hr\)](#) 08.04.2021.
9. Šimunić, An., Hećimović, I., Avanić, R. i Šimunić, Al. (1990): Osnovna geološka karta RH 1:100.000. Tumač za list Koprivnica L 33-70. Hrvatski geološki institut, Zagreb, 2013. Dostupno na: <https://www.hgi-cgs.hr/> 22.04.2021.

10. Hrvatski geološki institut. (prosinac, 2014.) Rudarsko-geološka studija Koprivničko-križevačke županije. Dostupno na: <https://kckzz.hr/> 15.05.2021.
11. Vorkapić V. Energetska efikasnost i obnovljivi izvori energije – potpora kreiranju energetske politike na lokalnoj razini. Dostupno na: <https://www.menea.hr/> 16.05.2021.
12. Kovačić, G. i sur. Elaborat zaštite okoliša. *Zahvat: Izgradnja geotermalne elektrane u Općini Legrad*. Dostupno na: <https://mingor.gov.hr/> 28.05.2021.
13. Porić L. *Upotreba Rankineovog ciklusa s organskim fluidom za iskorištavanje geotermalne energije*. Završni rad. Veleučilište u Karlovcu, Strojarski odjel. 2016
14. Turboden. Products. Dostupno na: <https://www.turboden.com/> 07.06.2021.

Popis oznaka

λ	W/mK	toplinska vodljivost
c	J/kg K	specifična toplina
a	m ² /s	temperaturna vodljivost
ρ	kg/m ³	gustoća
E	J	količina topline koja je prošla kroz površinu
h	m	debljina sloja
A	m ²	površina sloja kroz koju prolazi toplinski tok
T_2-T_1	K	razlika temperature na suprotnim plohama sloja
τ	s	vrijeme prolaženja toplinskog toka
T	K	temperatura izmjerena na određenoj dubini
T_0	°C	srednja godišnja temperatura tla promatranog područja
G_t	°C/m	vertikalni geotermalni gradijent
q	mW/m ²	toplinski tok
η_t		termodinamička efikasnost
W	W	snaga
Q	°C	razmijenjena toplina u isparivaču

Popis slika

Slika 1. Raspodjela topline unutar planeta Zemlje i mehanizmi prijenosa topline (Dye, 2012 i Aravelo et al., 2009).

Slika 2. Princ Piero Ginori Conti i mala turbina pogonjena parom iz geotermalnog izvora, Lardarello (preuzeto s <https://www.obnovljivi.com/>)

Slika 3. Duboka vodna tijela (DVT) od kojih su neka trans-graničnog karaktera duž Hrvatsko Mađarske granice. Legenda: 1. Puna linija ograničava „porozna“ DVT, 2. Siva boja označava „krška“ DVT (Kolbah 2010)

Slika 4. Prikaz Panonskog bazena i planinskih lanaca koji ga okružuju (preuzeto s <https://www.azu.hr/>)

Slika 5. Područje Legrad u Dravskoj depresiji (preuzeto s: <https://www.azu.hr>)

Slika 6. Shematski opći litostratigrafski stup bušotine za područje Legrad (preuzeto s: <https://www.azu.hr>)

Slika 7. Tektonska karta lista Koprivnice (preuzeto s: www.hgi-cgs.hr)

Slika 8. Geološka karta Koprivničko-križevačke županije (preuzeto s: <https://kckzz.hr/>)

Slika 9. Starost sedimenata koje nalazimo u Koprivničko-križevačkoj županiji (osjenčane zeleno) (preuzeto s: <https://kckzz.hr/>)

Slika 10. Arteški tip ležišta (preuzeto s <https://pdfcoffee.com/>)

Slika 11. Duboko geotermalno ležište (preuzeto s: <https://pdfcoffee.com/>)

Slika 12. Korištenja geotermalne energije ovisno o temperaturi vode (preuzeto s: https://www.voda.hr/sites/default/files/dokumenti/delineacija_i_karakterizacija_tijela_geotermalnih_podzemnih_voda_u_rh.pdf)

Slika 13. Prikaz gustoće toplinskog toka i geotermalni gradijent u hrvatskim regijama (preuzeto s: <https://www.menea.hr/>)

Slika 14. Prikaz lokalnog geotermalnog gradijenta Republike Hrvatske (preuzeto s: http://escom.rgn.hr/activities/post_Potencijaliskori%C5%A1tavanjetoplinskeenergijeprekonapu%C5%A1tenihbu%C5%A1otina)

Slika 15. Isječak karte gustoće toplinskog toka (preuzeto s: <https://www.zagreb.hr/userdocsimages/gu%20za%20strategijsko%20planiranje/ANALI ZA%20SEKTORA%20TOPLINARSTVA-UAZ-Studija.pdf>)

Slika 16. Područje istražna bušotina Legrad-1 u kojoj je u planu izgradnja geotermalne elektrane Legrad 1 (Živković et al. 2015).

Slika 17. Prikaz geološkog profila, odnosno bušotine Vol-4 je na području općine Legrad (preuzeto s: <https://www.azu.hr/>)

Slika 18. Shematski prikaz ORC (preuzeto s: <https://repozitorij.vuka.hr/>)

Slika 19. Model ORC (preuzeto s: <https://www.turboden.com/>)

Slika 20. Zračni kondenzator modularnih jedinica radnog medija (Geotermalna elektrana Velika Ciglena) (preuzeto s: <https://mingor.gov.hr/>)

Slika 21. Prikaz prostora proizvodnih i utisnih bušotina (preuzeto s: <https://mingor.gov.hr/>)

Slika 22. Prikaz spolne strukture ispitanika

Slika 23. Prikaz dobne strukture ispitanika

Slika 24. Prikaz spola

Slika 25. Dobna struktura