Potencijalnost geotermalnog sustava Stubičkih Toplica

Šturlan, Ivana

Master's thesis / Diplomski rad

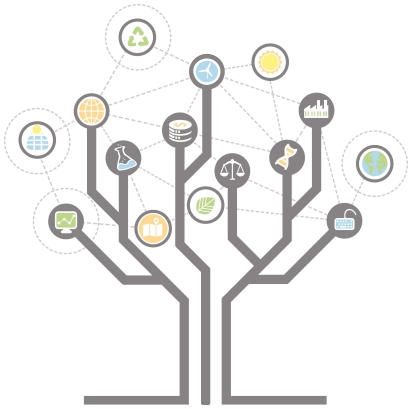
2017

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:282651

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Potencijalnost geotermalnog sustava Stubičkih Toplica

Šturlan, Ivana

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:282651

Rights / Prava: In copyright

Download date / Datum preuzimanja: **2020-11-04**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

IVANA ŠTURLAN

POTENCIJALNOST GEOTERMALNOG SUSTAVA STUBIČKIH TOPLICA

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

POTENCIJALNOST GEOTERMALNOG SUSTAVA STUBIČKIH TOPLICA

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:

Univ. bacc. ing. amb. Ivana Šturlan

MENTOR:

Prof. dr. sc. Sanja Kapelj

KOMENTOR:

Prof. dr. sc. Miroslav Golub

VARAŽDIN, 2017.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: IVANA ŠTURLAN

Matični broj: 139 - 2015./2016.

Smjer: UPRAVLJANJE OKOLIŠEM

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

POTENCIJALNOST GEOTERMALNOG SUSTAVA STUBIČKIH TOPLICA

Rad treba sadržati:
1. Uvod
2. Opis istraživanog područja
3. Pregled dosadašnjih istraživanja
4. Geološke značajke izvorišta
5. Kemijski sastav termalne vode
6. Izotopni sastav termalne vode
7. Geotermalni potencijal
8. Zaštita okoliša
9. Zaključak
10. Literatura
11. Popis slika, popis tablica, popis grafova, popis priloga

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

Zadatak zadan: 26.04.2017. Rok predaje: 11.09.2017.

Mentor:	Drugi mentor/komentor:	Predsjednik Odbora za nastavu:
Prof.dr.sc. Sanja Kapelj	Prof.dr.sc. Miroslav Golub	Doc.dr.sc. Igor Petrović

REPUBLIKA HRVATSKA - GEOTEHNIČKI FAKULTET - SVEUČILIŠTE U ZAGREBU - VARAŽDIN

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

POTENCIJALNOST GEOTERMALNOG SUSTAVA STUBIČKIH TOPLICA

(naslov završnog rada)

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom prof.dr.sc. Sanje Kapelj i komentora 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, 08.09.2017.

IVANA ŠTURLAN

(Ime i prezime)

Ivana Šturlan

(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

Ivana Šturlan: Potencijalnost geotermalnog sustava Stubičkih Toplica

Potencijalnost razmatranog geotermalnog sustava, kojim se odlikuju Stubičke Toplice, procijenjena je temeljem geoloških tumačenja. Istražnim geološkim bušotinama uzorkovane su stijenske naslage s povećanjem dubine. Utvrđeno je da geotermalno izvorište posjeduje tri vodonosna horizonta na različitim dubinama, no za sad se koristi geotermalna voda samo iz prvog, kojeg karakteriziraju vodonosnici u gornjobadenskim vapnencima (litotamnijskim). Izmjerena vrijednost temperature vode pokazala je 45 °C u plitkim zdencima i 69,7 °C u bušotinama gdje se javlja i pojava izotopne radioaktivnosti; no za procjenu potencijala najvažniji je parametar izdašnosti koji je procijenjen na 95 l/s. Kemijski sastav vode koji korelira s vrstama stijena u vodonosniku, definira da voda pripada kalcijevom, magnezijevom i hidrogenkarbonatnom tipu. Hidrogeokemijska istraživanja i analize stabilnih izotopa koristile su prilikom procjene uvjeta obnavljanja vodonosnika i zaključivanja da je termalna voda miješana s infililtriranim hladnijim oborinama u vodonosniku. Navedenim je prikazana mogućnost upotrebljavanja potencijala geotermalnog sustava i geotermalnih voda kao mineralnih sirovina koje je moguće iskoristiti u gospodarske svrhe, za zagrijavanje staklenika. Zato je prikazan proračun potrebne toplinske snage za održavanje projektirane temperature u stakleniku namijenjene uzgoju povrća.

Ključne riječi: potencijalnost, vodonosnik, temperatura, izdašnost, staklenik

SUMMARY

Ivana Šturlan: Geothermal energy potential in Stubičke Toplice

Geothermal energy potential in Stubičke Toplice was researched based on geological interpretations. Exploration wells sampled rock deposits with the wdepth increase. It has been determined that the geothermal source comprises three water - bearing horizons at different depths, but so far only the water from the first, characterised by aquifers in Upper Baden limestone (lithotaminium), has been used. The measured value of water temperature was 45°C in shallow wells and 69.75°C in exploration wells, where we found isotope radioactivity. The most important factor in the potential assessment is the emission perimeter set at 95 l/s. Chemical composition of water, which correlates with the types of rocks in the aquifer, defines the water type, i.e. calcium, magnesium and hydrogen carbonate type. Hydrogeochemical research and stabile isotope analysis were used to assess the conditions of aquifer regeneration, concluding that thermal water in the aquifer is mixed with colder, infiltrated precipitation. This proved the possibility to use geothermal energy and water potential as mineral resources, which could be used in economic purposes – greenhouse heating. Therefore, we have presented an assessment of thermal power required to keep the projected temperature in greenhouses used for vegetable cultivation.

Keywords: potential, aquifer, temperature, emission perimeter, greenhouses

Sadržaj

1. Uvod 1

2. Opis istraživanog područja 2

3. Pregled dosadašnjih istraživanja 4

4. Geološke značajke izvorišta 6

4.1. Tektonski odnosi 8

4.2. Litostratigrafski odnosi 9

4.2.1. Aluvijalni nanos - a - Q2 10

4.2.2. Gornji pont - M_7^2 10

4.2.3. Donji pont - M_7^1 10

4.2.4. Gornji panon - M_6^2 10

4.2.5. Donji panon - M_6^1 11

4.2.6. Sarmat – M_5 11

4.2.7. Gornji baden - M_4^2 11

4.2.8. Donji miocen - M_{1-2} 12

4.2.9. Srednji trijas - T_2 12

4.2.10. Donji trijas - T_1 12

4.3. Hidrogeotermalni odnosi vodonosnika 13

5. Kemijski sastav termalne vode 15

5.1. Kationi 16

5.2. Anioni 18

5.3. Piperov dijagram 20

6. Izotopni sastav vode 22

6.1. Stabilni izotopi 22

6.1.1. $\delta^{18}O$ i $\delta^2 H$ 22

6.1.2. $\delta^{13}C$ 25

6.2. Radioaktivni izotopi 25

6.2.1. Izotop Ra....26
6.2.2. Izotop Rn....27
6.2.3. Izotop ^{14}C....28
6.2.4. Izotop vodika ^{3}H....29
7. Geotermalni potencijal....31
7.1. Postojeći uvjet....32
7.2. Potrebni parametri....33
7.2.1. Statička temperatura tla....35
7.2.2. Geotermalni gradijent....35
7.2.3. Energetska raspoloživost....37
7.3. Modeliranje sustava....38
7.3.1. Opis tehničko – tehološkog procesa....39
7.3.2. Proračun toplinskih potreba....40
8. Zaštita okoliša....43
9. Zaključak....45
10. Literatura....47
11. Popis slika, popis tablica, popis grafova, popis priloga....51
11.1. Popis slika....51
11.2. Popis tablica....52
11.3. Popis grafova....53

1. Uvod

Područje Hrvatske, naročito njen sjeverozapadni dio, obiluje geotermalnim vodama. Termalne vode sjeverozapadne Hrvatske vezane su uz određene tektonske i litostratigrafske uvjete. Za procjenu potencijalnosti geotermalnog sustava takvi uvjeti moraju biti zadovoljeni te je nužno poznavati niz drugih karakteristika zadanog područja. Tako geotermalni sustav Stubičkih Toplica, s obzirom na temperaturu vode i dotok, pokazuje izvjesnu potencijalnost iskorištavanja u gospodarske svrhe. Cilj ovog rada je konstatirati postojeće analize i ukazati na istraživani potencijal sustava izvorišta. Procjena potencijala u radu započinje općim značajkama područja i pregledom dosadašnjih istraživanja Stubičkih Toplica. Ispitane geološke značajke izvorišta daju uvid u tektonske odnose, litološki sastav, u hidrogeotermalne odnose vodonosnika i u izdašnost, odnosno dotok vode pa i u njezinu temperaturu. Dalje je utvrđen kemijski sastav geotermalne vode, koncentracija aniona i kationa u uzorcima pojednih istraživanja te je kemijski sastav prikazan Piperovim dijagramom. Uz koncentracijski sastav termalne vode povezuje se pojava radioaktivnosti jednog izvora koja je obrađena u poglavlju izotopni sastav vode.
U istom su poglavlju prikazani stabilni izotopi pomoću kojih su određeni uvjeti nastanka, obnavljanja i starost podzemne vode u vodonosniku. Zaključenim geološkim i litološkim odnosima, kemijskim i izotopnim sastavom, uvjetima obnavljanja vodonosnika u završnom poglavlju prikazana je objektivna mogućnost iskorištavanja geotermalnih voda (energetska mineralna sirovina) za potrebe agrikulture, točnije za grijanje staklenika. Za područje izvorišta donesena ja arbitrarna procjena postojećih uvjeta, opisan je pojam energetske raspoloživosti koju je moguće dobiti iz termalne vode, zatim parametri i tehničko – tehnološki opis modeliranog sustava za zagrijavanje staklenika te su izračunate toplinske potrebe za održavanje projektirane temperature u stakleniku.

2. Opis istraživanog područja

Općina Stubičke Toplice prostire se na 27 km^2, što ju prema veličini svrstava na 23. mjesto od 32 jedinice lokalne samouprave na području Krapinsko - zagorske županije. Općina je smještena na jugu županije, a 80 % teritorija općine Stubičke Toplice obuhvaća Park prirode Medvednica, što je prikazano ortofoto kartom na slici 1. Na sjeveru graniči s gradom Oroslavje, a na istoku s gradom Donja Stubica, na zapadu s općinom Jakovlje, a na jugu s Gradom Zagrebom i manjim dijelom s općinom Bistra.



Slika 1. Digitalna ortofoto karta 2011. godina, M 1:100 000

(izvor: http://geoportal.dgu.hr/, datum pristupa: 16.08.2017.)

Područje Stubičkih Toplica ispresijecano je gustom mrežom gorskih potoka i potočića koji pripadaju slivu rijeke Krapine. Reljefno raščlanjeni i razvedeni brežuljkasti krajobraz Medvednice utjecao je na razvoj različitih vrsta tala. U površinskom horizontu tla na umjereno strmim obroncima prisutan je pseudoglej kojeg karakterizira mala plodnost i prekomjerno vlaženje atmosferskom vodom. Dok na strmijim padinama na vapnenačkoj dolomitnoj podlozi prevladava plodno tlo rendzina, odnosno crnica. Eutrična smeđa tla najučestalija su na dubljim terenima, dok su u dolinama prisutna aluvijalna tla pretežito sastavljena od pijeska i šljunka. Močvarna tla javljaju se na mjestim s usporenim

protokom vode i gdje se voda dulje zadržava. Stubičke Toplice imaju raznoliku vegetaciju, sastavljenu od šuma brdskih i dolinskih livada te od gorskih dolinskih vodotoka. Na osunčanim padinama brijegova prevladavaju zajednice hrasta kitnjaka, običnog graba i bukve. S druge strane na višim i hladnijim ograncima Parka prirode Medvednica zastupljene su šume bukve i jele. Od livadnih zajednica ističu se livade pahovke i livade krestaca. Vegetaciju potočne doline čine vrbe i johe te sekundarne zajednice vlažnih staništa u vidu visokih šaševa. Prema Köppenovoj klasifikaciji klime, područje pripada kontinentalnom - toplom umjerenom kišnom tipu klime. Srednja temperatura najhladnijeg mjeseca je iznad - 3 °C, ljeta su svježa pri čemu je srednja temperatura najtoplijeg mjeseca ispod 22 °C. Oborine su jednoliko raspoređene tokom godine pri čemu najviše oborina pada ljeti (lipanj – kolovoz) i na jesen, a najmanje je oborina u zimskom razdoblju. Upravo prosječna godišnja količina oborina od 952 mm ukazuje na humidnu klimu. Najučestaliji su vjetrovi jugozapadnog i sjeverozapadnog smjera.

Stubičke Toplice nadaleko su poznate po termalnim izvorima. Najvažnije izvorište nalazi se na prostoru gdje se potok Topličina probio između Kamenjaka i Kapelščaka i spojio s potokom Vidak. Termalnom vodom koriste se još od antike, a danas se njome koriste dva koncesionara – *Specijalna bolnica za medicinsku rehabilitaciju Stubičke Toplice* i hotel *Matija Gubec*. Voda iz izvora odlikuje visokom temperaturom, ljekovitim svojstvima, visokom koncentracijom kalcija te radioaktivnošću. Pored nekoliko termalnih izvora veliko značenje ima i prirodna baština, po vrijednosti je najznačajniji Park prirode Medvednica, proglašen 1981. godine. Zatim slijedi zaštićeni povijesni spomenik prirode hrast Galženjak te spomenik prirode – Tisa na vrhu Horvatovih stuba. Općina sadrži očuvano kulturno povijesno nasljeđe, kupališni kompleks koji se nalazi u sklopu Registra kulturnih dobara Ministarstva kulture Republike Hrvatske, obuhvaća glavnu kupališnu zgradu s Maksimilijanovom kupelji, parnu ili Dijaninu kupelj, kapelu sv. Katarine, te kupališni perivoj (Zagorska razvojna agencija, 2016). U prilogu broj 1 topografska karta daje informacije o mjesnim prilikama istraživanog područja, koje se odnose na naselja, prometnice, vode, vegetaciju, oblike reljefa i granice teritorijalnih područja.

3. Pregled dosadašnjih istraživanja

Termalna vrela u Stubičkim Toplicama istraživali su brojni stručnjaci, od balneologa i kemičara, do biologa i geologa. Termalni izvori poznati su iz drevnih doba, što dokazuje pronalazak rimskog novčića (Miholić i Trauner 1952, navedeno u Šimunić i Hećimović 2008). Toponim *Tupliza in praedio Zlubica* zabilježen je 1209. godine u povelji kojom Andrija II. Arpadović rodu Aka vraća oduzete posjede. Područje Stubičkih Toplica ima povijesnu važnost, naročito brdo Kapelščak na kojem je 1573. godine okončana znamenita Seljačka buna pod vodstvom Matije Gupca. Stubičke toplice spominje Crantz (1777), a Vukasović (1879) piše o njima na hrvatskom jeziku i iznosi kemijske analize Rudnog vrela i Gliba (Hauer 1879, u Šimunić i Hećimović 2008). Procvat toplica započeo je 1811. godine kada je zagrebački nadbiskup Maksimilijan Vrhovac preuzeo posjed i ispravno izgradio kompleks kupališta. Prvi natkriti bazen izgrađen baroknim stilom u glavnoj kupališnoj zgradi, prikazan na slici 2., nazvan je „Maksimilianeum“ (danas se koristi u svrhu medicinske rehabilitacije), a u perivoju je neogotičkim stilom izgrađena osmerokutna zgrada parne kupelji „Dijanina kupelj“ sa šiljastim lukom (slika 3.). Važno je naglasiti da na kompleksu Stubičkih Toplica, autor graditelj Kristijan Heinrich Vesteburg, u istom vremenu na tri objekta primjenjuje različite stilove (barokna tradicija, neogotika, klasicizam) što je rezultat miješanja povijesnih stilova tijekom cijelog 19. stoljeća.



Slika 2. Maksimilijanov bazen
(izvor: http://sbst.hr/, datum pristupa: 03.07.2017.)



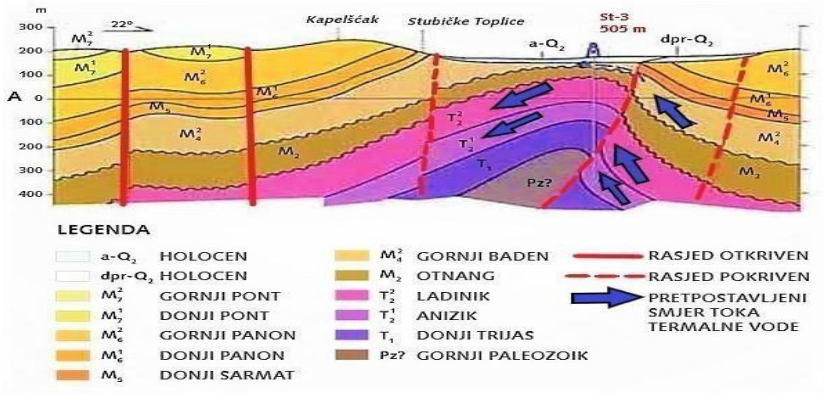
Slika 3. Dijanina kupelj
(izvor: http://www.visitzagorje.hr/, datum pristupa: 03.07.2017.)

Postojao je veliki rezervoar za hlađenje vode i zgrada parne kupelji poznata kao „blatna“ kupelj, te još dvije kupelji, jedna za građane, a druga za seljake. Sagradio je hotel s 45 soba i gostionicama. U to se vrijeme naveliko koristilo ljekovito blato sa samih izvora. Blato se nanosilo na bolna mjesta i upotrebljavalo za različite vrste bolesti. Preporučalo se piti takvu toplu vodu za određene tegobe (Šitić, 1814). Geološke i hidrološke analize krenule su inicijativom barunice Antonije Rauch koja ih je zatražila na temelju: *„Zakona o vodnom pravu od godine 1885. zakonski članak XXIII., podielbu štitnog okoliša za njezinu mineralnu kupelj u Stubičkih toplicah“*. Prvo istraživanje okolice toplica 1889. godine provedeno je prostoručno i na taj način su određene zaštitne zone površine do 5 km^2.

Geološku građu, podrijetlo vode i način izviranja proučavao je geolog Dragutin Gorjanović - Kramberger, koji pretpostavlja vulkansko podrijetlo vode (Šimunić, 1988). Njegovi su radovi korišteni za lociranje i izgradnju prvih bunara u Stubičkim Toplicama. Za orijentaciju potrebnih bunara, obavljena su prva geotermička istraživanja tla u Hrvatskoj. Najviša temperatura pokazala se na ušću potoka Vidak u potok Topličinu (Steeb, 1914, u Šimunić i Hećimović, 2008). Proučavajući termalne izvore Steeb zaključuje: *„tlak zraka, oborine i još mnogi drugi nepoznati faktori kombinovani najrazličitijim načinom prouzrokuju promjene nivoa kod terma“*. Između dva svjetska rata voda Stubičkih toplica buteljirala se u svrhu liječenja pod nazivom *„Stubička prirodna rudna voda“*. U izvješću su Bać i Herak (1962) odredili zaštitne zone, dali pregled geološko - tektonskih odnosa, predložili lokaciju istražne bušotine i iznijeli vrijednost izdašnosti. Utvrdili su da izdašnost geotermalnih bunara iznosi *„oko 1080 l/min, odnosno 18 l/s = 1550 m^3/dan“*. Posljednja hidrogeološka istraživanja s ciljem pronalaska novih količina vode obavljena su tijekom 1988. godine. Sastojala su se uglavnom od istražnog bušenja u području izvorišta termalne vode, a rezultati tih istraživanja su korišteni i u diplomskom radu (Glavinić 1963, Miletić 1988, Šimunić 1988, navedeno u Šimunić i Hećimović, 2008).

4. Geološke značajke izvorišta

Dragutin Gorjanović – Kramberger bavio se geološkom problematikom termalnih izvora u Hrvatskom zagorju. Uvodi pojam *„termalne linije“* kojim povezuje termalne izvore i postojeće rasjede. Osim, što se nalaze na nedokazanom „Balatonskom rasjedu“ kojim imaju doticaj s Varaždinskim toplicama, Stubičke toplice vezane su i Krapinskim toplicama takozvanom *„Zagorskom termalnom linijom“* (Šimunić, 2007). Zagrijavanje vode tumači kao rezultat vulkanske aktivnosti koja nije prestala. Probijajući kroz rasjede na površinu, vulkanski plinovi i pare stvaraju termalna vrela. Veliku izdašnost i potencijal objašnjava činjenicom da se nalaze na sjecištu dviju *„termalnih linija“*, za razliku od ostalih toplica sjeverozapadne Hrvatske (Šimunić, 1988). Geološkim kartiranjem, te kasnije obrađenim kemijskim analizama dokazano je da termalna voda nema vulkansko podrijetlo, niti pripada termalnim linijama. Miholić (1940) na temelju kemijskih analiza iznosi kako termalna voda nastaje infiltriranjem atmosferske vode, odnosno da je vadoznog porijekla. Tako se nakuplja u trijaskim dolomitima i vapnencima, a uz „termalne linije“ izbija na površinu. Istraživanjima Bać i Herak (1962) govore kako voda u Stubičkim toplicama nastaje na tjemenu izduženih antiklinala, a temperatura ovisi o dubini sinklinale ispod koje sama prolazi. Na slici 4. vidi se da je antiklinala (uzdignuti dio bore) u području izvorišta jako poremećena i ispresijecana brojnim rasjedima za koje se pretpostavlja da utječu na skoro pa vertikalno kretanje termalne vode.



Slika 4. Modificirani geološki profil okolice Stubičkih Toplica

(izvor: Šimunić, A. i sur., 2008)

Vodonosnici iz kojih se danas crpi voda čine gornjobadenski vapnenci (M_4^2) debljine 22 do 40 m, dok je površina prekrivena potočnim nanosom i glinom. U anizičkim dolomitima (T_2^1) na dubini od 100 m nabušen je drugi vodonosni horizont, dok se treći nalazi od 387 do 505 m dubine u tamnosivim dolomitima (P_z?).

Rubovi trijaskih karbonata okruženi nepropusnim miocenskim naslagama predstavljaju središnje mjesto gdje se voda može oborinski sakupljati (Šimunić, 2004). Tektonski i stratigrafski odnosi tumačni su Osnovnom geološkom kartom M 1 : 100 000 (Šikić i sur. 1972), u grafičkom prilogu br. 2 spojena su četiri lista različitih izdavača: Zagreb (L 38 – 80), Rogatec (L 33 – 68), Ivanić – Grad (L 33 – 81) i Varaždin (L 33 – 69). Grafički prilog daje uvid u važne geološke pojave na širem prostoru koji okružuje geotermalni sustav. Prostor izvorišta ubraja se u posebna područja koja su zaštićena prostornim planom i imaju važnost za Krapinsko – zagorsku županiju. U posebna područja ubrajaju se glavni i recentni izvori geotermalne vode: Maximilianeum, Glavno vrelo (Dijanina kupelj), Vrelo u livadi, Krista vrelo, Levinovo vrelo (najtoplije), Vrelo kod mosta,
Toplica vrela, Vrela uz desnu obalu Topličine (Službeni glasnik Krapinsko – zagorske županije *NN 16/09* i *9/13*, 2014). Izvorišni prostor predstavlja park *Matije Gupca*, gdje je na jednom od termalnih vrela kaptiran zatvoreni betonski bunar nazvan *„Topli kamen“* (slika 5.) koji je topao tijekom cijele godine.



Slika 5. Topli kamen

(fotografirano: 17. 08. 2017.)

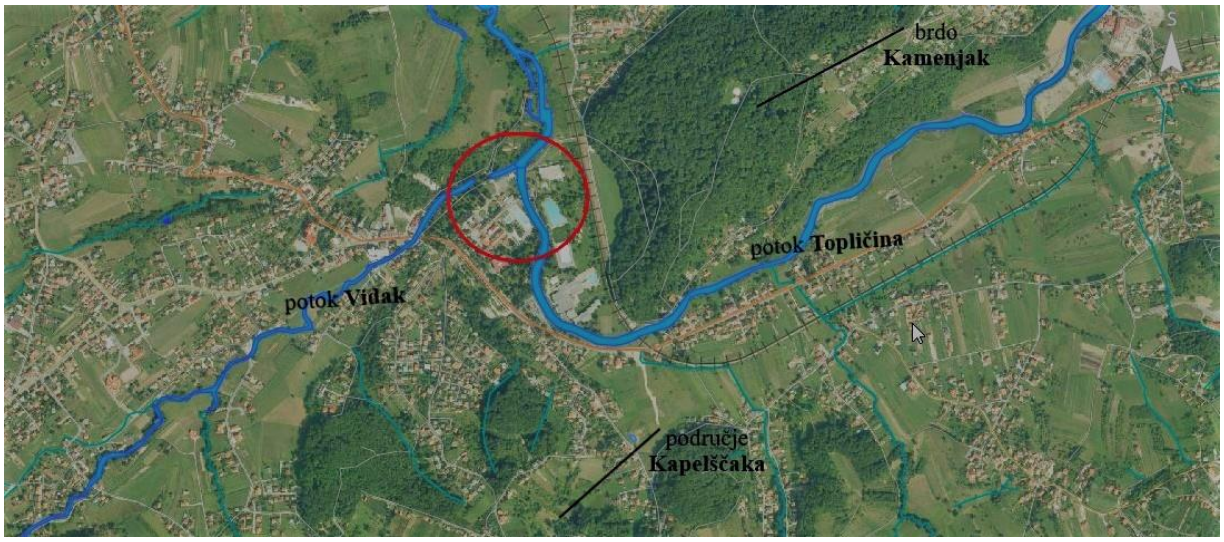
S obzirom na sve veću brigu o zaštiti okoliša danas bi se ponovo morala provesti zaštita toplica i termalnih izvora. To bi se moralo obaviti na potpuno novoj osnovi jer više nije dovoljna zaštita samo bliže okolice termalnog izvora, već je potrebno zaštititi područje napajanja i akumulacije kao i podzemne putove termalne vode. Da bi se to moglo obaviti mora se poznavati površinska i dubinska građa područja te dinamika obnavljanja rezervi geotermalne vode.

4.1. Tektonski odnosi

Termalni vodonosnici Stubičkih toplica objašnjeni su tjemenim dijelom izdužene antiklinale, čija se os B pruža u smjeru sjeveroistok - jugozapad. Duž dva najvažnija rasjeda, izdigli su se središnji dijelovi antiklinale, na čijim se tjemenima nalaze izvori. Dolinom potoka Vidak pruža se prvi rasjed i prelazi na područje Kamenjaka. Taj je rasjed u dubini reverzan, tako se objašnjava pojavljivanje tamnosivih srednjotrijaskih dolomita dubljih od 500 m. Drugi, južni rasjed, proteže se duž potok Topličinu. Taj je rasjed bio povod za postavljanje teorije o Balatonskom rasjedu koji „brazdi“ prostorom prema Gorjanović - Krambergeru. Uslijed paraklaze u kontakt su došle propusne gornjobadenske i trijaske naslage s nepropusnim panontskim i pontskim stijenama. Stoga je normalan tok vode prekinut, a ona izvire na mjestu gdje vodonosni slojevi izbijaju na površinu. Pojava je potkrijepljena hladnijim i slabijim izvorom termalne vode u Jezerčici u Donjoj Stubici, udaljenim oko 1,7 km. Osim glavnih rasjeda, Stubičke toplice presječene su s još dva rasjeda koji su okomiti na smjer pružanja antiklinale. Okolica je bila u stalnom izdizanju tijekom pliocena i kvartara, ali nisu se svi dijelovi kretali istom brzinom. Današnji izgled formiran je sredinom pleistocena (geološko razdoblje završeno prije 10 000 godina), no prije izdizanja ovakve strukture brda Kamenjak i Kapelščak bila su spojena (Šimunić i Hećimović, 2008).

4.2. Litostratigrafski odnosi

Geološkim istražnim bušotinama ustanovljeno je da Stubičke Toplice izgrađuju stijene donjeg i srednjeg trijasa, te mlađe miocenske karbonatno - klastične naslage i kvartarni sedimenti. Uzorci jezgre dobiveni su istražnim bušenjem na ušću potoka Vidak u potok Topličinu, a pokazuju vrste stijenskih naslaga do 506 m dubine (Šimunić, 1988). Slika 6. prikazuje ispravnu fotografiju šireg područja iz zraka, gdje je crvenim krugom označena površina na kojoj djeluju termalna izvorišta veličine otprilike 50 000 m^2. Naznačeno je ušće i trasa potoka Vidak i potoka Topličine koji u dubini predstavljaju rasjede te su označena brda Kamenjak i Kapelščak.



Slika 6. Ortofoto karta šireg područja M: 1: 10 000

(izvor: http://geoportal.dgu.hr/, datum pristupa: 16.08.2017.)

Načelom superpozicije u sljedećim podnaslovima opisane su stijenske naslage na području izvorišta termalne vode. Projektantski software AutoCAD korišten je u svrhu izrade grafičkog priloga br. 3 gdje prikazane modelirane litološke oznake stijenskih naslaga (Korbar i sur., 2012), prema tekstualnom opisu uzorka stijenske jezgre, s obzirom na istraženu dubinu i debljinu geoloških slojeva.

4.2.1. Aluvijalni nanos - a - Q2

Erozijskim djelovanjem potoka Vidak i Topličina nastale su dvije duboke udoline. Usječene su do badenskih vapnenaca u kojima leži prvi i glavni vodonosni horizont termalne vode. Kroz geološku prošlost u okolici je stvorena močvara u kojoj je odložena tamnosiva glina, debljine 0,5 – 1 m. Slijedi taloženje šljunka, pijeska i pjeskovitih glina. Sedimenti su slični recentnom nanosu potoka koji on transportira tijekom jačih poplava.

4.2.2. Gornji pont - M_7^2

Naslage ovog razdoblja predstavljaju ostatak široko rasprostranjenih sedimenata koji sprekrivali sjeverozapadnu Hrvatsku. Sedimenti se sastoje od žutosmeđih, tinjčastih pijesaka uz pjeskovite lapore. U okolici Stubičkih Toplica debljina takvih naslaga ne prelazi nekoliko desetaka metara. Krajem ponta, uslijed izdizanja, Panonsko more se povuklo s područja Hrvatskog zagorja i od tad je nastupila kopnena faza koja traje i danas.

4.2.3. Donji pont - M_7^1

U okolici Stubičkih Toplica sedimenti donjeg ponta rasprostiru se na maloj površini, samo u zapadnom dijelu Kapelščaka. To su glinoviti lapori koji se izmjenjuju sa sitnozrnatim pijescima. U istraživanom području debljina im iznosi 30 - 40 m. Pronađene su vrste brakične školjke *Paradacna abichi*, stoga se nazivaju i *„abichi slojevi*“.

4.2.4. Gornji panon - M_6^2

Uočeno je taloženje debelouslojenih lapora i donosa materijala. Pojavljuje se fosil *Congeria banatica*, pa se nazivaju *„banatica slojevi“*. Najčešće se pojavljuju na području Kamenjaka, dok ih na susjednom Kapelščaku ima nešto manje. U slojevima su šljunci koji se sastoje od fragmenata zelenih i glinenih škriljavaca, kvarca, te raznih pješčenjaka i vapnenaca. Debljina gornjopanonskih sedimenata iznosi 50 - 100 m.

4.2.5. Donji panon - M_6^1

U donjem panonu cijela sjeverna Hrvatska predstavljala je plitko slatkovodno jezero. Dolazi do promjena u fosilnom sadržaju stijena radi prekida veze s s Paratetisom i nastankom Panonskog bazena. Naslage donjeg panona izgrađuju velik dio brda Kamenjak, dok ih na Kapelščaku ima malo. To su tankopločasti (10 - 20 cm) vapnenci i vapnenački lapori koji sadrže karakterističnu slatkovodnu fosilnu zajednicu. Prisutna je vrsta slatkovodnog puža *Radix croatica,* zbog čega su slojevi poznati pod nazivom *„croatica slojevi"*. Debljina im varira od 30 do 50 m.

4.2.6. Sarmat – M_5

Naslage se pojavljuju na sjevernoj strani Kapelščaka i južnoj padini Kamenjaka. Debljina im ne prelazi 20 m. Litološki sastav utvrđuje da je bazen je još uvijek bio velik, njegovu prostranost dokazuju nalazi ostataka kitova i delfina, koje je pronašao Gorjanović - Kramberger (1908) kod Podsuseda. Taloženi su tankouslojeni i listićavi vapnenaci, lapori, gline i sitnozrnati pijesci. U bližoj okolici Stubičkih Toplica česti su nalazi fosilnih školjkaša, određene su vrste: *Ervilia dissita dissita, E. Dissitaa podolica, Cardium geleichenbergense* (Bash, 1986, u Šimunić i Hećimović, 2008).

4.2.7. Gornji baden - M_4^2

Naslage izgrađuju južni dio Kamenjaka, ali pojavljuju se i u podnožju Kapelščaka. Svi plići bunari izgrađeni nakon 1963. godine, zahvatili su termalnu vodu u gornjobadenskim vapnencima. U podnožju Kamenjaka naliježu svijetlosivi gornjobadenski vapnenci. Nazivaju se litavci ili litotamnijski vapnenci, nastali na „podmorskim livadama", a izgrađeni su od krša ježinaca, velikih oštriga i drugih školjkaša. Litavci i litotamnijski vapnenci, glavni su nositelji termalne vode u Stubičkim toplicama, a nalaze se na dubini do 60 m, no debljina im iznosi oko 22 m. U njima su pronađene kaverne promjera do 1 m, nastale uslijed protjecanja termalne vode (Šimunić, 2004). Takvi litotamnijski vapnenci nastaju procesom dedolomitizacije, a nastaju ako dolomitni kristali imaju višak Ca^{2+}. Cirkulirajući kroz dolomite površinska voda otapajući vapnence primi mnogo kalcijev hidrogenkarbonata i može postati prezasićena u odnosu na kalcit ili podzasićena

u odnosu na dolomit; tako dolazi do dedolomitizacije, odnosno kalcitizacije dolomita (Tišljar, 1994).

4.2.8. Donji miocen - M_{1-2}

U blizini željezničke stanice nalazi se jedini izdanak donjomiocenskih klastita, jezgra pokazuje izmjene crvenkastosmeđog pijeska, šljunka i sivozelene gline od 52,5 do 101,0 m dubine. Razlog ovakvom sastavu naslaga stoji iza tvrdnje da su ostaci nekadašnjeg slatkovodnog jezera u koja su rijekama i potocima unašani šljunci i pijesci. Ove naslage imaju bitnu ulogu radi svojstva nepropusnosti, najviše zbog glinovitih lapora koji ne omogućuju miješanje termalnih voda iz prvog vodonosnika i drugog koji se nalazi na preko 100 m dubine.

4.2.9. Srednji trijas - T_2

Na dubini od 101,0 – 263,0 m pokazani su vapnenci i dolomiti s dopunama koherentnih pješčenjaka, šejlova i tufova. Zatim su primijećene ljušturice malih školjkaša, pločica krinoida, foraminifere. U široj okolici Stubičkih Toplica nisu nađene naslage gornjeg trijasa, jure, krede i paleocena koje su inače poznate na Medvednici.

4.2.10. Donji trijas - T_1

Najstarije stijene u Stubičkim Toplicama pripadaju donjem trijasu. To su crvenosmeđi pješčenjaci, šejlovi i tankoploča sti oolitični vapnenci nastali uz obalu plitkog mora. Debljina im varira. Fosilni ostaci su rekristalizirani, no nisu određeni. Ove karakteristike koreliraju s naslagama na sjevernim padinama Medvednice. Nagib slojeva koji iznosi 58° čime se pokazuje povećana poremećenost stijenske mase u mjestu. Na 506 m ustanovljeni su tamnosivi i crni dolomiti, za koje nije određeno kojem geološkom razdoblju pripadaju. Daljnjim bušenjem je došlo do gubitka isplake, što je rezultat postojanja kaverna i zaključkom da postoji još dubljih termalnih vodonosnika.

4.3. Hidrogeotermalni odnosi vodonosnika

Bušotine su pokazale da u Stubičkim Toplicama postoje tri vodonosna horizonta. Prvi se javlja u gornjobadenskim vapnencima, drugi u aniščkim dolomitima na približno 100 m dubine. Između ta dva vodonosnika nalaze se donjomiceonski sedimenti koji su nepropusni i sprječavaju direktno miješanje termalne vode iz prvog i drugog vodonosnika. Treći vodonosni horizont leži na više od 500 m dubine. Temperatura na izvorima i plićim bunarima varirala je od 30 do 49,9 °C, a u bušotinama je pronađena voda temperature i do 69,7 °C (http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=58510). Izdašnost izvorišta do 1962. godina bila je oko 18/s, potom su izbušeni bunari do 60 m za potrebe hotela i lječilišta, čime su manji izvori presušili, no povećala se veličina izdašnosti na 48 l/s. Neki bunari imaju promjer i do 2 m, no to ne utječe na veličinu izdašnosti. Kod većih eksploatacija termalne vode iz jednog bunara dolazi do sniženja razine u svim ostalim, ali nikada nisu crpljeni svi bunari istovremeno, stoga se navedena vrijednost izdašnosti ne smatra realnom. No, potencijal izdašnosti termalne vode u Stubičkim Toplicama je velik, što govori najnovija vrijednost pretpostavke dotoka vode od 95 l/s = 5700 l/min = 342 m^3/h (Živković 2015, prema Meandžija i sur. 2017).

A. Glavni (prvi) vodonosnik

Glavni vodonosnik s debljinom 22 - 40 m čine gornjobadenski litotamnijski vapnenci. Površina vodonosnika pokrivena je potočnim nanosom i glinom, a nepropusne donjomiocenske klastične naslage debljine oko 60 m nalaze se u podini. Maksimalna temperatura ovog vodonosnika iznosi 45 °C. Na dubini do 60 m smješteni svi duboki bunari iz kojih se crpi potrebna termalna voda. Međusobni utjecaj bunara prilikom eksploatacije vode pokazuje da su postojeće količine vode u tom vodonosniku povezane i ograničene. U slučaju povećanje potrošnje vode biti će potrebno eksploatirati termalnu vodu iz dubljih vodonosnika.

B. Drugi vodonosnik

Na dubini 101 - 263 m istražna bušotina daje uvid u drugi vodonosnik. Debljina mu je oko 86 m, te predstavlja značajan rezervoar termalne vode temperature preko 65 °C. Predstavljaju ga srednjotrijaski (anizički) dolomiti, vapnenci i breče. U krovini vladaju donjomiocenski klastiti koji su primarno nepropusni, a u podini donjotrijaski šejlovi i pješčenjaci. Temperatura vode doseže 69,7 °C, no termalna voda iz ovog vodonosnika se ne koristi. Trijaske dolomite u kojima stoji drugi vodonosnik „nabušio“ je Glavinić (1963.) koji navodi kako se ispod badenskih vapnenaca pojavljuju šupine u dolomitima koje imaju obilježja pravog krša, te da postoje prave špilje promjera 2,5 – 8 m. (Šimunić, 2004).

C. Treći vodonosnik

Treći vodonosnik između 387 - 506 m, čine tamnosivi dolomiti za koje nije otkriveno pripadaju li trijasu ili čak gornjem permu. Debeli su 119 m, no bušotina ih nije probila, stoga mogu biti i deblji. Ako je riječ o srednjotrijaskim dolomitima, predstavljaju tektonsko pojavljivanje vode, gdje je temperatura vode usprkos povećanja dubine ostala jednaka. Treći vodonosnik ispresijecan je brojnim sitnim šupljinama i predstavlja značajan spremnik termalne vode. Povezanost između postojeća tri vodonosna horizonta teško je pretpostaviti, no nagađa se da postoji, s obzirom na brojne rasjede. Činjenice upućuju na visoke temperature u bušotinama i pojavu kasnije obrađene radioaktivnosti koju spominje Miholić. Novija geološka istraživanja su pokazala da situacija u podzemlju nije tako jednostavna kako se ranije mislilo. Vodoopskrba izvora mnogo je složenija jer se voda kreće po uklještenim i boranim vodonosnicima koji su naknadno rasjednuti, tako da pretpostavljeni «U» sustav prelazi u složeniji „W“ sustav ili u dvostruki „W“ sustav. U tom sustavu vanjski krakovi su povišeni i u njima se nakuplja oborinska voda, dok je središnji krak niži te u njemu izvire termalna voda (Šimunić, 2004). Naravno temperatura vode ovisi o dubini do koje dopire dno tog sustava te o geotermalnom stupnju koji za područje Hrvatskog zagorja iznosi 24,7 - 27,0 m (Rubinić, 1962, prema Šimunić, 2004).

5. Kemijski sastav termalne vode

Prirodna termalna voda prolazeći kroz vodonosnik i stijene otapa minerale od kojih su one građene. Ovisno o topljivosti pojedinih materijala i sastavu stijena, prirodne termalne vode poprimaju svoj kemijski sastav. Prema Miholiću (1944) termalnu vodu Stubičkih toplica karakterizira sastav pretežito kalcij - hidrokarbonati. U tablici 1. prikazan je kemijski sastav termalne vode u dva bunara i u jednoj bušotini.

Tablica 1. Kemijski sastav termalne vode

1 litra (l) vode termalne sadrži kationa		**Hotelski bunar (1992.)**	**Bolnički bunar (1996.)**	**Bušotina (1996.)**
Natrija	Na^+ [mg]	20,79	27,95	27,87
Kalija	K^+ [mg]	4,56	7,23	7,11
Kalcija	Ca^{2+} [mg]	68,97	66,95	71,74
Magnezija	Mg^{2+} [mg]	30,20	32,20	24,17
1 litra (l) termalne vode sadrži aniona				
Hidrokarbonata	HCO_3^- [mg]	298,90	318,05	300,43
Klorida	Cl^- [mg]	12,07	12,11	12,78
Sulfata	SO_{42-} [mg]	80,24	88,14	89,71
Ostali parametri				
pH		7,32	6,98	7,46
Temperatura [° C]	T	47,0	57,2	58,2

(prema Šimunić i Hećimović, 2008)

5.1. Kationi

Distribucija koncentracije kalcija, magnezija, natrija i kalija u vodi odražava mineraloško – petrografske karakteristike vodonosne sredine. Ca^{2+} i Mg^{2+} su kationi zemnoalkalnog porijekla. Koncentracija u podzemnim vodama se najčešće kreće oko više desetaka mg/l. Kalcij u prirodnim vodama potječe otapanjem iz karbonatnih minerala, kalcita ($CaCO_3$), dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), alumosilikata plagioklasa anortit ($CaAl_2Si_2O_8$), piroksena, zatim sulfata gipsa ($CaSO_4 \times 2H_2O$) i još nekih fosfata. Svi postojeći vodonosni horizonti u Stubičkim Toplicama leže ili su povezani s vapnencima i dolomitima (litotamnijski vapnenac, anizički dolomit, tamnosivi dolomiti), što objašnjava povećanu koncentraciju kalcija u termalnoj vodi. Magnezij, osim što se javlja u karbonatima i dolomitima, što je ovdje slučaj, tipična je komponenta ultrabaziČkih minerala piroksena, amfibola, olivina i tinjaca. Topljivost kalcijevih i magnezijevih karbonata ovisi i o količini otopljenog CO_2, točnije o karbonatnoj ravnoteži. U prirodnim vodama omjer Ca^{2+} : Mg^{2+} kreće se u granicama 5:1 do 1:1. Visoki omjeri karakteristični su za vodonosne sredine izgrađene od čistijih vapnenaca, niske omjere imaju vode iz pretežito dolomitnih vodonosnika. Dobiveni omjer kalcija i magnezija 3:1 u termalnoj vodi Stubičkih Toplica prikazan je u tablici 2.

Tablica 2. Odnos kalcija i magnezija, mineralizacija i tvrdoća

Ca^{2+} [mg/l]	Mg^{2+} [mg/l]	Ca / Mg	Mineralizacija	Tvrdoća $CaCO_3$/l
78,32	25,74	3,043	594,78	301,3

(prema Marić i sur., 2014)

Mineralizacija vode posebno je važan pokazatelj sastava podzemne termalne vode. Mineralizacija predstavlja zbroj otopljenih mineralnih tvari u vodi i opći je pokazatelj mogućnosti njezine uporabe. Za pitku vodu dopuštena mineralizacija je do 1 g/l, no najukusnija voda za piće je ako ima otopljenih 400 – 500 mg tvari u litri vode. Termalna voda Stubičkih toplica prema klasifikaciji mineralizacije pripada malo mineraliziranim (slatkim) vodama. Prema klasifikaciji tvrdoće termalna voda s obzirom na izmjerenu koncentraciju $CaCO_3$/l pripada tvrdim vodama. (Sawyer i McCarty, 1979, navedeno u

Bačani 2012). Dalje, koncentracija natrija u prirodnim vodama nekoliko puta je viša od koncentracije ukupno otopljenog kalija. Ta činjenica prepisuje se većoj otpornosti kalijskih feldspata, muskovita i biotita na kemijsko trošenje od natrijsko - kalcijskih plagioklasa, ali i manjoj pokretljivosti kalija u vodi. Kalij ima sposobnost da lako uzlazi u kristalne rešetke minerala glina, te se tako ugrađuje u strukturu stijenske mase (Hem, 1959, navedeno u Kapelj, 2010). Sljedeća Tablica 3. iznosi kemijsku analizu sastava termalne vode objavljenu 2015. godine.

Tablica 3. Minimalna srednja i maksimalna koncentracija kationa i aniona u vodi

Broj uzoraka	**4**		
1 litra termalne vode sadrži kationa	**Min.**	**Sred.**	**Max.**
Na^+ [mg]	20,8	25,3	28,5
K_+ [mg]	4,6	6,3	7,3
Ca^{2+} [mg]	71,7	66,9	71,7
Mg_{2+} mg]	23,1	25,4	30,2
1 litra termalne vode sadrži aniona			
HCO_3^- [mg]	262,3	281,8	300,4
SO_4^{2-} [mg]	80,2	88,3	97,9
Cl^- [mg]	9,6	12,1	13,9
Ostalo			
T [°C]	47,0	53,9	65,0
pH	6,7	7,0	7,3
EC [µS/cm]	610	627	653

(prema Marković, T. i sur., 2015.)

5.2. Anioni

Hidrogenkarbonati i karbonati, HCO_3^- i CO_3^{2-}, općenito zauzimaju prvo mjesto u sastavu podzemnih voda. Njihovo porijeklo u hidrogeološkom ciklusu vezano je uz otapanje CO_2 iz atmosfere i iz dubljih dijelova Zemljine kore, a u najvećoj mjeri potječu iz zone tla gdje nastaju otapanjem karbonatnom kiselinom (H_2CO_3) (Hem, 1959; navedeno u Kapelj, 2010).

Veličinom pH koja predstavlja negativan logaritam koncentracije/aktiviteta vodikovih iona - $\log[H^+]$, određen je odnos koncentracije hidrogenkarbonat iona HCO_3^-, karbonat iona CO_3^{2-} i nedisocirane karbonatne kiseline H_2CO_3 na danoj temperaturi vode. U jako kiselim vodama (pH < 4), HCO_3^- i CO_3^{2-} gotovo da i nema, no u termalnoj vodi Stubičkih Toplica koju karakterizira neutralan pH pretežito prevladavaju hidrogenkarbonati, što je vidljivo iz svih kemijskih analiza u tablicama i sukladno karbonatnoj ravnoteži u prirodnim vodama. U neutralnim vodama sadržaj HCO_3^- varira od desetak do 1000 mg/l i rijetko prelazi tu granicu.

Kloridi, Cl^- redoviti su sastojak podzemnih voda. U podzemnoj vodi nalaze se u različitim koncentracijama, od nekoliko mg/l do 150 g/l, pri čemu ih ima puno više u priobalnim vodonosnicima pod utjecajem mora. Porijeklo klorida u podzemnoj vodi vezano je uz otapanje soli u spojevima s metalima (NaCl) i nemetalima, a mogu biti i produkti vulkanizma i otapanja nekih minerala koji sadrže klor te mogu biti i posljedica otapanja dispergiranih klorida u magmatskim stijenama. Prilikom veće koncentracije klorida dolazi do korozije u cijevima, osobito u sustavima za grijanje vode. Svi kloridi su jako topljive soli i rijetko se talože, a slabo su podložne ionskoj izmjeni, adsorpciji i djelovanju biološkog faktora (Bačani i Vlahović, 2012).

Koncentracija sulfata, SO_4^{2-} u stubičkoj vodi nije velika, pošto oni čine glavne anione u visoko mineraliziranim podzemnim vodama. Sadržaj sulfata inače je različit, u termomineralnim vodama od nekoliko mg/l do 200 g/l. Pojava sulfata u vodi vezana je uz otapanje sedimentnih naslaga koje sadržavaju lako topljive soli, kao što su gips, anhidrit, te za oksidacijske procese sulfidnih minerala (galenit, pirit, halkopirit) i raspadanje organske tvari. U laporima i šejlovima nalazi se pirit FeS_2, koji oksidacijom

daje povećanu koncentraciju SO_4^{2-} iona. Najveće koncentracije SO_4^{2-} sadržane su u evaporitima, primjerice anhidritu i gipsu. Količina sulfata ograničena je prisutnošću kalcija s kojim stvaraju slabo topljive soli (Bačani i Vlahović, 2012). Koncentracija sulfata i klorida izmjerena na većim dubinama upućuje na to da je voda došla u kontakt sa škriljavcima, koji sadrže i sol (Miholić, 1944). U posljednjoj tablici 4. kemijskog sastava termalne vode navedeni su rezultati analize provedene u balneološkom laboratoriju za termalni izvor kojim se koristi Specijalna bolnica za medicinsku rehabilitaciju Stubičke Toplice (izvor:http://sbst.hr).

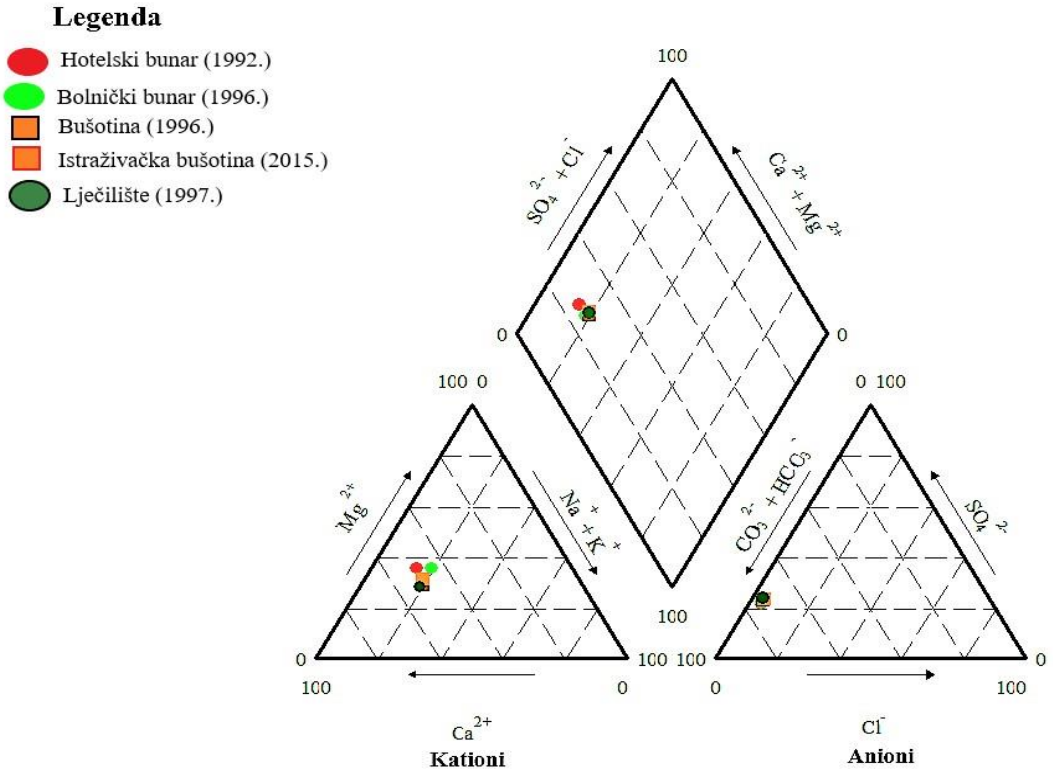
Tablica 4. Kemijska analiza Zavoda za fizikalnu medicinu i rehabilitaciju Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu izvršena u 1997. godine u balneološkom laboratoriju

1 litra vode sadrži	mg	mmol
Kationa		
Natrija	29,03	1,263
Kalija	7,03	0,18
Kalcija	78,32	1,954
Magnezija	25,736	1,059
Litija	0,09	0,002
Stroncija	0,14	0
Barija	0,01	0
Mangana	0,02	0,003
Željeza	0,15	0,022
Aluminija	0,6	4,496
Aniona		
Flourida	0,47	0,025
Klorida	10,49	0,296
Bromida	0,016	0
Jodida	0,005	0
Hidrogenkarbonata	296,8	4,846
Sulfata	94,039	0,019
Hidrofosfata	1,8	6,164
Silicijeve kiseline	50,043	0,641
Mineralizacija	594,789	11,301
Ugljičnog dioksida	101,49	
Temperatura vode	65	
Gustoća (20° C)	1,0005	

(izvor:http://sbst.hr)

5.3. Piperov dijagram

Kemijski sastav podzemnih voda može se vizualizirati pomoću Piperovog dijagrama, koji se u praksi koristi za tu svrhu. Sastoji se od četverostranog centralnog grafa (romba) i dva istostranična trokuta s lijeve i desne strane u kojima se odvojeno prikazuje relativna brojnost kationa i aniona u % mgekv. Ukupna suma kationa i aniona je 100 %, a stranice trokuta su osi koje sežu od 0 do 100. Unosom odgovarajuće vrijednosti u trokute proizlaze točke koje se potom projiciraju u romb i predstavljaju ukupnu ionsku raspodjelu, odnosno ukupne kemijske značajke uzorka vode. Piperov dijagram ima mogućnost prikazivanja velikog broja analiza iz različitih litoloških članova na jednom dijagramu, a kao i drugi linearni dijagrami, omogućuje da i ionski i kationski sastav bude prikazan na jednom grafikonu, te da se pokaže grupiranje točaka za označavanje uzorka koji imaju sličan sastav. U dijagramu prikazanom na slici 7. su unesene sve vrijednosti koncentracija aniona i kationa prikazane u gornjim tablicama. Piperov dijagram prikazuje da termalna voda pripada kalcijevom, magnezijevom i hidrogenkarbonatnom geokemijskom tipu voda. Dijagram je koristan za vizualno opisivanje razlike glavnog ionskog sastava u sustavima podzemnih voda. Utvrđuje geološke jedinice s kemijski sličnom vodom, klasificira vode, a i prikladan je za prikazivanje miješanja dviju voda različitog izvora (Bačani i Vlahović, 2012).



Slika 7. Piperov dijagram

Piperov dijagram prikazuje da termalna voda pripada kalcijevom, magnezijevom i hidrogenkarbonatnom geokemijskom tipu voda. Usporede li se sve vrijednosti prikazane u tablicama i starije provedene analize, uočljivo je da se kroz više od stotinu godina kemijski sastav vode nije bitno izmijenio, a razlike u količinama nekog kemijskog elemenata pripisuju se aparaturi i metodi mjerenja pojedinih parametara i njihovim granicama određivanja. Analize provedene kako bi se spoznao kemijski sastav termalne vode ukazuju na pojavu radioaktivnosti, koja korelira s povišenom temperaturom u vodonosnim horizontima.

6. Izotopni sastav vode

Elementi u prirodi nalaze se kao smjesa više izotopa. Izotopi su atomi istog kemijskog elementa, no različite mase, a razlikuju se po broju neurona u jezgri. Prema stabilnosti jezgre razlikuju se stabilni i radioaktivni izotopi. Jezgra stabilnih izotopa se ne mijenja s vremenom, suprotno jezgri radioaktivnih izotopa koja nakon nekog vremena doživi transformaciju, odnosno radioaktivni raspad. Radioaktivni izotopi pojedinih elemenata spontano se raspadaju emitirajući pritom energiju i radioaktivne čestice pri čemu dolazi do nastanka novih izotopa istovrsnog elementa i/ili novih elemenata.

6.1. Stabilni izotopi

Sastav stabilnih izotopa podzemnih voda mijenja se geološkim, litološkim, kemijskim, biokemijskim, ekološkim i klimatološkim čimbenicima. Od stabilnih izotopa za geokemiju podzemnih i geotermalnih voda važni su izotopi vodika ^{1}H (procij), ^{2}H (deuterij), kisika ^{16}O i ^{18}O i ugljika ^{12}C i ^{13}C. Koncentracije stabilnih izotopa izražavaju se kao omjer težih izotopa u odnosu na sadržaj lakših ($^{2}H/^{1}H$ ili $^{18}O/^{16}O$) u uzorku vode u usporedbi s tim omjerom u standardu. Rabi se veličina δ ($\delta^{2}H$, $\delta^{18}O$), a prikazuje relativno odstupanje omjera izotopa u nekom uzorku vode, od omjera u standardnom uzorku vode, izraženo u promilima. Za izotopne odnose $\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$ određen je međunarodni standard SMOW[1].

6.1.1. $\delta^{18}O$ i $\delta^{2}H$

Omjer stabilnih izotopa kisika $\delta^{18}O$ i vodika $\delta^{2}H$ u prirodnim uvjetima varira. Ovisi o nadmorskoj visini, geografskoj širini, godišnjem dobu, količini oborina, evaporaciji i kontinentalnom efektu (s nadmorskom visinom raste udio lakših izotopa u oborinama).

[1] Standard Mean Ocean Water

Ustanovljena linearna zavisnosti između sadržaja stabilnih izotopa kisika i vodika u oborinama omogućuje ispitivanje hidrodinamičkih uvjeta. Naime, omjeri stabilnih izotopa pronašli su primjenu u hidrogeologiji i hidrogeokemiji kod istraživanja podzemnih vodnih veza, za utvrđivanje porijekla vode, područja prihranjivanja i brzine izmjene vode u vodonosnicima, za područja napajanja i pražnjenja vodonosnika itd. (Kapelj, 2010). Takve interpretacije temelje se na usporedbi sa SMOW standardom izotopnog uzorka, a to je oceanska voda na dubini > 40 m. Unatoč definiciji koja uključuje termin „oceanska voda“, ne odnosi se na morsku nego na „čistu“ vodu određenog izotopnog sastava (Kapelj, 2010; Bačani i Vlahović, 2012). Odstupanje omjera težeg izotopa od lakšeg u uzorku u odnosu na isti omjer u standardu mjeri se tehnikom masene spektrometrije.

U svjetskim oborinama, ustanovljen je linearni odnos između δ^2H i $\delta^{18}O$, a prikazuje se u najvećem broju objavljenih znanstvenih publikacija jednadžbom pravca

$$\delta^2H = \delta^{18}O + 10 \qquad (1)$$

koji se naziva GMWL[2] - globalni pravac meteorske vode. Za praktičnu primjenu u hidrološkim i hidrogeološkim istraživanjima koristi se pravac oborinske vode dobiven za točno određeno područje, primjerice nekog sliva (LMWL[3] – lokalni pravac meteorske vode). Odstupanja izotopnog sastava podzemnih i površinskih voda od tog pravca može ukazivati na izotopne izmjene u vodonosniku, miješanje voda različitog porijekla, povećano isparavanje iz stajaćih voda ili na neke druge procese i utjecaje. Pravac oborinske vode dobije se na osnovu dugotrajnog mjerenja sadržaja stabilnih izotopa u mjesečnim kompozitnim uzorcima oborina na nekom području, obično na meteorološkim postajama. U tablici 5. prikazana je koncentracija stabilnih izotopa u geotermalnoj vodi Stubičkih Toplica.

[2] Global Meteoric Water Line

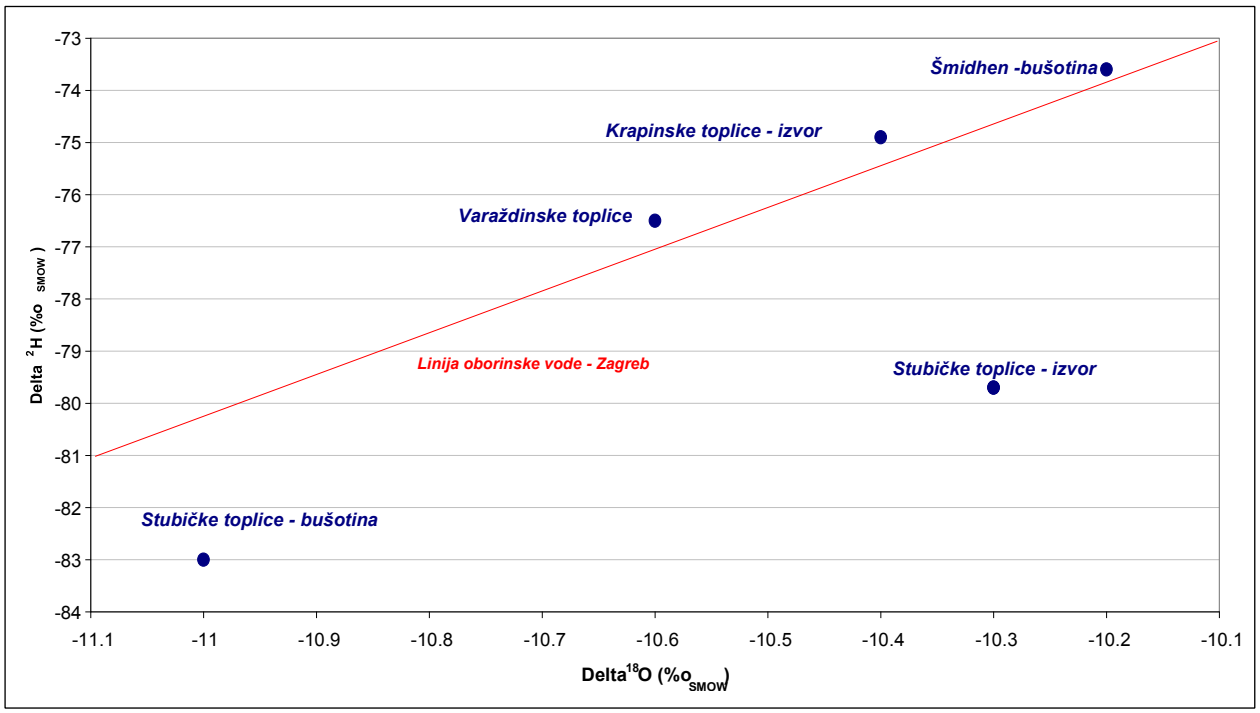
[3] Local Meteoric Water Line

Tablica 5. Koncentracija δ^2H i $\delta^{18}O$ u termalnoj vodi Stubičkih toplica

	Bušotina	**Izvor**
δ^2H ‰ SMOW	-83,00	-79,70
$\delta_{18}O$ ‰ SMOW	-11,00	-10,30

(preuzeto iz Horvatinčić i sur., 1996)

Na grafu 1. prikazan je odnos stabilnih izotopa δ^2H i $\delta^{18}O$ u termalnim vodama na području sjeverozapadne Hrvatske.



Graf 1. Odnos δ^2H i $\delta^{18}O$ u termalnim vodama na području sjeverozapadne Hrvatske

(preuzeto iz Horvatinčić i suradnici, 1996)

Termalna voda prikupljena iz bušotine i izvora u Stubičkim vodama upućuje na pretežiti doprinos infiltrirane vode u geotermalni vodonosnik tijekom hladnijeg razdoblja. Sadržaj stabilnih izotopa kisika i vodika je vrlo blizak pravcu oborinske vode – Zagreb što upućuje na pretežito meteorsko (oborinsko) porijeklo vode u geotermalnim vodonosnicima Stubičkih toplica.

6.1.2. $\delta^{13}C$

Određivanjem omjera stabilnih izotopa ugljika $\delta^{13}C$ može se odrediti porijeklo ugljika u vodi. Stari marinski karbonati i morska voda imaju $\delta^{13}C$ od -1 do 1 ‰, neke trave, žitarice, kukuruz posjeduju približno –12 ± 3 ‰. Otopljeni CO_2 u oborinama ima prosječni $\delta^{13}C$ 7 ± 1 ‰. Putujući kroz tlo do vodonosnika, voda otapa biogeni CO_2 koji ondje nastaje respiracijom bilja i raspadanjem organske materije. Biogeni CO_2 ima isti omjer stabilnih izotopa kao i biljke. Činjenica da je atmosferski parcijalni tlak CO_2 mnogo manji od biogenog, pri otapanju karbonata u vodonosniku, njegov je doprinos puno manji. Stoga negativnije vrijednosti omjera znače i veći udio biogenog ugljika, a pozitivnije znače veći udio anorganskog ugljika nastalog otapanjem stijena ili izotopnom izmjenom s atmosferskim CO_2 (Kapelj, 2010; Bačani i Vlahović, 2012).

6.2. Radioaktivni izotopi

Radioaktivni izotopi prirodnog podrijetla su kalij (^{40}K), radon (^{222}Rn), radij (^{226}Ra), torij ($^{230,232}Th$), uran ($^{235,238}U$), no u okolišu postoje radionuklidi koji se javljaju kozmičkim zračenjem, tesiranjem nuklearnog oružja, radom nuklearnih elektrana. Radionuklidi emitiraju ionizirajuće alfa (α) čestice, beta (β) čestice i gama (γ) zračenje. Ranije je za radioaktivnost služila jedinica curie (Ci), prema podacima raznih autora izlazi da je 1 Ci = 2,67; 2,49 ili 2,75 MJ (Machovih jedinica). Prema SI sustavu, jedinica za radioaktivnost je becquerel (Bq), a jedan Bq odgovara raspadu nekog radioaktivnog izotopa u jednoj sekundi. 1 Ci je $3,7*10^{10}$ Bq raspada u sekundi. Za uzorke vode koristi se mjerna jedinica pikoCurie (pCi), koji iznosi $1*10^{-12}$ Ci, ili $3,7*10^{-2}$ raspada u sekundi, a količina

radioaktivnih izotopa u podzemnim vodama određuje se indirektnim mjerenjem broja reakcija raspada tijekom dane dužine vremena, izražava se u jedinici Bq/l (Kapelj, 2010; Bačani i Vlahović, 2012).

6.2.1. Izotop Ra

U prirodnim vodama pojavljuju se četiri oblika izotopa radija: ^{223}Ra, ^{224}Ra, ^{226}Ra i ^{228}Ra. Izotop ^{226}Ra ima mnogo duže poluvrijeme raspada od ostalih (1599 godina), drugi oblici izotopa radija su kratkoživći te stoga jako radioaktivni (Hem, 1985, navedeno u Kapelj 2010). Hidrogeokemija radija nije tako dobro poznata. Radij je puno topljiviji od urana i torija i podložan je bioakumulaciji u bilju, jako je izmjenjiv kao kation. ^{228}Ra ima puno kraće poluvrijeme raspada (5,8 godina) od ^{226}Ra. Oba izotopa zastupljena su u podzemnim vodama. Istraživanja provedena gamaspektrometrijskom analizom pokazala su vrijednost specifične aktivnosti izotopa ^{226}Ra i ^{228}Ra. U termalnim vodama Stubičkih toplica specifična aktivnost ^{226}Ra iznosila je otprilike 2050 Bq/m^3, dok je za ^{228}Ra 2400 Bq/m^3. Omjer aktivnosti izotopa ^{226}Ra i ^{228}Ra iznosi 0,54. Ukupna specifična aktivnost ^{40}K iznosila je 3000 Bq/m^3. Koncentracija specifična aktivnost termalne vode Stubičkih toplica nalazi se unutar zakonom dopuštenih granica (Marović i Senčar, 1998).

U pogledu radioaktivnosti termalne vode Stubičkih toplica nije provedeno dovoljno istraživanja. Termalna voda je u određenom niskom stupnju radioaktivna. Miholić prvi provodi analize radioaktivnosti termalnih voda Hrvatskog zagorja. Rezultati izvora nekadašnje Blatne kupelji govore vrijednost radioaktivnosti od 2,88 - 3,00 nC/l (7,91 - 8,23 MJ). Zatim slijedi analiza koja navodi da je vrijednost radioaktivnosti na jednom od izvora čak 9,56 nC/l ili 26,26 MJ (Matoničkin i sur., 1964). Povišena radioaktivnost na tom današnjem izvoru „ispod brane“ kojeg prati i najviša izmjerena temperatura povezuje se s tamnosivim, anizičkim dolomitima. Oni su pronađeni u najdublje istraženom podzemlju Stubičkih Toplica, odakle se javlja povećana radioaktivnost, što korelira s geološkom vodonosnom situacijom u slovenskim Atomskim toplicama. Vrelo na livadi sa 2,7 MJ ili 0,983 nC/l ukazuje kako radioaktivnost ostalih izvora nije povezana i promjenjiva je. Ispitana je i ukupna β – aktivnost u vodi pomoću organizama; na 7785 organizama (biljaka) u pCi/g, izmjerena je β – aktivnost koja iznosi 5,27 pCi/l. Vrijednost

je pokazala toleranciju ispod dozvoljene, dok su u istoj analizi ostale toplice Hrvatskoj zagorja imale nešto veću aktivnost (Matoničkin, i sur., 1964). Povećana radioaktivnost kao i povišena koncentracija cinka u dubini tvori vezu s nalazom smithsonita ($ZnCO_3$) u blizini izvora (Miholić, 1944).

6.2.2. Izotop Rn

Radon je najvažniji od svih izvora prirode radijacije. To radioaktivni plin, bez okusa, mirisa i boje, kemijski je inertan, no ima sposobnost difunfiranja iz vode u atmosferu, a njegovim radioaktivnim raspadom nastaje izotop ^{210}Pb. Povećane koncentracije nalaze se u zonama intenzivne ispucalosti i većih rasjeda, te u podzemnim vodama ležišta urana, fosfata i u magmatskim stijenama (Bačani i Vlahović, 2012). U prirodi postoje tri izotopa radona, ali za podzemne vode je najznačajniji ^{222} Rn. Njegovo vrijeme poluraspada je 3,8 dana, ostali izotopi radona imaju veoma kratko vrijeme raspada, manje od minute. EPA[4] preporuča kao MCL[5] standard od 300 pCi/L radona u pitkoj vodi. Koncentracija radona od 5 do 15 bq/m^3 svakodnevno ulazi u respiratorni sustav kod ljudi, stoga može utjecati na ljudsko zdravlje. Preporučeno je pratiti koncentraciju radona u lječilištima i zatvorenim objektima gdje postoji konstantni dotok nove termalne vode koja potom isparava, a koncentracija radona zadržava se u prostoriji i dolazi u izravan doticaj s korisnicima. Vrijednost koncentracije radioaktivnog radona termalne vode u Specijalnoj bolnici za medicinsku rehabilitaciju iznosi 45,85 Bq/l = 3,4 M J = 1,24 nC/l.

Novije analize raspadanja radona procijenjuju se na temelju mjerenja alfa zračenja, raspadnuti aerosoli nakupljaju se na filtrima tijekom procesa uzorkovanja zraka i analiziraju metodom izmjene detektora ili spektromterijom. Rezultati određivanja potencijalne energije i vrijednost koncentracije izraženi su u mjesečnim jedinicama radne razine (Kovač i Marović, 2003).

[4] Environmental Protection Agency

[5] Maximum contaminant level

6.2.3. Izotop ^{14}C

Radioaktivni izotopi ugljika ^{14}C nastaju u višim slojevima atmosfere djelovanjem termalnih neutrona na atome dušika, emitirajući β zračenje. Nastali ^{14}C oksidira u $^{14}CO_2$ i raspodjeljuje se po atmosferi, putem fotosinteze ugrađuje u biljke, hranidbenim lancem u životinje i tako sudjeluje u ciklusu kruženja ugljika. Koncentracija izotopa ^{14}C izražava se kao specifična aktivnost, odnosno broj raspada u sekundi (Bq) po 1 g ugljika. Iako podzemna voda sadržava atmosferski oborinski ^{14}C, ona nije isključivo tog podrijekla. Infiltrirana oborinska voda koja prolazi kroz tlo, otapa CO_2 biogeneog porijekla i onaj nastao raspadom organske materije u tlu. Za geotermalne vodonosnike važan je utjecaj CO_2 pretpostavljenog vulkanskog porijekla jer potječe iz vapnenaca i ne sadržava ^{14}C te utječe na smanjenje početne aktivnosti čime doprinosi i tkz. „postaravanju" voda.

Mjerenja su pokazala da je u različitim područjima vrijednost početne aktivnosti ^{14}C u rasponu 65 – 100% suvremenog ugljika. Postotak suvremenog ugljika izražava se često u jedinicama pMC[6] što je u skraćenica engleskog porijekla riječi percent od modern carbon. Kako se karbonatni minerali otapaju brže od minerala silikatnih stijena, tako u područjima bez karbonata početna aktivnost ^{14}C iznosi oko 100%. To se tumači činjenicom da je vrlo mala količina otopljenog ugljika nastalog tako sporim otapanjem silikata već je pretežito recentnog atmosferskog i biogenog porijeka. Teoretski, prema jednadžbi otapanja karbonata, početna aktivnost ukupno otopljenog anorganskog ugljika trebala bi prema stehiometrijskim omjerima iznositi 50%, no cirkulacijom izotopnog ugljika dolazi do njegove izmjene među tvarima koje ga sadržavaju (karbonati, organska tvar), tako da je početna aktivnost ^{14}C općenito viša od 50%. Izotopa ^{14}C ima u otopljenom ugljičnom dioksidu, hidrogenkarbonatima u TIC[7] (ukupnom anorganskom ugljiku). Datira se ugljik koji je sadržan u TIC - u starosti do 40 000 godina. Zbog vremena poluraspada izotopa ^{14}C 5730 □ 40 godina, moguće je izračunati starost ukupno otopljenog anorganskog ugljika, dakle starost vode do 40 000 godina. Svime navedenim,

[6] percent Modern Carbon

[7] Total inorganic carbon

početna aktivnost ^{14}C ovisi o prisutnim pedološkim, geološkim, litološkim, geokemijskim, hidrogeološkim, klimatskim obilježjima istraživanog područja (Kapelj, 2010; Bačani i Vlahović, 2012).

6.2.4. Izotop vodika ^{3}H

Tricij ^{3}H je radioaktivni izotop vodika s vremenom polraspada 12,43 godine. U prirodi nastaje u višim slojevima atmesfere djelovanjem kozmičkog zračenja. Tricij tako postaje sastavni dio molekule vode te oborinama i atmosferskom vlagom ulazi u hidrološki ciklus, a time i u podzemne vode. Tricij je nestabilan izotop i radioaktivno se raspada uz emisiju β čestica, pri čemu nastaje stabilan izotop helija ^{3} He. Koncentracija aktivnosti tricija obično se mjeri u tkz. tricijevim jedinicama TU[8]. Tako jedna tricijeva jedinica predstavlja omjer jednog atoma ^{3}H prema 10^{18} atoma ^{1}H, što odgovara aktivnosti tricija:

$$1\ TJ = 7{,}2\ raspad/min/l\ vode = 0{,}118\ Bq/l$$

U tablici 6. prikazan je sadržaj izotopa $\delta^{13}C$, tricija ^{3}H te radioaktivnog izotopa ugljika pomoću kojeg se određuje starost termalne vode u vodonosnicima.

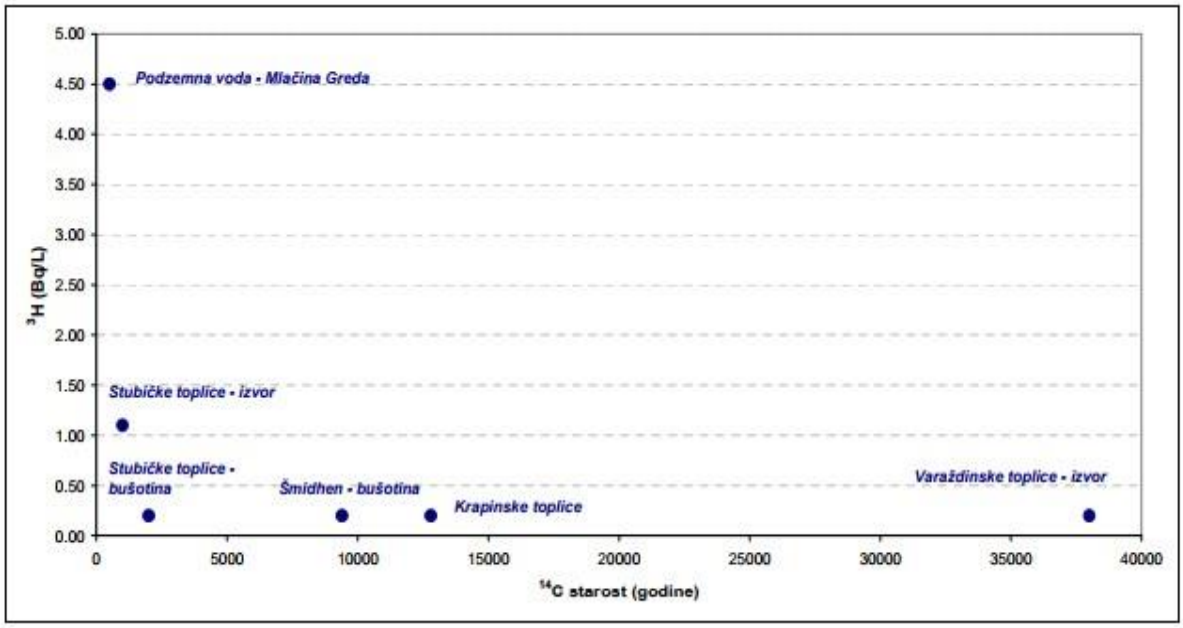
Tablica 6. Sadržaj stabilnih δ13C te radioaktivnih ^{3}H i ^{14}C izotopa u termalnoj vodi

	Bušotina	**Izvor**
$\delta^{13}C$ ‰ PDB	-6,40	-8,50
^{3}H (Bq/l)	<0,2	1,10
^{14}C % pmc	51,50	45
^{14}C starost	2000	1000

(Horvatinčić i suradnici, 1996)

[8] Tritium Unit

Kruženje tricija atmosferom i hidrosferom omogućilo je njegovu primjenu u meteorološkim, hidrološkim i hidrogeološkim istraživanjima. Najpoznatija je uporaba tricija kao trasera za određivanje porijekla podzemne vode i određivanje srednjeg vremena prolaza ili zadržavanja vode (MRT[9]) u podzemlju do 40 godina. Graf 2. donosi vrijednosti tricija i ^{14}C koji upućuju na starost vode u vodonosnicima.



Graf 2. Odnos aktivnosti tricija i ^{14}C starost u termalnim vodama

(preuzeto iz Horvatinčić i suradnici, 1996)

Budući da voda iz bušotine ima izmjerenu aktivnost tricija manju od granice određivanja, a izvorska voda je označena aktivnošću tricija, to znači da postoji suvremeno recentno obnavljanje dubljih dijelova termalnog vodosnosnika Stubičkih toplica recentnim oborinama, ali vjerojatno je nešto starije od 40 – ak godina i odnosi se na pretežiti doprinos hladnijih, zimskih oborina (Horvatinčić i suradnici, 1996).

[9] Mean Residence Time

7. Geotermalni potencijal

Riječ geotermalno potječe od grčke riječi "geo" i "termos", što označava zemlju i toplinu. Takva energija je održiva, čista i obnovljiva. Toplina u dubini zemlje proizlazi raspadom radioaktivnih elemenata, kemijskim reakcijama i kretanjem tektonskih jedinica. Resursi geotermalne energije rezultat su kompleksnih geoloških procesa, koji su doveli do nakupljanja topline na dohvatljivim dubinama, a osnovne svojstvo takve energije je obnoljivost. Geotermalna energija koristi se naveliko u komercijalnim svrhama, pri tehnološkim postupcima, prilikom generiranja električne energije i za izravnu upotrebu. Geotermalni sustav Stubičkih Toplica karakterizira temperatura vode manja od 100 °C, što pogoduje upotrebi za grijanje prostora i za razne tehnološke procese.

Prema Zakonu o rudarstvu (*NN, 56/13*) mineralnim sirovinama smatraju se. *„geotermalne vode iz kojih se može koristiti akumulirana toplina u energetske svrhe, osim geotermalnih voda koje se koriste u ljekovite, balneološke ili rekreativne svrhe i druge namjene, za koje se primjenjuju propisi o vodana.“*

Veličina geotermalnog potencijala ovisi o propusnosti vodonosnika zasićenog s vodom i o volumenu ležišne stijene. Stijene koje se odlikuju velikom šupljikavosti i kod kojih su te šupljine dobro povezane te one koje su jako razlomljene imaju svojstvo dobre propusnosti, stoga su značajne radi velikih mogućnosti davanja vode. Najveći geotermalni potencijal imaju razdrobljeni karbonati jer se obično javljaju kao tijela velikih dimenzija i tako čine ležišta masivnog tipa koja mogu davati i do nekoliko tisuća metara kubnih. Da bi se geotermalna energija mogla ekonomično proizvoditi moraju postojati povoljni prirodni uvjeti: visok geotermalni gradijent, šupljikav vodonosnik što veće propusnosti i debljine te konstantan dotok vode koja sadrži toplinu. Za trajnije korištenje geotermalne energije nužno je da flud cirkulira, tj. da s površine ulazi u ležište i prolazi kroz njega, preuzima toplinu i zagrijan izlazi na površinu kroz otvore prirodnog tipa, zdence ili bušotine. Nadalje, na ekonomičnost korištenja geotermalne energije utječe prije svega toplinska snaga proizvodne bušotine, kemijski sastav geotermalne vode (koncentracija teških metala, otopljeni plinovi), osmišljeni koncept načina korištenja geotermalne vode, udaljenost do potrošača i financijska mogućnost ulaganja. (Kolbah i Škrlec, 2011).

7.1. Postojeći uvjet

Najviša izmjerena temperatura vode u bušotinama iznosi 69,7 °C, dok ta vrijednost na izvorima varira od 30 do 49 °C. Bušotine koje otkrivaju dubinu i debljinu vodonosnika već su ostvarene, kao i bunari duboki od 40 do 50 m odakle se crpi voda. Bunari dopiru do baze gornjobadenskih vapnenaca; debljina tih litotamnijskih vapnenaca iznosi 20 – 40 m, a najvažnije je njihovo svojstvo propuštanja oborinske vode. Budući da nikada nisu crpljeni svi bunari istovremeno precizna vrijednost izdašnosti nije definirana, no najnovije procjene iznose dotok od 95 l/s. S obzirom da područje pripada humidnom tipu klime te su oborine ravnomjerno raspoređene tokom cijele godine, pretpostavljena je konstantna infiltracija atmosferskih oborina u prvi vodonosni horizont gornjobadenskih vapnenaca. Stubičke Toplice već su početkom 80 - ih godina koristile geotermalnu vodu za zagrijavanje staklenika, no spletom okolnosti zdenac za crpljenje vode, bunari za hlađenje vode i staklenik godinama nisu u funkciji. Sustav se nalazi u perivoju lječilišta i stoji napušten, što se može vidjeti iz sljedećih fotografija. Na slici 8. je zdenac namijenjen za crpljenje geotermalne vode, potom se ona transprtirala do kotlova, odnosno uređaja za hlađenje. Nakon što se voda ohladila i postigla se željena temperatura voda je zagrijavala zapušteni staklenik, prikazan na slici 9.



Slika 8. Zdenac i uređaji za hlađenje
(fotografirano: 18.08.2017.)



Slika 9. Zapušteni staklenik
(fotografirano: 18.08.2017.)

Takav projekt gospodarskog iskorištavanja geotermalnih voda u skladu je sa Županijskom razvojnom strategijom 2016 – 2020 godine. Razvojna strategija Krapinsko zagorske županije tumači da je geotermalna energija dostupna skoro na cijelom području županije, a njezin stupanj iskorištenja je minimiziran. Polazište za takav način korištenja

geotermalne vode je Lindalov dijagram (Van Nguyen, M. i sur., 2015) koji definira primjenjivost geotermalne vode za razne namjene ovisno o temperaturi, tako dijagram predlaže da temperatura između 40 – 100 °C pogoduje zagrijavanju staklenika, neovisno o vrsti materijala od kojeg je napravljen.

7.2. Potrebni parametri

Za modeliranje sustava izvedbe staklenika potrebno je pronaći, analizirati i uskladiti nužne varijable. Istražna bušotina na području već je izvedena, stoga je prvi korak gotov. Istražnom bušotinom St – 3 izvedenom u termalnom izvorštu, utvrđene su postojeće stijenske naslage do 505 m dubine (Šimunić i sur. 2008). Osim što je bušotina St – 3 poslužila za definiranje litostratigrafskih odnosa u području izvorišta, njome je otkriveno da postoje tri vodonosna horizonta koje karakteriziraju različite vrste stijena u vodonosnicima. Slika 10. prikazuje prostor termalnog izvorišta gdje je izvedena istražna bušotina St - 3 pomoću koje su utvrđene stijenske vrste i vodonosni horizonti do 505 m dubine. Žutom bojom naznačena je površina na kojoj su se zagrijavali prijašnji staklenici, a ljubičastom bojom označena je potencijalna površina za izvedbu novih staklenika.



Slika 10. Ortofoto karta, M 1:2000

(izvor: http://geoportal.dgu.hr/, datum pristupa: 04.09.2017.)

Sustav grijanja staklenika bezuvjetno treba imati uvid u geološke i termogeološke značajke tla i vodonosnika (vrsta stijena, statička temperatura tla, toplinska provodljivost, toplinski kapacitet i gustoća, toplinska difuznost, geotermalni gradijent). Potrebne su hidrogeološke karakteristike tla (hidraulički uvjeti podzemnih vodonosnika) i energetske karakteristike (toplinska raspoloživost). Energetski dio zahtijeva poznavanje toplinske snage, tj. količinu toplinske energije koja može biti proizvedena termalnom vodom. Potom slijede tehnoekonomski parametri bušotine - odnose se na način bušenja, opremanja i ugradnju izmjenjivača topline, vrstu ugrađene opreme i cijenu. Nužno je izraditi Studiju procijene stupanja geotermalnog potencijala, upotrijebiti pritom dubinu od najviše 60 m na kojoj leži glavni vodonosnik, iskoristiti vrijednost pretpostavljenog dotoka 95 l/s, temperaturu do 69 °C, te uključiti prethodno obrađenu kemijsku analizu vode. Posljednji parametar, ali ne manje bitan su klimatski uvjeti područja na kojem se projektira staklenik, jer iz njih proizlazi režim rada sustava i omjer potrebne energije za grijanje staklenika (Kurevija, 2010). Osnovni termogeološki parametri potrebni za modeliranje sustava staklenika navedeni su u sljedećim podnaslovima te se dotiče pojam maksimalnog rada dobivenog iz geotermalnog izvora.

7.2.1. Statička temperatura tla

Statička temperatura tla je jedan od najvažnijih termogeoloških parametara, potreban za vrednovanje i iskorištavnje plitkih geotermalnih izvora. Geotermalnom energijom smatra se ona energija koja je pohranjena u tlu na dubinama gdje nema utjecaja sunčevog zračenja s površine. Na do 1000 cm dubine pojavljuje se statička temperatura tla, neovisna o sezonskim promjenama temperature zraka na površini; ali je u funkciji klimatskih parametara na površini i termogeoloških karakteristika ležišta (Kurevija i Vulin, 2010). Porast statičke vrijednosti temperature tla na dubinama, zavisan je veličinom geotermalnog gradijenta. Vrijednost statičke temperature nužno je poznavati prilikom pravilnog modeliranja ikakvog sustava s bušotinskim izmjenjivačem topline. Ta se vrijednost koristi i u projektima s dizalicom topline. Dvije navedene tehnologije smatraju se najučinkovitijima za iskorištavanje plitkih geotermalnih izvora, u ovom slučaju do 60 m. Nužno je spoznati koeficijent toplinske vodljivosti vodonosnika, odnosno TRT[10] - test toplinskog odaziva. Toplinska vodljivost predstavlja količinu energije koja prođe u sekundi kroz presjek površine od 1 m^2, u pravcu okomitom na presjek, pri gradijentu od 1 °C/m, (Kurevija i Golub, 2008). Potrebni koeficijent toplinske vodljivosti dobiva se geofizičkim radovima, gdje se mjeri brzina promjene temperature fluida pri ulazu u bušotinski izmjenjivač topline, još ovisno o karakteristikama stijena i o točno određenom toplinskom izvoru. Kako bi se dobila vrijednost statičke temperature tla potrebno je pomoću sinusoidne funkcije i mjerenih temperatura po dubini odrediti prigušivanje temperature tla.

7.2.2. Geotermalni gradijent

Postojeća temperatura na površini tla u najvećoj mjeri ovisi o utjecaju sunčeve svjetlosti, a daljnji porast temperature po jedinici dubine naziva se geotermalni gradijent. Na temelju geotermalnog gradijenta obavljaju se prve procjene potencijala termalnog polja. Tom svrhom izrađene su karte geotermalnih gradijenata koje pokazuju položaj anomalija. Pozitivne anomalije posljedica su konvekcije i velike vertikalne propusnosti. Kada je velik geotermalni gradijent očekuju se i povoljna svojstva ležišnih stijena. Vrijednost

[10] Thermal Response Test

geotermalnog gradijenta za Europu iznosi 0,03 °C/m; gradijent Dinarida u Hrvatskoj iznosi 0,015 – 0,025 °C/m, dok vrijednost Panonskog dijela ima vrijednost iznad 0,049 °C/m. Geotermalni gradijent u Panonskom području znatno je veći od europskog prosjeka, a u glavnom gradu Zagrebu u prosjeku iznosi 0,055 °C/m. Geotermalni gradijent direktno je povezan s toplinskim tokom i s toplinskom vodljivosti. Gradijent je proporcionalan toplinskom toku, koji iznosi 76 mW/m^2 za Panonski dio i 29 mW/m^2 za Dinaride. Toplinska vodljivost koja se mijenja s dubinom i geotermalni gradijent obrnuto su proporcionalni; a toplinska vodljivost je bitan geotermalni parametar, predstavlja količinu energije koja prođe u sekundi kroz presjek površine od 1 m^2, u pravcu okomitom na presjek. Stijene visoke toplinske vodljivosti (dolomiti) omogućuju konduktivni prijenos topline iz dubine do hidrogeotermalnog ležišta prekrivenog nepropusnim stijenama niske toplinske toplinske vodljivosti. Tako su na primjer za do sada izmjerene temperature geotermalne vode, odabrane arbitrarne vrijednosti temperature kako bi se izračunao geotermalni gradijent, gdje je:

$$g_T = \frac{t_m - t_z}{H_{TL}} \tag{2}$$

gdje je:

g_T - geotermalni gradijent (°C/m)

t_m - temperatura izmjerena na određenoj dubini (°C)

t_z - srednja godišnja temperatura zraka (°C)

H_{TL} - dubina na kojoj je mjerena temperatura (m)

$$g_t = \frac{45\ °C - 11\ °C}{60\ m}$$

$$g_T = \frac{0{,}5\ °C}{10\ m} = 0{,}056\ °C/m$$

7.2.3. Energetska raspoloživost

Energetska raspoloživost predstavlja maksimalnu količinu reverzibilnog rada koju je moguće dobiti iz geotermalnog izvora. Povezuje se s pojmom eksergije, odnosno tehničke radne moći koja se može dobiti kada se stanje radnog medija dovede povratnim načinom u mehaničku i toplinsku ravnotežu s okolinom (prema Bošnjaković, navedeno u Kurevija i Gregurić, 2008). Energetska raspoloživost od velike je važnosti kod proračuna potrebe instalirane eksergetske snage geotermalnog ležišta, a temelji se na prvom i drugom zakonu termodinamike. Maksimalni ostvareni rad koristi se za ocjenu valjanosti kontinuiranih procesa s obzirom na pretvorbu oblika energije. Energetska raspoloživost važan je parametar kod izvedbe elektrana, koje kaskadno iskorištavaju geotermalnu energiju za pretvorbu u električnu energiju Rankine binarnim ciklusom, te daljnjim projektiranim tokom iskorištavanja topline za industrije potrebe i grijanje staklenika i prostora.

Kada proces teče reverzibilno, sačuvana eksergija odvedenih tvari i ona dobivena mehaničkim radom mora biti jednaka eksergijama dovedenih tvari, ali potrebno je uključiti i utrošenu eksergiju mehaničkog rada kod izmjene topline. Termodinamički stupanj iskorištenja definiran je prema prvom zakonu termodinamike a njegova vrijednost mora biti manja od iskoristivosti Carnotovog ciklusa. Prema je zakonu zbroj količina topline i mehaničkoga rada u zatvorenom sustavu stalan.

$$dQ = dU + pDV \tag{3}$$

Količina topline dQ predana nekomu sustavu troši se samo na povećanje njegove unutarnje energije U (zagrijavanje) i na svladavanje vanjskoga tlaka p, a tlak se protivi povećanju volumena sustava V. Prvi zakon termodinamike može se poćiti kao zatvoreni sustav u kojem je zbroj svih oblika energije, uključujući i materiju stalan.

U nepovratnom procesu sveukupna eksergija se umanjuje, a smanjenje dovodi do gubitka energetske raspoloživosti u okolini koju je nemoguće ponovo dobiti. Maksimalno potencijalan koristan rad jednak je promijeni raspoloživosti geotermalnog fluida pri uvjeta na ušću do standarnih uvjeta okoline. Izraz za eksergetsku snagu binarnog Rankine

ciklusa dobiva se proračunom koji je ovisan o promjeni entalpije pri konstantnom tlaku. Ovisno o realnim uvjetima na lokaciji, maksimalna teoretska snaga za odabrani binarni Rankine ciklus, prema navedenim pretpostavkama predstavlja ukupan stupanj iskorištenja koji je definiran drugim zakonom termodinamike (Kurevija i Gregurić, 2008.) Do toga je zakona došao već Carnot proučavajući idealne uvjete prelaska topline u mehanički rad. Zaključio je da su za prelazak topline u mehanički rad potrebna dva spremnika topline na različitoj temperaturi; prelaskom topline iz toplijega spremnika u hladniji samo se dio topline pretvara u mehanički rad, a ostatak topline prelazi u spremnik niže temperature (degradacija). Prema Carnotu (1824) maksimalna djelotvnosrnost η η idealnog toplinskog stroja, kružim procesom pretvara toplinu u rad i iznosi:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q1} \quad \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \tag{4}$$

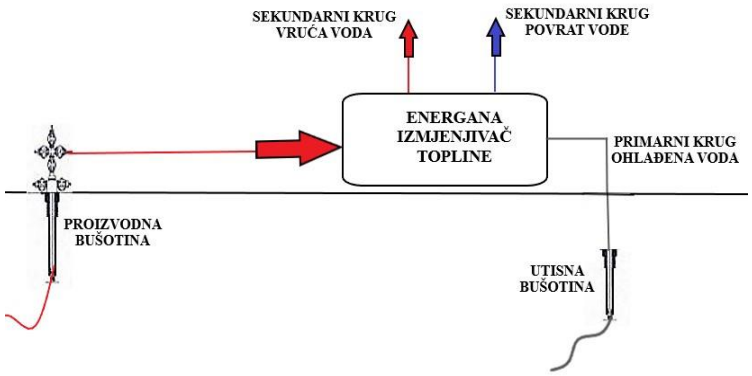
gdje su T_1 i T_2 temperature toplijega i hladnijega spremnika; Q_1 je toplina koja pri prelasku stoji na raspolaganju, a Q_2 dio topline koji se degradira. Bit je drugoga zakona termodinamike da se pri prelasku topline u mehanički rad dio topline uvijek degradira. Drugi zakon termodinamike iskazuje se entropijom. Entropija u sustavu je veća, što je uz danu količinu topline u sustavu, temperatura niža. Kako pri svakom prelasku topline u mehanički rad dio topline prelazi u spremnik niže temperature, a ukupna se entropija sustava povećava (http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=60967).

7.3. Modeliranje sustava

Modeliranje sustava izvedbe staklenika zahtijeva opis tehničko – tehnološkog procesa koji bi djelovao na istraživanom području te nužno je poznavati potrebne toplinske potrebe za zagrijavanje staklenika.

7.3.1. Opis tehničko – tehološkog procesa

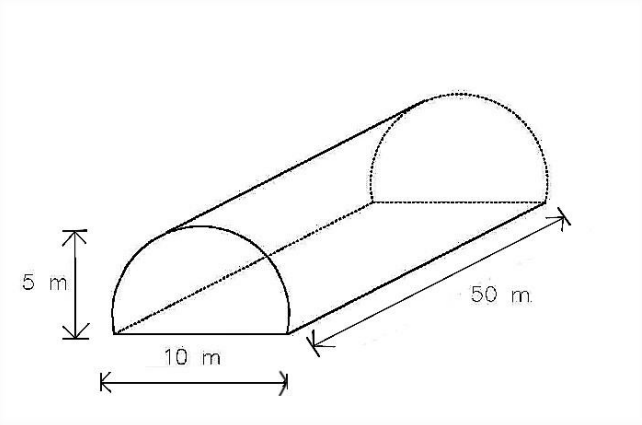
Građevinski radovi u radnom prostoru obuhvaćali bi izgradnju armirano betonskih temelja koji služe za postavu separatora, energane s izmjenjivačem topline, razvodnog ormara, rasvjetnog stupa, i ostale tehnološke opreme. Opisana jedinica, čija je shema prikazana na slici 11. bila bi izvedena kao horizontalna tlačna posuda proizvedena za odabrane radne tlakove pri temperaturi eksploatirane vode od 65 °C. Za crpljenje termalne vode mogu poslužiti postojeći bunari, no postoji mogućnost izvedbe novih geotermalnih bušotina. Takva proizvodna bušotina s pripadajućom infrastrukturom bila bi priključena cjevovodom do izmjenjivača topline, odnosno do postrojenja za korištenje geotermalne vode. U izmjenjivaču se toplina predaje u sekundarni krug. Na izlazu izmjenjivača topline cjevovod odvodi iskorištenu vodu do utisne bušotine koja vraća vodu natrag u vodonosni horizont i tako cirkulira što pouspješuje djelotvornost procesa. Ovisno o klimatskim uvjetima i godišnjem dobu, ulazna količina i temperatura vode regulirala bi se pomoću ugrađenog ventila na ušću bušotine (bunara), te na ulazu u izmjenjivač sa sekundarnim krugom izvedenim za potrebe grijanja sustava.



Slika 11. Shema tehničko – tehnološkog procesa

7.3.2. Proračun toplinskih potreba

Kako bi se odredio pravilan sustav zagrijavanja prvo se mora odrediti vršna potrošnja toplinske energije za staklenik koja je u funkciji projektirane unutrašnje temperature staklenika, klimatskih uvjeta (brzina vjetra), te ovisi o karakteristikama geotermalnog ležišta. Shema staklenika prikazana je slikom 12., a prema odabranim dimenzijama stalenika donešen je proračun potrebne toplinske snage koja je potrebna za održavanje projektirane temperature.



Slika 12. Shema tipskog staklenika

Ukupni toplinski gubitak jednak je zbroju gubitaka topline kroz krov i zidove i gubitkom koji je rezultiran prodorom vanjskog zraka. U obzir se uzima vrsta materijala od kojeg je staklenik napravljen, u ovom slučaju odabrano je dvostruko stako radi estetskog dojma okoliša, no moguće je koristiti i plastičnu masu ili pleksiglas. Staklo bolje propušta sunčevu svjetlost i toplinu od plastike, kvalitetnije štiti biljke, čvršće je i neusporedivo dugotranije od ostalih materijala, no ono ima najslabiju energetsku efikasnost. Troškovi grijanja su veći u odnosu na druge tipove radi slabije izolacije koja uzrokovana pukotinama na spojevima konstrukcije. Osnovna prednost odabira stakla umjesto plastičnih masa je mogućnost kontroliranih uvjeta uzgoja vrsta i mijenjanja istih tokom godine. Prilikom proračuna ukupnih toplinskih gubitaka kroz stijenke staklenika koristi se odabrana projektirana unutrašnja temperatura od 26 °C (namijenjenu za uzgoj povrća),

prosječna najniža temperatura tijekom zimskog razdoblja koja prelazi – 3 °C (uzeto – 5 °C), prosječna godišnja brzina vjetra u rasponu 4,0 – 5,0 m/s koja je dobivena primjenom globalnih modela razdiobe prostora na prostoru Krapinsko – zagorske županije, te koeficijent ukupnog prolaza topline za odabrani materijal dvoslojno staklo koje iznosi 5,84 W/m^2 °C (prema Kurevija i Golub, 2008).

Za primjer staklenika širine 10 m, visine 5 m i duljine izračunate su površine krova te prednjeg i stražnjeg zida. Površina krova staklenika na primjeru načinjenog od dvostrukog stakla iznosi:

$$A_{krov} = \frac{2 \times r \times \pi \times h}{2} = \frac{2 \times 5 \times \pi \times 50}{2} = 785 \text{ m}^2 \quad (5)$$

Ukupna površina prednjeg i stražnjeg zida također od dvostrukog stakla iznosi:

$$A_{zid} = 5^2 \times \pi = 78{,}53\ m^2 \quad (6)$$

Proračun maksimalnih toplinskih potreba Q_{max} za održavanje projektirane temperature unutrašnjosti staklenika, uz vremenske uvjete na lokaciji, ovisi o :

Q_{hl} - gubicima zbog odvođenja topline kroz zidove i krov

Q_{ai} - gubicima zbog prodora vanjskog zraka u staklenik

$$Q_{max} = Q_{hl} + Q_{ai} \quad (7)$$

$$Q_{max} = (A_{krov} \times \Delta t_{grh} \times k_m) + (A_{zid} \times \Delta t_{grh} \times k_m) \quad (8)$$

gdje je Δt_{grh} razlika unutarnje temperature staklenika u odnosu na vanjsku

$$\Delta t_{grh} = t_{PR} - t_H \quad (9)$$

.S obzirom na klimatološke prilike na području Stubičkih Toplica uzeta je srednja vrijednost temperature t_H za vrijeme najhladnijih mjeseci od – 5 °C, a odabrana projektirana temperatura t_{PR} u stakleniku iznosi 26 °C te je namijenjena za uzgoj povrća. k_m je koeficijent ukupnog prolaza topline određenog materijala, za odabrano dvostruko

staklo u ovom slučaju koeficijent ukupnog prolaza topline iznosi 5,84 W/m^2 °C. Proračun maksimalnih toplinskih potreba za održavanje projektirane temperature u stakleniku iznosi:

$$Q_{max} = (785{,}4\ m^2 \times 31\ °C \times 5{,}84\ W/m^2\,°C) + (78{,}53\ m^2 \times 31\ °C \times\ 5{,}84\ W/m^2\,°C)$$

$$Q_{max} = 142188{,}8\ W + 14217{,}07\ W = 156405{,}87\ W = 156{,}4\ kW$$

Veličina gubitaka topline kroz krov i prednji i stražnji zid iznosi 156,4 kW. No, kod ovog proračun u obzir se uzima brzina vjetra na zadanom području, volumen staklenika i temperaturne razlike. Toplinski gubici zbog prodora vanjskoz zraka (Q_{ai}) ovise o broju izmjene volumena zraka po satu, zbog prodora vanjskog hladnijeg zraka. Broj izmjene zraka funkcija je brzine vjetra, volumena staklenika i temperaturne razlike. Za odabrani staklenik vrijednost broja izmjene zraka iznosi 0,75 (Kurevija i Golub, 2008), a kako navodi (Kurevija, 2008.) ukupna iskoristivost binarnog cilusa iznosi 10%, odnosno 0,102. Za isto je potrebno dobiti i volumen proizvoljnog staklenika

$$V = \frac{5^2 \times \pi \times 50}{2} = 1963\ m3 \qquad (10)$$

$$Q_{ai} = Q_{ai/h} \times V \times \Delta t_{grh} \times 0{,}102 \qquad (11)$$

$$Q_{ai} = 0{,}75_{/h} \times 1963\ m^3 \times 31\ °C \times 0{,}102 = 4655{,}25\ W = 4{,}6\ kW$$

$$Q_u = \ 156405{,}87\ W + 4655{,}25\ W = 161061{,}12\ W = 161{,}0\ kW$$

Za odabrani primjer tipskog staklenika izrađenog od dvostrukog stakla potrebna je toplinska snaga od 161,0 kW. Ukoliko se isti proračun provede za staklenik koji je načinjen od drugog materijala, primjerice od plastičnih masa i pleksiklasa, potrebna toplinska snaga za staklenik koji ima jednake dimenzije kao ovaj sa slike 12., iznosi 110,05 kW.

8. Zaštita okoliša

Za projekt zagrijavanja staklenika geotermalnom vodom potrebno je provesti Elaborat zaštite okoliša za postupak ocjene o potrebi procjene utjecaja na okoliš. Uloga elaborata je ispitati moguće nepovoljne utjecaje na osnovne sastavnice okoliša, poput tla, zraka, prirodnih vrijednosti i krajobraza.

1. Tlo

Radovi potrebni za izvedbu načina korištenja geotermalne vode u gospodarske svrhe, unutar planirane lokacije, neće imati značajan negativan utjecaj na tlo. Na vrlo malom dijelu potencijalne površine, postoji potreba za uklanjanjem površinskog sloja tla radi izvođenja spojnog cjevovoda. Fizička i kemijska svojstva uklonjenog površinskog sloja tla ostat će nepromijenjena, stoga je predviđeno da su sve količine tla od iskopa sačuvane i upotrijebljene nakon izvođenja građevinskih radova. Ukoliko se prilikom izvedbe planiranog zahvata postupa u skladu s važećim propisima i najboljom praksom, te odgovarajućim materijalima i opremom, mogućnost onečišćenja tla svedena je na najmanju moguću mjeru. Utjecaj planiranog zahvata na tlo lokalnog je karaktera i privremen. Kemijska svojstva geotermalne vode navedena u poglavlju 5. ukazuju da i u slučaju istjecanja ona ne može dovesti do povećanja organskih i anorganskih onečišćenja u tlu.

2. Zrak

Utjecaj eksploatacije geotermalne vode na zrak kao sastavnicu okoliša je minimalan. Emisije plinova se pojavljuju zbog otpuštanja toplinske instalacije (blago tople cijevi) i iz tehnološkog sustava. Utvrđeno je kako u geotermalnoj vodi nema dovoljno otopljenog plina, stoga nije potrebno planirati otplinjavanje vode niti ugrađivati separator plina.
Manji kratkotrajni utjecaji na zrak će se javljati tijekom izvođenja radova, na održavanju bušotinske opreme gdje postoji mogućnost emisija prašine, kao i onečišćujućih plinova. S obzirom na vrijeme trajanja radova, emisije onečišćujućih plinova i čestica prašine biti će relativno male i neće značajno utjecati na kakvoću zraka. Također, s obzirom na blizinu

potencijalne lokacije od naselja i kuća, neće biti negativnog utjecaja na stanovništvo tj. neće biti neugodnih mirisa ili povećanih koncentracija štetnih plinova. Prema svemu utjecaj na zrak tijekom povremenog i sezonskog korištenja staklenika biti će minimalan i ograničen.

3. Prirodne i kulturne vrijednosti

S obzirom na vrlo mali obuhvat zahvata neće biti utjecaja na morfološko – geološke značajke prostora. Izvedba temelja potrebnog za sustav, opremu i rad bušotine biti će smještena vrlo plitko, a budući da je dubina vodonosnika ispod zone utjecaja, ne postoji mogućnost da će biti narušeni hidrogeološki odnosi zadanog područja. Kako lokacija ne predstavlja veliku površinu, zahvatom izvedbe staklenika neće se zadirati u staništa, točnije neće doći do značajne promjene stanišnih uvjeta.

U blizini potencijalne površine namijenjene za izvedbu staklenika, uz glavnu kupališnu zgradu s Maksimilijanovom kupelji, nalazi se i Dijanina kupelj, spomenik prirode hrast Galženjak, kompleks bazena, te u kupališnom perivoju kapela sv. Katarine. Za planirani koncept i kapacitet ovog projekta ne očekuje se negativan utjecaj na kulturno dobro.

4. Krajobraz

Mogući utjecaj planiranog zahvata na lokaciji koja ima namjenu pašnjaka, biti će neznatan. Ponajprije radi toga što se predmetna lokacija nalazi pored prostora na kojem su već izvedene geotermalne bušotine i bunari. Opisana jedinica s postrojenjem i opremom bušotine, ne predstavlja vizualno dominirajući sadržaj, dok s druge strane izvedba staklenika načinjenog od dvostrukog stakla u tom bi ambijentu imala estetsku ulogu.

9. Zaključak

Geotermalne vode u Krapinsko – zagorskoj županiji predstavljaju značajan obnovljiv izvor energije, no njihov stupanj iskorištavanja je minimalan. Prilikom iskorištavanja geotermalnih sirovina presudno je poznavati vrijednost temperature i dotok vode.

Izvršenim geološkim istražnim bušenjima u termalnom izvorištu Stubičkih Toplica utvrđeni su tektonski i litostratigrafski uvjeti užeg područja, namijenjeni shvaćanju stijenskih vrsta vodonosnika. Izvedene bušotine dale su uvid u vrstu stijenskih naslaga s povećanjem dubine i debljinu triju postojećih vodonosnih horizonata. Glavni vodonosnici koji se trenutno koriste pripadaju litotamnijskim vapnencima, a značajni su radi svojstva propusnosti oborinskih voda. Procijenjena vrijednost izdašnosti geotermalnog sustava Stubičkih Toplica je 95 l/s, dok najviša temperatura izmjerena u bušotinama iznosi 69,7 °C. Kemijski sastav geotermalne vode usko je povezan s vrstama stijena u kojima ona obitava i kroz koje prolazi, otapajući tako minerale stijena. Provedenim kemijskim analizama zaključeno je kako geotermalna voda pripada kalcijevom, magnezijevom i hidrogenkarbonatnom tipu voda; a kod usporedbe prethodnih i današnjih kemijskih analiza primijećeno je kako se sastav geotermalne vode nije znatno mijenjao proteklih stotinu godina. Istraživano geotermalno izvorište karakterizira pojava izotopne radioaktivnosti na jednom od izvora, gdje je izmjerena i najviša temperatura vode za koju se pretpostavlja da izvire iz tamnosivih anizičkih dolomita. Ispitani izotopni sastav vode primijenjuje se prilikom hidrogeoloških i geokemijskih istraživanja. Odnos stabilnih izotopa δ^2H i $\delta^{18}O$ ukazao je na miješanje i izmjenu voda u vodonosnicima. Prikupljeni podaci stabilnih izotopa govore kako postoji doprinos oborinske vode u geotermalne vodonosnike tijekom zimskih razdoblja; izmjerena aktivnost tricija manja je od granice određivanja što znači da se vodonosnici obnavljaju recentnim oborinama. Upravo zaključeno obnavljanje vodonosnika te njegovo svojstvo propusnosti, izmjerena temperatura vode i izdašnost upućuju na postojeću potencijalnost iskorištavanja geotermalnog sustava za potrebe zagrijavanja staklenika. Takvom idejom promicanja korištenja geotermalnih voda kao obnovljivih izvora energije procjenjeni su postojeći uvjeti za geotermani sustav Stubičkih Toplica. S obzirom na projektiranu unutrašnju temperaturu staklenika od 26 °C, dvostruko staklo kao izabran materijal te zadane

dimenzije prikazan je proračun potrebne toplinske snage za održavanje navedene temperature. Geotermani sustav Stubičkih Toplica pokazuje veliku potencijalnost iskorištavanja geotermalnih voda, s obzirom da osim korištenih vodonosnika koji se nalaze u prvom horizontu, postoje još dva dublja vodonosna horizonta iz kojih se još ne eksploatira voda.

10. Literatura

1. Bačani, A., Vlahović, T. (2012): Hidrogeologija, primjena u graditeljstvu. Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije.
2. Gizdavec, N. i suradnici (2016): Elaborat zaštite okoliša u postupku ocjene o potrebi procjene utjecaja na okoliš eksploatacije geotermalne vode u svrhu poljoprivredne proizvednje na budućem ekspoatacijskom polju „Bošnjaci – sjever“.
3. Horvat, S., Getliher A. (2008): Geotermalna voda – obnovljiv, ekološki prihvatljiv i višenamjenski energetski potencijal, INA, Zagreb, SD Naftaplin
4. Horvatinčić, N., Srdoč, D., Krajcar Bronić, I., Pezdič, J., Kapelj, S., Sliepčević, A. (1996,): A study of geothermal waters in Northwest Croatia and East Slovenia // Isotopes in water resources management, Vol. 2 / IAEA (Ur.) Vienna : IAEA, 470-474 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).
5. Kapelj, S. (2010): Geokemija voda, u upravljanju vodama, inženjerstvu okoliša i geoinženjerstvu. Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
6. Kolbah, S., Škrlec, M. (2011): Mogućnosti gospodarskog korištenja geotermalnog potencijala na prostoru Varaždinske županije. Istraživanje i proizvodnja nafte i plina, Sektor I&P N&P za JE Europu. Tribina Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. (dostupno na: www.gfv.unizg.hr/modules/m_gfv/datoteke/3_kolbah_ina.pdf, datum pristupa: 01.08.2017.).
7. Korbar, T., Avanić, R., Bakrač, K. (2012): Upute za izradu Osnovne geološke karte Republike Hrvatske M 1: 50 000. Hrvatski geološki institut (Zavod za geologiju), Zagreb.
8. Kovac, J., Marović, G., Sencar, J. (2014): Working Levels in some Croatian spas. Institute for Medical Research & Occupational Health, Radiation Protection Unit, Ksaverska cesta 2, Zagreb. Zagreb: HDZZ, 2003. STR. 323 – 328 (dostupno na: irpa11.irpa.net/pdfs/6a42.pdf, datum pristupa: 09.07.2017.).

9. Kurevija, T. (2008): Analiza potencijala plitkih geotermalnih resursa u sustavima toplinskih pumpi na području grada Zagreba, Goriva i maziva, 47, 5: 355 – 390.
10. Kurevija, T. (2010): Energetsko vrednovanje plitkih geotermalnih potencijala Republike Hrvatske. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu.
11. Kurevija, T., Golub, M. (2008): Iskorištavanje geotermijskih ležišta. Rudarsko geološko naftni fakultet, Zavod za naftno inženjerstvo.
12. Kurevija, T., Gregurić, M. (2008): Energetska snaga binarnog Rankine ciklusa na geotermalnom ležištu Kutnjak – Lunjkovec, Izvorni znanstveni rad, Goriva i Maziva, GOMABN 47, 6-33, 2008.
13. Kurevija, T., Vulin D. (2010): Determining undisturbed ground temperature as part of shallow geothermal resources assessment, Rudarsko – geološko naftni zbornik, Vol. 22, str. 27-36, Originalni znanstveni rad, Zagreb.
14. Kurevija, T., Vulin D., Macenić M. (2014.): Impact of geothermal gradient on ground source heat pump system modeling, Rudarsko – geološko naftni zbornik, Vol.28, Originialni znanstveni rad, Zagreb.
15. Marić, A., Čepelak, R., Andabaka D (2014.): Odnos kalcija i magnezija u flaširanim termomineralnim vodama. Voda i javna Vodoopskrba. XVIII Znanstveno – stručni skup. Hrvatski zavod za javno zdrastvo i županijski zavodi za javno zdravstvo. Str. 55-63(dostupno na: hzjz.hr/wpcontent/uploads/2014/09/II-obavjest-Stari-Grad.pdf, datum pristupa: 09.06.2017.).
16. Marković, T., Borović, S., Larva, O. (2015): Geochemical characteristic of thermal waters of Hrvatsko zagorje. Geologia Croatica 68/1, 7 Figs, 2 Tabs, Zagreb. (dostupno na: http://hrcak.srce.hr/141049, datum pristupa: 09.06.2017.)
17. Marović, G., Senčar, J., Cesar D. (1998): Prirodna radioaktivnost termalnih izvora u Hrvatskoj. Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Jedinica za zaštitu od zračenja, Zagreb. (dostupno na: http://beta.bib.irb.hr/15284, datum pristupa: 09.07.2017.).
18. Matoničkin, I., Pavletić, Z., Popović V. (1964): Prilog istraživanju radioaktivnosti u biotopu termalnih voda Hrvatskog zagorja.Iz Instituta za biologiju Sveučilišta,

Instituta za botaniku Sveučilišta i Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada JAZU. (dostupno na:

https://hrcak.srce.hr/file/225974, datum pristupa: 09.07.2017.).

19. Meandžija, I. i sur. (2017.): Nafta i plin. Stručni časopis hrvatske udruge naftnih inženjera i geologa. ISSN 1330 – 2434, v 37, n 149./2017. str. 66 – 76 (dostupno na: http://www.hunig.hr/casopis/NiP149.pdf, datum pristupa: 09.06.2017.).
20. Miholić, S. (1944): Kemijska analiza termalnog vrela u Stubičkim Toplicama. Zavod za izpitivanje rudarskih i kovinarskih proizvoda u Zagrebu. (dostupno na: http://dizbi.hazu.hr/object/view/12058, datum pristupa: 09.06.2017.).
21. Službeni glasnik Krapinsko – zagorske županije NN 16/09 i 9/13 (2014): Odluka o donošenju prostornog plana uređenja općine Stubičke Toplice. Zakon o prostornom uređenu NN 153/13, klasa: 350 - 02/14 – 01/02, urbroj: 2113/03 – 01 – 14 – 2 (dostupno na: http://www.stubicketoplice.hr/clanak/odluka-odonosenju-izmjena-i-dopuna-prostornog-plana-uredenja-opcine-stubicke-toplice, datum pristupa: 11.06.2017.).
22. Šegon, V., Kolega, V., i sur. (2008): Strategija održivog korištenja energije Krapinsko – zagorske županije (dostupno na: http://www.kzz.hr/sadrzaj/dokumenti/strategija-razvoja-2020/Strategija_Krapinsko_zagorska_energija.pdf, datum pristupa: 03.08.2017.).
23. Šikić,K., Bash, O., Šimunić, A. (1972): Osnovna geološka karta M 1: 100 000, tumač za list Zagreb (33 – 80), Rogatec (L 33 – 68), Ivanić – Grad (L 33 – 81) i Varaždin (L 33 – 69).
24. Šimunić, A. (1988): Radovi Zavoda za znanstveni rad Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti: Geološko - tektonska osnova termomineralnih vrela u Varaždinskim toplicama. Varaždin. knj. 2, str. 9 – 29 (dostupno na: hrcak.srce.hr/file/197752, datum pristupa: 06.06.2017.).
25. Šimunić, A. (2004): Vodoopskrba toplica i termalnih vrela u Hrvatskom zagorju (dostupno na: https://bib.irb.hr/.../291095.Vodoopskrba_toplica_i_termalnih_vrela_u_Hr._zag doc, datum pristupa: 27.07.2017.).

26. Šimunić, A. (2007): Dragutin Gorjanović-Kramberger Geological Mapping Pioneer in Croatia. KiG 2007,7. Hrvatski geološki institut, Zagreb. (dostupno na: https://hrcak.srce.hr/file/20187, datum pristupa: 06.06.2017.).
27. Šimunić, A., Hećimović, I. (2008): Geotermalne i mineralne vode Republike Hrvatske. Hrvatski geološki institut, Zagreb. str. 125 – 135.
28. Šitić, J. (1814): Fizikalno-kemijski opis Stubičkih toplica. Kajkaviana, 2003, Zagreb.
29. Tišljar, J. (1994): Sedimentne stijene. Školska knjiga, Sveučilišta u Zagreb, tisak: Zadarska tiskara d.d., Zadar.
30. Van Nguyen, M., Arason, S., Gissurarson, M (2015): Uses of geothermal energy in food and agriculture – Opportunities for developing countries, Rome, FAO. (dostupno na: www.fao.org/3/a-i4233e.pdf, datum pristupa: 01.08.2017.).
31. Zagorska razvojna agencija (2016): Strategija razvoja Općine Stubičke Toplice za razdoblje 2015. do 2020. godine. (dostupno na: http://www.stubicketoplice.hr/stranica/strategija-razvoja, datum pristupa: 07.06.2017.).
32. Zakon o rudarstvu (2009). NN 56/13 (dostupno na: https://www.zakon.hr/z/390/Zakon-o-rudarstvu, datum pristupa: 01.08.2017.)

Internetske stranice:

1. http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=58510
2. http://www.turistplus.hr/hr/povijest_toplica_u_hrvatskom_zagorju/1177/
3. http://sbst.hr
4. https://solarserdar.wordpress.com/2012/07/20/geotermalni-izvori-gdje-je-zapelo/
5. https://living.vecernji.hr/zelena-zona/staklenik-obaveza-svakog-ozbiljnogvrtlara-972833
6. https://www.geocaching.com/geocache/GC511M7_stubicketoplice?guid=7602d0be-5c66-415e-8266-76e7996dfe7a
7. http://project-rec.eu/obnovljivi-izvori-energije/geotermalna-energija/
8. http://www.aqua.hr/a/tvrdoca-vode
9. http://www.obnovljivi.com/geotermalna-energija/67-iskoristavanjegeotermalne-energije-u-energetici?showall=1

11. Popis slika, popis tablica, popis grafova, popis priloga

11.1. Popis slika

Slika 1. Digitalna ortofoto karta 2011. godina, M 1:100 000 2
Slika 2. Maksimilijanov bazen 4
Slika 3. Dijanina kupelj 4
Slika 4. Modificirani geološki profil okolice Stubičkih Toplica 6
Slika 5. Topli kamen 7
Slika 6. Ortofoto karta šireg područja M: 1: 10 000 9
Slika 7. Piperov dijagram 21
Slika 8. Zdenac i uređaji za hlađenje 32
Slika 9. Zapušteni staklenik 32
Slika 10. Ortofoto karta, M 1:2000 34
Slika 11. Shema tehničko – tehnološkog procesa 39
Slika 12. Shema tipskog staklenika 40

11.2. Popis tablica

Tablica 1. Kemijski sastav termalne vode 15

Tablica 2. Odnos kalcija i magnezija, mineralizacija i tvrdoća 16

Tablica 3. Minimalna srednja i maksimalna koncentracija kationa i aniona u vodi 17

Tablica 4. Kemijska analiza Zavoda za fizikalnu medicinu i rehabilitaciju Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu 19

Tablica 5. Koncentracija $\delta^{2}H$ i $\delta^{18}O$ u termalnoj vodi Stubičkih toplica 24

Tablica 6. Sadržaj stabilnih δ13C te radioaktivnih ^{3}H i ^{14}C izotopa u termalnoj vodi 29

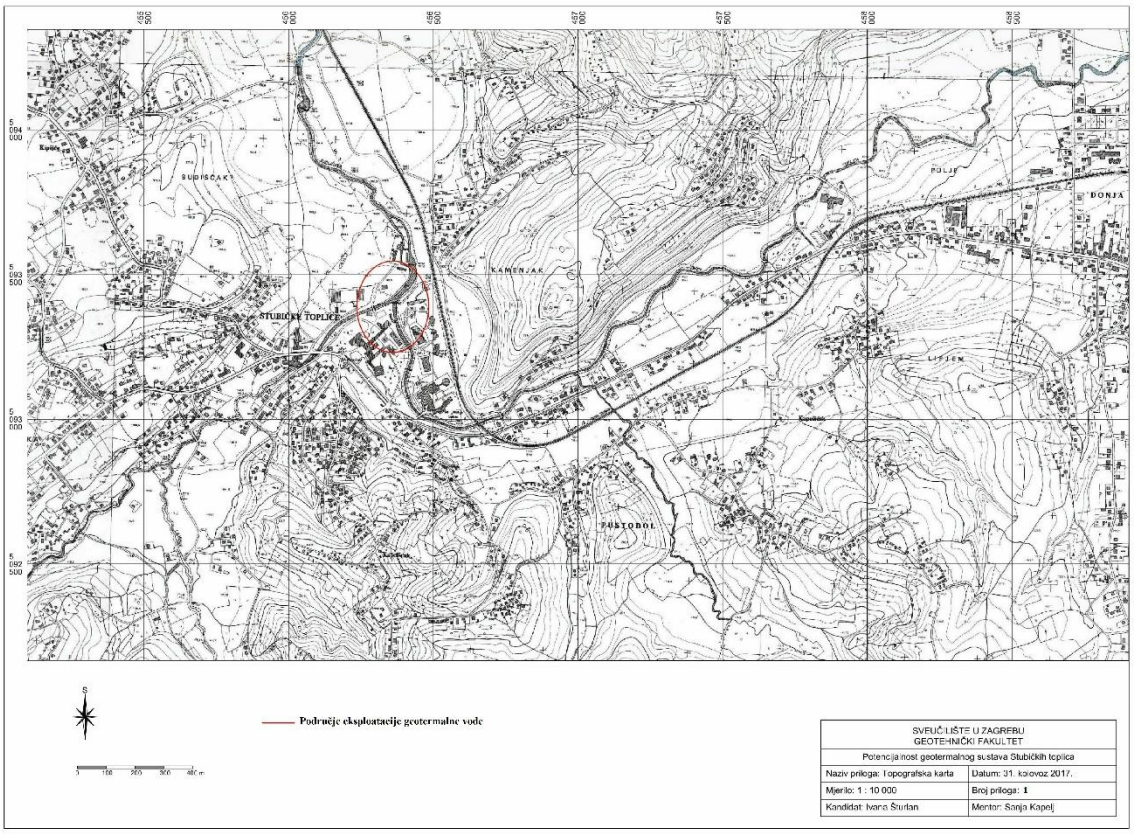
11.3. Popis grafova

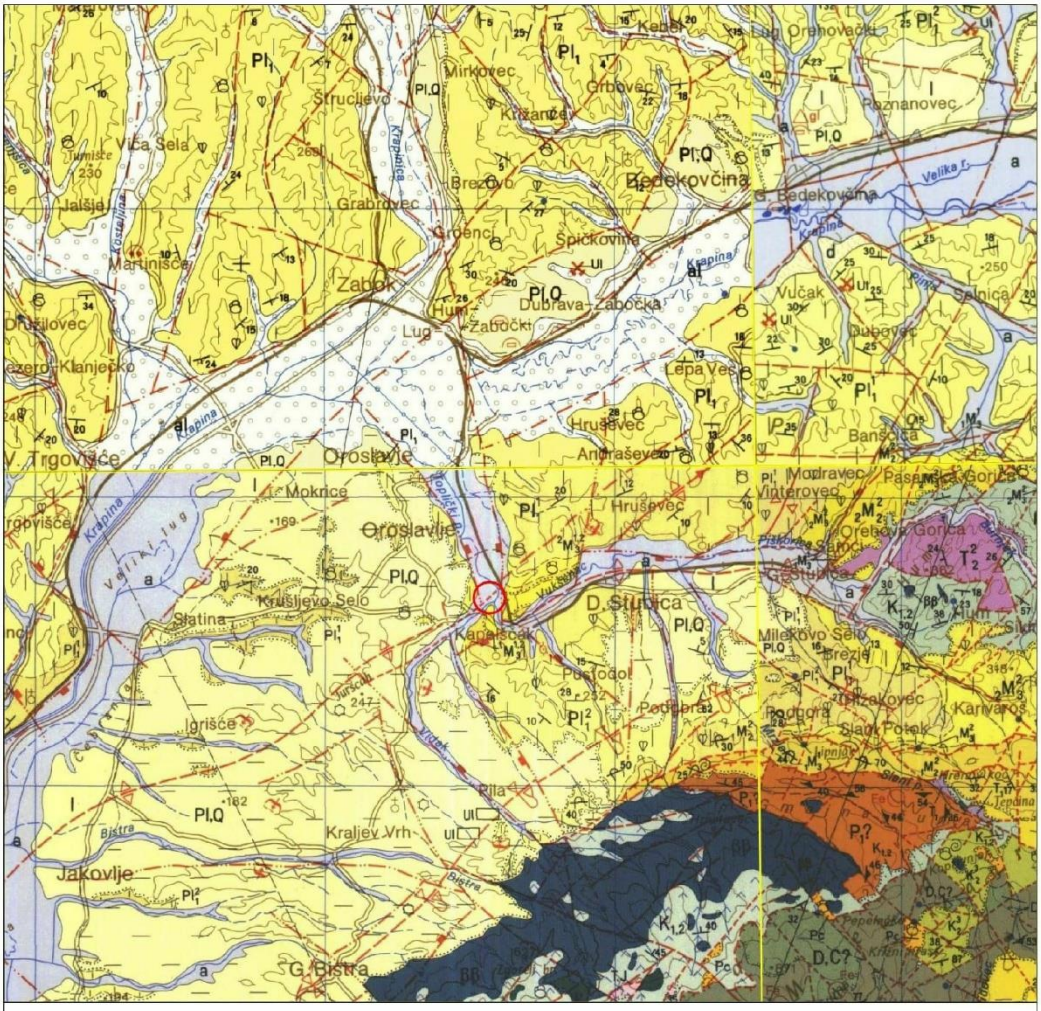
Graf 1. Odnos $\delta^{2}H$ i $\delta^{18}O$ u termalnim vodama na području sjeverozapadne Hrvatske 24

Graf 2. Odnos aktivnosti tricija i ^{14}C starost u termalnim vodama 30

11.4. Popis priloga

1. Topografska karta istraživanog područja, M 1:10 000
2. Osnovna geološka karta istraživanog područja, M 1:100 000
3. Modelirane litološke oznake


495 500
496 000
496 500
497 000
497 500
498 000
498 500
5 094 000
5 093 500
5 093 000
5 092 500
SUDILŠĆAK
STUBIČKE TOPLICE
KAMENJAK
POLJE
DONJA
LIPJEN
PUSTODOL
Područje eksploatacije geotermalne vode
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET
Potencijalnost geotermalnog sustava Stubičkih toplica
Naziv priloga: Topografska karta
Datum: 31. kolovoz 2017.
Mjerilo: 1 : 10 000
Broj priloga: 1
Kandidat: Ivana Šturlan
Mentor: Sanja Kapelj



0 1 2 3 4 km

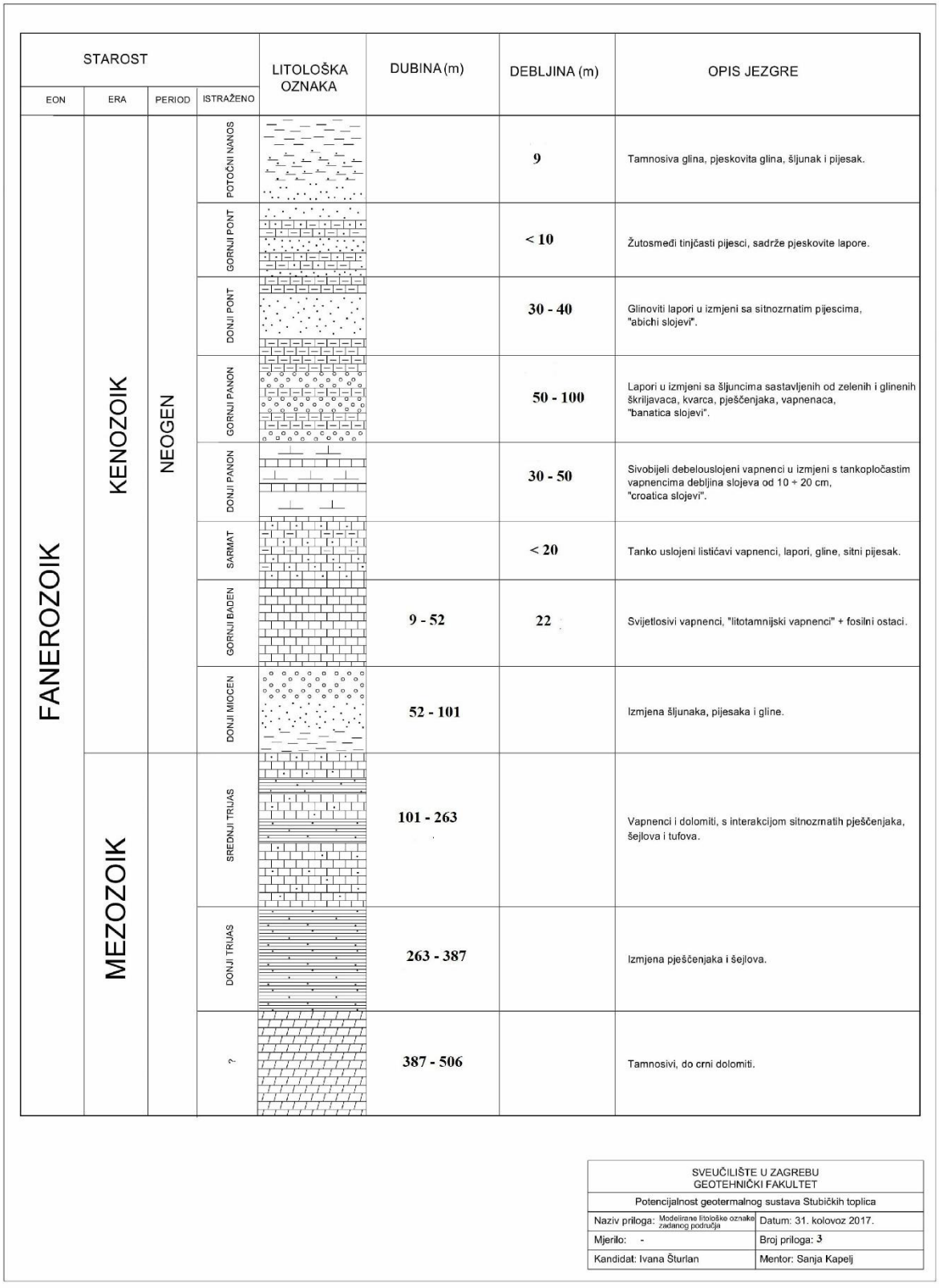
S

Područje eksploatacije geotermalne vode

LEGENDA PROPUSNOSTI TLA

SIMBOL	LITOLOŠKI OPIS		PROPUSNOST
a-Q$_2$	Aluvijalni nanos	šljunci, pijesci, gline, pjeskovite gline	srednja
M$_7^2$	Gornji pont	pijesci, lapori	niska
M$_7^1$	Donji pont	glinoviti lapori, sitnozrni pijesci u izmjeni	niska
M$_6^2$	Gornji panon	lapori, šljunci, pješčenjaci, vapnenci	srednja
M$_6^1$	Donji panon	vapnenci i vapnenački lapori	srednja
M$_5$	Sarmat	vapnenci, lapori, gline, sitnozrni pijesci	srednja
M$_4^2$	Gornj baden	vapnenci	vrlo visoka
M$_{1-2}$	Donji miocen	pijesci, šljunci, sivozelene gline	srednja do niska
T$_2$	Srednji trijas	vapnenci	vrlo visoka
T$_3$	Donji trijas	pješčenjaci, šejlovi, tankopločasti oolitični vapnenci	visoka

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET	
Potencijalnost geotermalnog sustava Stubičkih toplica	
Naziv priloga: Geološka karta	Datum: 31. kolovoz 2017.
Mjerilo: 1 : 100 000	Broj priloga: 2
Kandidat: Ivana Šturlan	Mentor: Sanja Kapelj


STAROST
EON
ERA
PERIOD
ISTRAŽENO
LITOLOŠKA OZNAKA
DUBINA (m)
DEBLJINA (m)
OPIS JEZGRE
FANEROZOIK
KENOZOIK
NEOGEN
POTOČNI NANOS
9
Tamnosiva glina, pjeskovita glina, šljunak i pijesak.
GORNJI PONT
< 10
Žutosmeđi tinjčasti pijesci, sadrže pjeskovite lapore.
DONJI PONT
30 - 40
Glinoviti lapori u izmjeni sa sitnozrnatim pijescima, "abichi slojevi".
GORNJI PANON
50 - 100
Lapori u izmjeni sa šljuncima sastavljenih od zelenih i glinenih škriljavaca, kvarca, pješčenjaka, vapnenaca, "banatica slojevi".
DONJI PANON
30 - 50
Sivobijeli debelouslojeni vapnenci u izmjeni s tankopločastim vapnencima debljina slojeva od 10 ÷ 20 cm, "croatica slojevi".
SARMAT
< 20
Tanko uslojeni listićavi vapnenci, lapori, gline, sitni pijesak.
GORNJI BADEN
9 - 52
22
Svijetlosivi vapnenci, "litotamnijski vapnenci" + fosilni ostaci.
DONJI MIOCEN
52 - 101
Izmjena šljunaka, pijesaka i gline.
MEZOZOIK
SREDNJI TRIJAS
101 - 263
Vapnenci i dolomiti, s interakcijom sitnozrnatih pješčenjaka, šejlova i tufova.
DONJI TRIJAS
263 - 387
Izmjena pješčenjaka i šejlova.
?
387 - 506
Tamnosivi, do crni dolomiti.
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET
Potencijalnost geotermalnog sustava Stubičkih toplica
Naziv priloga: Modelirane litološke oznake zadanog područja
Datum: 31. kolovoz 2017.
Mjerilo: -
Broj priloga: 3
Kandidat: Ivana Šturlan
Mentor: Sanja Kapelj