

DIMENZIONIRANJE GEOSONDE (IN TOPLOTNI VPLIVNI RADIJ) ZA POSTAVITEV TOPLOTNEGA OGREVALNEGA SISTEMA S TOPLOTNO ČRPALKO – PRIMER IZ ŠKOFJE LOKE

DESIGN OF BOREHOLE HEAT EXCHANGER (AND THERMAL IMPACT RADIUS) FOR THE APPLICATION OF HEATING SYSTEM WITH HEAT PUMP – CASE STUDY FROM ŠKOFJA LOKA

**doc. dr. Željko Vukelić, univ. dipl. inž. rud.
in geotehnol.**

zeljko.vukelic@ntf.uni-lj.si

dr. Jurij Šporin, univ. dipl. inž. rud. in geotehnol.

jurij.sporin@ntf.uni-lj.si

Blaž Janc, mag. inž. geotehnol.

blaz.janc@ntf.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška
fakulteta

Aškerčeva cesta 12, SI-1000 Ljubljana

Strokovni članek

UDK 550.836:621.577.2

(497.4Škofja Loka)

Povzetek | Izkoriščanje plitve geotermalne energije ima v Sloveniji velik potencial, posebno za primere nizkotemperaturnega ogrevanja in hlajenja stavb. Zaprti geotermalni sistemi z uporabo geotermalne toplotne črpalke so za izkoriščanje plitve geotermalne energije na območju Slovenije najbolj primerni. V članku so prikazani principi delovanja plitvih geotermalnih toplotnih sistemov, ki so trenutno v uporabi, ter potencial njihove uporabe na območju Slovenije. Na praktičnem primeru je prikazan primer dimenzioniranja globine geosonde glede na nemške smernice VDI 4640 v pogojih prevajanja toplote ter simulacija vplivnega toplotnega radija geosonde z analitičnim matematičnim modelom linijskega vira toplote.

Ključne besede: plitva geotermalna energija, geotermalna toplotna črpalka, vrtina, geosonda, model linijskega vira

Summary | Exploitation of shallow geothermal energy in Slovenia has a great potential, especially for low temperature heating and cooling of buildings. Closed geothermal systems with the use of geothermal heat pump are most suitable for the exploitation of shallow geothermal energy in Slovenia. The paper presents working principles of shallow geothermal systems that are currently in use and the potential of their application in the area of Slovenia. Practical example of borehole heat exchanger depth design according to the VDI 4640 guidelines in conditions of heat conduction and simulation of radius of thermal influence with analytical mathematical line source model is showed.

Key words: shallow geothermal energy, geothermal heat pump, borehole, borehole heat exchanger, line source model

1 • UVOD

Plitvo geotermalno energijo je mogoče definirati kot tisto, ki se pojavlja na globinah od 0 m do okoli 300 m pod površjem. Izkorišča se jo z geotermalno toplotno črpalko, ki je posrednik med hribinskim virom toplote in mestom, ki ga želimo ogrevati. Plitve geotermalne toplotne sisteme je mogoče razdeliti na odprte in zaprte. Pri tem velja, da so odprti sistemi tipa voda-voda, zaprti pa zemlja-voda, kjer prva beseda pomeni toplotni vir, druga pa toplotni ponor.

Namen članka je prikazati dimenzioniranje globine geosonde glede na nemške smernice

VDI (nem. Verein Deutscher Ingenieure) ter določiti toplotni vplivni radij geosonde na primeru iz Škofje Loke.

Z dimenzioniranjem geosonde želimo na praktičnem primeru iz Škofje Loke pokazati uporabo smernic VDI za določitev potrebne globine geosonde za vnaprej določene toplotne zahteve pri ogrevanju stanovanjskega objekta.

Z analitičnim modelom linijskega vira toplote želimo določiti toplotni vplivni radij geosonde. Ker se hribina okoli aktivirane geosonde sčasoma ohladi (v primeru odvzema toplote iz

hribine), nas zanima sprememba temperature hribine v odvisnosti od oddaljenosti od geosonde. Z rezultati modela je mogoče določiti medsebojno oddaljenost posameznih geosond v primeru postavitve več geosond ali polja geosond.

Poleg dimenzioniranja globine geosonde in toplotnega vplivnega radija bodo v članku predstavljene splošne osnove plitve geotermalne energije, geotermalni toplotni sistemi s tehnološkega vidika izkoriščanja plitve geotermalne energije ter potenciali za postavitve plitvih geotermalnih toplotnih sistemov s toplotno črpalko na območju Slovenije.

2 • OSNOVE PLITVE GEOTERMALNE ENERGIJE

Potencial izkoriščanja geotermalne energije je v veliki meri odvisen od lokalnih razmer. V splošnem obstajata dva vira plitve geotermalne energije. To sta energija Sonca (solarna energija) in energija Zemljine notranjosti. Posledično je mogoče definirati dve coni pod površjem, ki se navezujeata na prevladujoči vir energije: solarna cona in zemeljska cona (Kaltschmitt, 1999). Med solarno cono in zemeljsko cono obstaja prehodno območje (geosolarna cona), kjer je mogoče zaznati tako vpliv solarne kot zemeljske cone (Milivojević, 1994).

Sonce s svojim sevanjem ogreva površje Zemlje in atmosfero. Pronicanje vode s površja v globino prenaša to energijo v zemljo. Sonce je torej glavni vir energije v solarni coni.

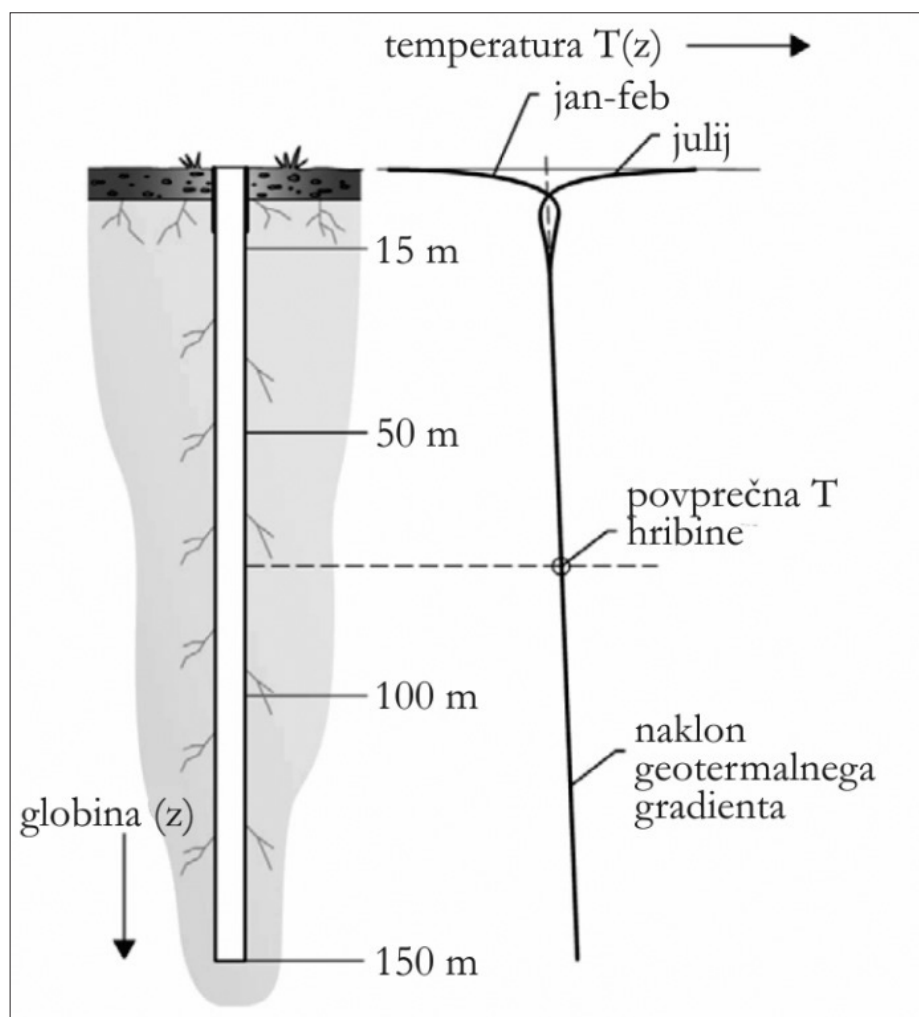
30–50 % energije v zemeljski coni izhaja iz nastanka planeta, preostalih 50–70 % energije pa iz radioaktivnega razpada izotopov (Sass, 2016). Ta energija se prenaša do plitvih globin v bližini zemeljskega površja. Glavna gonilna mehanizma pri tem sta prevajanje in konvekcija. Geotermični gradient v osrednji (celinski) Evropi znaša povprečno okoli 3 K na 100 m globine.

2.1 Solarna cona

V solarno cono spada prvih nekaj metrov globine zemeljskega podpovršja. Pri obravnavanju toplote, shranjene v solarni coni, je toplotni tok iz Zemljine notranjosti mogoče zanemariti. Gostota toplotnega toka iz Zemljine notranjosti ima povprečno vrednost okoli $0,070 \text{ W/m}^2$ in je tako znatno nižja od gostote toplotnega toka zaradi

neposrednega sevanja Sonca, ki znaša tudi do 1370 W/m^2 (Kaltschmitt, 1999).

Temperature zemljine do globine okoli 1 m nihajo glede na temperaturo površja, ki se spreminja glede na čas dneva in leta. V globinah pod 2 do 3 m temperature v srednji Evropi običajno ostajajo nad lediščem celo leto. Zaradi nizkih temperaturnih gradientov



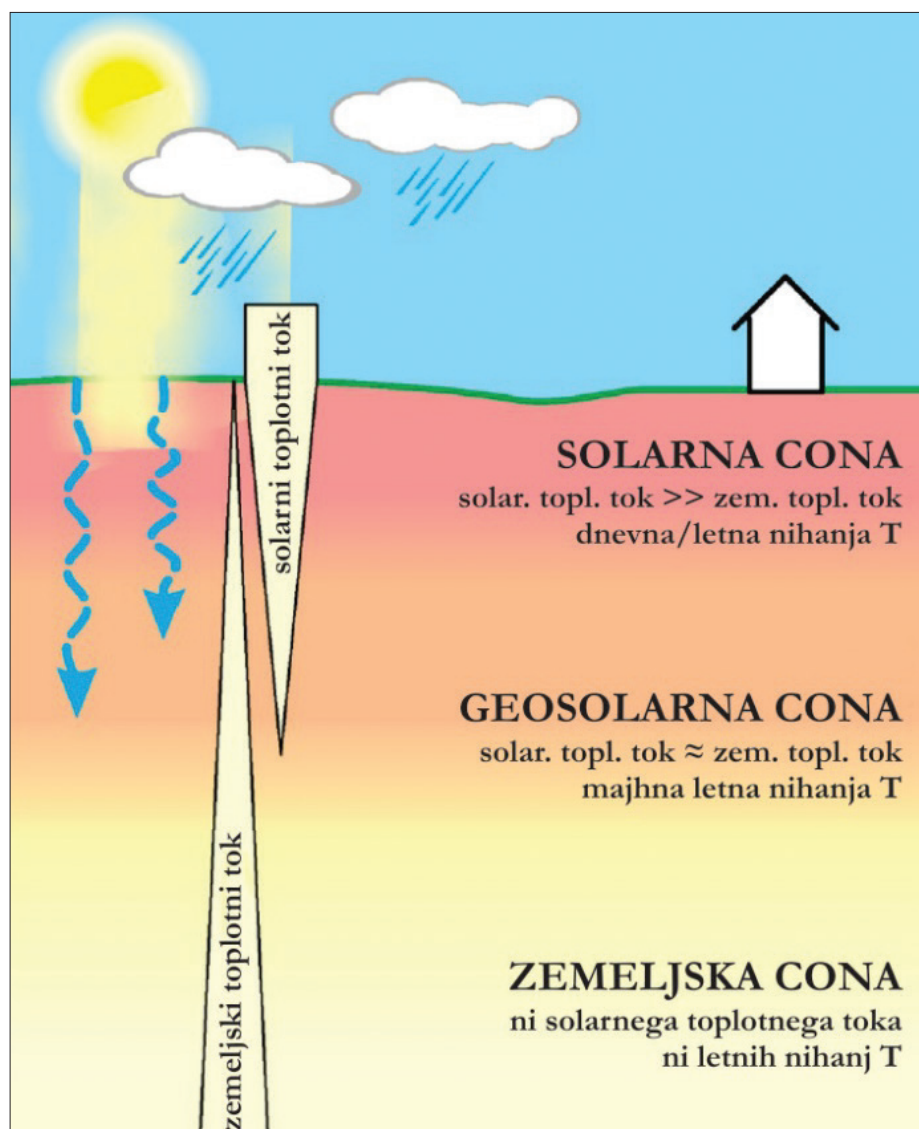
Slika 1 • Geotermični gradient (prirejeno po (Gehlin, 2002)).

v sušnem obdobju leta transporta energije v globino praktično ni. Prenos toplote v večje globine je mogoč samo preko infiltracije padavin ali preko gibanja vode iz drugih virov. Zaradi tega uporaba vodoravnih sistemov za zajem plitve geotermalne energije pod stavbami ni ekonomično upravičena.

Proces prenosa toplote s konvekcijo je odvisen od navpične vodoprepustnosti zemljine. Vpliv klimatskih sezonskih nihanj se z globino zmanjšuje. Pod globino okoli 15 m prevladujejo konstantne temperature celo leto.

2.2 Zemeljska cona

Zemeljska cona je območje od Zemljine notranjosti do solarne cone. V tej coni ni vpliva sončevega sevanja. Prav tako ne prihaja do sezonskih nihanj temperatur. Pri načrtovanju geotermalnih toplotnih odjemalcev je zadostna ocena, da toplotna energija kamnin v zemeljski coni izhaja izključno iz Zemljine notranjosti. Prenos toplote je odvisen od vrste kamnine in geološke situacije. V tektonsko nepoškodovanih razmerah temperatura kamnin narašča z globino glede na lokalni geotermični gradient.



Slika 2 • Shematski prikaz solarne, geosolarne in zemeljske cone (prirejeno po (Sass, 2016)).

3 • GEOTERMALNI TOPLOTNI SISTEMI

Geotermalni toplotni sistemi predstavljajo tehnologije za izkoriščanje geotermalne energije. V splošnem jih je mogoče razdeliti na zaprte in odprte geotermalne toplotne sisteme.

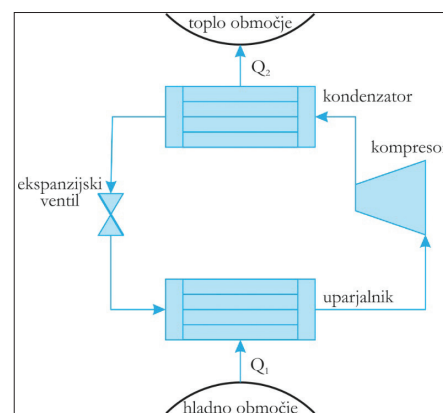
Ker so temperature plitvega podzemlja do globine okoli 300 m za neposredno uporabo v ogrevalnih sistemih večinoma prenizke, je treba v ogrevalnem sistemu uporabiti toplotno črpalko, ki s svojim delovanjem dvigne temperaturo plitvega podzemlja (na primer 12 °C) na obratovalno temperaturo ogrevalnega sistema (na primer 35 °C).

3.1 Toplotne črpalke

Toplotna črpalka (TČ) je ciklična naprava, ki pri ogrevanju prenaša toploto iz nizkotem-

peraturnega medija na visokotemperaturni medij. Toplotne črpalke za svoje delovanje porabljajo električno energijo. Glavni deli TČ so kondenzator, ekspanzijski ventil, uparjalnik in kompresor. Delovni fluid je običajno določen tip hladiva (Rosen, 2017).

Hladivo z nizko temperaturo vrelišča potuje preko toplotnega izmenjevalca (uparjalnika) in absorbira toploto od nizkotemperaturnega geotermalnega vira. Hladivo se pri tem upari. Para nato potuje skozi kompresor, kjer se ji dodatno poviša tlak in posledično temperatura. Vroča para za tem potuje v kondenzator, kjer odda toploto visokotemperaturnemu mediju. Ko hladivo odda toploto, kondenzira in se utekočini. Preden se



Slika 3 • Princip delovanja toplotne črpalke za ogrevanje (prirejeno po (Rosen, 2017)).

hladivo vrne v uparjalnik, potuje skozi ekspanzijski ventil, ki sprosti tlak. Cikel se za tem ponovi.

Za oceno učinkovitosti toplotne črpalke ali za njihovo primerjavo se uporablja koeficient učinkovitosti (ang. COP – coefficient of performance), ki ga imenujejo tudi grelni števil. COP je za ogrevanje prostorov definiran kot (Bonin, 2009):

$$COP = \frac{Q}{W}, \quad (1)$$

kjer je Q toplota, potrebna za ogrevanje prostorov, in W porabljena električna energija.

Večji ko je COP toplotne črpalke, bolj učinkovit je sistem. COP pada z večanjem temperaturne razlike med visoko- in nizkotemperaturnim medijem. V splošnem imajo toplotne črpalke faktor učinkovitosti približno enak štiri in tudi že višji (boljši).

COP, ki ga navajajo proizvajalci, odraža učinkovitost toplotne črpalke pri laboratorijskih pogojih. Dejanski pogoji, v katerih obratuje črpalka, se od laboratorijskih razlikujejo. Zaradi tega je pri ocenjevanju potenciala toplotne črpalke bolj smiselna uporaba sezonskega koeficienta učinkovitosti (ang. SCOP – seasonal coefficient of performance). SCOP predstavlja končno energetska učinkovitost celotnega sistema preko celotne ogrevalne/ohlajevalne sezone. Izračunan je kot količnik med celotno uporabno izstopno energijo in celotno potrebno vstopno energijo sistema. Pri tem so upoštevane spremenljive potrebe po ogrevanju ali hlajenju, spremenljive temperature toplotnega vira in ponora ter dodatne energetske potrebe, na primer za obtočne in potopne črpalke (Nouvel, 2015).

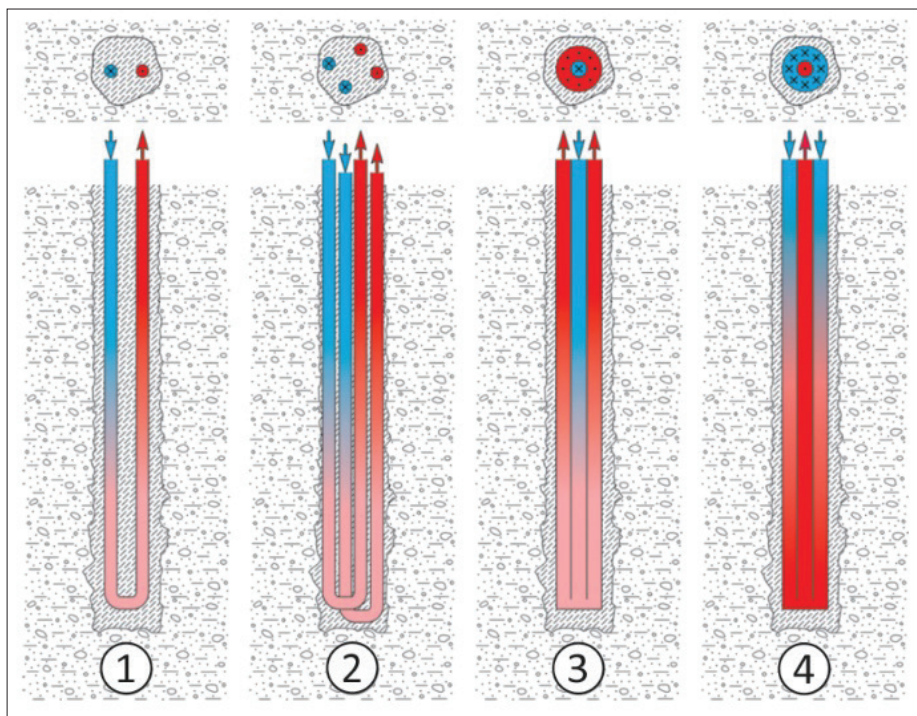
3.2 Zaprti geotermalni toplotni sistemi

Med zaprte geotermalne toplotne sisteme spadajo navpični toplotni izmenjevalci v vrtnah ali geosonde, toplotne cevi, vodoravni kolektorji in toplotni piloti. Med naštetimi obstajajo znatne razlike glede na obliko, prostorske zahteve in globino inštalacije.

Zaprti sistemi imajo podzemno mrežo cevi, ki imajo vlogo toplotnega izmenjevalca. Cevi so izdelane iz različnih materialov, večinoma iz polietilena visoke gostote (ang. HDPE – high density polyethylene), jekla in bakra.

3.2.1 Geosonde

Izvedba geosonde je mogoča z enojno U-cevjo, dvojno U-cevjo ali koaksialno cevjo kot toplotnim izmenjevalcem. Trenutno je največ geosond opremljenih z dvojno U-cevjo. Enojna U-cev se večinoma uporablja za vrtnice, globlje od okoli 250–300 m. Skupaj s cevmi so v vrtno vgrajeni tudi notranji in zunanji distančniki, ki omogočajo centričnost cevi. Notranji distančniki zmanjšajo toplotni vpliv



Slika 4 • Shematski prikaz različnih izvedb geosond 1-geosonda z enojno U-cevjo, 2-geosonda z dvojno U-cevjo, 3-geosonda s koaksialno cevjo (notranja povratna), 4-geosonda s koaksialno cevjo (zunanja povratna) (prirejeno po (Sass, 2016)).

med posameznimi cevmi. Zunanji distančniki preprečujejo stik med cevjo in ostenjem vrtnice in tako zagotavljajo, da so cevi popolnoma obdane z injekcijsko maso (Sass, 2016).

Konstrukcija geotermalnega toplotnega sistema z geosondo zahteva vrtnanje ene ali več navpičnih vrtnic, v katere so iz kolata spuščene cevi določene izvedbe. Cevi se pri tem ne smejo poškodovati. Vrtnice za geosonde so običajno globoke med 70 m in 200 m. Globlje vrtnice so manj pogoste.

Ko je sistem v obratovanju, fluid za prenos toplote kroži v zaprtem krogu geosonde. Fluid lahko absorbira toploto hribine (ogrevanje) ali prenaša toploto v hribino (hlajenje). Fluid za prenos toplote (prenosnik toplote) je večinoma iz mešanice vode in glikola. Kroženje fluida v sistemu omogoča črpalka.

3.2.2 Toplotne cevi

Toplotne cevi so napolnjene s toplotnim fluidom, ki je podvržen stalnim spremembam agregatnega stanja (tekoče-plinasto). Uporabljeni fluidi vključujejo ogljikov dioksid, amonijak, propan in butan. Toplotni fluid se uparja v uparjalni coni zaradi prejemanja okoliške toplote in se zaradi znižanja gostote prične dvigovati navzgor. Pri tem ni potrebe po črpalci. Na vrhu cevi fluid odda toploto in kondenzira v hladni coni ter se vrača navzdol po cevi do uparjalne cone, kjer se cikel ponovi.

Cev je lahko spiralno zvita, kar pripomore pri procesu (Sass, 2016).

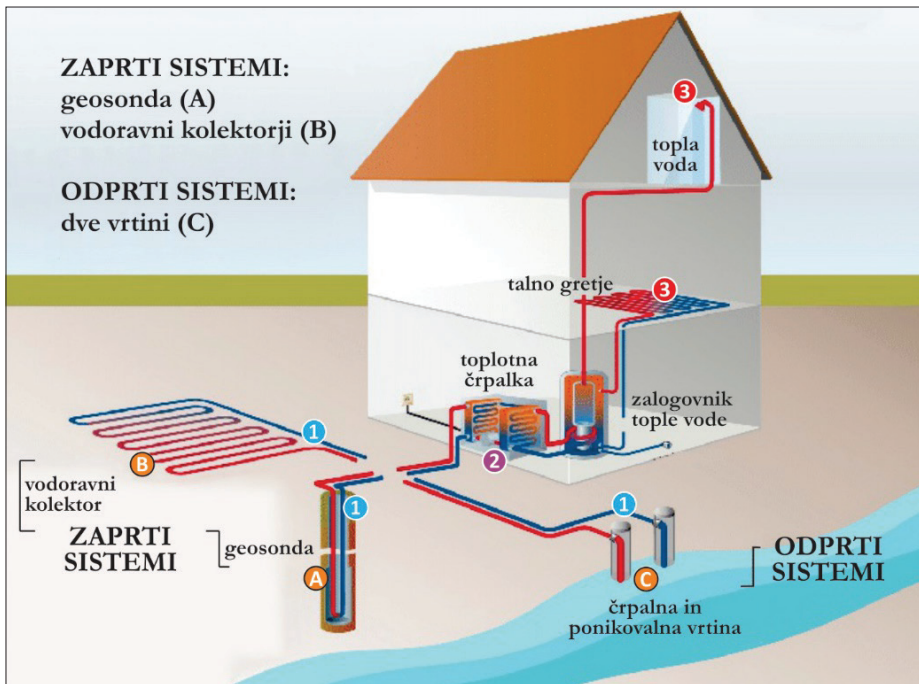
3.2.3 Vodoravni zemeljski kolektorji

Vodoravni kolektorji so sestavljeni iz mreže cevi, položenih v zemljo na globini okoli 1–2 m. Cevi so v zemljo položene na določeni medsebojni razdalji. Napolnjene so z mešanico vode in glikola, ki ne zmrzuje.

Prenosnik toplote (fluid) kroži v ceveh in odvzema toploto, shranjeno v zemlji, ki je skoraj izključno rezultat sončevega sevanja (solarna cona). Zaradi različnih podnebnih režimov je tako pri enakih zemljinah pričakovati različne toplotne zmogljivosti (Sass, 2016).

Obstajajo različne izvedbe vodoravnih zemeljskih kolektorjev. Vse sestavljajo zanke iz plastičnih ali bakrenih cevi. Cevi je mogoče položiti tudi v jarke na globini 0,5–1,5 m. Prednost pri tem je manjša poraba prostora.

Poseben primer vodoravnega zemeljskega kolektorja predstavljajo geotermalne energetske košare. Nameščajo se tam, kjer ni prostora za vodoravne kolektorje, kjer obstajajo določene omejitve za vgradnjo geosonde ali kjer je na voljo posebej ugodna mehka zemljina. Energetske košare so sestavljene iz spiralno navitih polietilenskih cevi v obliki konusa. Običajno je položenih in povezanih več geotermalnih energetskih košar skupaj.



Slika 5 • Shematski prikaz različnih izvedb geosond 1:-geosonda z enojno U-cevjo, 2:-geosonda z dvojno U-cevjo, 3:-geosonda s koaksialno cevjo (notranja povratna), 4:-geosonda s koaksialno cevjo (zunanja povratna) (prirejeno po (Sass, 2016)).

3.3 Odprti geotermalni toplotni sistemi

Odprti geotermalni sistemi delujejo po principu odvzema podzemne vode, spremembi njene temperature in vračanju nazaj v vodonosnik. Običajno je v uporabi dvojni sistem, ki ima najmanj eno črpalno vrtino in najmanj eno ponikovalno vrtino.

Pri odprtih geotermalnih sistemih gre za večji poseg v vodonosnik kot pri zaprtih geotermalnih sistemih.

Temperaturna razlika vrnjene vode v vodonosnik naj ne bi presegala 3–6 K. Pri tem se ogrevanje podzemne vode šteje za bolj problematično kot njeno hlajenje. Zaradi tega je pri vgradnji odprtih geotermalnih toplotnih sistemov potrebno strogo upoštevanje pravil za zaščito podtalnice (Sass, 2016).

Odperti geotermalni sistemi izkazujejo večjo stopnjo izkoristka kot večina zaprtih geotermalnih sistemov, imajo pa večjo potrebo po vzdrževanju.

Pri odprtih geotermalnih toplotnih sistemih je potrebna posebna pozornost glede hidravličnih in toplotnih vplivov na okolico. Sistem dveh vrtin povzroča pri črpalni vrtni znižanje piezometrične višine podzemne vode v obliki depresijskega lijaka in pri ponikovalni vrtni zvišanje piezometrične višine podzemne vode. Poleg tega v sistemu prihaja do temperaturnih razlik, kar privede do toplotnega toka. Radij toplotnih vplivov je lahko v primerjavi s hidravličnimi vplivi znatno večji. Zaradi tega je vpliv odprtih geotermalnih toplotnih sistemov na okolico lahko bistveno večji kot vpliv zaprtih sistemov.

Izvedba in uporaba sistema z vrtino potrebuje dovoljenje v skladu z Zakonom o vodah.

Črpalna in ponikovalna vrtina sta zasnovani na enak način. Obe vrtini sta v zgornjem delu zaščiteni z obložnimi cevmi, v spodnjem delu pa s filtrskimi cevmi, ki so obdane z zasipnim materialom. V črpalno vrtino je vgrajena potopna črpalka. Vsaka vrtina mora zagotavljati tesnost proti vdoru meteorne vode. Prav tako mora biti njeno ustje zaščiteno proti nepooblaščenemu dostopu.

Neposredno ogrevanje iz črpalne vrtine brez uporabe toplotne črpalke je mogoče samo pri dovolj globokih vrtinah. V večini primerov pa je potrebna uporaba toplotne črpalke.

Po uporabi v ogrevalnem sistemu se voda preko ponikovalne vrtnice vrača nazaj v vodonosnik, tokrat pri drugačni temperaturi, kot je bila pri odvzemu. Podzemna voda mora biti vrnjena v isti vodonosnik, iz katerega je bila odvzeta.

3.4 Priporočila pri namestitvi plitvih geotermalnih toplotnih sistemov

Pred namestitvijo plitvih geotermalnih toplotnih sistemov je priporočljivo pridobiti čim več informacij o hribini (prisotnost vode, toplotna prevodnost), v kateri se načrtuje vgradnja toplotnega sistema. Prav tako je potrebna pozornost glede injektiranja ali zasipa med cevmi toplotnega geotermalnega sistema in hribino. Če med cevjo in hribino nastanejo zračni žepi, ti delujejo kot toplotni izolatorji in preprečujejo prehod toplote iz hribine v toplotni geotermalni sistem. Zaradi tega je priporočljivo, da ima injekcijska ali zasipna masa čim večjo toplotno prevodnost. Pazljivost je potrebna tudi pri zadostni medsebojni oddaljenosti toplotnih geotermalnih sistemov, če nastopajo v skupinah. Za geosonde je priporočljiva medsebojna oddaljenost okoli 10 m (Sass, 2016).

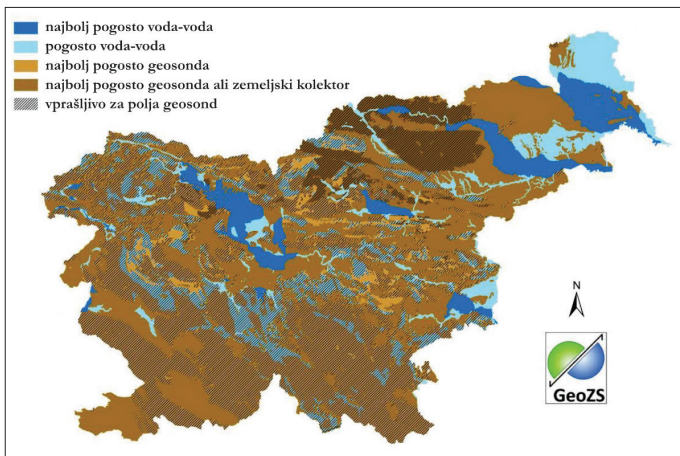
Slika 7 prikazuje pričakovane temperature na globini 100 m. Lokalni ekstremi se pojavljajo v severovzhodnem delu Slovenije in v delu krške kotline. Razlog za višje temperature na globini 100 m v SV Sloveniji od preostalih območij je tanjša Zemljina skorja in višji toplotni tok iz plašča Zemlje. Ta območja so najbolj primerna za geotermalne sisteme s toplotno črpalko, saj temperature na globini 100 m dosežejo okoli 14 °C.

4 • PLITVA GEOTERMALNA ENERGIJA V SLOVENIJI

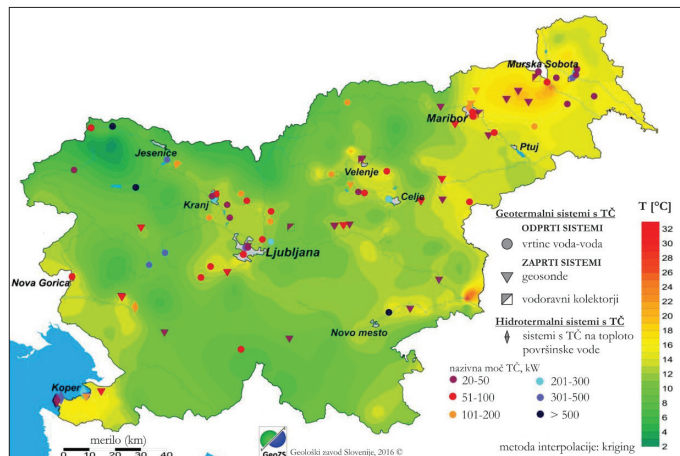
Slika 6 prikazuje geološki in hidrogeološki potencial plitvih geotermalnih sistemov voda-voda in zemlja-voda z uporabo toplotne črpalke na območju Slovenije. Vgradnja vodoravnih zemeljskih kolektorjev je najbolj primerna v peskih in peščenih glinah. Na območju dolomitov, apnencev in magmatskih ter metamorfnih kamnin je geosonda praviloma najprimernejši sistem. Zaradi nepredvidljivosti

so plitva kraška območja za geosonde manj primerna (Rajver, 2016).

Obsežni in visokoproduktivni vodonosniki so pod približno 7 % površja Slovenije. Ta območja so zelo primerna za odprte geotermalne sisteme voda-voda. Temperature podzemne vode se gibljejo med 10 °C in 15 °C. Nivo pozemne vode je na globini 2 m do 25 m. Na teh območjih so tudi največja mesta (Raiver, 2016).



Slika 6 • Potencial za postavitve plitvih geotermalnih toplotnih sistemov s toplotno črpalko na območju Slovenije (prirejeno po (Rajver, 2016)).



Slika 7 • Porazdelitev objektov z enotami GTČ večjih nazivnih moči (na plitvo geotermalno energijo) in pričakovane temperature na globini 100 m (prirejeno po (Rajver, 2016)).

5 • PRAKTIČNI PRIMER DIMENZIONIRANJA GEOSONDE IN TOPLLOTNI VPLIVNI RADIJ

Na praktičnem primeru je prikazano dimenzioniranje globine geosonde ter njen vplivni toplotni radij. Izračuni so narejeni za območje Škofje Loke. Raziskovalna vrtna je bila izvedena na območju nekdanje vojašnice.

5.1 Globina geosonde

Predpostavimo, da ima enodružinska hiša površino 150 m² in je opremljena s talnim gretjem s projektirano temperaturo vode 35 °C. Specifična letna potreba po toploti znaša 90 kWh/m². To pomeni, da znašajo skupne toplotne potrebe 13.500 kWh, ki se porazdelijo čez celo leto.

Pri dimenzioniranju geosonde smo izbrali sezonski koeficient učinkovitosti (SCOP) enak 4,0. Prav tako je bil izbran čas delovanja sistema 2400 ur. Pričakovane vrednosti za specifični odvzem toplote za posamezne geološke plasti so izbrane glede na nemške smernice VDI 4640, ki so prikazane v preglednici 1. Vrednosti veljajo za toplotne ogrevalne sisteme moči do 30 kW.

Moč geosonde se določi po enačbi (Shao, 2016):

$$P_{BHE} = \left(1 - \frac{1}{SCOP}\right) \frac{E_{\text{annual}}}{h_{\text{operation}}}, \quad (2)$$

kjer je P_{BHE} moč geosonde (kW), SCOP se-

zonski koeficient učinkovitosti, E_{annual} skupna letna potreba po toploti (kWh) in $h_{\text{operation}}$ čas delovanja (h).

Potrebna moč geosonde je

$$P_{BHE} = \left(1 - \frac{1}{4}\right) \frac{13500 \text{ kWh}}{2400 \text{ h}} = 4219 \text{ W}$$

Obravnavano območje do globine 100 m gradijo geološke plasti, ki so opisane v preglednici 2.

Vrednosti za specifični odvzem toplote se nanašajo glede na VDI-smernice. Ker omenjene smernice za posamezni tip hribine upoštevajo intervalne vrednosti, smo v našem primeru upoštevali minimalne vrednosti.

Vrednosti za specifični odvzem toplote so prikazane v preglednici 3.

Čeprav je zgornjih 10 m v območju vpliva solarne cone, je pri izračunu upoštevano, kot da so vse plasti del zemeljske cone.

Toplotna moč 1. in 2. plasti je enaka 324 W in 770 W, kar skupno pomeni 1094 W. Če od potrebne moči geosonde, ki znaša 4219 W, odštejemo toplotno moč zgornjih dveh plast, dobimo 3125 W.

Globina geosonde v apnencu je enaka:

$$h_{\text{apn}} = \frac{3125 \text{ W}}{50 \frac{\text{W}}{\text{m}}} = 62,5 \text{ m}$$

Če upoštevamo globino prvih dveh plast in globino geosonde v apnencu, znaša skupna globina 102,5 m.

Izračunana globina geosonde se nanaša na nemške smernice VDI 4640. Pri tem je treba upoštevati, da je dejansko moč vrtnice mogoče določiti le s preizkusom termične odzivnosti geosonde (ang. TRT – thermal response test).

Princip preizkusa termične odzivnosti geo-

HRIBINA	SPECIFIČNI ODVZEM TOPLOTE	
	za 1800 ur	za 2400 ur
	W/m	W/m
suhi gramoz, pesek	<25	<20
nasičeni prod, pesek	65-80	55-65
močni vodni tokovi v gramozu, pesku	80-100	80-100
vlažna glina	35-50	30-40
masivni apnenec	55-70	45-60
peščenjak	65-80	55-65
kisle magmatske kamnine (granit)	65-85	55-70
bazične magmatske kamnine (bazalt)	40-65	35-55
gnajs	70-85	60-70

Preglednica 1 • VDI 4640 smernice za geosonde (VDI 4640).

PLAST	INTERVAL GLOBINE	HRIBINA
1. plast	0-18 m	zaglinjeni prod
2. plast	18-40 m	glinasti skrilavec
3. plast	40-100 m	pretrti apnenec in dolomit

Preglednica 2 • Geološke plasti na območju geosonde (Herič, 2017).

PLAST	DOLŽINA	SPECIFIČNI ODVZEM TOPLOTE
1. plast	18 m	18 W/m
2. plast	22 m	35 W/m
3. plast	60 m	50 W/m

Preglednica 3 • Specifični odvzem toplote.

sonde je v tem, da se opravljajo meritve temperature na vhodni in izhodni cevi geosonde. Toplotni fluid geosonde se pri tem umetno segreva z grelnikom. Kroženje fluida po sistemu zagotavlja črpalka z znanim pretokom. Preizkus se po priporočilih ASHRAE (ang. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) opravlja od 36 do 48 ur pri toplotni moči 50 do 80 W/m. Z modelom linijskega vira toplote je nato mogoče izračunati toplotno prevodnost hribine (Mu Bae, 2019).

5.2 Vplivni radij geosonde

Pri izračunu vplivnega radija geosonde je upoštevan analitični toplotni model z linijskim virom ponora toplote (ang. line-source model).

Pri teoriji linijskega vira je vrtna predpostavljena kot neskončni linijski vir v hribini. Hribina je predpostavljena kot neskončni medij z neko začetno enakomerno porazdeljeno temperaturo. Pri tem je prenos toplote v osni smeri vzdolž vrtnine zanemarljiv. Ta predpostavka je veljavna v območju vrtnine, ki je dovolj oddaljeno od vrha in dna vrtnine. Pri tem je prevajanje toplote v hribini mogoče poenostavljeno zapisati kot (Rosen & Koohi Fayegh, 2017):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

kjer je T temperatura hribine, r radij, α toplotna difuzivnost hribine in t čas od začetka opazovanja.

Pri linijskem modelu geosonde so upoštevane naslednje predpostavke:

- toplotne lastnosti hribine so izotropne,
- pretok podzemne vode je zanemarljiv,
- toplotna upornost vrtnine je zanemarljiva in
- vpliv površja hribine je zanemarljiv.

Temperaturni odziv v hribini zaradi vpliva konstantnega toplotnega toka linijskega vira je mogoče zapisati kot:

$$T(r, t) - T_0 = \frac{q'}{4\pi k} \int_{r^2}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (4)$$

Z upoštevanjem približka eksponentnega integrala je enačbo mogoče zapisati kot (Rosen & Koohi Fayegh, 2017):

$$T = T_0 + \frac{q'}{4\pi k} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) - \gamma \right], \quad (5)$$

kjer je T temperatura hribine (K), T_0 začetna temperatura hribine (K), q' specifični odvzem toplote (W/m), k toplotna prevodnost hribine

začetna temperatura	T_0	283	K
specifični odvzem toplote	q'	50	W/m
toplotna prevodnost	k	3,5	W/m K
toplotna difuzivnost	α	$2 \cdot 10^{-6}$	m^2/s

Preglednica 4 • Specifični odvzem toplote.

(W/(m·K)), α toplotna difuzivnost hribine (m^2/s), t čas (s), r radij (m) in γ Eulerjeva konstanta ($\gamma = 0,5772$).

Z opisanim matematičnim modelom smo simulirali toplotni vpliv geosonde na okoliško hribino. Za tri različne čase (1 dan, 10 dni in 100 dni) smo simulirali spreminjanje tempera-

ture hribine v odvisnosti od oddaljenosti od geosonde.

V preglednici 4 so predstavljeni vhodni podatki za matematični model.

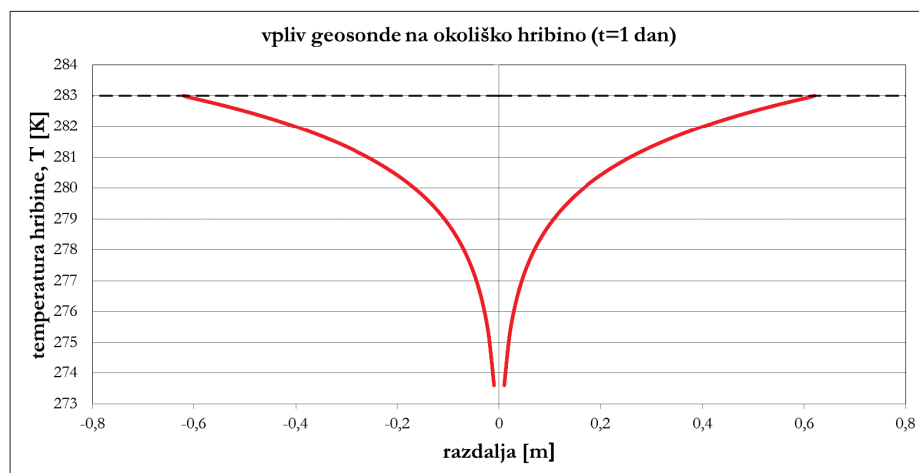
V nadaljevanju so prikazani grafi, ki so rezultat simulacije vpliva geosonde na okoliško hribino z različnim časom opazovanja. Vplivni radij geosonde se s časom povečuje. Po 100 dneh opazovanja znaša teoretični vplivni radij okoli 6 m. Hribina v okolici geosonde se sčasoma ohladi. Temperatura hribine na grafih je precejšena zaradi predpostavk matematičnega modela. Pri tem je treba upoštevati, da se okoliška hribina v času nedelovanja geosonde (poletna sezona) zopet ogreje. Zaradi tega ni mogoče pričakovati, da bi se hribina v okolici geosonde zaradi njenega delovanja z leti ohladila do take mere, da bi se zmanjšala njena učinkovitost.

Na sliki 8 je prikazan teoretični vpliv geosonde na okoliško hribino po enem dnevu. Vplivni radij znaša okoli 0,6 m.

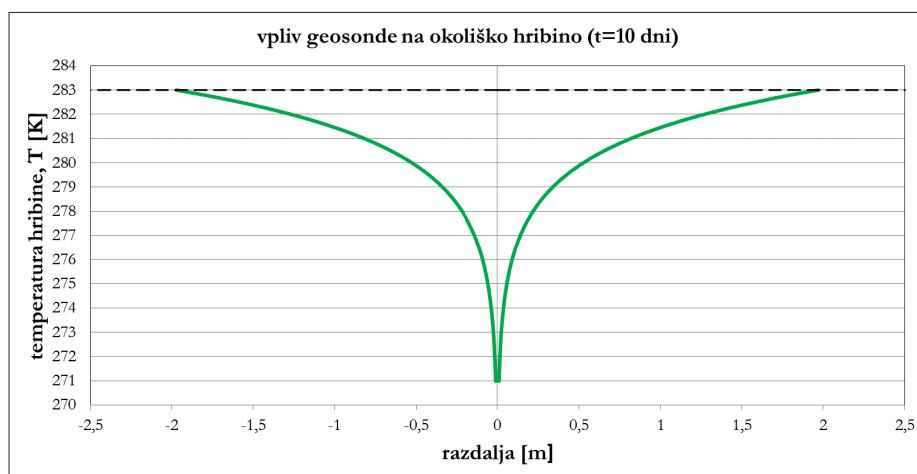
Na sliki 9 je prikazan teoretični vpliv geosonde na okoliško hribino po 10 dneh delovanja. Vplivni radij znaša okoli 2 m.

Na sliki 10 je prikazan teoretični vplivni radij geosonde po 100 dneh, ki znaša okoli 6 m.

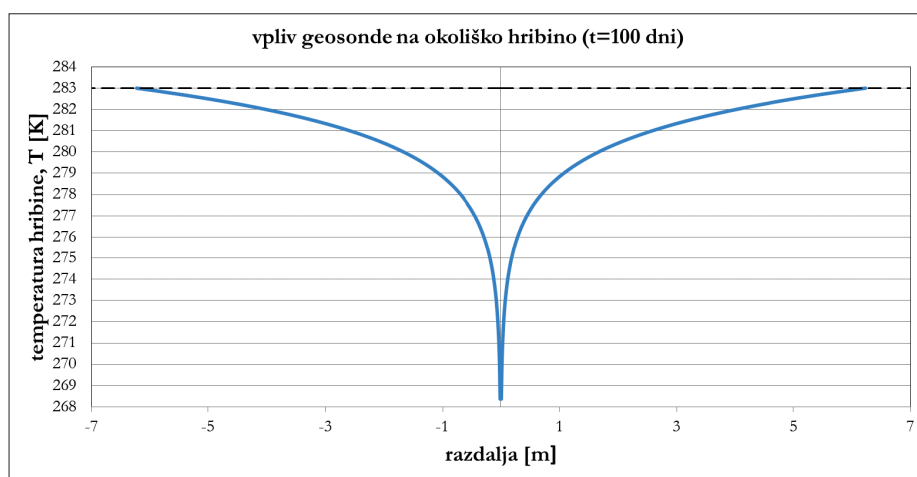
Na sliki 11 so združeni vsi trije grafi vpliva geosonde na okoliško hribino. 100 dni ustreza času delovanja 2400 ur, ki je bil izbran pri dimenzioniranju geosonde.



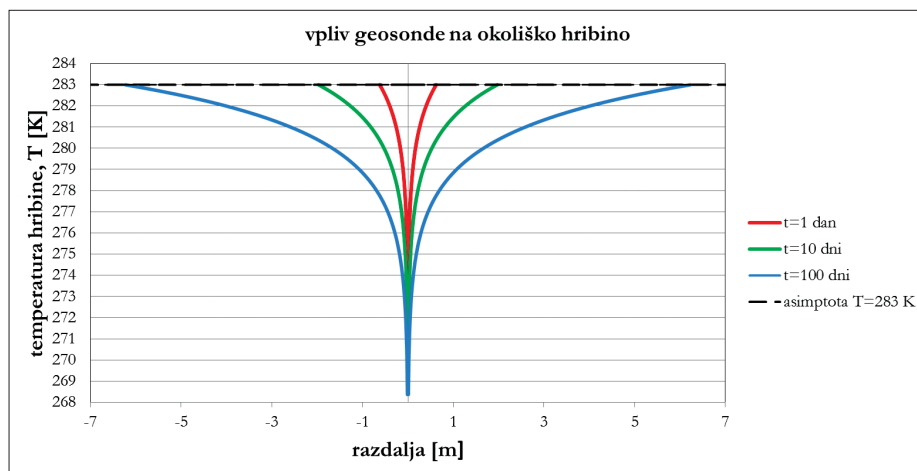
Slika 8 • Teoretični toplotni vpliv geosonde na okoliško hribino po 1 dnevu.



Slika 9 • Teoretični toplotni vpliv geosonde na okoliško hribino po 10 dneh.



Slika 10 • Teoretični toplotni vpliv geosonde na okoliško hribino po 100 dneh.



Slika 11 • Teoretični toplotni vpliv geosonde.

6 • SKLEP

Plitva geotermalna energija je zanesljiv in razmeroma lahko dostopen vir toplote, ki je predvsem primeren za ogrevanje in tudi hlajenje (z namestitvijo reverzibilnih enot TČ) stanovanjskih objektov. V Sloveniji je skoraj na vseh poseljenih območjih mogoča uporaba določenih geotermalnih sistemov, zaprtih ali odprtih. Večji potencial predstavljajo zaprti geotermalni sistemi, ki imajo tudi manjši hidravlični in toplotni vpliv na okoliško hribino v primerjavi z odprtimi sistemi. Geotermalne toplotne črpalke izkazujejo do 30 % večji sezonski koeficient učinkovitosti od toplotnih črpalk na zrak.

Z dimenzioniranjem geosonde s pomočjo smernic VDI je v članku prikazan način

določitve globine geosonde. Za omenjeni postopek je treba poznati geološko situacijo (debeline posameznih plasti in vrsto kamnine oziroma zemljine ter prisotnost podzemne vode). Globina, pridobljena glede na smernice VDI, služi za inženirsko oceno. Treba je upoštevati, da se dejansko moč vr-tine lahko določiti le s preizkusom termične odzivnosti geosonde, kjer je po izvedbi preizkusa mogoče izračunati toplotno prevodnost hribine. Smernice VDI pri vrednostih za specifični odvzem toplote upoštevajo intervalne vrednosti, kjer je povprečna razlika med najnižjo in najvišjo vrednostjo okoli 20 %. V našem primeru smo pri izračunu globine geosonde za posamezne

plasti materialov vzeli najnižje vrednosti za specifični odvzem toplote, kar pomeni, da končna izračunana globina geosonde znaša 102,5 m.

Z modelom linijskega vira toplote je prikazana določitev toplotnega vplivnega radija geosonde. Za primer v Škofji Loki znaša teoretični toplotni vplivni radij geosonde po 100 dneh delovanja okoli 6 m. Izračunani vplivni radij se sklada z nemškimi priporočili o minimalni osni oddaljenosti dveh geosond, ki znaša med 5 m in 10 m (Sass, 2016). Ker je dejansko porazdelitev temperature hribine v okolici delovanja geosonde v odvisnosti od časa mogoče določiti samo z meritvami temperature v vrtninah, služi določitev toplotnega vplivnega radija z modelom linijskega vira toplote za pomoč pri načrtovanju polja geosond.

7 • LITERATURA

- Bae, S. M., Nam, Y., Choi, J. M., Lee, K. H., Choi, J. S., Analysis on Thermal Performance of Ground Heat Exchanger According to Design Type Based on Thermal Response Test, *Energies*, 12(4):651, 2–16, 2019.
- Bonin, J., Handbuch Wärmepumpen-Planung und Projektierung, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2009.
- Gehlin, S., Thermal Response Test-Method Development and Evaluation (doctoral thesis), Luleå University of Technology, Sweden, 2002.
- Herič, J., Poročilo o izvedbi raziskovalne vrtnice PVK-1/17, Škofja Loka, Minervo d. d., 2017.
- Kaltschmitt, M., Huenges, E., Wolff, H., Baumgärtner, J., Hoth, P., Kayser, M., Sanner, B., Schallenberg, K., Jung, R., Scheytt, T., Lux, R., Energie aus Erdwärme, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1999.
- Milivojević, M. G., Praćenje promena klime na osnovu geotermalnih ispitivanja u bušotinama, Climatic change history based on geothermal down-hole measurements, *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, 58/2, 265–284, 1994.
- Nouvel, R., Cotrado, M., Pietruschka, D., European mapping of seasonal performances of air-source and geothermal heat pumps for residential applications, *Proceedings of CISBAT 2015 International Conference on Future Buildings and Districts*, 2015.
- Portal GeoPLASMA-CE, <https://portal.geoplasma-ce.eu/>, 2019.
- Rajver, D., Lapanje, A., Rman, N., Prestor, J., Geothermal Energy Use, Country Update for Slovenia, European Geothermal Congress, Strasbourg, 18 p., 2016.
- Rosen, M. A., Koohi-Fayegh, S., Geothermal Energy-Sustainable Heating and Cooling Using the Ground, John Wiley & Sons, 2017.
- Sass, I., Brehm, D., Coldewey, W. G., Dietrich, J., Klein, R., Kellner, T., Kirschbaum, B., Lehr, C., Marek, A., Mielke, P., Müller, L., Panteleit, B., Pohl, S., Porada, J., Schiessl, S., Wedewardt, M., Wesche, D., Shallow Geothermal Systems-Recommendations on Design, Construction, Operation and Monitoring, Wilhelm Ernst & Sohn, 2016.
- Shao, H., Hein, P., Sachse, A., Koldiz, O., Geoenergy Modeling II-Shallow Geothermal Systems, Springer, 2016.
- VDI-Standard: VDI 4640 Blatt 1 Berichtigung, Thermal use of the underground-Fundamentals, approvals, environmental aspect.