



Primeri ocene temperatur na površini trdnih tal pri projektiranju zajetij plitve geotermalne energije

Examples of the assessment of temperatures on the surface of solid ground in the design of the shallow geothermal energy extractions

Dušan RAJVER, Simona PESTOTNIK & Joerg PRESTOR

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija;
e-mails: dusan.rajver@geo-zs.si, simona.pestotnik@geo-zs.si, joerg.prestor@geo-zs.si

Prejeto / Received 22. 5. 2018; Sprejeto / Accepted 2. 7. 2019; Objavljeno na spletu / Published online 31. 7. 2019

Ključne besede: plitva geotermalna energija, toplotne črpalke, temperatura površja trdnih tal, temperatura zraka, termogrami, geosonde, Slovenija

Key words: shallow geothermal energy, heat pumps, ground surface temperature, air temperature, thermograms, borehole heat exchangers, Slovenia

Izveček

Na dimenzioniranje zajetij plitve geotermalne energije z zaprtimi sistemi zemlja-voda imajo največji vpliv toplotna prevodnost kamnin in zemljin ter srednja letna temperatura tal. Predstavljen je postopek določanja temperature tal na štiri načine glede na razpoložljive podatke na določeni lokaciji: 1) imamo podatek o srednji letni temperaturi zraka, 2) imamo samo podatek o nadmorski višini kraja, 3) v bližini je meteorološka postaja z meritvami temperature tal, in 4) v bližini je vrtina s termogramom. Uporabo teh štirih načinov in razlike med njimi ponazarjamo s petimi primeri v različnih predelih Slovenije (Cerkno, Lucija, Brnik, Babno Polje in Maribor). Pokazalo se je, da je temperatura tal merjena na meteoroloških postajah v povprečju višja od temperature, izračunane iz termogramov vrtin. Temperaturo tal lahko dobro ocenimo z regresijsko premico med nadmorsko višino in izmerjenimi temperaturami tal na meteoroloških postajah le za celinski del. V primorskem delu Slovenije taka ocena ni bila izvedljiva, ker sta na voljo samo dve postaji z meritvami temperature tal. Vrtin s termogrami je bistveno več, kar 458, kot meteoroloških postaj z meritvami temperature tal (le 9). Zaradi tega je uporaba termogramov vrtin smiselna. Poleg tega nam termogrami vrtin omogočajo izračun gostote toplotnega toka, ki ga prav tako potrebujemo pri dimenzioniranju zajetij geotermalne energije. Za bolj primerljivo oceno temperatur tal iz termogramov bi morali imeti na voljo več termogramov iz novejšega obdobja 1981-2010, kajti to obdobje že vsebuje vpliv globalnega segrevanja ozračja. Ker temu ni bilo tako, smo dobili pri vseh lokacijah po načinu izračuna iz termograma najnižje vrednosti. Po drugi strani v večini vrtin manjka temperaturni zapis v zgornjih 20 metrih, zato smo v pravilni ekstrapolaciji T-z profila iz globljega odseka profila zajeli večinoma odseke med 20 in 100 m globine. S tem smo zajeli tak potek T-z profila, ki še nosi v sebi spomin običajno malo nižjih temperatur na površju v preteklosti.

Abstract

The thermal conductivity of rocks and soils and the mean annual temperature of the ground have the biggest impact on the dimensioning of the extraction of geothermal energy with closed ground-water systems. The method of determining the ground temperature is presented in four ways according to the available data at a given location: 1) we have data on the mean annual air temperature, 2) we only have information about the altitude of the place, 3) nearby is a meteorological station with soil (ground) temperature measurements, and 4) a borehole with a thermogram is in the vicinity. The use of these four methods and the differences between them are illustrated by five examples in different parts of Slovenia (Cerkno, Lucija, Brnik, Babno Polje and Maribor). It has been shown that the ground temperature measured at meteorological stations is on average higher than the temperature calculated from the borehole thermograms. The ground temperature can be well estimated with a regression line between the altitude and the measured ground temperatures at meteorological stations only for the continental part. In the coastal part of Slovenia, such an assessment was not feasible, as only two stations with ground temperature measurements are available. There are significantly more boreholes with thermograms (as much as 458) than meteorological stations with measurements of ground temperature (only 9). For this reason, the use of borehole thermograms makes sense. In addition, the borehole thermograms allow us to calculate the heat-flow density, which is also needed in the dimensioning of geothermal energy extractions. For more

comparable assessment of the ground temperature from the thermograms, several thermograms from the recent period 1981-2010 should be available, because this period already contains the effect of global warming of the atmosphere. Since this was not the case, we obtained at all locations according to the method of calculation the lowest value from the thermograms. On the other hand, in most boreholes, the temperature record in the upper 20 m is missing, so in the correct extrapolation of the T-z profile from the deeper section of the profile, we mainly covered sections between 20 and 100 m depth. With this we captured such a course of the T-z profile, which still contains in itself a memory of usually slightly lower temperatures on the surface in the past.

Uvod

Geotermalne toplotne črpalke (angl. ground-source (geothermal) heat pumps, GSHP) kot visoko učinkovita tehnologija obnovljivih virov energije (OVE) omogočajo ogrevanje in hlajenje prostorov, pripravo sanitarne tople vode in shranjevanje energije (npr. Curtis et al., 2005; Omer, 2008; REGEOCITIES; Sarbu & Sebarchievici, 2014). Toplotne črpalke nudijo energetsko učinkovit in trajnostni način za ogrevanje in hlajenje v mnogih rabah, saj uporabljajo OVE iz zemlje, podzemne in površinske vode ter zraka v naši okolici. Pri tem izkoriščajo toploto shranjeno tik pod zemeljskim površjem, tj. že od globine 0,8 m pod površjem in globlje. Plitvi geotermalni sistemi za ogrevanje in hlajenje so sistemi za prenos zemljine toplote iz ali v tla v izvedbi z ali brez geotermalnih toplotnih črpalk (GTČ). Največje prednosti sistemov s plitvo geotermalno energijo so, da imamo isti vir za ogrevanje in hlajenje, ter dostopnost vse dni v letu in zelo nizek okoljski odtis te energije (Prestor et al. 2016), po katerih se tudi razlikuje od drugih virov obnovljive energije.

Pri načrtovanju sistema z GTČ je pomembno čim natančneje določiti toplotne lastnosti plitvega podzemlja (toplotne prevodnosti in difuzivnosti zemljin in kamnin), na katere večinoma vplivata geološka sestava (litologija) in prisotnost podzemne vode. S tem se bistveno poveča učinkovitost in zmanjšajo stroški naprave. Poleg tega je pri načrtovanju potrebno upoštevati dejavnike, kot so temperatura tal, temperature do globin 200 m, gladina podzemne vode in njen pretok ter lastnosti vodonosnika, trajanje sončnega obsevanja, ki je odvisno tudi od topografije, ter še zemeljski toplotni tok in padavine (Busby et al., 2009; Grunert et al., 2010).

Izkoriščanje Zemljinega toplotnega toka predstavlja neizčrpen, povsod prisoten in stalen vir energije za ogrevanje in hlajenje. Zemljin toplotni tok je odraz geotermalnega polja. Geotermalno polje pa je posledica njenih notranjih in zunanjih virov toplote, kar se odraža v toplotnem polju in temperaturnem polju.

Geosolarni toplotni tok je s strani Zemlje absorbiran del solarnega oz. Sončevega toplotnega sevanja, ki dospe do Zemljine površine (npr. Mi-

livojević, 1994; Banks, 2008). Jakost energije tega sevanja znaša v povprečju 628 W/m^2 , to je približno 45,7 % vsega sončnega obsevanja, ki prihaja do vrha Zemljine atmosfere v iznosu 1373 W/m^2 (sončna konstanta), ko je Zemlja na razdalji ene astronomske enote od Sonca (Clauser, 2006).

Sončno sevanje predira zemeljsko površje in povzroča temperaturne spremembe v plitvem podzemlju. Globina prenosa sončne energije je odvisna od lokalnega podnebja (npr. sončnega sevanja, sprememb temperature okolice, vetra, padavin) in specifičnih dejavnikov za posamezno lokacijo, kot so lokalna topografija, površinski pokrov in usmerjenost glede na Sonce (npr. proti jugu na severni polobli). Povprečni zemeljski toplotni tok na celinah z $0,071 \text{ W/m}^2$ (Davies & Davies, 2010) pa je 8850-krat manjši od sončnega sevanja.

Glavni notranji vir Zemljinega toplotnega toka je toplota razpada radioaktivnih izotopov U, Th, ^{40}K (≈ 62 % celotne toplote v Zemlji). Ostali notranji viri (38 %) so precej manjši: prvotna toplota med nastajanjem planeta (≈ 17 %), gravitacijsko ločevanje jedra od plašča, tonjenje železa v jedro, sproščena potencialna energija med tvorjenjem nove skorje, tektonski procesi (toplota trenja iz elastične energije sproščene v potresih), metamorfni in diagenetski procesi, plimovanje in kemične reakcije (Clauser, 2006).

Temperatura tal je funkcija prenosa toplote s pomočjo sevanja, konvekcije in prevajanja v tleh in kamninah (Kurevija et al., 2011; Seward & Prieto, 2015). Na splošno lahko razlikujemo tri temperaturne cone (npr. Popiel et al., 2001): (1) površinsko (solarno) cono, kjer je temperatura tal občutljiva na dnevne spremembe (vrhnji 0,5 do 1 m), (2) plitvo območje, kjer so tla (oz. plitvo podzemlje) občutljiva na sezonske vremenske spremembe (do približno 10 m) in (3) globoko cono, kjer je temperatura v plitvem podzemlju skoraj stalna skozi vse leto (globlje od približno 10 m). Obe zgornji coni lahko imenujemo tudi cono letnih sprememb temperature ali geosolarno termocono. Ugotovili smo ju tudi na opazovalnici pri Kostanjevici na Krki (Strgar et al., 2017). Globoko cono, katere vrh nekateri znanstveniki postavljajo tudi malo globlje (pri 14 do 15 m, odvisno od toplotne difuzivnosti

plitvega podzemlja), pa imenujemo zemeljsko (terestrično) ali geotermocono (Milivojević, 1994; Busby et al., 2009). Vrh te cone označuje nemotena temperatura plitvega podzemlja, za katero lahko rečemo, da se nahaja v globini, kjer se amplituda letne temperature zniža na samo 0,1 °C (Kurevića et al., 2011, 2014). Letne spremembe temperature sicer prodrejo približno 19-krat globlje kot dnevne (znano kot razmerje kožnih globin, angl. skin depth ratio, npr. Gosar & Ravnik, 2007), to je do globine približno 20 m. Amplituda dnevnih in sezonskih temperaturnih sprememb v plitvem podzemlju se z globino zmanjšuje, spremlja pa jo fazni premik, ki se veča z globino (Bodri & Čermák, 2007; Seward & Prieto, 2015; Rajver et al., 2006; Strgar et al., 2017).

Nadalje je specifični odvzem toplote (angl. specific heat extraction) odvisen od trajanja odvzema (letne ure delovanja), premera vrtine in lege oz. postavitve cevi v geosondi ter v primeru več geosond od medsebojnih vplivov le-teh (npr. Busby et al., 2009; Banks, 2008). Napake v dimenzioniranju zaprtih sistemov zemlja-voda se lahko odrazijo v poddimenzioniranih ali predimenzioniranih sistemih (Grunert et al., 2010).

Pri načrtovanju geosonde je potrebno poznavanje dveh najvažnejših parametrov, to sta toplotna prevodnost kamnin in zemljin v globinskem dosegu geosonde ter temperatura tal na lokaciji izvedbe. Ta dva parametra najbolj vplivata na dimenzioniranje zaprtih sistemov zemlja-voda in na vrednotenje nizko-temperaturnih virov, ki jih ti sistemi uporabljajo (Signorelli & Kohl, 2004; Eugster et al., 2010). Druga dva pomembna parametra pa sta prostorninska toplotna zmogljivost in gostota geoloških plasti, ki vplivata na njihovo toplotno difuzivnost (Prestor et al., 2016, 2018, str. 27; Eugster et al., 2010). Glede temperature tal smo menili, da je smiselno preveriti, kako lahko ocenimo temperaturo tal za poljubno lokacijo z uporabo podatkov iz termogramov vrtin. To je tudi glavni cilj članka. Termogramov vrtin je namreč razmeroma veliko glede na postaje z merjeno temperaturo zraka, še zlasti pa glede na postaje z merjenimi temperaturami tal.

Metodologija

V projektu GRETA smo pri kartiranju v lokalnem merilu potrebovali podatke o temperaturah tal celotne občine Cerkno za določitev potenciala plitve geotermalne energije (Casasso et al., 2017, 2018). Ker se naprej opisana metodologija v Sloveniji do sedaj še ni izvajala, smo v letih 2016–2017 za boljše načrtovanje zaprtih sistemov izdelali grafe temperatur na površini trdnih tal po algoritmu

iz švicarskega standarda SIA 546 384/6 (Eugster et al., 2010). Izvedli smo kalibracijo rezultatov z rezultati dejanskih meritev temperatur v vrtinah, ki je zajela: sortiranje (izločitev neustreznih meritev) z ocenjevanjem reprezentativnosti, določanje anomalij, porazdelitev ugotovljenih površinskih temperatur iz temperaturnih profilov iz vrtin na značilne za primorsko in celinsko podnebje Slovenije, informacije, kdaj so bile meritve opravljene, zanesljivost podatka in upoštevanje lege vrtine. V članku je ta, redkokdaj uporabljena metodologija po švicarskem standardu (sploh pa prvič na slovenskem primeru), za določanje temperature na površini trdnih tal podrobneje opisana, vključno z detaljnim preverjanjem izmerjenih termogramov iz vrtin.

Temperatura površja tal

Srednja letna temperatura površja tal (»temperatura tal«) je linearno odvisna od nadmorske višine (Powell et al., 1988), kjer višinski gradient približno odgovarja atmosferskemu gradientu. Seveda pa je na splošno temperatura tal za 1 do 4 K višja od temperature zraka (Powell et al., 1988; Lewis & Wang, 1992), ki je običajno merjena na 2 m višine nad tlemi. Tolikšna razlika je posledica kombiniranega učinka snežnega izolacijskega pokrova in latentne toplote vlažnih tal, ki vzdržujeta temperaturo tal pri 0 °C tudi v daljših obdobjih zmrzovanja (Lewis & Wang, 1992; Signorelli & Kohl, 2004). Temperatura tal praktično pomeni temperaturo v globini 2 cm. Temperatura tal je odvisna tudi od izpostavljenosti površja osončenju, ki pa je samo po sebi odvisno od nagnjenosti površja in njegove usmerjenosti (Blackwell et al., 1980; Šafanda, 1999). Na severni polobli je običajno, da so proti severu usmerjena pobočja zaradi manjše osončenosti tudi za nekaj stopinj hladnejša od tistih obrnjenih proti jugu.

Druga pomembna dejavnika, ki vplivata na temperaturo tal, sta vegetacija in stanje (tekstura, preperelost ipd.) površinskih kamnin (Lewis, 1998; Lewis & Wang, 1992). Tako sta že Kappelmeier in Haenel (1974) ugotavljala v globini 1 m za okoli 1 K nižje temperature v gozdu od temperatur pod bližnjimi travniki, podobno ali malo večjo razliko temperature tal so navajali Lewis (1998) ter Nitoiu in Beltrami (2005) kot učinek krčenja gozdov.

V švicarskem standardu SIA 384/6 za Švico navajajo, da je srednja letna temperatura tal za 1,55 °C višja od srednje letne temperature zraka (enačba 1). Ta navidezna linearna odvisnost velja približno za kraje pod nadmorsko višino 1000 m.

Za višje ležeče kraje odvisnost ni več linearna, pač pa se razlika med temperaturo tal in zraka zvišuje z nadmorsko višino. Tako je na nadmorski višini 1800 m temperatura tal že za približno 4 °C višja od temperature zraka (enačba 2).

$$\theta_{g,a} = \theta_{e,a,m} + 1,55 \quad (1)$$

$$\theta_{G,s} = \theta_{e,a,m} + 1,55 + \frac{H_S - 1000}{800} \cdot 2,45 \quad (2)$$

kjer so:

- $\theta_{g,a}$ srednja letna temperatura površja tal, °C
- $\theta_{e,a,m}$ srednja letna zunanja temperatura (zraka), °C
- $\theta_{G,s}$ površinska temperatura tal (zemlje), °C
- H_S nadmorska višina kraja, m n.m.

Zaradi lokalnih negotovosti, na primer vpliva izpostavljenosti kraja, se uporablja tolerančna vrednost $dT_{\text{tolerančni}} = 1$ K, ki se odšteje za ogrevanje in doda za hlajenje. Odstopanje pri oceni temperature površja po izračunu po SIA 384/6 standardu torej znaša – 1 K za ogrevanje ter + 1 K za hlajenje (Eugster et al., 2010).

Površinska temperatura tal s tolerančno vrednostjo za *ogrevanje* je določena, ker v režimu ogrevanja odvezemo toploto iz tal in jih hladiamo. Zato je srednja letna površinska temperatura tal znižana za 1 °C in smo tako »na varni strani«, saj s tem zajamemo sipanje vrednosti (enačba 3). Na primeru slike 2 je temperatura tal z upoštevanom toleranco za ogrevanje nižje od zelene premice. Izračuna se po enačbi 3:

$$\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 \quad (3)$$

Površinska temperatura tal s tolerančno vrednostjo za *hlajenje* je določena, ker v režimu hlajenja vnašamo toploto v tla. Zato je srednja letna površinska temperatura tal povišana za 1 °C in smo tako spet »na varni strani« (enačba 4). Na primeru slike 2 je temperatura tal z upoštevanom toleranco za hlajenje nad rdečo premico. Izračuna se po enačbi 4:

$$\theta_{g,a,C} = \theta_{g,a} + 1 \quad (4)$$

Navedene enačbe temeljijo na primerjavi številnejših podatkov o temperaturi tal v Švici, ki se jih da primerjati s podatki o temperaturah zraka. Za Slovenijo razpolagamo z zelo redkimi podatki meritev temperature tal.

Vrednost za celinsko Slovenijo smo dobili kot povprečje razlik trendnih črt povprečne temperature zraka (2 m) ter povprečne temperature tal (-2 cm) med nadmorsko višino 0 m (1,3 °C) in vi-

šino vrha Triglava 2864 m (0,7 °C). Za primorsko Slovenijo tak izračun ni bil možen zaradi premajhnega števila podatkov. Ocenili smo, da je temperatura tal vsaj 1,0 °C višja od temperature zraka na dveh metrih. Za primerjavo omenimo, da smo tudi iz opazovanj v vzhodni Sloveniji (Mallence) po prvih treh letih ugotovili razliko okrog 1 °C med srednjimi letnimi temperaturami tal in zraka (Rajver et al., 2006; Šafanda et al., 2007).

Zaradi pomanjkljivih podatkov o temperaturi tal v Sloveniji smo si pomagali s korelacijo med temperaturami zraka in temperaturami tal, ocenjenimi iz termogramov vrtin.

Korelacija med temperaturami zraka in temperaturami tal, ocenjenimi iz termogramov vrtin

Najprej smo obdelali podatke izmerjenih temperatur v 458 vrtinah po vsej državi. Dodali smo tudi 9 točk v različnih krajih po državi, za katere imamo povprečja mesečnih temperatur tal v različnih globinah v obdobju 1971-2000 (Internet 1). Tako smo preverili izmerjene termograme (T-z profile) iz vrtin za določitev temperatur na površini trdnih tal. Upoštevali smo podatek za leto zadnje ali najboljše (ko je bila vrtina toplotno stabilizirana z okoliškimi kamninami) meritve temperature v vrtini. Nato smo iz teh podatkov izračunali regresijsko premico odvisnosti temperature na globini nič od nadmorske višine ustja vrtine (Rajver et al., 2018 – metapodatek za sloj ABC) in sicer posebej za primorski in posebej za celinski del Slovenije. Meja med celinskim in primorskim delom je ista, kot velja za meteorološke postaje (Ogrin & Plut, 2009) in je opredeljena na sliki 3. Območje primorske Slovenije je prostorsko tisto, kjer vlada zmerno sredozemsko podnebje (oranžna barva za obalno in rumena za zaledno podnebje).

Določili smo kakovost interpretacije, in sicer : A – »normalen« termogram (večinoma linearno naraščanje temperature z globino, vsaj v vrhnjih 50 do 100 metrih vrtine), B – odvisnost temperature z globino interpretirana z ekstrapolacijo, potek temperature z globino je lahko nelinearen in C - interpretacija vprašljiva in težavna (glej sliko 4). Glede na podatke o lokacijah (GKX, GKY) in nadmorski višini (z) vrtin so bile le-te razvrščene bodisi v celinsko bodisi primorsko Slovenijo. S pomočjo Atlasa okolja so bile opredeljene tudi lege obravnavanih vrtin: S - sončna lega, obrnjena pretežno proti jugu, odprti prostor ter T - temačna senčna lega, obrnjena pretežno proti severu, v gozdu ali na manjši jasi v gozdu

ipd. Na podlagi karte temperatur zraka za zadnje referenčno obdobje 1981-2010 je mag. Mojca Dolinar (Agencija RS za Okolje, osebno sporočilo) izračunala višinska gradienta letne povprečne temperature zraka na 2 m za primorsko in celinsko Slovenijo, v odvisnosti od nadmorske višine z (enačbi 5 in 6):

primorska Slovenija:

$$T_p = 13,5 \text{ } ^\circ\text{C} - 6,4 \frac{\text{K}}{\text{km}} \times z \text{ (km)} \quad (5)$$

celinska Slovenija:

$$T_c = 11,6 \text{ } ^\circ\text{C} - 4,9 \frac{\text{K}}{\text{km}} \times z \text{ (km)} \quad (6)$$

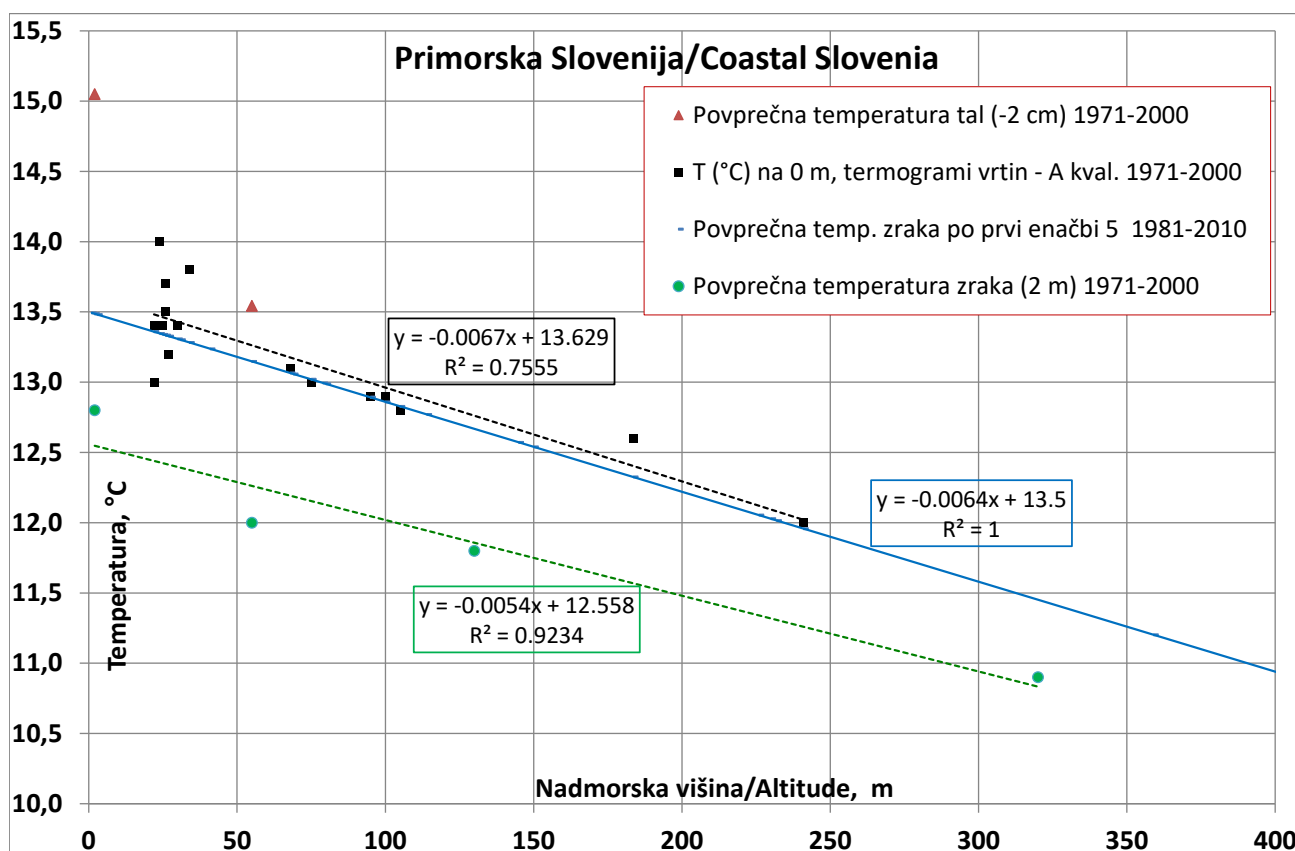
Obe enačbi višinskih gradientov smo uporabili za izračun povprečne letne temperature zraka na 2 m nad tlemi za lokacijo vsake vrtnice. Na podlagi izračunov za zadnje referenčno obdobje 1971-2000 smo izrisali grafe temperatur iz termogramov vrtin, temperatur tal v globini 2 cm, povprečne temperature zraka (iz višinskih gradientov lokacij vrtin) ter zraka na višini 2 m, vse v

odvisnosti od nadmorske višine za primorsko in celinsko Slovenijo (sl. 1 in 2).

Grafi so uporabni za projektiranje geosond. Postopek se izvaja po korakih. Podrobneje so vsi štirje načini za določitev temperature na površini tal opisani v poglavju »Štirje osnovni načini za izračun temperature (T_0) na površini trdnih tal«.

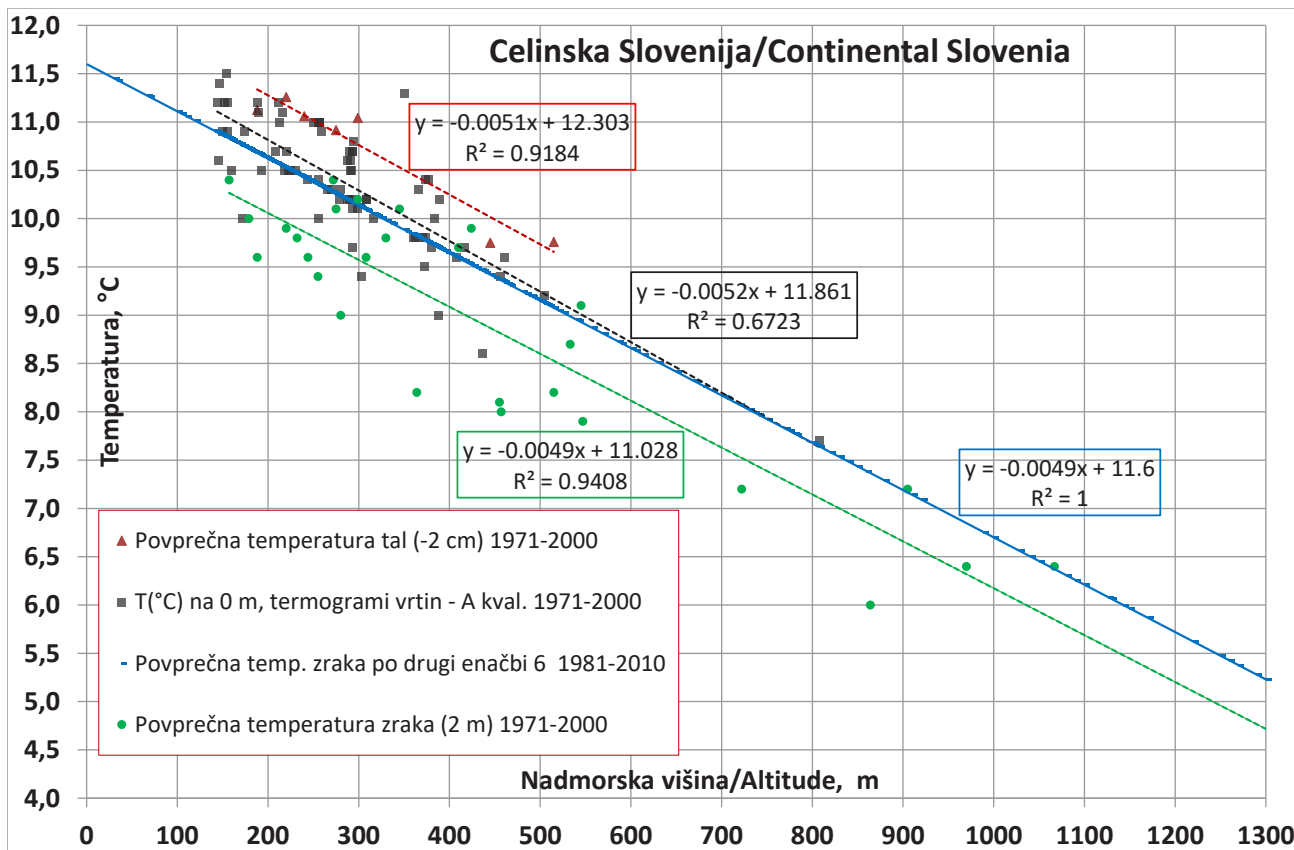
Za Slovenijo smo ugotovili, da je potrebno prišteti $dT_{\text{tla-zrak}} = 1,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ k povprečni letni temperaturi zraka, da dobimo podatek o srednji letni temperaturi tal na površju celinske Slovenije (sl. 2, tabela 1). Če primerjamo s Švico, tam velja popravek $1,55 \text{ } ^\circ\text{C}$, za katerega predvidevamo, da je posledica dejstva, da je povprečna nadmorska višina Švice višja od tiste za Slovenijo, posledično so torej srednje letne temperature zraka v Švici nižje in je večja razlika do temperature tal.

V primeru primorske lege, povprečni letni temperaturi zraka prištejemo $1,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ in v primeru celinske lege, povprečni letni temperaturi zraka prištejemo $1,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ter na ta način dobimo podatek o temperaturi tal na površju.



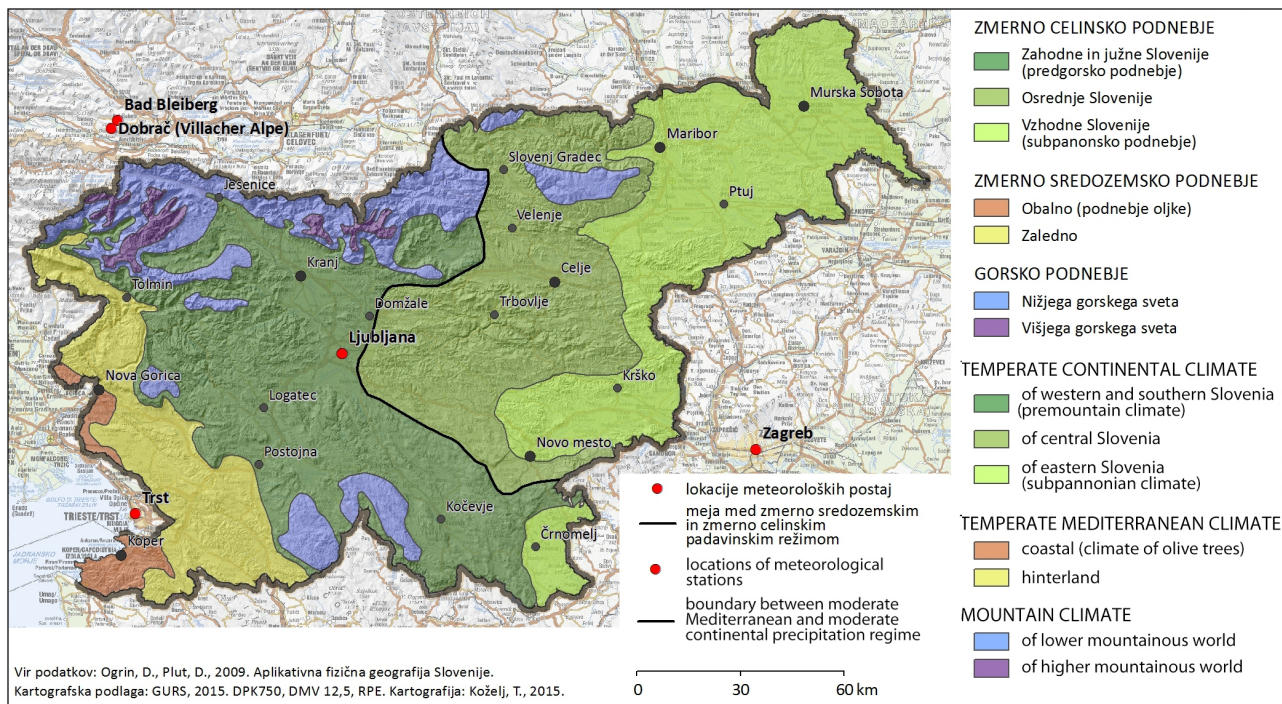
Sl. 1. Odvisnost temperatur iz termogramov vrtin, temperatur tal v globini 2 cm, povprečne temperature zraka po enačbi 5 (iz višinskih gradientov lokacij vrtin) ter zraka na višini 2 m od nadmorske višine za primorsko Slovenijo.

Fig. 1. Dependence of temperatures from borehole thermograms (squares), soil temperatures at a depth of 2 cm (triangles), mean air temperature after equation 5 (from altitude gradients of borehole locations)(quadrangles) and air at a height of 2 m (circles) from altitude for the coastal Slovenia.



Sl. 2. Odvisnost temperatur iz termogramov vrtin, temperatur tal v globini 2 cm, povprečne temperature zraka po enačbi 6 (iz višinskih gradientov lokacij vrtin) ter zraka na višini 2 m od nadmorske višine za celinsko Slovenijo.

Fig. 2. Dependence of temperatures from borehole thermograms (squares), soil temperatures at a depth of 2 cm (triangles), mean air temperature after equation 6 (from altitude gradients of borehole locations)(quadrangles) and air at a height of 2 m (circles) from altitude for the continental Slovenia.



Sl. 3. Podnebni tipi v Sloveniji (Ogrin & Plut, 2009).
Fig. 3. The climate types in Slovenia (Ogrin & Plut, 2009).

Celinska / Continental Slovenija sl. 2 / fig. 2			x: nadmorska višina/altitude, m			
	k	n	200	500	1000	1500
tla / ground:	-0,0051	12,30	11,28	9,75	7,20	4,65
zrak / air:	-0,0049	11,03	10,05	8,58	6,13	3,68
			1,23	1,17	1,07	0,97
dT tla-zrak / dT ground-air	-0,0002	1,27	1,2	1,2	1,1	1,0
Primorska / Coastal Slovenija sl. 1 / fig. 1			x: nadmorska višina/altitude, m			
	k	n	0	50	100	150
tla / ground:	-0,0092	13,69	13,69	13,23	12,77	12,31
zrak / air:	-0,0054	12,56	12,56	12,29	12,02	11,75
			1,13	0,94	0,75	0,56
dT tla-zrak / dT ground-air	-0,0038	1,13	1,1	0,9	0,8	0,6

Tabela 1. Določitev temperaturne razlike dT med premicama $kx+n$ iz slik 1 in 2.Table 1. Determination of the temperature difference dT between the lines $kx + n$ from figs. 1 and 2.

Izračuni

Splošen postopek sledi zgledu švicarskega standarda SIA 384/6 (Eugster et al., 2010) in se ga uporablja v vsakem od štirih osnovnih načinov izračuna.

V prvem koraku preverimo, kakšni so podnebni podatki za dano lokacijo. Podnebni podatki so dostopni na spletni aplikaciji pregledovalnika podnebnih podlag na spletni strani Agencije RS za okolje (Internet 2). Te podatke lahko pridobimo za poljubno lokacijo (GKX, GKY). Koordinate (GKX, GKY) in nadmorsko višino (z) pa lahko dobimo s pomočjo pregledovalnika Atlas okolja (Internet 3).

Drugi korak: če v kraju, kjer dimenzioniramo zajetje plitve geotermalne energije z geosondami, nimamo nobenih meritev temperature tal, lahko temperaturo na površini trdnih tal ocenimo na štiri osnovne, v nadaljevanju opisane načine. Pri tem izberemo med grafoma (sl. 1 in 2) glede na to ali podatek o lokaciji kaže na primorski ali celinski del Slovenije.

Tretji korak: Zaradi lokalnih negotovosti, na primer vpliva izpostavljenosti, se uporablja tolerančna vrednost $dT_{\text{tolerančni}} = 1$ K, ki se odšteje za ogrevanje in doda za hlajenje. Odstopanje pri očni temperature površja po izračunu po SIA 384/6 standardu torej znaša -1 K za ogrevanje ter $+1$ K za hlajenje (Eugster et al., 2010).

Štirje osnovni načini za izračun temperature (T_0) na površini trdnih tal

1. Imamo podatek o srednji letni temperaturi zraka

Podatek lahko dobimo iz meritev na bližnji meteorološki postaji (Internet 4) ali pa vnesemo koordinate v spletni aplikaciji pregledovalnika podnebnih podlag na spletni strani Agencije RS za okolje (Internet 2).

Dobljenemu rezultatu prištejemo vrednost za pretvorbo temperature zraka v temperaturo tal, pri tem si pomagamo z interpolacijo med nadmorskimi višinami (tabela 2).

Celinska / Continental Slovenija				
x: nadmorska višina / altitude, m	200	500	1000	1500
dT _{tla-zrak/ground-air} (°C)	1,2	1,2	1,1	1,0
Primorska / Coastal Slovenija				
x: nadmorska višina / altitude, m	0	50	100	150
dT _{tla-zrak/ground-air} (°C)	1,1	0,9	0,8	0,6

Tabela 2. Vrednosti za pretvorbo temperature zraka v temperaturo tal (poenostavljeno iz tabele 1).

Table 2. Values for converting the air temperature to the soil temperature (simplified from Table 1).

Končnemu rezultatu odštejemo vrednost $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, če dimenzioniramo zajetje pretežno za ogrevanje (enačba 3) ali prištejemo vrednost $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, če dimenzioniramo zajetje s pomembnim deležem hlajenja (enačba 4).

2. Imamo samo podatek o nadmorski višini kraja

Način je lahko uporaben v predelih, ki sploh niso pokriti s potrebnimi podatki za prvi, tretji in četrti način. Izberemo enačbo za višinski gradient letne povprečne temperature zraka za celinsko ali primorsko Slovenijo in v njo vnesemo podatek nadmorske višine. S tem načinom dobimo pričakovano povprečno temperaturo zraka na neki lokaciji iz višinskega gradienta glede na karto za zadnje referenčno obdobje za katerega veljata enačbi.

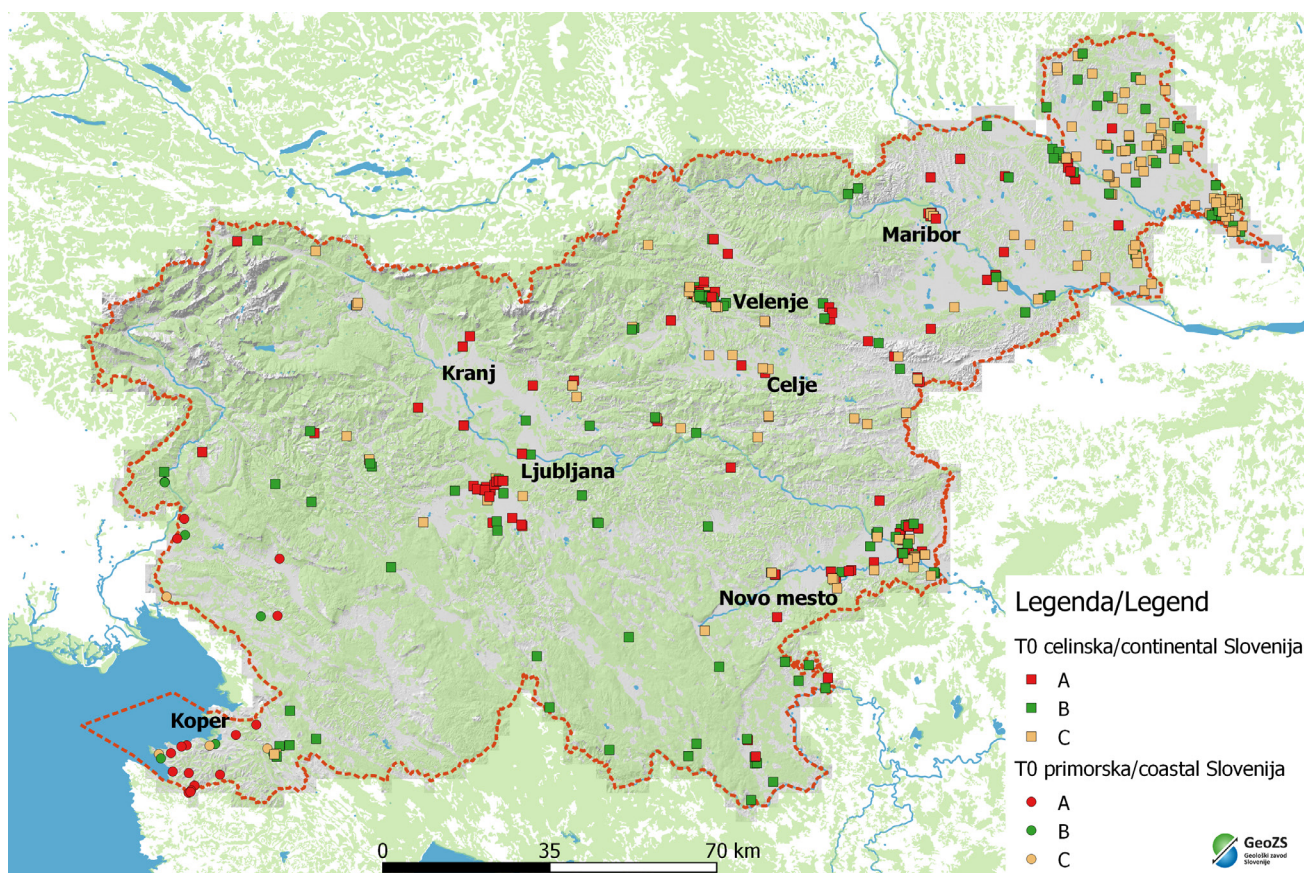
Dobljenemu rezultatu prištejemo ustrezno vrednost za pretvorbo temperature zraka v temperaturo tal (glej prejšnjo točko za prvi način).

V končnem rezultatu upoštevamo še tolerančno vrednost za ogrevanje ali hlajenje kot je navedeno v prvem načinu.

3. V bližini je merilna postaja temperature tal

Upoštevamo merjene temperature v tleh, to so podatki iz najbližje samodejne meteorološke postaje, kjer izvajajo meritve temperature tal v globinah 2, 5, 10, 20, 30, 50 in 100 cm. Ti podatki so na voljo v pregledovalniku MOP ARSO (Internet 1), v katerem najdemo povprečja mesečnih temperatur tal v različnih globinah v obdobju 1971-2000. Povprečna mesečna temperatura tal v izbrani globini je izračunana iz dnevnega povprečja terminskih meritev temperature tal ob 7., 14. in 21. uri. Povprečna mesečna temperatura tal v globini enega metra je izračunana iz dnevnih meritev ob 14. uri. Kot bomo videli iz primerov izračuna, smo se opredelili za temperature tal v globini 5 cm, ker menimo, da še dovolj dobro odražajo površinsko temperaturo tal, hkrati pa niso preveč podvržene nenadnim mehanskim dejavnostim, kot je to lahko primer s temperaturnimi tipali v globini 2 cm.

Tudi tu v končnem rezultatu upoštevamo še tolerančno vrednost za ogrevanje ali hlajenje kot je navedeno v prvem načinu.



Sl. 4. Lokacije s termogrami vrtin za določitev temperatur na površini trdnih tal v Sloveniji. Vrtine so razvrščene med celinsko in primorsko Slovenijo glede na njihovo lokacijo in nadmorsko višino. Opređeljena je kvaliteta interpretacije: A - normalen termogram temperature z globino, B - odvisnost temperature z globino interpretirana z ekstrapolacijo, potek temperature je lahko nelinearen, C - interpretacija je vprašljiva ali težavna.

Fig. 4. Locations with borehole thermograms for determination of temperatures on the surface of solid ground in Slovenia. Boreholes are classified between continental and coastal Slovenia according to their location and altitude. The quality of interpretation is defined: A - normal temperature thermogram with depth, B - dependence of temperature with depth is interpreted by extrapolation, the temperature course can be nonlinear, C - interpretation is questionable or problematic.

4. V bližini je vrtina z izračunano temperaturo tal iz geotermičnih meritev

Upoštevamo temperaturo tal, ki je bila določena iz termograma bližnje vrtine (izmerjeni T-z profil v vrtini). Uporabimo podatkovni GIS sloj z lokacijami geotermalnih vrtin in preverimo ali je najbližji podatek reprezentativen za izbrano mesto. Iz najbližje vrtine, s primerno izmerjenim profilom temperature z globino, določimo temperaturo T_0 , če je potrebno tudi z ekstrapolacijo proti površju. Primerno izmerjen termogram je tisti, ki je opravljen v vrtini po daljšem času toplotne stabilizacije vrtine, tj. dalj časa po končanem vrtanju, po črpalnih preskusih, ipd. Izbere mo torej ekstrapolirano temperaturo iz najbližje vrtine ali pa npr. naredimo interpolacijo med dvema vrtinama. Prostorski podatki bodo dostopni preko spletnega portala eGeologija v WMS storitvi.

V dobljenem rezultatu upoštevamo še tolerančno vrednost za ogrevanje ali hlajenje kot je navedeno v prvem načinu.

Slika 4 prikazuje lokacije vrtin s termogrami, ki so uporabni za določitev temperatur na površini trdnih tal. Lokacije označene s kvadrati so v celinskem delu, tiste v primorskem delu pa s krogi. Barve oziroma oznake A, B in C označujejo kvaliteto interpretirane temperature na površini tal iz izmerjenega termograma posamezne vrtine.

Rezultati

Primeri izračuna temperature na površini trdnih tal za izbrane lokacije

V nadaljevanju predstavljamo pet različnih lokacij v Sloveniji s primeri izračuna temperature na površini trdnih tal po vseh štirih omenjenih načinih, če so seveda merodajni za vsako izbrano lokacijo. Izbrali smo takšne lokacije, ki predstavljajo različne regije in s tem geološke ter podnebne pogoje v Sloveniji. Podrobneje opisujemo postopke le za prvi primer v Cerknem.

Izbrana lokacija za postavitev geosonde je na območju **občine Cerkno, v Cerknem pri stavbi Centra šolskih in občinskih dejavnosti**, s koordinatama: GKY: 422039, GKX: 109742 in nadmorsko višino: 319,2 m.

Zajetje z geosondo bo namenjeno pretežno ogrevanju in le zelo malo tudi hlajenju. Poglejmo si vse štiri možne načine:

a) *izračun temperature iz meteorološke postaje (ki je najbližje lokaciji)*

Na spletni aplikaciji pregledovalnika podnebnih podlag na spletni strani Agencije RS za okolje (Internet 2) z vnosom koordinat dobimo na desni strani dolge preglednice **podatek o povprečni letni temperaturi (zraka)** in lokaciji:

$\Theta_{e,a,m} = 9,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ srednja letna zunanja temperatura (zraka)

V primeru naselja Cerkno imamo celinsko lego, zato povprečni letni temperaturi zraka prištejemo $1,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (glej tabelo 2) ter na ta način dobimo podatek o **temperaturi tal na površju**:

$$\Theta_{g,a} = \Theta_{e,a,m} + 1,2 = 10,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Površinska temperatura tal, s tolerančno vrednostjo za ogrevanje:

$$\Theta_{g,a,H} = \Theta_{g,a} - 1 = 9,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

b) *izračun temperature iz nadmorske višine*

Izberemo enačbo 6 za višinski gradient letne povprečne temperature zraka za celinsko Slovenijo:

$$11,6 \text{ } ^\circ\text{C} - 4,9 \text{ K/km} \cdot z \text{ (v km)}$$

in v njo vnesemo podatek nadmorske višine z (v km), v tem primeru $0,3192 \text{ km}$. Dobimo:

$$11,6 \text{ } ^\circ\text{C} - 4,9 \text{ K/km} \cdot 0,3192 \text{ km} = 10,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

S tem načinom dobimo pričakovano povprečno temperaturo zraka na lokaciji glede na karto za zadnje referenčno obdobje 1981 – 2010.

V primeru celinske lege povprečni letni temperaturi zraka prištejemo $1,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (glede na nadmorsko višino lokacije (tabela 2)) ter na ta način dobimo podatek o temperaturi tal na površju:

$$\Theta_{g,a} = \Theta_{e,a,m} + 1,2 = 11,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Površinska temperatura tal s tolerančno vrednostjo za ogrevanje je potem:

$$\Theta_{g,a,H} = \Theta_{g,a} - 1 = 11,2 - 1,0 = 10,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

c) *izračun, ki je uporaben le v primeru, če so v bližini primerne meteorološke postaje, kjer so merili temperaturo tal*

Temperaturo tal v globini 5 cm poiščemo v pregledovalniku (Internet 1).

Če naša lokacija ni blizu nobeni od navedenih postaj, ta način ni uporaben, in takšen je slučaj z lokacijo Cerkno.

Tabela 3. Primeri izračuna temperature na površini trdnih tal za pet izbranih lokacij.
Table 3. Examples of temperature calculation on the surface of solid earth for five selected locations.

1. Lokacija		
Cerkno, pri stavbi ČŠOD		
GKX: 109742 GKY: 422039 Z=319,2 m		
Predvideno zajetje plitve geotermalne energije z geosondo bo namenjeno predvsem ogrevanju in le zelo malo tudi hlajenju.		
Način	1. korak	3. korak
	povprečna letna temperatura zraka	temperatura površja tal (TPT) tolerancijska vrednost za ogrevanje
1) Izračun temperature iz meteorološke postaje (ki je najbližje lokaciji) - spletna stran ARSO: http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/pravilnik-ucinkoviti-rabi-energije/		
	$\theta_{e,a,m} = 9,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 = 10,7 - 1 = 9,7 \text{ } ^\circ\text{C}$
2) Enačba za višinski gradient letne povprečne temperature zraka za celinsko Slovenijo (v tem primeru): $11,6 \text{ } ^\circ\text{C} - 4,9 \text{ K/km} \cdot z \text{ (v km)}$ $11,6 \text{ } ^\circ\text{C} - 4,9 \text{ K/km} \cdot 0,3192 \text{ km} = 10,0 \text{ } ^\circ\text{C}$		$\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 = 11,2 - 1 = 10,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
3) V bližini je meteorološka postaja, kjer merijo temperaturo tal (iščemo temp. tal v globini 5 cm) - spletna stran ARSO: http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/period/soiltemp/		
4) Primerno izmerjen T-z profil (termogram) iz najbližje vrtnice: iz termograma vrtnice Ce-1/94 (Cerkno, Na Rajdi):		$\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 = 10,0 - 1 = 9,0 \text{ } ^\circ\text{C}$
2. Lokacija		
Lucija pri Portorožu, pri vrtcu Morje Lucija		
GKX: 041043 GKY: 391551 Z=2 m		
Predvideno zajetje plitve geotermalne energije z geosondami bo namenjeno ogrevanju, morda pa še bolj hlajenju.		
Način	1. korak	3. korak
	povprečna letna temperatura zraka	temperatura površja tal (TPT) tolerancijska vrednost za hlajenje
1) Izračun temperature iz meteorološke postaje (ki je najbližje lokaciji) - spletna stran ARSO: http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/pravilnik-ucinkoviti-rabi-energije/		
	$\theta_{e,a,m} = 13,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\theta_{g,a,C} = \theta_{g,a} + 1 = 14,6 + 1 = 15,6 \text{ } ^\circ\text{C}$
2) Enačba za višinski gradient letne povprečne temperature zraka za primorsko Slovenijo (v tem primeru): $13,5 \text{ } ^\circ\text{C} - 6,4 \text{ K/km} \cdot z \text{ (v km)}$ $13,5 \text{ } ^\circ\text{C} - 6,4 \text{ K/km} \cdot 0,002 \text{ km} = 13,5 \text{ } ^\circ\text{C}$		$\theta_{g,a,C} = \theta_{g,a} + 1 = 14,6 + 1 = 15,6 \text{ } ^\circ\text{C}$
3) V bližini je meteorološka postaja, kjer merijo temperaturo tal (iščemo temp. tal v globini 5 cm) - spletna stran ARSO: http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/period/soiltemp/		
4) Primerno izmerjen T-z profil (termogram) iz najbližje vrtnice: - na voljo imamo dva termograma: (a) iz termograma vrtnice Lu-1/94 (Lucija); (b) iz termograma vrtnice LIV-1/01 (Izola):		$\theta_{g,a,C} = \theta_{g,a} + 1 = 14,7 + 1 = 15,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ odločimo se npr. za primer (a): $\theta_{g,a,C} = \theta_{g,a} + 1 = 13,5 + 1 = 14,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

3. Lokacija

Predviden sistem zajetja plitve geotermalne energije z geosondo bo namenjen pretežno ogrevanju in bolj malo tudi hlajenju.			
Zgornji Brnik, Letališče J. Pučnika Ljubljana GKX: 120709 GKY: 458131 Z=382,4			
1. korak	2. korak	3. korak	
povprečna letna temperatura zraka	povprečna temperatura površja tal celinska lega (tab. 2)	temperatura površja tal (TPT) tolerančna vrednost za ogrevanje	
1) Izračun temperature iz meteorološke postaje (ki je najbližje lokaciji) - spletna stran ARSO: http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/pravilnik-ucinkoviti-rabi-energije/	$\theta_{g,a} = \theta_{e,a,m} + 1,2 = 10,6 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 = 10,6 - 1 = 9,6 \text{ } ^\circ\text{C}$	
2) Enačba za višinski gradient letne povprečne temperature zraka za celinsko Slovenijo (v tem primeru): $11,6 \text{ } ^\circ\text{C} - 4,9 \text{ K/km} \cdot z \text{ (v km)}$ $11,6 \text{ } ^\circ\text{C} - 4,9 \text{ K/km} \cdot 0,3824 \text{ km} = 9,7 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\theta_{g,a} = \theta_{e,a,m} + 1,2 = 10,9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 = 10,9 - 1 = 9,9 \text{ } ^\circ\text{C}$	
3) V bližini je meteorološka postaja, kjer merijo temperaturo tal (iščemo temp. tal v globini 5 cm) - spletna stran ARSO: http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/period/soiltemp/	naša lokacija v Zg. Brniku je neke vmes med postajama Lesce in Ljubljana; privzamemo srednjo letno vrednost obeh postaj: $\theta_{g,a} = 10,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 = 10,5 - 1 = 9,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	
4) Primerno izmerjen T-z profil (termogram) iz najbližje vrtnice: iz termograma vrtnice BR-1/86 (Brdo pri Kranju):	povprečna temperatura površja tal $T_0 = 9,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ (A kvaliteta interpret.)	$\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 = 9,3 - 1 = 8,3 \text{ } ^\circ\text{C}$	

4. Lokacija

Predviden sistem zajetja plitve geotermalne energije z geosondo bo namenjen pretežno ogrevanju in le zelo malo tudi hlajenju.			
Babno Polje, pri Župnijski cerkvi Sv. Nikolaja GKX: 055825 GKY: 465233 Z=754,8 m			
1. korak	2. korak	3. korak	
povprečna letna temperatura zraka	povprečna temperatura površja tal celinska lega (tab. 2)	temperatura površja tal (TPT) tolerančna vrednost za ogrevanje	
1) Izračun temperature iz meteorološke postaje (ki je najbližje lokaciji) - spletna stran ARSO: http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/pravilnik-ucinkoviti-rabi-energije/	$\theta_{g,a} = \theta_{e,a,m} + 1,1 = 8,1 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 = 8,1 - 1 = 7,1 \text{ } ^\circ\text{C}$	
2) Enačba za višinski gradient letne povprečne temperature zraka za celinsko Slovenijo (v tem primeru): $11,6 \text{ } ^\circ\text{C} - 4,9 \text{ K/km} \cdot z \text{ (v km)}$ $11,6 \text{ } ^\circ\text{C} - 4,9 \text{ K/km} \cdot 0,7548 \text{ km} = 7,9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\theta_{g,a} = \theta_{e,a,m} + 1,1 = 9,0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 = 9,0 - 1 = 8,0 \text{ } ^\circ\text{C}$	
3) V bližini je meteorološka postaja, kjer merijo temperaturo tal (iščemo temp. tal v globini 5 cm) - spletna stran ARSO: http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/period/soiltemp/	naša lokacija na Babnem Polju ni blizu nobeni od navedenih postaj.		
4) Primerno izmerjen T-z profil (termogram) iz najbližje vrtnice: iz termograma vrtnice SK-1/98 (Stari Kot pri Čabru):	povprečna temperatura površja tal $T_0 = 7,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ (B kvaliteta interpret.)	$\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 = 7,9 - 1 = 6,9 \text{ } ^\circ\text{C}$	

5. Lokacija

Maribor - Brezje, na vzhodnem robu Stražunskega gozda GKX: 154860 GKY: 552805 Z=256 m		Predviden sistem zajetja plitve geotermalne energije z geosondo bo namenjen pretežno ogrevanju, nekoliko pa tudi hlajenju.		
Način		1. korak	2. korak	3. korak
1) Izračun temperature iz meteorološke postaje (ki je najbližje lokaciji) - spletna stran ARSO: http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/pravilnik-ucinkoviti-rabi-energije/		povprečna letna temperatura zraka $\theta_{e,a,m} = 9,9 \text{ } ^\circ\text{C}$	povprečna temperatura površja tal celinska lega (tab. 2) $\theta_{g,d} = \theta_{e,a,m} + 1,2 = 11,1 \text{ } ^\circ\text{C}$	temperatura površja tal (TPT) tolerančna vrednost za ogrevanje $\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 = 11,1 - 1 = 10,1 \text{ } ^\circ\text{C}$
2) Enačba za višinski gradient letne povprečne temperature zraka za celinsko Slovenijo (v tem primeru): $11,6 \text{ } ^\circ\text{C} - 4,9 \text{ K/km} \cdot z \text{ (v km)}$ $11,6 \text{ } ^\circ\text{C} - 4,9 \text{ K/km} \cdot 0,256 \text{ km} = 10,3 \text{ } ^\circ\text{C}$		$\theta_{g,d} = \theta_{e,a,m} + 1,2 = 11,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ naša lokacija v Mariboru-Brezje je dokaj blizu meteorološki postaji Maribor; za letno povprečje dobimo: $\theta_{g,d} = 10,96 = 11,0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 = 11,5 - 1 = 10,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 = 11,0 - 1 = 10,0 \text{ } ^\circ\text{C}$
3) V bližini je meteorološka postaja, kjer merijo temperaturo tal (iščemo temp. tal v globini 5 cm) - spletna stran ARSO: http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/period/soiltemp/		povprečna temperatura površja tal $T_0 = 10,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ (A kvaliteta interpret.)	$\theta_{g,a,H} = \theta_{g,a} - 1 = 10,4 - 1 = 9,4 \text{ } ^\circ\text{C}$	
4) Primerno izmerjen T-z profil (termogram) iz najbližje vrtnice iz termograma vrtnice MB-I/90 (Maribor - Stražun):				

The calculation mode:

- 1) calculation of temperature from the meteorological station (closest to the location) - ARSO website,
- 2) the equation for the height gradient of the annual mean air temperature, for continental or coastal Slovenia,
- 3) nearby is a meteorological station measuring the soil temperature (we are looking for a temperature at 5 cm depth) - ARSO website.
- 4) properly measured T-z profile from the nearest borehole.

d) izračun iz najbližje vrtine, s primerno izmerjenim termogramom (T-z profilom), določimo temperaturo T_0 , če je potrebno tudi z interpolacijo.

V primeru izbrane lokacije Centra za šolske in občinske dejavnosti (CŠOD) upoštevamo zanesljivost in kvalitetne meritve temperature v vrtinah, torej v tem primeru na termogramu iz vrtine Ce-1/94 (Cerkno - Na Rajdi) razberemo: $T_0 = 10 \text{ °C}$ (A kvaliteta interpretacije).

Površinska temperatura tal s tolerančno vrednostjo za ogrevanje je potem:

$$\Theta_{g,a,H} = \Theta_{g,a} - 1 = 10,0 - 1,0 = 9,0 \text{ °C}$$

Za to prvo lokacijo, kakor tudi za naslednje štiri v krajih Lucija pri Portorožu, Zgornji Brnik (Letališče Jožeta Pučnika Ljubljana), Babno Polje in Maribor-Brezje predstavljamo vhodne podatke, postopke izračunov in rezultate v tabeli 3.

Kot primer uporabljenega tretjega načina prikazujemo rezultat za Lucijo pri Portorožu (glej tudi tabelo 3). Zanj se temperatura tal v globini 5 cm najde v pregledovalniku (Internet 1), saj se meri na glavnih agrometeoroloških postajah v Sloveniji. V primeru lokacije vrtec Morje Lucija v Luciji izberemo najbližjo ali najbolj primerljivo agrometeorološko postajo Portorož – letališče z mesečnimi povprečji (tabela 4). Za letno povprečje v obdobju 1971-2000 dobimo $14,7 \text{ °C}$.

Pridobljene vrednosti smo pregledno strnili v tabeli 5 in komentirali v diskusiji.

Diskusija

Kriteriji izbire ustreznega načina izračuna

Med štirimi načini izračuna temperature na površini trdnih tal izberemo najbolj ustreznega (obrazloženo v nadaljevanju), lahko seveda tudi več načinov, in sicer glede na vse znane razmere. Četrty način z uporabo ekstrapolacije temperature iz izmerjenega termograma v vrtini proti površini je obremenjen predvsem s tem, da so marsikje meritve temperatur v vrtinah starejše od 10, 20 ali celo 30 let, tako da lahko starejše meritve že doprinesejo k odstopanju od rezultatov po prvih treh načinih.

Globalno segrevanje v 20. stoletju je povzročilo dvig povprečnih temperatur zraka globalno za $1,0 \text{ °C}$ do leta 2000, relativno na referenčno obdobje 1961-1990 (Bodri & Čermák, 2007; Internet 5). Poleg tega je potrebno dobro poznati mikrolokacijo vrtine (Signorelli & Kohl, 2004), tj. ali leži ustje vrtine na odprtem prostoru, ima sončno lego, je na pobočju, nagnjenem proti jugu (soncu) ali pa ima senčno lego, se nahaja na jasi sredi gozda, na pobočju, nagnjenem proti severu, ipd. Za tretji način je potrebno vedeti, da temelji na povprečju mesečnih temperatur tal v eni od sedmih različnih globlin v obdobju 1971-2000, kar pomeni, da se v teh povprečjih ne odraža segrevanje podnebja v zadnjih 18 letih. Podobno velja tudi za prvi način, za katerega smo prav tako upoštevali obdobje 1971-2000. Edino v drugem načinu je za višinska gradienta upoštevano novejšo obdobje 1981-2010. Vse to se je računsko odrazilo v razlikah.

Rezultate po vseh štirih načinih za izbranih pet lokacij lahko povzamemo v naslednji Tabeli 5, oceno ustreznosti izbranega načina izračuna pa v tabeli 6. Kriterija za najprimernejšo (referenčno) metodo pravzaprav ni. Najbolj smo uporabljali zanesljivost podatka, sicer pa sta verjetno prvi in drugi način bolj merodajna.

Za lokacijo 1) CŠOD, Cerkno sta očitno najbolj primerna prvi in drugi način. Rezultat po četrtem načinu je tudi v redu, vendar morda nanj nekoliko vpliva položaj vrtine (nekoliko izven naselja) sicer kvalitetno izmerjenim temperaturnim profilom.

Za lokacijo 2) vrtec Morje, Lucija so najbolj primerni prvi, drugi in tretji način, medtem ko četrti način odstopa, ne glede na to, ali upoštevamo manj zanesljiv termogram iz bližje globoke vrtine ali bolj kvaliteten termogram iz vrtine pri Izoli, oba pokazeta skoraj enako vrednost. Bolj verjetno je, da T-z profil iz obeh vrtin še vedno odraža malo nižje temperature na površju iz preteklega obdobja.

Za lokacijo 3) Babno Polje sta se za najbolj primerna pokazala prvi in četrti način, drugi način pa manj, vendar je morda pogojen z nadmorsko višino kraja. Morda pa je drugi način boljši od prvega in četrtega, saj izhaja iz novejšega 30-letnega obdobja.

Tabela 4. Povprečja mesečnih temperatur tal v globini 5 cm v obdobju 1971-2000 za Portorož.

Table 4. The average monthly temperatures of the soil at a depth of 5 cm in the period 1971-2000 for Portorož.

	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	Letno povprečje/ Annual average
T (°C)	4,1	4,4	8,8	13,5	19,7	23,6	26,1	26,1	20	14,8	9,4	5,3	14,7

Tabela 5. Rezultati izračunanih temperatur (°C) na površini trdnih tal za vseh pet lokacij po štirih načinih.

Table 5. Results of calculated temperatures (°C) on the surface of solid earth for all five locations in four calculation modes.

Način izračuna / Calculation mode	Lokacija / Site	Cerkno, CŠOD	Lucija, vrtec Morje	Babno Polje	Maribor-Tezno	Zgornji Brnik, Letališče
1. Temperatura zraka v temperaturo tal / Air temp. into Ground temp.		9,7	15,6	7,1	10,1	9,6
2. Višinski gradient / Height gradient		10,2	15,6	8,0	10,5	9,9
3. Meteo. postaja / Meteo station: 5 cm		-	15,7	-	10,0	9,5
4. T-z termogram / T-z profile		9,0	14,5	6,9	9,4	8,3

Za lokacijo 4) Maribor - Brezje sta najbolj primerna prvi in tretji način, morda tudi drugi način, medtem ko četrti način odstopa, verjetno zaradi mikrolokacije vrtine, ki je na robu Stražunskega gozda in to vpliva na malo nižjo temperaturo tal, kot odčitano iz interpolacije termograma.

Za lokacijo 5) Brnik - Letališče J. Pučnika Ljubljana so najbolj primerni prvi in drugi način ter tretji način, pri četrtem načinu je verjetno spet vzrok mikrolokacija vrtine, ki leži na večji jasi ob potoku blizu gozda. Rezultat po drugem načinu nekoliko odstopa od tistih po prvem in tretjem načinu, razlog je morda v bližini oziroma oddaljenosti agrometeoroloških postaj oziroma porazdelitvi postaj državne meteorološke mreže, in zato pride do manjšega neskladja. Podobno kot za lokacijo Babno Polje pa lahko razglabljam, če ni drugi način celo boljši.

Glede izbire izračuna se lahko odločamo na več načinov. Na primer, načrtovalec se lahko odloči za bolj varen pristop in izbere najslabši rezultat, ali drugače, s temi načini lahko načrtovalec ugotovi, kakšna so možna odstopanja in ali je

smiselno opraviti še podrobnejšo analizo (ugotavljanje osončenosti lokacije, mikroklimatskih razmer, ipd.).

Problematika ustreznega referenčnega obdobja in ustreznost termogramov

Pri dimenzioniranju zaprtih sistemov rabe plitve geotermalne energije je pomembno poznati temperature tal na lokacijah izvedbe. Za temperaturo tal je bilo do nedavno v Sloveniji razmeroma malo postaj (sedem za celinsko in le dve za primorsko Slovenijo; po novem (nekje od leta 2016) jih je 17, tj. za celinsko Slovenijo 13, za primorsko pa 4, od tega 2 v obalnem zmernem sredozemskem podnebnju in 2 v zalednem zmernem podnebnju) (Internet 6). Zaradi tega je dobro imeti enačbo za izračun temperature tal na podlagi nadmorske višine za poljubno lokacijo (2. način).

Iz tabele 7 sledi, da je termogramov vrtin razmeroma veliko glede na postaje z merjeno temperaturo zraka, še zlasti pa glede na postaje z merjenimi temperaturami tal. Dokaj dobro so razporejene tudi po nadmorskih višinah. Zaradi

Tabela 6. Ocena ustreznosti načina izračuna za vseh pet lokacij (iz Tab. 5).

Table 6. Assessment of the calculation modes for all five locations (from Tab. 5).

Način izračuna / Calculation mode	Cerkno, CŠOD	Lucija, vrtec Morje	Babno Polje	Maribor-Brezje	Zgornji Brnik, Letališče
1. Temp. zraka v temp. tal / Air temp. into Ground temp.	***	***	***	***	***
2. Višinski gradient/ Height gradient	***	***	** - nadmorska višina kraja/altitude of location	**	**
3. Meteo. postaja/ Meteo station: 5 cm	-	***	-	***	***
4. T-z termogram/ T-z profile	** - vpliv mikrolokacije vrtine/influence of borehole's microlocality	** - T-z profil iz preteklega desetletja/T-z profile from the past decade	***	** - vpliv mikrolokacije vrtine/influence of borehole's microlocality	** - vpliv mikrolokacije vrtine/influence of borehole's microlocality

Legenda za klasifikacijo / Legend for classification: *** bolj primeren / more appropriate; ** primeren / appropriate; * manj primeren/less appropriate

tega smo preverili, kako lahko ocenimo temperaturo tal iz nadmorske višine za poljubno lokacijo z uporabo podatkov iz termogramov vrtin, kar je bil tudi glavni cilj tega članka.

Praviloma bi morale biti temperature tal enake kot temperature, ki jih izračunamo iz termogramov vrtin, razen če ne gre v vrtini za občutne vplive konvekcije zaradi pretakanja podzemne vode. Iz vseh termogramov iz naših meritev oziroma v našem arhivu (vseh skupaj je 458), smo izračunali temperaturo na površini tal, oziroma v globini 0 (nič) metrov. Izračune smo razvrstili v tri razrede A, B in C. Razred A so tisti termogrami, iz katerih se je dalo najbolj zanesljivo določiti temperaturo na površini. Na celinskem delu smo imeli tako 73 izračunanih temperatur na površini (globini 0 metrov), na primorskem delu pa 16.

Večina od uporabljenih 458 termogramov vrtin je bila izmerjena v obdobju 1971 – 2000, a imamo v primorskem delu, na primer, v sedmih vrtinah tudi termograme iz novejšega obdobja (po letu 2000). Zato smo za primerjavo izračunanih temperatur na površini (globini 0 m) s temperaturami iz meteoroloških postaj uporabili isto obdobje. Primerjavo smo naredili s srednjimi letnimi temperaturami zraka na 2 m (29 na celinskem delu in 4 na primorskem delu) in s temperaturami tal v globini 2 cm.

Pokazalo se je, da je sipanje vrednosti iz termogramov večje (celinski del $R^2 = 0,67$ in primorski $R^2 = 0,76$), kot srednjih letnih temperatur zraka (celinski del $R^2 = 0,94$, primorski $R^2 = 0,92$). Standardna deviacija za vrednosti iz termogramov za celinski del je $0,67\text{ °C}$, za primorski del pa $0,49\text{ °C}$. Vendar moramo upoštevati, da imamo z izborom samo tistih vrtin s termogrami A kvalitete dejansko izračunane površinske temperature, porazdeljene skoraj izključno na nadmorskih višinah med 140 in 500 m, zato je sipanje večje.

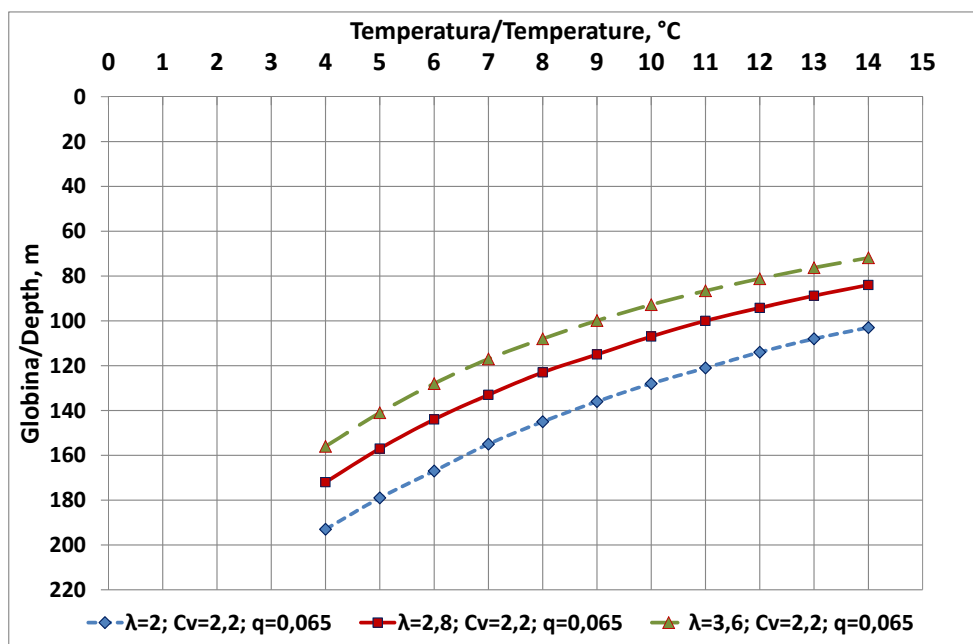
Slika 5 kaže kako pomembno je čim točnejše poznavanje povprečne letne temperature tal, saj ta precej vpliva na določitev potrebne globine vrtanja (za geosondo) pri različnih toplotnih prevodnostih zemljin in kamnin. Modeliranje za ugotavljanje potrebne globine geosonde je bilo izvedeno s programsko opremo Earth Energy Designer (EED), ki upošteva enačbe po Eskilsonu (1987).

Poglavitna razlika med samimi vrednostmi znotraj obeh nizov, tako med temperaturami iz termogramov in tudi med temperaturami zraka, se lahko pripiše pojemanju temperatur z nadmorsko višino (sl. 1 in 2). Iz primerjave regresijskih premic vrednosti iz termogramov in srednjih letnih temperatur za celinski del dobimo, da je razlika med temperaturo iz termogramov in temperaturo zraka $0,74\text{ °C}$ ($\pm 0,67\text{ °C}$) na nadmorski višini 300 m. Za primorski del je razlika $1,01\text{ °C}$ ($\pm 0,49\text{ °C}$) na nadmorski višini 50 m. Neujemanje ni nenavadno, saj imajo na posamezne lokacije vrtin lahko vpliv lokalni mikropodnebni učinki. Harris in Chapman (1995) sta npr. ugotovila za Utah razliko do 4 °C med linearnima regresijskima premicama za temperature iz termogramov iz vrtin in za meteorološke povprečne temperature zraka. Na potek izmerjenih termogramov namreč lahko vplivajo razni procesi in lastnosti, ki vključujejo (1) spremembe v toplotni prevodnosti kamnin z globino, (2) radiogeno proizvodnjo toplote v kamninah (zanemarljiva za večino plitvih in srednje globokih vrtin), (3) učinke dvignjenosti ali spuščeniosti površja na lokaciji in v njeni bližini, (4) bočne spremembe temperature tal zaradi orientiranosti površja in rastlinskega pokrova, (5) dviganje in erozijo ali pogrezanje in zasipavanje lokacije, in (6) navpični tok podzemne vode (Chisholm & Chapman, 1992; Harris & Chapman, 1995; Bodri & Čermák, 2007).

Tabela 7. Razpon nadmorskih višin meteoroloških postaj in vrtin s termogrami ter število enih in drugih v celinskem in primorskem delu Slovenije.

Table 7. Range of altitudes of meteorological stations and boreholes with thermograms and number of one and the other in the continental and coastal part of Slovenia.

Razpon nadmorskih višin meteoroloških postaj in vrtin s termogrami / število postaj, vrtin Range of altitudes of meteo stations and boreholes with T-z profiles / number of stations, boreholes	Celinski del / Continental part (m n.m.)	Primorski del / Coastal part (m n.m.)
Postaje s temperaturo tal na -2 cm / Stations with ground temperature at -2 cm	188 – 515 / 7	2 – 55 / 2
Postaje s temperaturo zraka na 2 m / Stations with air temperature at 2 m	157 – 2.514 / 29	2 – 320 / 4
Vrtine s termogrami vrtin / Boreholes with T-z profiles	144 – 808 / 73	22 – 241 / 16



Sl. 5. Vpliv povprečne letne temperature tal (T_0) na potrebno globino vrtnice pri različnih toplotnih prevodnostih (λ) kamnin in zemljin in gostoti toplotnega toka (q) $0,065 \text{ W/m}^2$ in volumski kapaciteti toplote (C_v) $2,2 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$.

Fig. 5. The influence of the annual average ground temperature (T_0) on the required drilling depth for different thermal conductivities (λ) of rock and soil and for the heat-flow density (q) of 0.065 W/m^2 and the volume heat capacity (C_v) of $2.2 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$.

Regresijska premica srednjih letnih temperatur tal iz meteoroloških postaj je na celinskem delu višja za $0,47 \text{ }^\circ\text{C}$ od premice iz termogramov. Skupna razlika med temperaturo zraka in temperaturo tal tako znaša $(0,74 + 0,47) 1,21 \text{ }^\circ\text{C}$ za celinski del.

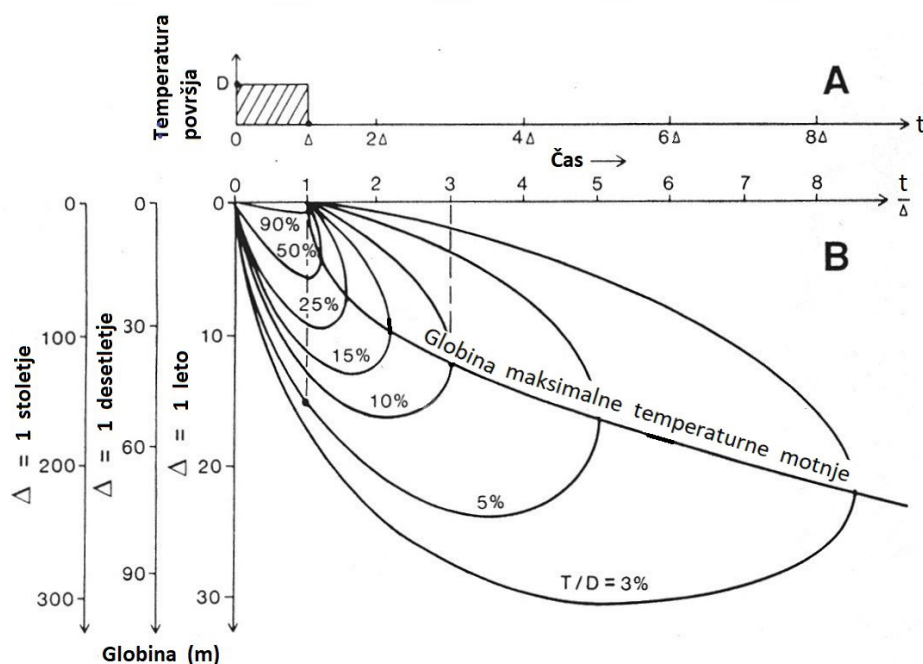
Na primorskem delu sta samo dve postaji z meritvami temperature tal, od katerih je na Bilju temperatura višja za približno $0,25 \text{ }^\circ\text{C}$, v Portorožu pa za približno $1,4 \text{ }^\circ\text{C}$ od premice iz termogramov. Zaradi tega teh podatkov ni možno uporabiti za enakovredno primerjavo.

Od obdobja 1971-2000 do obdobja 1981-2010 se je srednja letna temperatura zraka na celinskem delu povečala v povprečju vseh postaj za $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Na primorskem delu je to povečanje srednje letne temperature $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Predvidevamo, da bi se za enako razliko povečala vrednost iz termogramov, če bi bili merjeni v obdobju 1981-2010. Če bi temperaturo tal ocenjevali iz regresijskih premic iz termogramov, bi morali tudi tem vrednostim prišteti povečanje povprečnih temperatur glede na obdobje 1971-2000. Brez tega popravka smo zato dobili pri vseh petih lokacijah po načinu izračuna iz termograma najnižje vrednosti (tabela 5). Vendar je tu kritičen še drug razlog. Zelo malo je bilo vrtin, v katerih je bila temperatura izmerjena postopoma, s korakom 5 m ali gosteje praktično od samega površja. Tovrstne meritve se namreč izvajajo v vodnem stolpcu vrtnice, gladina vode pa se je v večini vrtin nahajala globlje od 5 m , velikokrat tudi globlje od 10 m . Zaradi tega v večini vrtin manjka temperaturni zapis v zgornjih 10 do 20 m , in je pravilna ekstrapolacija T-z pro-

fila iz globljega odseka tega profila proti površju lahko nekoliko subjektivna. V vseh primerih, kjer imamo iz vrtnice normalen potek termograma, smo večinoma povlekli ekstrapolacijo proti površini ne iz najplitvejšega globinskega odseka med 0 in 20 m , ampak iz odseka med 20 in 40 (morda 50) m , ali celo med 20 (tudi 30) m in 100 m globine. To pa ima vpliv na to, da je s tem zajet tak potek T-z profila, ki ima (nosi) v sebi še spomin običajno malo nižjih temperatur na površju v preteklosti.

V nadaljnji raziskavi bi bilo morda smiselno še malo bolj dosledno izločiti neobičajne (»slabe«) T-z profile in obdržati res le dobre T-z profile, čeprav smo dejansko pregledali samo tiste profile A kategorije.

Pojasniti želimo tudi, da Zemljino plitvo in tudi globlje podzemlje hrani »toplotni spomin« o dogodkih na njenem površju še dolgo po njihovem zaključku. Izmerjene temperature v vrtnici so odziv na visoko frekvenčne spremembe temperature zraka na površju, ki so bile filtrirane in oslABLJENE v Zemlji s procesom toplotne difuzije (Lachenbruch & Marshall, 1986; Bodri & Čermák, 2007; Harris & Chapman, 1995). Poglejmo primer enovite temperaturne anomalije v trajanju Δ na površju, ki se razširja v podzemlje, kjer s časom pojenjuje (Lachenbruch & Marshall, 1986). Moč temperaturne anomalije T v globinsko-časovnem polju se lahko izrazi kot odstotek anomalne površinske temperature D. Lachenbruch in Marshall (1986) sta podala tri globinske lestvice (v metrih) za dogodke, ki trajajo 1 leto, 1 desetletje in 1 stoletje, za predvideno toplotno difuzivnost kamnin in zemljin $\alpha=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (sl. 6).



Sl. 6. Termični spomin Zemlje za dogodke na njeni površini. Enovita temperaturna anomalija v trajanju Δ na površini (A) se širi navzdol in izginja (B). Krivulje kažejo jakost temperaturne anomalije T v globinsko - časovnem polju, izražene kot odstotek anomalne površinske temperature D .

Fig. 6. The thermal memory of the Earth for events on its surface. A uniform temperature anomaly of duration Δ at the surface (A) propagates downward and fades away (B). Curves show strength of the temperature anomaly T in the depth-time field expressed as a percentage of anomalous surface temperature D .

Kasneje po zaključku dogodka (n.pr. pri $t = 3 \Delta$), ko maksimalni signal pade na 10 %, se kot tak pojavi pri približno 11 m globine za $\Delta = 1$ leto in pri 110 m za $\Delta = 1$ stoletje. Ob zaključku enotne motnje v trajanju Δ anomalija ni več opazna (njena moč je $< 5\%$) globlje od 50 m za $\Delta = 1$ desetletje in globlje od 150 m za $\Delta = 1$ stoletje. Podajamo še en primer: nenadna sprememba temperature zraka v iznosu $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ki se je dogodila na površju pred 10 do 12 leti in je relativno dalj časa stalna, se odraža kot temperaturna motnja v izmerjenem termogramu (T -z profilu) z velikostjo do ca $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ še vedno le v zgornjem globinskem odseku do globine 50 do 60 m pod površjem. Ravno zaradi tega so raziskave povezanosti temperatur zraka in plitvega podzemlja (Harris & Chapman, 1995; Bodri & Čermák, 2007; Rajver et al., 2006; Strgar et al., 2017) pomembne z vidika ugotavljanja, kako hitro se temperaturno polje v plitvem podzemlju odziva na spremembe temperature na površju in kakšna je lastnost (značaj) preteklega podnebja, predvsem tistega pred instrumentalnimi zapisi, katerega se lahko pridobi (povrne) z matematično inverzijo iz T -z profilov v vrtinah. V Sloveniji prav tako ugotavljamo naraščanje temperature tal z našimi opazovanji (Strgar et al., 2017)

Zaključki

V članku smo opisali metodologijo določanja temperature na površini trdnih tal s štirimi načini izračuna. Prvi način, ko imamo podatek o srednji letni temperaturi zraka, je uporaben, ker je meteoroloških postaj relativno veliko in so v Sloveniji dokaj enakomerno porazdeljene (sple-

tna stran pa sama izbere najbližjo naši lokaciji). Drugi način, ko imamo samo podatek o nadmorski višini kraja, je uporaben v predelih, kjer ni potrebnih podatkov za prvi, tretji in četrti način. Tretji način, ko imamo v bližini merilno postajo temperature tal, je uporaben le v primeru, če so v bližini primerne meteorološke postaje, kjer so merili temperaturo tal, takih postaj pa je le sedem v Sloveniji. Četrti način, ko imamo v bližini vrtino z izmerjenim termogramom, je uporaben zato, ker izhaja iz ekstrapolacije nemotenih podpovršinskih formacijskih temperatur proti površju. Uporabili smo 458 termogramov vrtin, med njimi je bila večina izmerjena v obdobju 1971 – 2000, le manjši del pa tudi v desetletju kasneje. Od teh smo izbrali 89 termogramov A kategorije, ki najbolj zadostijo pogojem uporabe.

Enačbi višinskih gradientov za celinsko in primorsko Slovenijo smo uporabili za izračun povprečne letne temperature zraka na 2 m nad tlemi za lokacijo vsake vrtine, iz katere smo uporabili termogram. Na podlagi izračunov za zadnje referenčno obdobje 1971–2000 smo dobili grafe odvisnosti temperatur iz termogramov vrtin, temperatur tal v globini 2 cm ter zraka na višini 2 m od nadmorske višine za primorsko in celinsko Slovenijo.

Iz prikazov podatkov in regresijskih premic vidimo, da je temperatura tal iz meteoroloških postaj v povprečju višja od temperature, izračunane iz termogramov vrtin. Dobro je ocenjena z uporabo regresijskih premic za celinski del. Za primorski del taka ocena ni izvedljiva, ker sta za primerljivo obdobje obstajali samo dve postaji z

meritvami temperature tal. Sipanje izračunanih površinskih temperatur iz termogramov glede na nadmorsko višino je večje kot pri meteoroloških postajah.

Dobljeni regresijski premici (sl. 1 in 2) za izračunane površinske temperature iz termogramov se dokaj ujemata po nagibu s premicama za temperature zraka in tal iz meteoroloških postaj, razen v primeru temperature tal na primorskem delu, kjer taka primerjava ni bila možna zaradi samo dveh razpoložljivih postaj.

Če regresijski premici izračunanih površinskih temperatur iz termogramov prištejemo standardno deviacijo, se zelo dobro približamo temperaturi tal izmerjeni na meteoroloških postajah.

Termogramov je razmeroma veliko v primerjavi z meteorološkimi postajami, zlasti pa neprihernno več kot pa postaj z meritvami temperature tal. Menimo, da smo smiselno izkoristili poglobljene prednosti termogramov, pa tudi njihova razpršenost po državi je zadovoljivo dobra. Za bolj primerljivo oceno temperatur tal iz termogramov s temperaturami iz meteoroloških postaj bi morali imeti na voljo več termogramov iz novejšega obdobja 1981-2010, saj bi s tem izločili vpliv hladnejšega podnebja iz desetletje starejšega obdobja 1971-2000.

Zahvala

Poglavitni del članka izhaja iz našega dela v projektu GRETA, zato se avtorji lepo zahvaljujemo programu Interreg Alpine Space, v katerem je trajal 3-letni projekt. Zahvala gre tudi Ministrstvu za infrastrukturo in Agenciji za raziskave RS za pretekla financiranja našega raziskovalnega dela, brez katerega poglobljene analize ne bi bile mogoče. Zahvaljujemo se tudi vsem recenzentom za temeljit pregled in koristne pripombe, ki so pripomogle k izboljšavi članka.

Reference

Banks, D. 2008: An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling. Blackwell Publishing, Oxford etc., 339 p.

Blackwell, D.D., Steele, J.L. & Brott, Ch.A. 1980: The terrain effect on terrestrial heat flow. *J. Geophys. Res.*, B 85/9: 4757-4772. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00066-9)

Bodri, L. & Čermák, V. 2007: Borehole Climatology. A new method on how to reconstruct climate. Elsevier, Amsterdam etc., 335 p.

Busby, J., Lewis, M., Reeves, H. & Lawley, R. 2009: Initial geological considerations before installing ground source heat pump systems.

Quarter. *J. Engineer. Geol. Hydrogeol.*, 42/3: 295-306.

Casasso, A., Pestotnik, S., Rajver, D., Jež, J., Prestor, J. & Sethi, R., 2017: Assessment and mapping of the closed-loop shallow geothermal potential in Cerčno (Slovenia). *Energy Procedia*, 125: 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.210>

Casasso, A. (POLITO) et al.: ARPA VdA, BRGM, EURAC, GBA, GeoZS, TUM, Uni Basel, 2018: Deliverable D.4.2.1 – Local-scale maps of the NSGE potential in the Case Study areas. GRETA project - Interreg Alpine Space programme, 137 p.

Chisholm, T.J. & Chapman, D.S. 1992: Climate change inferred from borehole temperatures: An example from western Utah. *J. Geophys. Res.*, 97: 14155-14176. <https://doi.org/10.1029/92JB00765>

Clauser, C. 2006: Geothermal energy. In: Heinloth K. (ed.): Landolt-Börnstein, Group VIII: Advanced Materials and Technology, 3: Energy Technologies, subvol. C Renewable Energies, Springer Verlag, Heidelberg-Berlin: 493-604.

Curtis, R., Lund, J.W., Sanner, B., Rybach, L. & Hellström, G. 2005: Ground source heat pumps – Geothermal energy for anyone, anywhere: current worldwide activity. *Proc. World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey*: 9 p.

Davies, J. & Davies, D. 2010: Earth's surface heat flux. *Solid Earth*, 1: 5-24.

Dickson, M.H. & Fanelli, M. 2004: What Is Geothermal Energy? Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italy. Available via the International Geothermal Association, <http://iga.igg.cnr.it/geo/geoenergy.php>, last accessed September 2007.

Eskilson, P. 1987. Thermal analysis of heat extraction boreholes. Lund, Sweden: Doctoral thesis, University of Lund, Dept. of Mathematics.

Eugster, W., Pahud, D., Rohner, E. & Signorelli, S. 2010: Sondes géothermiques. *SIA 384/6:2010 Bâtiment, génie civil. Norme suisse SN 546 384/6*. Valable dès 2010-01-01. Société suisse des ingénieurs et des architectes, CH-8027 Zurich: 76 p.

Gosar, A. & Ravnik, D. 2007: Uporabna geofizika - univerzitetni učbenik za študente geologije, geotehnologije in rudarstva. Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo, Ljubljana: 218 p.

Grunert, A.G., Wornle, M.I. & Zorn, R. 2010: Potential mapping of geothermal heat pumps

- with GIS in Southern Germany. Proc. of the World Geothermal Congress 2010, Nusa Dua, Bali, Indonesia, 8 p.
- Harris, R.N. & Chapman, D.S. 1995: Climate change on the Colorado Plateau of eastern Utah inferred from borehole temperatures. *J. Geophys. Res.*, 100/B4: 6367–6381.
- Kappelmeyer, O. & Haenel, R. 1974: Geothermics with special reference to application. In: Rosenbach O. & Morelli C. (eds.): *Geoexploration Monographs, Series 1, No. 4.* Gebrüder Borntraeger, Berlin: 241 p.
- Kurevija, T., Vulin, D. & Krapec, V. 2011: Influence of undisturbed ground temperature and geothermal gradient on the sizing of borehole heat exchangers. Proc. of the World Renewable Energy Congress 2011 (Geothermal Applications), Linköping, Sweden, 8 p. <https://doi.org/10.3384/ecp110571360>
- Kurevija, T., Vulin, D. & Macenić, M. 2014: Impact of geothermal gradient on ground source heat pump system modeling. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 28: 39–45. <https://hrcak.srce.hr/129490>
- Lachenbruch, A. & Marshall, B.V. 1986: Changing climate: Geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic. *Science*, 234: 689–696.
- Lewis, T.J. & Wang, K. 1992: Influence of terrain on bedrock temperatures. *Glob. Planet. Change*, 6/2: 87–100.
- Lewis, T.J. 1998: The effect of deforestation on ground surface temperatures. *Glob. Planet. Change*, 18: 1–13.
- Milivojević, M.G. 1994: Praćenje promena klime na osnovu geotermalnih ispitivanja u bušotinama. Climatic change history based on geothermal downhole measurements. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, 58/2: 265–284.
- Nitoiu, D. & Beltrami, H. 2005: Subsurface thermal effects of land use change. *J. Geophys. Res.*, 110/F1. <https://doi.org/10.1029/2004JF000151>
- Ogrin, D. & Plut, D. 2009: Aplikativna fizična geografija Slovenije. Filozofska fakulteta Univerze v Ljubljani, Ljubljana: 246 p.
- Omer, A.M. 2008: Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12/2: 344–371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.003>
- Popiel, C.O., Wojtkowiak, J. & Biernacka, B. 2001: Measurements of temperature distribution in ground. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 25: 301–309.
- Powell, W.G., Chapman, D.S., Balling, N. & Beck, A.E. 1988: Continental heat-flow density. V: Haenel R., Rybach L., Stegena L. (eds.): *Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination.* Kluwer Academic Publishing: 167–222.
- Prestor, J., Rajver, D., Pestotnik, S., Benček, R., Petauer, D., Pregl, M., Sadnikar, J., Šporin, J. & Vukelić, Ž. 2016: Smernice za vrtanje v plitvi geotermiji do globine 300 metrov - Izvod za poskusno uporabo – 2a. Ministrstvo za infrastrukturo, Ljubljana: 78 p.
- Prestor, J., Rajver, D., Pestotnik, S., Benček, R., Petauer, D., Pregl, M., Ratej, J., Sadnikar, J., Šporin, J. & Vukelić, Ž. 2018: Priloga 2. Smernice za vrtanje v plitvi geotermiji do globine 300 metrov. Izvod za poskusno uporabo – v4, In: Rajver, D. Prestor, J., Pestotnik, S., Janža, M., Rman, N. & Lapanje, A. (eds.): *Geotermalni viri. Poročilo o izvedenih delih za Ministrstvo za infrastrukturo v letu 2018.* GeoZS, Ljubljana: 82 p.
- Rajver, D., Šafanda, J. & Dedeček, P. 2006: Monitoring of air-ground temperature coupling and examples of shallow subsurface warming in Slovenia. *Geologija*, 49/2: 279–293. <https://doi.org/10.5474/geologija.2006.021>
- Rajver, D., Prestor, J., Pestotnik, S., Rman, N. & Lapanje, A. 2018: Geotermalni viri. Poročilo o izvedenih delih za Ministrstvo za infrastrukturo v letu 2017. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 82 p.
- REGEOCITIES: Factsheets on geothermal heat pumps. The technology. www.regeocities.eu
- Sarbu, I. & Sebarchievici, C. 2014: General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*, 70: 441–454. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>
- Seward, A.M. & Prieto, A. 2015: New Zealand rock properties: determining thermal properties of shallow soils. Proc. World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, IGA, 7 p.
- Signorelli, S. & Kohl, T. 2004: Regional ground surface temperature mapping from meteorological data. *Glob. Planet. Change*, 40/3–4: 267–284. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2003.08.003>
- Strgar, A., Rajver, D. & Gosar, A. 2017: Investigations of the air – ground temperature coupling at location of the Malence borehole near Kostanjevica, SE Slovenia. *Geologija*, 60/1: 129–143. <https://doi.org/10.5474/geologija.2017.010>
- Šafanda, J. 1999: Ground surface temperature as a function of the slope angle and

slope orientation and its effect on surface temperature field. *Tectonophysics*, 306/3-4: 367– 375. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00066-9)

Šafanda, J., Rajver, D., Correia, A. & Dědeček, P. 2007: Repeated temperature logs from Czech, Slovenian and Portuguese borehole climate observatories. *Clim. Past*, 3/3: 453-462. <https://doi.org/10.5194/cp-3-453-2007>

Internetni viri:

Internet 1: meteo.si > Pregled > Agrometeorologija > Povprečja > Temperature tal (globine 2, 5, 10, 20, 30, 50 in 100 cm): Povprečja mesečnih temperatur tal v različnih globinah v obdobju 1971-2000 <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/period/soiltemp/> (26.3.2019)

Internet 2: meteo.si > Pregled > Podnebje > Preglednice > Učinkovita raba energije: Podatki za pravilnik o učinkoviti rabi energije

<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/pravilnik-ucinkoviti-rabi-energije/> (26.3.2019)

Internet 3: Atlas okolja, Agencija RS za okolje (ARSO)

http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (26.3.2019)

Internet 4: meteo.si > Pregled > Podnebje > Preglednice > Klimatološka povprečja 1981-2010 http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/normals_81_10/ (26.3.2019)

Internet 5: UEA Climatic Research Unit, Global Temperature Record, Phil Jones & Tim Osborn <http://www.cru.uea.ac.uk/> (26.03.2019)

Internet 6: meteo.si > Pregled > Agrometeorologija > Podatki > Temperature tal - zip datoteke (dnevni podatki za postajo): Temperature tal za celotno arhivsko obdobje (dnevni podatki po letu 1961) http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/data/arhiv_ttal/ (26.03.2019)