

Plitvi geotermalni potencial za zaprte navpične sisteme: trije študijski primeri iz alpskega prostora

Dušan Rajver¹, Alessandro Casasso², Pietro Capodaglio³, Joerg Prestor¹, Charles Cartannaz⁴, Charles Maragna⁴, Simona Pestotnik¹, Jernej Jež¹

Povzetek

Plitve geotermalne sisteme običajno delimo na dve glavni skupini: odprte krožne sisteme, kjer izmenjava toplote poteka s podzemno vodo in zaprte krožne sisteme, kjer izmenjava poteka s kroženjem tekočine kot nosilca toplote v zaprti cevni zanki, zakopani v vodoravni legi v tleh ali v navpični legi kot so geosonde in geotermični piloti. V smislu povečanja rabe geotermalne energije in zlasti števila plitvih geotermičnih naprav lahko kartiranje in ocena plitvega geotermalnega potenciala prispevata k določitvi najprimernejših območij za vsako tehnologijo. Izvedena je bila študija geoloških in geotermičnih značilnosti na treh alpskih pilotnih območjih, in sicer v dolini Aosta (Italija), občini Cerkno (Slovenija) in naravnemu parku Bauges (Francija), z namenom določiti geotermalni potencial za sisteme z zaprto zanko. Največji izziv je predstavljalo zlasti prepoznavanje litologij v različnih merilih, da se pravilno določijo vrednosti toplotnih lastnosti. Za dolino Aosta so značilne metamorfne kamnine z nekaj granita, območja Cerkno in Park Bauges pa sta pretežno sestavljena iz sedimentnih kamnin s hitrimi spremembami geoloških enot in posledično z različnimi geotermičnimi lastnostmi. Toplotno prevodnost in difuzivnost kamnin smo merili z optično metodo skeniranja TCS in s temi podatki določili plitvi geotermalni potencial za zaprte sisteme, t.j. letno količino energije, ki jo standardna 100 m globoka vrtna trajnostno izmenja s tlemi. Uporabljena G.POT metoda je omogočila pravilno upoštevanje temperature tal, ki se precej razlikuje v širokem območju nadmorske višine, kar je značilno za vsa tri analizirana območja. Dobljene karte prikazujejo prostorsko porazdeljen potencial za 100 m dolgo geosondo.

Ključne besede: plitva geotermalna energija, geotermalni potencial, termični parametri, zaprti geotermalni sistemi, metoda G.POT, Aosta (Italija), park Bauges (Francija), Cerkno (Slovenija)

Key words: shallow geothermal energy, geothermal potential, thermal parameters, closed systems, G.POT method, Aosta (Italy), Parc des Bauges (France), Cerkno (Slovenia)

Uvod

Tehnologija toplotnih črpalk na zemeljski vir (geotermalne toplotne črpalke - GTČ, angl. ground-source heat pumps - GSHP) je splošno priznana kot ena izmed učinkovitejših in stroškovno učinkovitih rešitev za ogrevanje, hlajenje in pripravo tople sanitarne vode. Čeprav njihova uporaba stalno narašča (Sanner, 2019), GTČ še vedno predstavljajo obrobni sektor obnovljivih virov toplote (Bayer in sod., 2012). Zaradi promocije tega trajnostnega vira energije je Tehnična univerza v Münchnu (TUM) skupaj z Geološkim zavodom Slovenije (GeoZS), Politecnico iz Torina, BRGM, ARPA iz Aoste in še sedmimi drugimi partnerji iz alpskih držav vodila triletni projekt GRETA (Interreg Alpine Space), ki se je zaključil decembra 2018. Glavni cilj projekta je bil premostiti nekatere glavne ovire v

¹ Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Politecnico di Torino, DIATI, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italija

³ ARPA Valle d'Aosta, Loc. La Maladière, 48, 11020 Saint-Christophe AO, Italija

⁴ BRGM, Direction des Géoresources – Div. Géothermie, 45060 Orléans cedex 2, Francija

razširjanju GTČ s poudarkom na naslednjih vprašanjih (Casasso in sod., 2017a): 1) poenostavitev obstoječih uredb in postopkov odobritve, ki temeljijo na najboljših praksah, izbranih med obstoječimi primeri dobre prakse (Prestor in sod., 2016); 2) reševanje načrtovalskih in tehničnih vprašanj različnih plitvih geotermalnih tehnik s poudarkom na posebnih alpskih pogojih (Bottig in sod., 2016; 2017); 3) ocena geotermalnega potenciala in možnih podzemnih motenj pri postavitvi geosond in vrtin; 4) razvoj orodij za vključitev plitve geotermalne energije v lokalne energetske načrte treh pilotnih območij, tj. Oberallgäu (Nemčija), Cerklno (Slovenija) in doline Aosta (Italija); 5) razvoj mreže interakcij in izmenjave znanja z zainteresiranimi stranmi. Ta prispevek prikazuje nekatere dejavnosti projekta, ki so se izvedle pod vodstvom Politecnica iz Torina.

Zaprta navpični sistemi z geosondami so najbolj sprejeta tehnika za plitve geotermalne sisteme, saj v nasprotju z odprtim sistemom ni potrebna prisotnost proizvodnega vodonosnika. Njihova ekonomska sposobnost je odvisna od zmožnosti tal za izmenjavo toplote, definirana kot potencial plitve geotermalne energije (PGE). Geotermalni potencial je odvisen od toplotne rabe stavb (profili porabe energije in najvišje porabe energije) in od lokacijsko-specifičnih termofizikalnih značilnosti podzemlja (toplotna prevodnost in specifična toplotna zmogljivost). Advekcija podzemne vode prav tako izboljšuje uspešnost geosond, vendar jo je težko oceniti, zato je pri ocenjevanju geotermalnega potenciala v splošnem ne upoštevamo. Pomen potenciala PGE je bil v zadnjem desetletju precej prepoznan, zato je bilo financiranih več projektov. Za kartiranje potenciala PGE z zaprtimi sistemi so Ondreka in sod. (2007) in Gemelli in sod. (2011) uporabili metodo VDI 4640 (VDI, 2000, 2001), v jugozahodni Nemčiji in v regiji Marche (Srednja Italija). Vendar ta metoda ne upošteva nemotene temperature tal, kar pripelje do enake specifične vrednosti odvzema toplote za topla tla v dolinah (npr. pri 13 °C) in hladna tla v gorah (npr. 7 °C), in to je njena glavna omejitev. To omejitev presega metoda MIS 3005 (DECC, 2011; Curtis in sod., 2013), ki upošteva trajanje ogrevalnega cikla (s širšo izbiro v primerjavi z VDI 4640), toplotno prevodnost in temperaturo tal. Tabele MIS 3005 so zato bolj prilagodljive in uporabne na širših pilotnih območjih (Casasso in sod., 2017b), vendar ne ponujajo jasne (eksplicitne) formule za oceno plitvega geotermalnega potenciala.

V prispevku predstavljamo oceno geotermalnega potenciala z zaprtimi sistemi kot poprečno toplotno obremenitev, ki jo je mogoče učinkovito izmenjati skozi geosonde. Uporabili smo metodo G.POT za oceno potenciala PGE v treh alpskih pilotnih območjih: v regiji dolina Aosta (Italija), občini Cerklno (Slovenija) in naravnem parku Bauges (Francija). Odprtih sistemov tu ne obravnavamo, je pa bil v projektu ocenjen tudi ta potencial (Böttcher in sod., 2019).

Metoda za določitev plitvega geotermalnega potenciala

Na toplotne lastnosti plitvega podzemlja največ vplivata geološka sestava (litologija) in prisotnost podzemne vode. Poleg tega na toplotno zmogljivost (ekstrakcijo) geosonde vplivajo tudi srednja letna temperatura tal, zemeljski toplotni tok, padavine in trajanje sončnega obsevanja, kar je odvisno tudi od topografije.

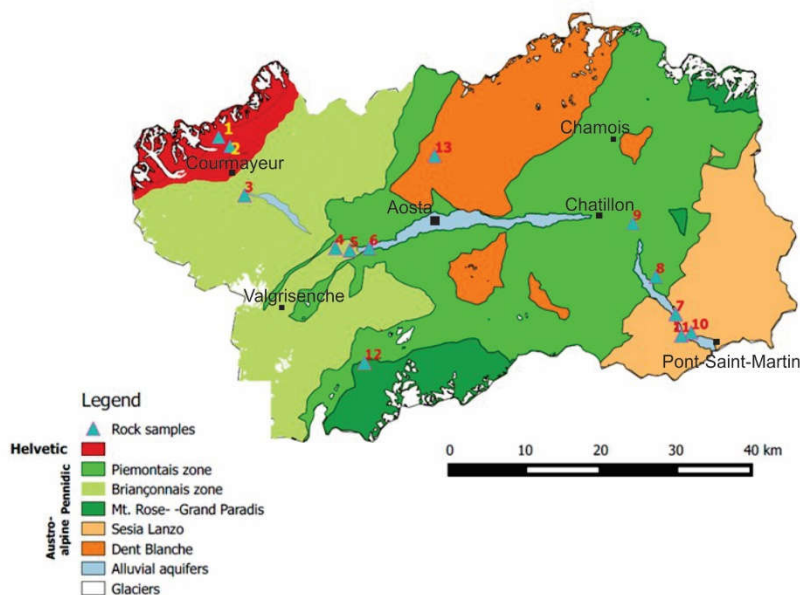
Prepoznavanje litologij v različnih merilih na treh pilotnih območjih

Geološko kartiranje smo najprej izvedli v večjem merilu za potencialno določitev celotnih območij, na vseh treh območjih pa so bila različna (običajno 1: 50.000 ali 1: 25.000), nato pa v manjših merilih za prepoznavanje potenciala za določena majhna območja oz. za skupino stavb, večinoma v merilu 1: 10.000 ali 1: 5.000.

Geološka sestava doline Aosta

Dolina Aosta je največja (3200 km²) in najbolj gorata (popr. nadmorska višina ozemlja je ca 2100 m n.m.) med šestimi preučeni primeri v projektu. Evidentirane so tri glavne tektonske domene Alp (slika 1):

- Helvetska domena v severozahodnem predelu je edini sektor, ki ni bil podvržen metamorfizmu, sestoji pa iz granita in migmatitov (tj. podlaga masiva Mont Blanc);
- Austroalpin lahko razdelimo na dva sektorja:
 - Cona Sesia Lanzo v jugovzhodnem delu regije: prevladujejo eklogitični blestniki in gnajsi z metabaziti;
 - Dent Blanche enota v osrednjem delu regije: večinoma kinzingiti in amfiboliti;
- Penidska domena je najbolj razpršena, nanaša se na širok nabor kamnin prvotno različnega geološkega izvora in paleogeografskega položaja, kasneje deformiranih med orogenezo. Lahko jo delimo v:
 - Masiva Grand Paradis in Monte Rosa: sestojita večinoma iz gnajsa;
 - Paleo-oceansko območje Piemontais: ofioliti (predvsem serpentiniti in metabazalti) in z njimi povezani metasedimenti (v glavnem kalkšisti);
 - Cona Briançonnais: sestoji iz različnih vrst metasedimentnih kamnin.



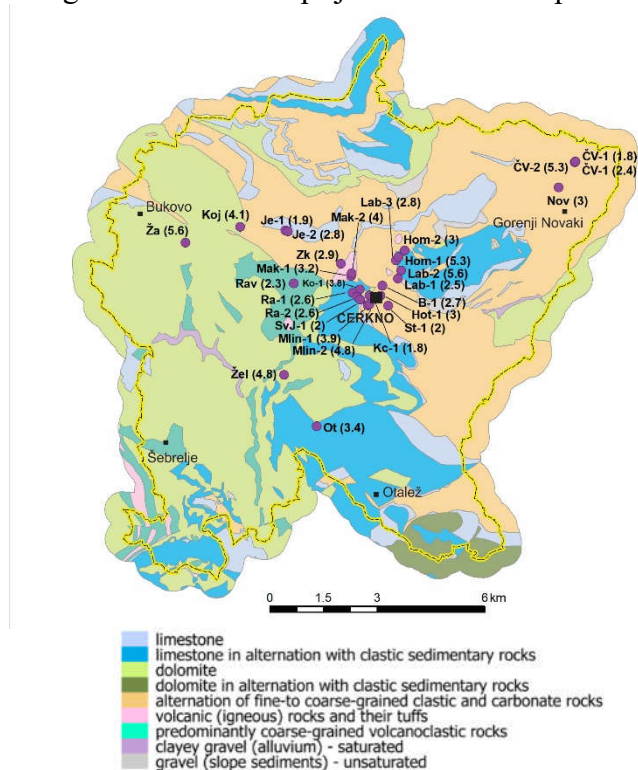
Slika 1: Poenostavljena tektonska karta območja Doline Aosta, s številkami vzorčevanih kamnin.

V dnu glavne doline so kvartarni aluvialni sedimenti (peščeni prod) zelo debeli in prepustni vodonosniki, ki se izkoriščajo predvsem za industrijsko in pitno vodo, v zadnjih letih tudi za geotermalno rabo. Njihovo napajanje izvira iz sezonskega taljenja snega, poleg ledenikov, ki pokrivajo približno 5% celotnega regionalnega območja.

Geološka sestava občine Cerkno

Občina Cerkno je najmanjše (132 km²) med pilotnimi območji. Večinoma ga pokrivajo klastične sedimentne kamnine, ki izkazujejo v različnih geoloških enotah (formacijah) hitro menjavo v obliki različnih zaporedij in razmerij (Slika 2). Ponekod so v klastitih debele plasti karbonata, zlasti apnenca. Drugi izdanki so večinoma karbonatne kamnine, pretežno

dolomit. Klastične kamnine so v glavnem izmenjava peščenjaka in glinavca (ali muljevca). Na Črnem vrhu se izmenjujejo peščenjak, vulkanoklastični tuf in tufit, manj pa glinavec in meljevec. Te plasti zaznamujejo tudi del mesta Cerčno, pa tudi nekaj manjših sosednjih naselij. Aluvialni sedimenti (mulj, pesek in prod) so zelo omejeni, odloženi se le ob rekah in potokih, z nekaj metri globine. Tla in nesprijeti sedimenti so praviloma tanjši od 1 m.



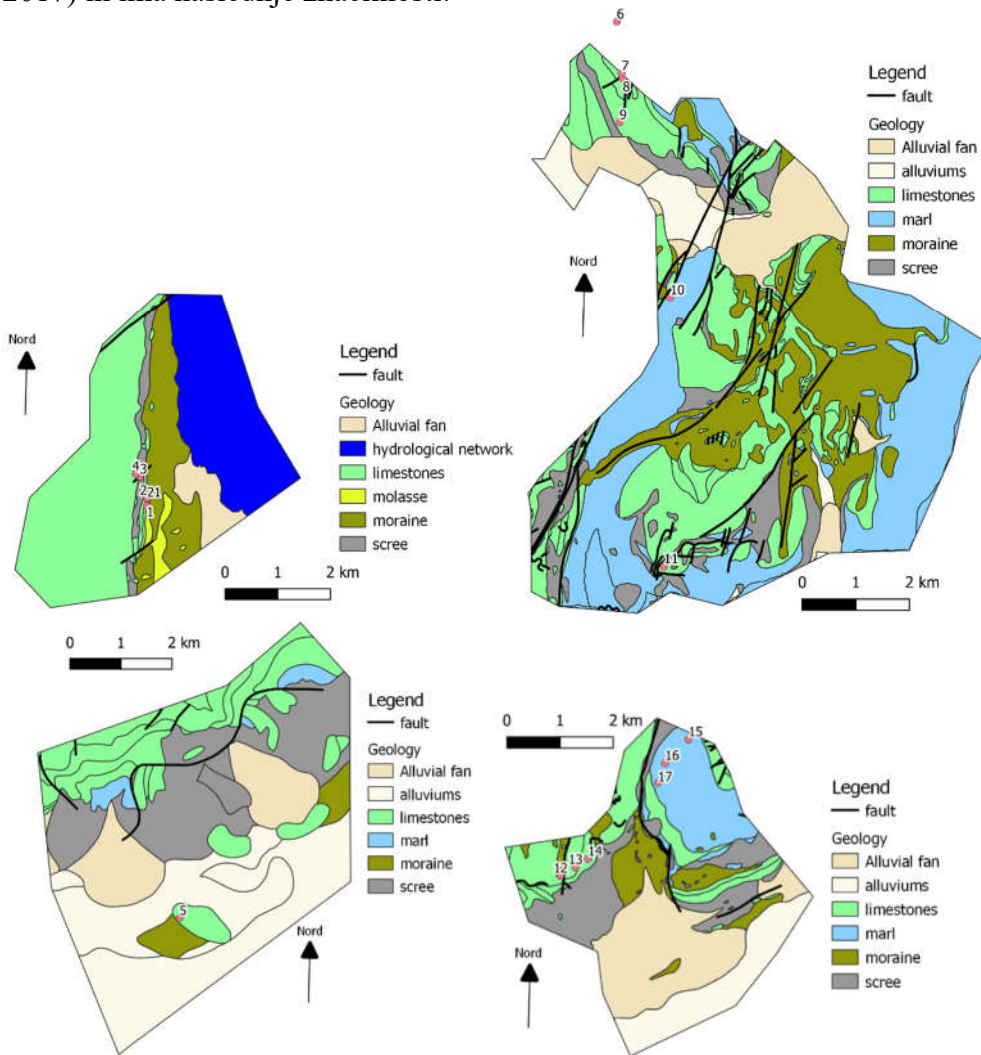
Slika 2: Litološka karta občine Cerčno, s kodami vzorčevanih kamnin.

Geološka sestava naravnega parka Bauges

Masiv Bauges je eden od subalpskih masivov ob zahodnem robu severnih francoskih Alp (glej sliko 3 s kartami štirih občin). V glavnem sestoji iz nagubanih in prelomljenih karbonatnih kamnin (apnenci, laporji), ki so bolj deformirane proti vzhodu. Na zahodu masiv razkriva asimetrične reliefje (zahodna strma pobočja), ki jih povzročata geološka zgradba jurskih in krednih formacij v gubah, ki so prevrnjene proti vzhodu. V vzhodnem delu kaže masiv strmejši reliefje v povezavi z intenzivnejšo deformacijo kamnin z več gubami in prelomi, ki jih povzročata bližina alpskega potisnega nariva. Proti zahodu je omejen s kilometer visoko škarpo, ki označuje mejo z nižjim molasnim predgorjem (200 do 300 m nadm. višine). Predstavlja narinjene kredne in jurske formacije na oligo-miocensko perialpsko molasno zapolnitev. Na vzhodu je masiv prepoznaven do doline Isère. Severne in južne meje masiva najdemo v prečnih dolinah, ki so močno vrezane: dolina Annecy na severu in dolina Chambéry na jugu. V zadnjih fazah kvartarja so alpski ledeniki napredovali in izpodkopavali doline. Številni aluvialni nanosi so lateralno hranili doline s pretežno grobimi sedimenti.

Vzorčenje in laboratorijske meritve toplotnih parametrov

Po letu 2003 se je v svetu uveljavila hitra in natančna metoda merjenja toplotne prevodnosti (angl. thermal conductivity - TC) kamnin in drugih snovi z optičnim skeniranjem. S skenerjem toplotne prevodnosti (TCS) smo po tej metodi v geotermičnem laboratoriju GeoZS izmerili vse vzorčevane kamnine iz treh območij. Naprava nudi po izbiri tudi hkratne meritve toplotne difuzivnosti (angl. thermal diffusivity - TD) (Popov in sod., 2017) in ima naslednje značilnosti:



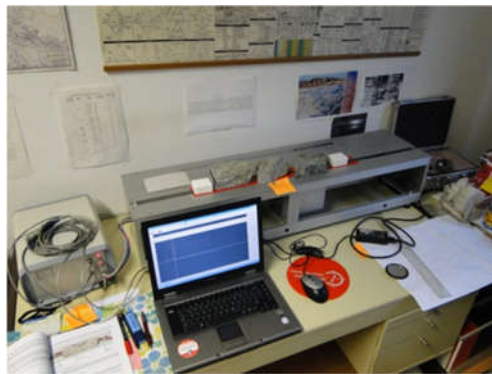
Slika 3: Geološke karte štirih občin na območju parka Bauges s številkami vzorčevanih kamnin; v smeri urinega kazalca od zgornje leve: (a) Sévrier, (b) Faverges-Seythenex, (c) Saint Pierre d'Albigny, (d) Montmélian. Položaj občin na obodu parka kaže slika 10.

- Meritve TC (in TD): naprava TCS ima usmerjen, mobilni, neprekinjeno delujoč vir toplote z IR žarnico v kombinaciji z IR senzorji temperature.
- 2 IR senzorja merita temperaturo pred in po segrevanju z virom toplote (za merjenje TC + TD se vklopijo 3 senzorji).
- Določitev TC neznanih vzorcev (neobvezno tudi TD): primerjava presežnih temperatur (temp. razlik) standardnih referenc (certificirani vzorci z znanim TC_R) s presežnimi temperaturami enega ali več neznanih vzorcev, ki jih segreva mobilni vir

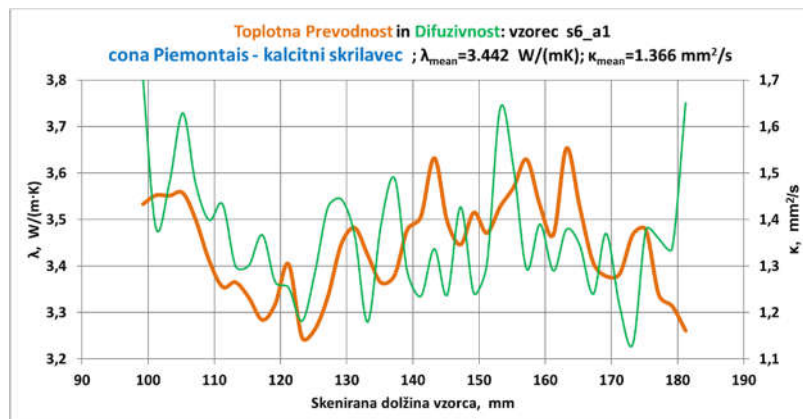
toplote. Pred in za merjenimi vzorci se vzdolž črte za skeniranje postavijo referenčni standardi z znano TC, odvisno od pričakovane TC merjenih vzorcev (slika 4).

Lastnosti kamnin iz doline Aosta

V regiji dolina Aosta je bilo zbranih 13 vzorcev kamnin (slika 1), ki predstavljajo glavne litološke različke za določanje TC in TD (in s tem toplotne kapacitete). Rezultati meritev (primer na slikah 4 in 5) so pokazali zelo dobre vrednosti TC metamorfnih kamnin (slika 11). Aluvialni nanosi so v štirih glavnih lečah na dnu doline (največja je ravnica Aosta), ledeniški nanosi pa so v manjših lečah v več stranskih dolinah.



Slika 4: Trije kosi vzorca 6 (kalcitni skrilavec iz cone Piemontais) so postavljeni na platformo optičnega skenerja TCS med skeniranjem TC s premikajočo se optično glavo.



Slika 5: Primer profilov TC in TD vzdolž ene od treh skeniranih kamnin vzorca 6 iz doline Aosta.

Lastnosti kamnin iz občine Cerklje

Izmerili smo vrednosti TC in TD na 16 vzorcih z območja mesta Cerklje in na 16 vzorcih iz širše cerkljanske občine (skupno 53 posamičnih kosov po žaganju). Po izmerjenih vrednostih TC kamnin in litološki zgradbi Cerkljanskega smo ocenili, da so najboljše kamnine za izkoriščanje PGE v zahodnem delu, (npr. planota Šebrelje), večinoma zgrajenega iz masivnega dolomita srednje in zgornje triasne starosti (ca 230 mil. let). Vendar pa imajo tudi v drugih predelih občine litološka zaporedja do globin 100 ali 200 m v poprečju

dober potencial, pod pogojem, da so mešanica kamnin z nižjimi in višjimi vrednostmi TC (glej sliko 13).

Lastnosti kamnin iz parka Bauges

Kartografija poprečne TC med 0 in 100 m globine je bila izvedena v štirih občinah tega območja, kjer so bili pobrani vzorci apnenčastih in molasnih kamnin iz najvažnejših geoloških enot, za razliko od slabo razkritih laporjev, katerih nizka trdota je preprečila ohranitev vzorca (slika 3). Vzorci kamnin so večinoma jurski in kredni apnenci in laporji. Z glinami bogate ali slabo strjene geološke formacije, kot so aluvij, melišča ali morene, niso bile vzorčene za te meritve. Vrednosti zanje so povzete iz literature, vklj. iz švicarskega standarda SIA384/6 (Eugster in sod., 2010). Po žaganju je bilo izmerjeno 18 vzorcev na TC in TD. Dobljene vrednosti TC so srednje visoke ($> 2,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Večina vzorcev je pokazala nizek razpon v spremenljivosti toplotne kapacitete, ki ima tako le obrobni vpliv na končni geotermalni potencial območja. Posledično je bila toplotna kapaciteta (razmerje med TC in TD) opredeljena s poprečno vrednostjo $3,00 \text{ MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ na celotnem območju.

Opis metode G.POT in izpeljava vhodnih podatkov

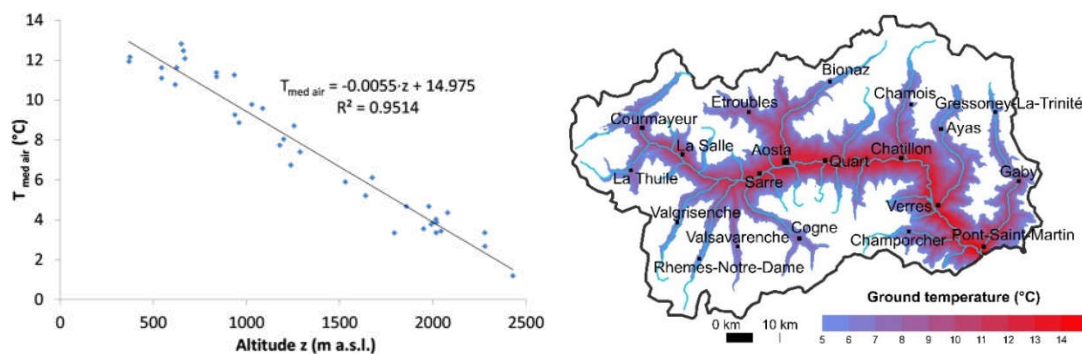
Za oceno geotermalnega potenciala za zaprte sisteme (geosonde) je bila uporabljena metoda G.POT (Casasso & Sethi, 2016) za vsa tri pilotna območja. Metoda predvideva, da uporaba ciklične sinusoidne toplotne obremenitve povzroči časovno spreminjajočo se toplotno spremembo tal in tako doseže mejno temperaturo tekočine (najnižjo ali najvišjo, odvisno od uporabe). Uporabljena metoda temelji na prilagajanju analitičnih enačb zemeljskega prenosa toplote in lahko upošteva več vhodnih parametrov: toplotne lastnosti tal, lastnosti naprave in profil rabe (dolžina geosond, mejna temperatura tekočine - prenosnika toplote, trajanje ogrevanja/hlajenja, letni čas in simulirana življenjska doba).

Ker je toplotna sprememba tal (in s tem prenosnika toplote) neposredno sorazmerna s toplotno obremenitvijo, izmenjano s tlemi, potem razlika med začetno nemoteno temperaturo tal (T_0) in mejno temperature tekočine (T_{lim}) določa toplotno obremenitev (geotermalni potencial), ki jo lahko geosonda določene dolžine trajnostno izmenja. Metoda je bila prvič uporabljena na ozemlju province Cuneo (Casasso & Sethi, 2017) s 100 m kot značilno globino ocenitve geosonde. Metodo lahko uporabimo za oceno geotermalnega potenciala za ogrevanje ali hlajenje. Edina omejitev je, da se lahko upošteva en sam način delovanja, zato je pri kartiranju upoštevan prevladujoči način delovanja. Raziskali smo torej le uporabo za ogrevanje zaradi značilnega podnebja alpskega prostora.

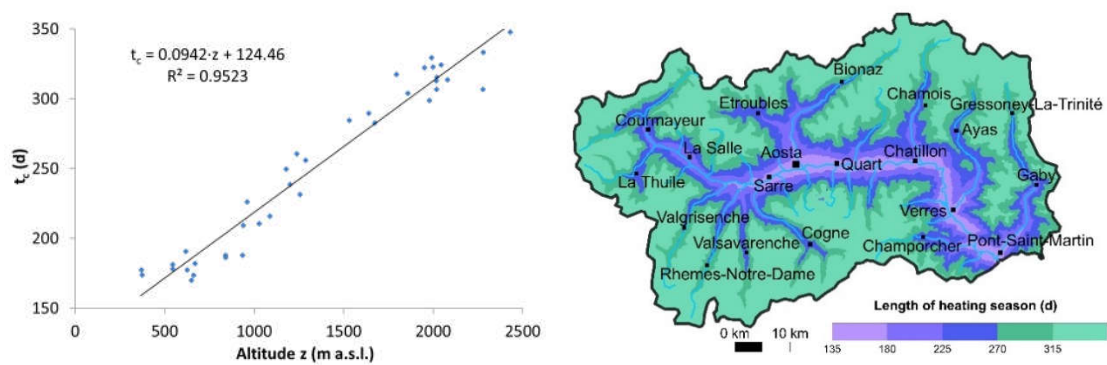
Geotermalni potencial je bil izračunan z nekaj fiksnimi parametri: temperaturna meja = $-3 \text{ }^\circ\text{C}$, dolžina geosonde = 100 m, simulirana življenjska doba naprave = 50 let, polmer vrtine = 0,075 m. Prostorska porazdelitev nekaterih drugih parametrov je temeljila na izmerjenih vrednostih TC in TD. Na podlagi lokalno veljavnih korelacij s podnebnimi parametri in nadmorsko višino sta bili dobljeni dve prostorski porazdelitvi (T_0 in dolžina sinusoidnega cikla toplotne obremenitve ali dolžina ogrevalne sezone t_c).

V relativno majhni globini (pribl. 10 m) je temperatura predpostavljeno stalna skozi vse leto. Nekaj avtorjev (Signorelli & Kohl, 2004; Ouzzane in sod., 2015) poudarja, da je ta temperatura zelo podobna poprečni letni temperaturi zraka, to je parametru, ki ga je z dobro prostorsko ločljivostjo razmeroma enostavno opredeliti. Za dolino Aosta so Casasso in sod., (2018) domnevali, da je temperatura tal za $1 \text{ }^\circ\text{C}$ višja od letne poprečne temperature zraka (slika 6 desno), ki je, kot je prikazano na grafu slike 6 (levo), linearno odvisna od nadmorske

višine tal. S takšno korelacijo zadostuje digitalni model terena (DTM), da dobimo prostorsko porazdelitev T_0 . Vendar pa na višji nadmorski višini (nad 1500 m) temperatura tal zaradi toplotne izolacijske lastnosti snežne odeje postane precej višja od poprečne temperature zraka (Signorelli & Kohl, 2004). Zaradi tega je bila izbrana presečna višina (npr. 2000 m nadmorske višine, kar ustreza poprečni nadmorski višini celotne regije), saj bi bilo ocenjevanje temperature tal in s tem geotermalnega potenciala nad to mejo nemogoče brez terenskih meritev ter bolj malo uporabno, kajti dejansko je na teh višinah malo stavb. Glede na dolžino kurilne sezone so bili za vsa območja sprejeti različni pristopi. Za dolino Aosta in park Bauges je bilo število ogrevalnih dni (primer je slika 7 za dolino Aosta) ocenjeno kot poprečno število dni s poprečno temperaturo pod 12 °C, t.j. z italijanskim pristopom za izračun števila ogrevalnih dni (UNI, 1987). Za Cerkljevo so bile dolžine ogrevalne sezone iz Slovenije najprej soodvisno povezane s stopinjskimi dnevi v Eurostatu (slika 8) in nato z nadmorsko višino tal (Casasso in sod., 2017b). Karta stopinjskih dni (temperaturnega primanjkljaja, angl. heating degree-days, HDD) kaže prostorsko porazdelitev stopinjskih dni in je ocena za porazdelitev porabe energije za ogrevanje. Stopinjski dnevi in trajanje ogrevalne sezone naraščajo z nadmorsko višino. Temperaturni primanjkljaj (vsota stopinjskih dni) je vsota razlik zunanje temperature zraka in izbrane temperature v ogrevanem prostoru, in jo izračunamo za tiste dni, v katerih je poprečna dnevna temperatura zraka nižja od 12 °C (Ovsenik-Jeglič & Mekinda-Majaron, 2002). Dolžina ogrevalne sezone je odvisna od podnebja in je lahko opredeljena z različnimi kriteriji (npr. z nadm. višino tal ali s HDD). Za karto talnih temperatur v občini Cerkljevo so bile ugotovljene linearne korelacije z nadmorsko višino, s temperaturo tal za približno 1 °C višjo od letne poprečne temperature zraka.



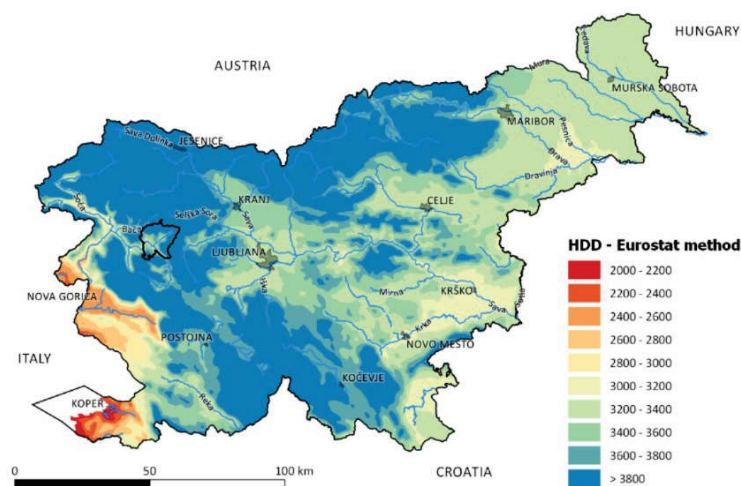
Slika 6: Korelacija talne temperature z višino in njena prostorska razporeditev za območje doline Aosta (Casasso in sod., 2018).



Slika 7: Korelacija dolžine ogrevalne sezone z višino in njena prostorska razporeditev za območje doline Aosta (Casasso in sod., 2018).

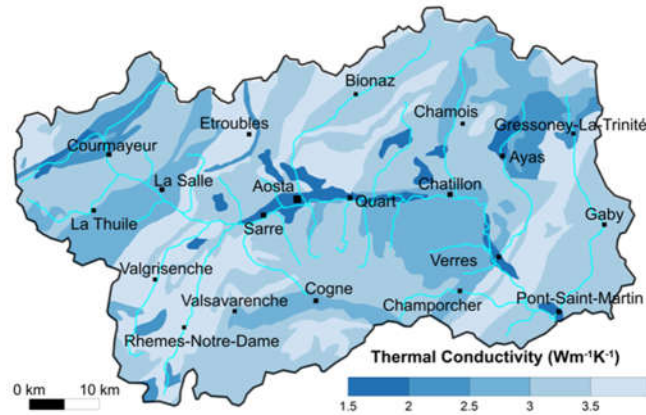
Karte plitvega geotermalnega potenciala

Izdelane so bile najprej karte prostorske porazdelitve poprečne TC za vsa tri območja. V dolini Aosta (slika 9) so vrednosti TC na splošno precej visoke, med 2,8 in 4,0 W/(m·K), povsem značilne za metamorfne kamnine, ki v glavnem tvorijo geološko podlago območja. Na Cerkljanskem (slika 10) so se za najbolj prevodne kamnine izkazali dolomiti (masivni in plastnati), kremenovi peščenjaki in konglomerati, dolomitni apnenci in nekateri tufi (keratofir, porfir), ki imajo najboljši potencial za dimenzioniranje plitvih zaprtih sistemov. Dobre lastnosti so pokazale tudi nekatere druge kamnine, kot so apnenci, karbonatni peščenjaki, meljevci in diabaz. Nekoliko nižji potencial kažejo skrilavi glinavci, meljevci (muljevci), nekateri laporovci in lapornati apnenci. Razpon srednjih vrednosti od 1,8 do 5,6 W/(m·K) za vse vzorčene kamnine kaže na geološko raznolikost Cerkljanskega. Karta TC za park Bauges temelji na izmerjenih vrednostih in nekaterih geoloških premislekih (slika 11).



Slika 8: Karta stopinjskih dni (glede na 20 °C) v Sloveniji (ARSO, 2002); označen je položaj občine Cerkno.

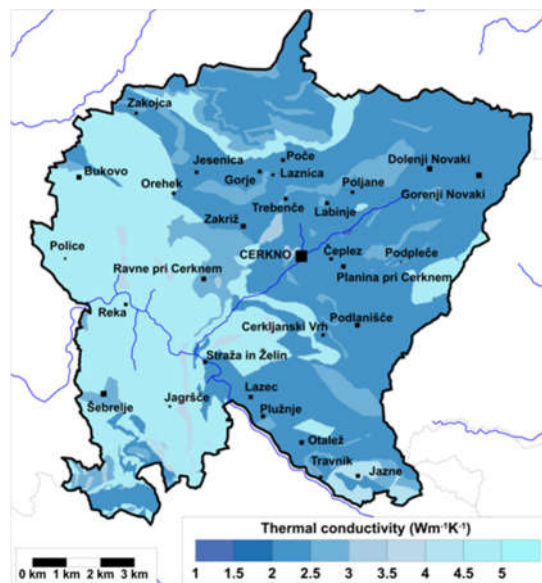
Poprečne izmerjene vrednosti TC na kamninah iz parka Bauges so večinoma med 2,4 in 3,5 W/(m·K). Nevezanih formacij ni bilo mogoče vzorčiti za naše meritve. Trdo ali mehko naravo tal je bilo tudi zelo težko oceniti. Zato ni nemogoče, da se poprečna vrednost, ki izhaja iz karte, razlikuje od dejanske vrednosti TC na terenu. Nazadnje je zelo visoka stopnja netočnosti pripisana globinski razširjenosti formacije, ker ne obstaja 3D geološki model masiva Bauges.



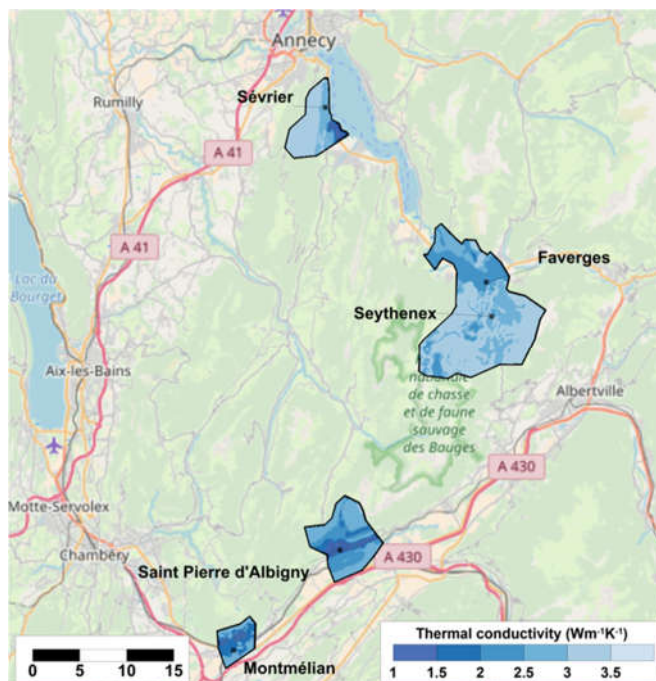
Slika 9: Prostorska porazdelitev poprečne TC tal v zgornjih 100 m pod površja v dolini Aosta.

Geotermalni potencial za 100 m globoke geosonde na območju doline Aosta

Geotermalni potencial za geosonde za dolino Aosta je prikazan le pod 2000 m n.v. (nad katero pač ocena talne temperature ni zanesljivo korelirana s sliko 12 za nadmorske višine). Karta prikazuje dokaj visok geotermalni potencial, ki je na večjem delu ozemlja višji od 10 MWh/leto (>70%), zaradi dokaj visokih vrednosti TC. Nižji potencial lahko najdemo v aluvialnih ravninah v dnu doline zaradi nižjih TC aluvialnih sedimentov. Največje območje je ravnica Aosta z dolžino 13,5 km v smeri zahod-vzhod in širino 2,5 km v osrednjem delu blizu mesta Aosta.



Slika 10: Prostorska porazdelitev poprečne TC tal v zgornjih 100 m pod površja na območju Cerknega.

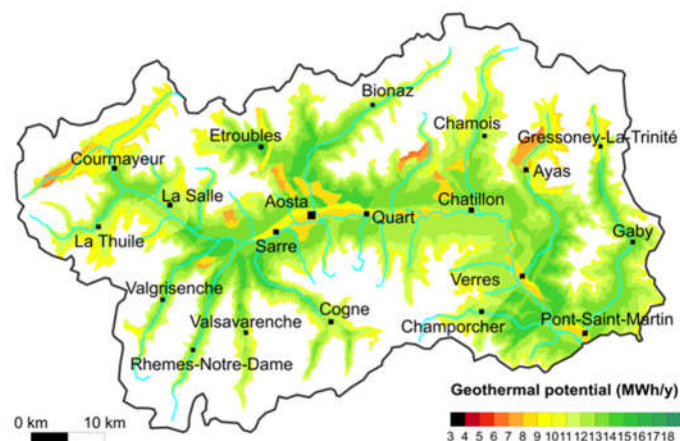


Slika 11: Prostorska porazdelitev poprečne TC v zgornjih 100 m podpovršja v štirih občinah parka Bauges.

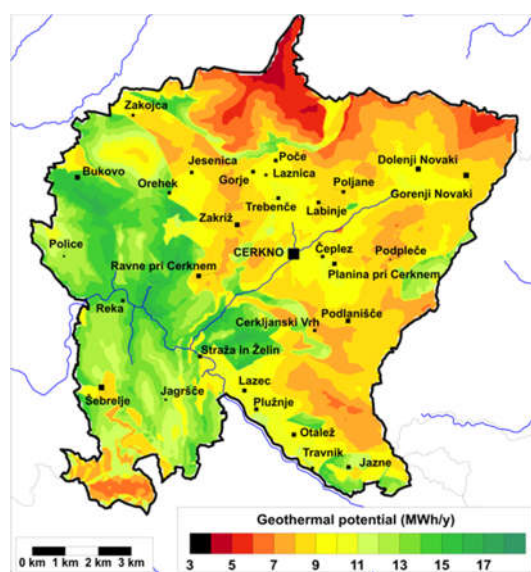
Nekaj velikih leč ledeniških nanosov, za katere je tudi značilen nižji potencial, najdemo celo v številnih stranskih dolinah. Ocena plitvega geotermalnega potenciala z G.POT metodo ne upošteva učinka advekcije podzemne vode, kar lahko občutno poveča toplotno izmenjavo. Učinek advekcije bi lahko upoštevali pri numeričnih modelih, kot so FEFLOW oz. MODFLOW ali z analitičnimi enačbami. Za aluvialno ravnico je bil določen tudi potencial za odprte sisteme.

Geotermalni potencial za 100 m globoke geosonde na območju Cerknega

Prostorsko porazdeljeni potencial za Cerkno (slika 13) se giblje od 8 do 15 MWh/leto, večina naselij pa ima potencial med 8 in 10 MWh/leto (Casasso in sod., 2017b). Višje vrednosti so na območjih z visoko prevodnim dolomitom v vaseh Bukovo (15 MWh/leto), Orehek in Reka (14 MWh/leto), Jagršče, Police in Jazne (12 MWh/year). Na splošno visoka TC podpovršja kompenzira učinek sorazmerno nizke talne temperature in zato plitvi geotermalni potencial kaže precej visoke vrednosti na tem hribovitem območju.



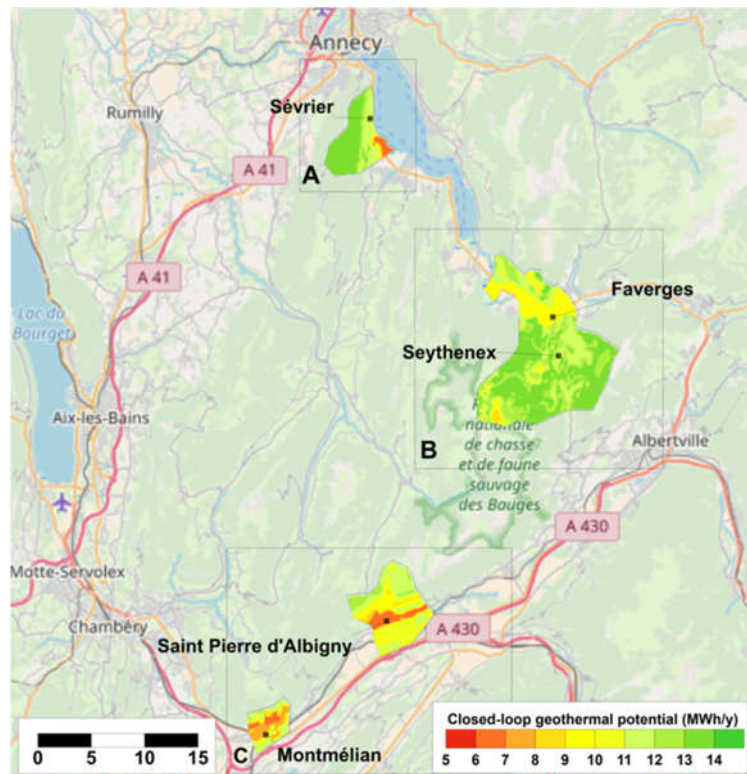
Slika 12: Porazdelitev plitvega geotermalnega potenciala P_{BHE} (MWh/leto) v dolini Aosta.



Slika 13: Porazdelitev plitvega geotermalnega potenciala P_{BHE} (MWh/leto) na območju Cerknega.

Geotermalni potencial za 100 m globoke geosonde na območju parka Bauges

Slika 14 prikazuje (na splošno gledano) prostorsko porazdeljen potencial štirih izbranih občin. Obseg prikazanih vrednosti je precej velik, če ga primerjamo z omejeno površino. To je predvsem posledica podrobne analize poprečne TC, zlasti nad aluvialnimi nanosi. Nad temi nanosi so dejansko potencialne vrednosti nižje od 10 MWh/leto, medtem ko se na pobočjih dolin povečajo do 15 MWh/leto. Nižje vrednosti (5,5 do 7 MWh/leto) so ugotovljene le nad ravnico reke Isère v občinah Montmélian in Saint-Pierre d'Albigny.



Slika 14: Porazdelitev plitvega geotermalnega potenciala v občinah Sévrier, Faverges-Seythenex, Saint-Pierre-d'Albigny in Montmélian (od severa proti jugu, generalni pogled).

Diskusija

Dolina Aosta je glede na srednje vrednosti TC kamnin podlage bolj homogeno območje kot ostali dve, Cerkno in Bauges. Po drugi strani je zaradi višinskih razlik nemotena temperatura tal (T_0) bolj spremenljiva v dolini Aosta in manj na območju parka Bauges in Cerknega. Najvažnejša vhodna parametra za geotermalni potencial sta ravno TC kamnin in T_0 . Potencial (tako za ogrevanje kot hlajenje) se viša s TC, saj se toplotna sprememba tal zmanjša. Po drugi strani se geotermalni potencial viša s T_0 , če upoštevamo način ogrevanja (ker gre pri tem za hlajenje tal in je zanj na voljo širši razpon). Seveda pa se iz nasprotnega razloga potencial zniža, če predpostavimo le hlajenje. Dobljene karte potenciala (slike 12, 13, 14) prikazujejo koliko energije za ogrevanje lahko letno pridobimo iz ene 100 m globoke geosonde (Capodaglio in sod., 2018; Casasso in sod., 2018). Ta potencial za geosonde je dokaj visok za vsa tri gorska območja. Na območju Cerknega znaša med 8 in 10 MWh/leto, z višjimi vrednostmi, do 16 MWh/leto, v zahodnem delu občine, ki ga pokrivajo visoko prevodni dolomiti. V dolini Aosta se giblje med 5 in 18 MWh/leto, in je na večjem delu ozemlja (> 70%) višji od 10 MWh/leto. V parku Bauges potencial znaša med 5 in 15 MWh/leto, s tem, da sta občini Sévrier in Faverges-Seythenex obetavnejši. Omenjeno ogrevalno energijo je mogoče neposredno primerjati z letno porabljeno energijo, izračunano v MWh. Če letno porabimo n.pr. 2300 litrov kurilnega olja s starim kotlom s 70% izkoristkom, je to enako 16 MWh. Približno $\frac{1}{4}$ te energije izvira iz toplotne črpalke (pri COP=4), ostalih 12 MWh iz okolja, iz vrtine. Na zelenkasto obarvanih območjih vseh potencialnih kart bi zadoščala 100 m globoka ali plitvejša vrtina. Na drugih območjih naj bi bila vrtina globlja. Eno globljo vrtino se lahko nadomesti z dvema ali več plitvimi. Pri dimenzioniranju polja geosond se vrtine za geosonde običajno izdelajo 5 do 7 m narazen

(odvisno od globine geosond) in v neki pravilni razporeditvi (pravokotnik, črka L ali U ipd.), da ne prihaja do motečega vpliva med njimi. Geosonde se lahko štejejo za neodvisne, če je razdalja B večja od dolžine geosonde H. Toplotni vpliv je tedaj vedno zanemarljiv. Torej je toplotni vpliv vedno majhen, ko je razdalja B med $H/2$ in H. (Pahud et al., 2002). V primeru posameznih hiš, in če so globine geosond 100 m, to pomeni, da mora biti razdalja do sosednje geosonde 50 metrov ali več, da se toplotne motnje čim bolj zmanjšajo (Zosseder et al., 2018).

Kar zadeva učinek nadmorske višine, zlasti v dolini Aosta, je geotermalni potencial v višjem delu doline globalno nižji zaradi nižje talne temperature. Glede na vrednosti potenciala za zaprte sisteme bi lahko bile že sedaj geosonde zanimive za nadomestitev plinskih kotlov, medtem ko bi jih morali v odsotnosti plinskega omrežja resno obravnavati kot alternativo kotlom na kurilno olje ali utekočinjen naftni plin.

Zaključki

V prispevku je predstavljeno kartiranje in ocena plitvega geotermalnega potenciala za zaprte sisteme, za katerega je izvedena podrobna študija geoloških in geotermičnih značilnosti v treh alpskih pilotnih območjih, s ciljem opredeliti najprimernejša območja za tehnologijo GTČ. Največji izziv je bila identifikacija litologij v različnih merilih za pravilno dodelitev termičnih lastnosti. Z metodo TCS so določene poprečne vrednosti TC vzorcev kamnin (skupaj s TD, ki je potrebna za pridobitev toplotne zmogljivosti). Pridobljene so večinoma pričakovane poprečne vrednosti TC glede na obstoječo litologijo. S temi vhodnimi podatki smo določili geotermalni potencial s pomočjo metode G.POT za standardno 100 m globoko geosondo. Seveda so bile toplotne lastnosti tal opredeljene za enako globino. Opažena je bila močna korelacija podnebja (letna poprečna temperatura zraka in HDD), zlasti na območjih Cerknega in Aoste, zato sta bili talna temperatura in trajanje ogrevalne sezone ocenjeni na podlagi DTM. Namen teh kart je podati veljavne podatke o plitvem geotermalnem potencialu za zaprte sisteme podjetnikom, inženirjem in posameznikom, da jim pomagajo v njihovi energetski izbiri pri izvedbi kateregakoli plitvega geotermalnega projekta, ki vključuje enote GTČ. Geotermalni potencial vsakega območja predstavlja letno količino energije, ki je trajnostno izmenljiva s tlemi, in sicer z eno vrtino z določenimi lastnostmi. Ta količina je uporabna za predhodno oceno stroškov namestitve geotermične naprave z zaprtim sistemom. Vendar ta energija ne bi smela biti mišljena kot nadomestitev za dimenzioniranje celega polja geosond.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo Evropskemu regionalnemu razvojnemu fondu Interreg Alpine Space za financiranje projekta GRETA, in več agencijam za dodatne potrebne podatke.

Literatura

- Bayer, P., Saner, D., Bolay, S., Rybach, L. & Blum, P. (2012): Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp 1256-1267.
- Bottig, M., Götzl, G., Prestor, J., Pestotnik, S., Zosseder, K., Böttcher, F., Capodaglio, P., Maragna, C., Casasso, A., Piga, B., Tosco, T., Zambelli, P., Vaccaro, R. & Huggenberger, P. (2016): Catalogue of techniques and best practices for the utilization of Near-Surface Geothermal Energy. GRETA project deliverable 3.1.1, TUM, Munich, 48 p.

- Bottig, M., Hoyer, S., Prestor, J., Pestotnik, S., Rajver, D., Zosseder, K., Böttcher, F., Capodaglio, P., Maragna, C., Casasso, A., Piga, B., Della Valentina, S. & Zambelli, P. (2017): Catalogue of operational criteria and constraints for shallow geothermal systems in the Alpine environment. GRETA project deliverable 3.2.1, TUM, Munich, 91 p.
- Böttcher, F., Casasso, A., Götzl, G. & Zosseder, K. (2019): TAP – Thermal aquifer Potential: A quantitative method to assess the spatial potential for the thermal use of groundwater. *Renew. Energy*, 142, pp 85-95. [https://doi: 10.1016/j.renene.2019.04.086](https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.086)
- Capodaglio, P., Baietto, A., Casasso, A., Della Valentina, S., Andorno, E., Caldera, D., Saggese, M., Rajver, D., Bucci, A., Böttcher, F., Zambelli, P. & Olmedo, M. (2018): Geotermia a bassa entalpia: aspetti ambientali, energetici ed economici. Il Progetto INTERREG Spazio Alpino GRETA in Valle d'Aosta. GRETA project booklet, ARPA, Aosta, 85 p.
- Casasso, A. & Sethi, R. (2016): G.POT: A quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential. *Energy*, 106, pp 765-773.
- Casasso, A. & Sethi, R. (2017): Assessment and mapping of the shallow geothermal potential in the province of Cuneo (Piedmont, NW Italy). *Renewable Energy*, 102, Part B, pp 306-315.
- Casasso, A., Piga, B., Sethi, R., Prestor, J., Pestotnik, S., Bottig, M., Götzl, G., Zambelli, P., D'Alonzo, V., Vaccaro, R., Capodaglio, P., Olmedo, M., Baietto, A., Maragna, C., Böttcher, F. & Zosseder, K. (2017a): The GRETA project: the contribution of near-surface geothermal energy for the energetic self-sufficiency of Alpine regions. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 6, pp 1-12.
- Casasso, A., Pestotnik, S., Rajver, D., Jež, J., Prestor, J. & Sethi, R. (2017b): Assessment and mapping of the closed-loop shallow geothermal potential in Cerknò (Slovenia). *Energy Procedia*, 125C, pp 335-344.
- Casasso, A., Sethi, R., Tiraferri, A., Della Valentina, S., Bucci, A., Tosco, T., Zosseder, K., Böttcher, F., Capodaglio, P., Baietto, A., Prestor, J., Pestotnik, S., Bottig, M., Hoyer, S., Rupprecht, D., Götzl, G., Maragna, C., Cartannaz, C., Zambelli, P., Scaramuzzino, C., Vianello, A. & Huggenberger, P. (2018): Local-scale maps of the NSGE potential in the Case Study areas. GRETA project deliverable 4.2.1, TUM, Munich, 137 p.
- Curtis, R., Pine, T. & Wickins, C. (2013): Development of new ground loop sizing tools for domestic GSHP installations in the UK. *Proceedings European Geothermal Congress 2013, Pisa, Italy*, EGEC, 10 p., SG1-07.
- DECC, MCS 022 (2011): Ground heat exchanger look-up tables. Supplementary material to MIS 3005. Issue 1.0, Dept of Energy and Climate Change (DECC), United Kingdom, p. 22.
- 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.
- Gemelli, A., Mancini, A. & Longhi, S. (2011): GIS-based energy-economic model of low temperature geothermal resources: A case study in the Italian Marche region. *Renewable Energy*, 36(9), pp 2474-2483.
- Ondreka, J., Rusgen, M.I., Stober, I. & Czurda, K. (2007): GIS-supported mapping of shallow geothermal potential of representative areas in south-western Germany—possibilities and limitations. *Renew. Energy*, 32 (13), pp 2186–2200.
- Ouzzane M., Eslami-Nejad P., Badache M. & Aidoun Z. (2015): New correlations for the prediction of the undisturbed ground temperature. *Geothermics*, 57, pp 379-384.
- Ovsenik-Jeglič, T. & Mekinda-Majaron, T. (2002): Klimatografija Slovenije. Stopinjski dnevi in trajanje kurilne sezone. Agencija RS za okolje – Urad za meteorologijo, Ljubljana. http://www.arso.gov.si/vreme/poro%C4%8Dila%20in%20projekti/dr%C5%BEavna%20slu%C5%BEba/Stopinjski_dnevi_in_trajanje_kurilne_sezone.pdf
- Pahud, D., Mégel T., Brenni, R. (2002): Langzeiteffekt von MehrfachErdwärmesonden. Programm Geothermie Im Auftrag des Bundesamtes für Energie.
- Popov, Y.A., Lippmann, E. & Rauen, A. (2017): TCS – Manual. Thermal conductivity (TC) and thermal diffusivity (TD) scanner, version 31.01.2017. TCS Lippmann and Rauen GbR, Schaufling, 53 p.
- Prestor, J., Pestotnik, S., Zosseder, K., Böttcher, F., Capodaglio, P., Götzl, G., Bottig, M., Weilbold, J., Maragna, C., Martin, J.-C., Durst, P., Casasso, A., Zambelli, P., Vaccaro, R., Gilbert, J.,

- Messina, F. & Spinolo, F. (2016): Overview and analysis of regulation criteria and guidelines for NSGE applications in the Alpine region. GRETA project deliverable 2.1.1, TUM, Munich.
- Sanner, B., (2019): Summary of EGC 2019 Country Update Reports on Geothermal Energy in Europe. Proceedings, European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands, EGEC, 14 p.
- Signorelli, S. & Kohl, T., (2004): Regional ground surface temperature mapping from meteorological data. *Global and planetary change*, 40, pp 267-284.
- UNI (1987): UNI 9019: 1987 - Heating costs based on consumption. Determination of heating costs by degree-day counter in zone plant. Degree-day counter utilization and test.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI), (2000): VDI 4640 Part 1. Thermal use of the ground. Fundamentals, approvals, environmental aspects, Düsseldorf, 32 p.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI), (2001): VDI 4640 Part 2. Thermal use of the underground. Ground source heat pump systems, Düsseldorf.
- Zosseder, K., Böttcher, F., Prestor, J., Pestotnik, S., Bottig, M., Capodaglio, P., Casasso, A., et al. (2018): Definition of the guidelines for legal and technological procedures. GRETA project deliverable 2.3.1, TUM, Munich