

Analiza uporabe termalne vode v severovzhodni Sloveniji

Analysis of thermal water utilization in the northeastern Slovenia

Nina RMAN, Andrej LAPANJE & Dušan RAJVER

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana; e-mail: nina.rman@geo-zs.si;
andrej.lapanje@geo-zs.si; dusan.rajver@geo-zs.si

Prejeto / Received 18. 10. 2012; Sprejeto / Accepted 26. 11. 2012

Ključne besede: termalna voda, geotermalna energija, direktna raba, Murska formacija, Mursko-Zalski bazen, Pomurje, Murska depresija

Key words: thermal water, geothermal energy, direct use, Mura Formation, Mura-Zala basin, Pomurje, Mura depression

Izvilleček

S predstavljeno raziskavo smo želeli identificirati uporabnike termalne vode v SV Sloveniji, ugotoviti kakšno in koliko vode pridobivajo ter kako jo uporabljajo. Pregled energetske izrabe termalne vode smo nadgradili z opisom stanja obratovalnega monitoringa in ravnanja z odpadno vodo, dodali pa smo tudi informacije o tehnoloških težavah pri rabi vode in njihovem reševanju. Ugotovili smo, da kar 14 od 26 aktivnih vrtin zajema vodonosnik v Murski formaciji, v katerega posega tudi edina reinjekcijska vrtina. Odvzem termalne vode je v letu 2011 znašal 3,29 mio m³. Prevladuje kaskadna izraba termalne vode, pri čemer ogrevanju prostorov in sanitarne vode sledi ogrevanje bazenskih kompleksov z balneologijo. Poznano je tudi ogrevanje rastlinjakov ter daljinsko ogrevanje. Obratovalni monitoring termalnih vrtin je v splošnem nezadovoljiv, geotermalni vodonosniki pa so zaradi več desetletnega odvzema podvrženi preizkoriščenju. Ugotovljeno stanje kaže na nujnost izvedbe ustreznih ukrepov za izboljšanje njihovega stanja, ki bodo omogočili nadaljnjo in hkrati večjo rabo termalne vode v prihodnosti.

Abstract

The presented research aims at identification of thermal water users in NE Slovenia, at finding type and amount of the produced thermal water as well as its utilization practice. The energetic overview has been upgraded by a description of current observational monitoring practice and thermal waste water management, but technological problems of thermal water use and their mitigation are discussed also. We have ascertained that 14 of 26 active geothermal wells tap the Mura Formation aquifer in which the only reinjection well is perforated also. Total thermal water abstraction summed to 3.29 million m³ in 2011. Cascade use of thermal water is abundant, where individual space and sanitary water heating is followed by heating of spa infrastructure and balneology. Greenhouse heating systems and district heating were also identified. Operational monitoring of these geothermal wells is generally insufficient, and geothermal aquifers are overexploited due to decades of historical water abstraction. All these facts indicate the need for applying appropriate measures which will improve their natural conditions as well as simultaneously enable further and even higher thermal water utilization in the future.

Uvod

Direktna raba je ena najstarejših, najpogostejših in najbolj vsestranskih oblik izkoriščanja geotermalne energije (DICKSON & FANELLI, 2003). Tako se izrabljajo številni nizkotemperaturni vodonosniki v sedimentacijskih bazenih (RYBACH, 2010), kar je značilno tudi za bližnjo Madžarsko (OTTLIK et al., 1981) in slovenski del Mursko-Zalskega bazena (NOSAN, 1973; ŽLEBNIK, 1975; KRALJ, 1999; LAPANJE et al., 2007; LAPANJE et al., 2010; RAJVER et al., 2010; RMAN et al., 2011). Raba teh virov je pogosto ekonomična le, kadar odvzem termalne vode bistveno presega naravni iztok iz geotermalnega sistema, to pa sčasoma povzroči izčrpanje razpo-

ložljivih zalog (RYBACH, 2003). S tem se hidro- in termodinamsko ter kemično stanje vodonosnikov spreminja (AXELSSON & GUNNLAUGSSON, 2000), kar je že ugotovljeno tudi v severovzhodni Sloveniji (PEZDIČ, 1991; KRALJ, 1993; KRALJ & KRALJ, 2000a; KRALJ & KRALJ, 2000b; KRALJ, 2001; KRALJ et al., 2009; RMAN et al., 2011; RMAN & SZŐCS, 2011; TÓTH et al., 2011). Naravna obnova sistema po prenehanju izkoriščanja je dolgotrajna in lahko obsega več sto let (MÉGEL & RYBACH, 2000; AXELSSON, 2010), zato je način izkoriščanja tega naravnega vira izredno pomemben. Razprava o trajnostni rabi razpoložljivih naravnih virov poteka že desetletja, pri čemer še vedno velja osnovno načelo, da sedanji razvoj ne sme ogroziti prihodnjega (ZDRU-

ŽENI NARODI, 1987). Podzemne vodne vire lahko rabimo na več načinov. Prvi koncept je poimenovan »varen odvzem« (*ang. safe yield*) in predvideva, da so vodonosniki obnovljivi (SOPHOCLEOUS, 2000). V tem primeru celotni odvzem podzemne vode ne sme presegati količine naravnega napajanja. V Vodni direktivi (2000/60/EC) se kot dodatne omejitve odvzema upoštevajo soodvisnost površinskih voda in ekosistemov od podzemne vode ter vdori kemijsko drugačne vode v vodonosnik. To seveda dodatno zmanjša razpoložljivo količino na višino »trajnostnega odvzema« (*ang. sustainable yield*), ki je bistveno nižji od napajanja. V primeru vračanja vode nazaj v vodonosnik se lahko odvzem ustrezno poveča ali celo doseže »ničelno izčrpanje zalog« (*ang. zero depletion*), a pri slednji se mora celotna odvzeta količina vračati v vodonosnik. Četrti način je naravovarstveno gledano najslabši in definira »načrtno izčrpanje zalog« (*ang. planned depletion*), pri čemer se vir v določenem in dogovorjenem časovnem obdobju namenoma preizkorišča (SOPHOCLEOUS, 2010). Na žalost je upravljanje z regionalnimi in čezmejnimi (Szócs et al., 2012) geotermalnimi vodonosniki v SV Sloveniji še vedno zelo pomanjkljivo, saj koncesije za rabo termalne vode večinoma niso podeljene, hkrati pa še ni vzpostavljen državni monitoring stanja globokih vodonosnikov (VIŽINTIN et al., 2008; RMAN et al., 2011).

Raziskava opisuje obstoječ način izrabe geotermalnih vodonosnikov SV Sloveniji in opozarja na njegove prednosti in slabosti. V članku smo najprej opisali značilnosti geotermalnih vodonosnikov v tem delu Slovenije ter načina pridobivanja in obdelave podatkov. Ker smo želeli identificirati sedanje in bodoče uporabnike termalne vode, smo ugotavljali s katerimi vrtnami pridobivajo termalno vodo, v kakšni količini ter kako jo uporabljajo. Izračun energetske izrabe in razpoložljive kapacitete tega vira energije smo nadgradili z opisom stanja obratovalnega monitoringa in ravnanja z odpadno vodo, dodali pa smo tudi informacije o tehnoloških težavah pri rabi vode in njihovem reševanju. Na podlagi interpretiranih podatkov je mogoče izpostaviti območja z dolgotrajnim odvzemom termalne vode, kjer je pričakovana oziroma opazovana sprememba stanja geotermalnih vodonosnikov zaradi izrabe največja. S tem opisom obstoječega stanja rabe smo želeli postaviti osnovo za nadaljnjo razpravo med uporabniki, upravljavci in investitorji o prihodnjem načinu izkoriščanja dragocenega naravnega vira, »trajnostnem« ali kakšnem drugačnem.

Geotermične značilnosti severovzhodne Slovenije

Regionalna geotermična slika je predstavljena v okviru različnih geotermičnih kart (HURTIG, 1992; RAVNIK et al., 1992; RAVNIK et al., 1995; RAJVER & RAVNIK, 2002; RAJVER et al., 2002). Območje severovzhodne Slovenije se v zadnjih letih intenzivno proučuje v okviru evropskih projektov, kot so Transthermal (LAPANJE et al., 2007), T-JAM

Seznam kratic:

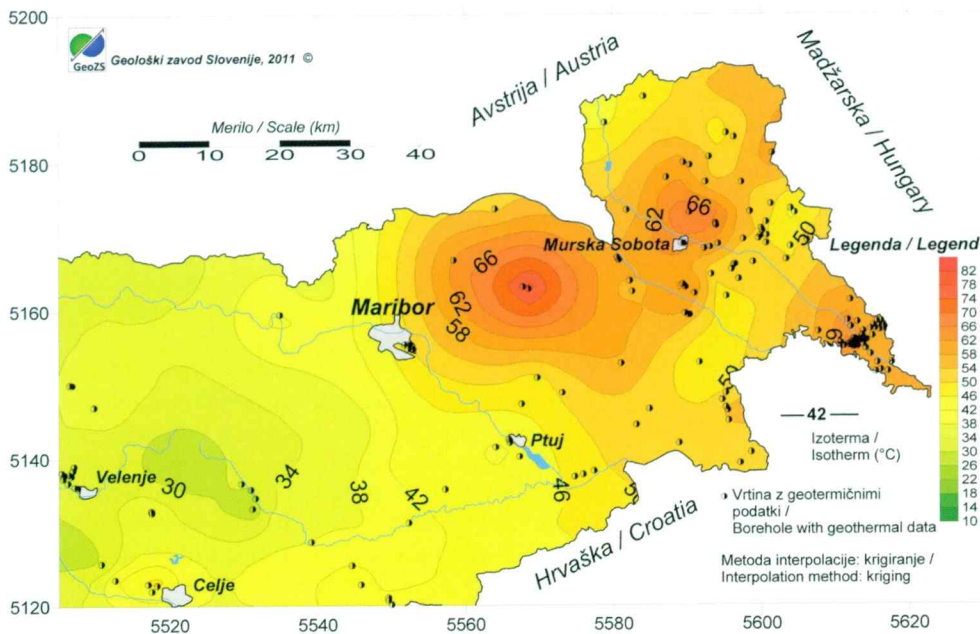
Ang. – angleško
Form. – formacija (*ang. Formation*)
GTT – površinska gostota toplotnega toka
GTČ – geotermalna toplotna črpalka
GHP – geothermal heat pump
l. – leto
mio – milijon

(LAPANJE et al., 2010; NÁDOR et al., 2012) in Trans-energy (GOETZL et al., 2012).

Ozemlje severovzhodne Slovenije leži na stičišču treh velikih regionalnih strukturnih enot, Vzhodnih Alp (Avstro-Alpidi), Panonskega bazena ter Južnih Alp kot dela Dinaridov (PLACER, 1999). Raznolikost struktur je opazna v geotermičnem polju več tisoč km² velike toplotne anomalije, katere vzrok tiči globoko v skorji ali v zgornjem plašču (CHAPMAN et al., 1979; ROYDEN et al., 1983b; CHAPMAN & RYBACH, 1985; ČERMÁK & BODRI, 1986). Prehod med debelejšo skorjo Alp v zahodni Sloveniji (do 43 km) ter tanjšo skorjo Panonskega bazena (do 28 km) je zelo strm, saj se v vzhodni Sloveniji globina do Mohorovičićeve diskontinuitete zmanjša za 8 km na dolžini 50 km (GOETZL et al., 2012).

Predneogenska podlaga je z višjo toplotno prevodnostjo nosilka toplote in s tem vir povišanih geotermičnih gradientov v neogenskih plasteh povsod, kjer je dvignjena proti površini.

Na območju Panonskega bazena so vrednosti površinske gostote toplotnega toka povišane in nad 100 mW/m² (RAJVER & RAVNIK, 2002). Poleg tanjše Zemljine skorje in možnih magmatskih intruzij je eden od vzrokov za višjo geotermalnost tudi lokalna konvekcija termalne vode skozi razpokane prelomne cone. Nanjo vplivata še radiogena produkcija toplote (RAVNIK, 1991) in advekcija podzemne vode (BODVARSSON, 1973). Najvišje vrednosti GTT, med 145 in 154 mW/m², so izračunane na lokacijah vrtin T-4 (Radenci), Dan-3 (Dankovci), Pg-9 (Petišovci) in BS-2 (Benedikt) ter vsebujejo nekaj konvektivne komponente (okvirno 35 do 45 mW/m²), ki vpliva na povišan temperaturni gradient v terciarnem paketu sedimentov. V nekaterih delih bazena so zaradi hitrega odlaganja velikih debelin hladnih sedimentov temperature in GTT za 10 do 30% nižje, kot bi bile ob počasnejši sedimentaciji (ROYDEN et al., 1983a). Temperaturne karte vseeno kažejo kar nekaj pozitivnih anomalij. V manjših globinah (0,5 do 1 km; sl. 1) je anomalija povezana z lokalnimi konvekcijskimi celicami termalne vode v tektonsko razpokani metamorfni podlagi pri Benediktu, ki se verjetno širi proti Radgoni in Radencem. Ponekod, predvsem na Murskosoboškem ekstenzijskem bloku med Lenartom in Moravskimi Toplicami ter pri Lendavi so pričakovane temperature v globini 500 m nad 38 °C in v globini 1000 m nad 58 °C. Anomalija se verjetno nadaljuje proti Mađžarski. Vzrok za anomalije v srednjih globinah (1 do 2 km) je najverjetneje termalna konvekcija vzdolž globokih prelomov v predterciarni podlagi, ki je dokazana v Benediktu in je možna tudi



Sl. 1.
Pričakovane temperature
v globini 1000 m pod površino
(posodobljeno po RAJVER &
RAVNIK, 2002)

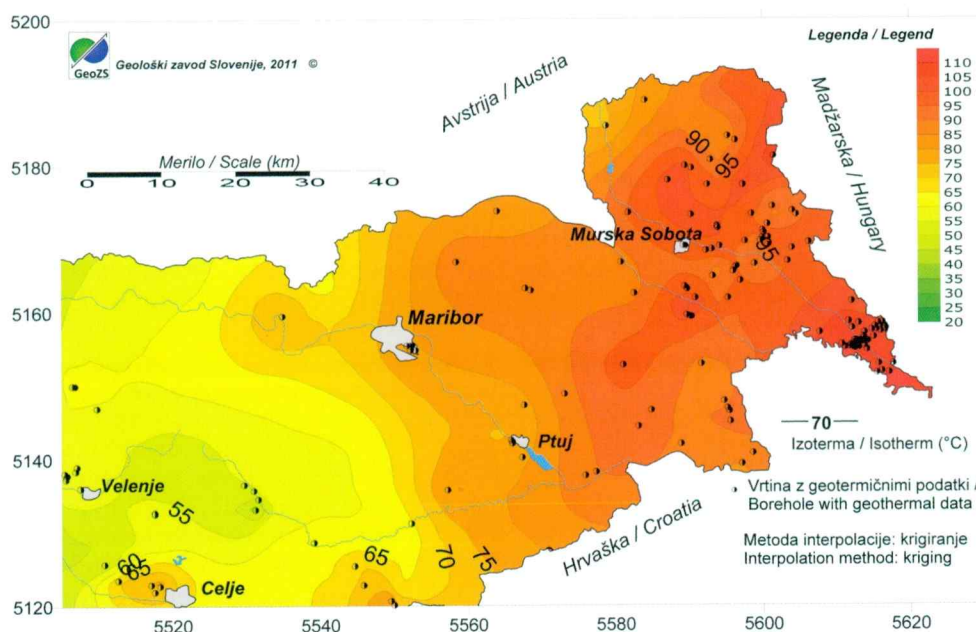
Fig. 1.
Expected temperatures at
a depth of 1000 m beneath
surface (updated after RAJVER
& RAVNIK, 2002)

na območju Moravskih Toplic in Murske Sobote, globlje pa pričakovana na območju Lendave in Murskega gozda. V globini 2000 m (sl. 2) se temperaturna slika spremeni, saj se temperature nad 90 °C pričakujejo v večjem delu Prekmurja, tudi na predelu Bočko-Ormoško-Budafaške antiforme oziroma njenega podaljška pri Lendavi, anomalija med Lenartom in Mursko Soboto pa ne izstopa več. V Ptujsko-Ljutomerski sinformi se poglobitev do podlage bazena odraža na rahlo znižanem geotermičnem gradientu v neogenskih sedimentih. Zato so temperature v globini 1000 m nekoliko nižje kot na antiformah v bližini.

Geotermalni vodonosniki severovzhodne Slovenije

Pomembni regionalni geotermalni vodonosniki na raziskanem območju so nastali zavoljo

povišane GTT in dovolj velike prepustnosti neogenskih sedimentov in kamnin. Poglavitno regionalno paleogeografsko strukturo predstavlja Mursko-Zalski sedimentacijski bazen, ki leži v zahodnem delu Centralne Paratetide (MARTON et al., 2002; FODOR et al., 2005; JELEN et al., 2006). Današnji relief predneogenske podlage je posledica večfaznih tektonskih procesov v razvoju bazena. Kamnine podlage so razlomljene v tektonske bloke in poljarke, ki so usmerjali neogensko sedimentacijo (FODOR et al., 2011). Njena prepustnost je povečana na območju regionalnih prelomnih struktur, vendar je njihovo napajanje pogosto omejeno kot npr. v Mariboru. V Benediktu je termalna voda ugotovljena v prelomnih conah metamorfih kamnin do globine 1,8 km, medtem ko je mezozojski dolomit v Zrečah in Korovcih (tu skupaj s Haloško formacijo) zajet do globine 2 km. Čeprav se domneva, da so te kamnine potencialni nosilci visokotemperaturnih geotermalnih



Sl. 2.
Pričakovane temperature
v globini 2000 m pod površino
Fig. 2.
Expected temperatures at
a depth of 2000 m beneath
surface

fluidov (KRALJ et al., 1994; RAJVER et al., 2012), le-ti še niso odkriti.

Na predneogensko podlago so odloženi plastoviti siliciklastični neogenski sedimenti (ŽLEBNIK, 1978), ki so glede na dinamični procesni pristop razvrščeni v pet formacij. Karpatijska in sp. badenijska (JELEN & RIFELJ, 2011) Haloška formacija sestoji v spodnjem delu iz debelozrnatih pobočnih in rečnih sedimentov. Kasneje je to področje zalilo morje. V plitvinah se je odlagal pesek, globlje pa mulj, ki sta deloma litificirala v peščenjak in meljevec ali laporovec. Pretežno drobnnozrnata sp. badenijska do sp. panonijska (JELEN & RIFELJ, 2011). Špiljska formacija je odložena deloma v rečnem, deloma pa v morskem okolju. V preteklosti sta bili Haloška in Špiljska formacija skupaj poimenovani kot Murskosoboška formacija (TURK, 1993; KRALJ & KRALJ, 2000b). Špiljska formacija sestoji iz prostorsko omejenih vodonosnih plasti peščenjaka, ki jih v globini 0,4 do 1,3 km zajemajo v Radencih in Moravskih Toplicah. Murska in Lendavska formacija (JELEN & RIFELJ, 2011) sta nastajali sočasno v panoniju in pontiju. Za Lendavsko je značilna globokomorska sedimentacija muljevca in laporovca z vložki turbiditnega peščenjaka v vzhodni polovici bazena. Zahodnejše so se odlagale peščene in prodnate plasti napredujočega deltnega čela, ki so bile kasneje pokrite z drobnozrnatimi sedimenti deltne ravnice. Deltni sistemi so zasipavali umikajoče se Panonsko jezero s severozahoda in severa proti jugovzhodu in so poimenovani Murska formacija. Izolirane vodonosnike Lendavske formacije izkoriščajo v Banovcih, Lendavi, Moravcih v Slovenskih goricah, Moravskih Toplicah in Murski Soboti v globini od 0,8 do 1,6 km. Hidravlično povezane peščene leče Murske formacije predstavljajo najizdatnejši nizkotemperaturni geotermalni vodonosnik v sedimentacijskem bazenu v Sloveniji, ki se izkorišča v Banovcih, Dobrovniku, Lendavi, Moravcih v Slovenskih goricah, Moravskih Toplicah, Murski Soboti, Petišovcih in Ptujju. Zajet je v globini 0,6 do 1,5 km. Zasipavanje bazena z rečnimi nanosi iz Alpskega predgorja je bilo aktivno od pliocena do pleistocena. Debelo in drobnozrnati sedimenti aluvialne ravnice Ptujsko-Grajske formacije so ugotovljeni med vzhodnim delom Slovenskih goric in vzhodnim Goričkem (JELEN & RIFELJ, 2011). Na Ptujju vsebujejo termalno vodo, drugod pa neogreto podzemno vodo. Hidravlično povezani vodonosniki v Murski in Ptujsko-Grajski formaciji so poimenovani tudi Termal 1 (KRALJ, 2004). Vsi opisani geotermalni vodonosniki so pretežno zaprtega hidravličnega tipa, le plikvartarni in kvartarni prodni vodonosniki na Murskem in Dravskem polju so odprti in povezani z rečno mrežo.

Naravni mineralni izviri se pojavljajo ob prelomnih strukturah v dolini Ščavnice in Nuskove ter okoli Radencev (PEZDIČ et al., 1995). Tam že desetletja pridobivajo in stekleničijo mineralno vodo, zaradi česar se je hitrost dreniranja podzemne vode proti območju črpanja močno povečala (PEZDIČ, 1991; PEZDIČ et al., 2006). Nove čezmejne regionalne raziskave so potrdile ugotovitev,

da se termalna voda v Murski formaciji (na Madžarskem je poimenovana Újfalu formacija) pretaka okvirno od zahoda proti vzhodu s hitrostjo 2–3 mm na leto (TÓTH et al., 2011). Zahodno od Blatnega jezera se ta termalna voda drenira iz zgornjemiocenskih peskov v zakrasele karbonatne kamnine v podlagi sedimentacijskega bazena, nato pa izvira v termalnem jezeru Hévíz, kjer je njen delež pritoka približno 5 % (TÓTH, 2009).

Metodologija

V Sloveniji je termalna voda opredeljena v Zakonu o vodah kot podzemna voda, ki izteka iz izvira ali vrtine in »ki ustreza predpisanim kriterijem« (ANONIMNI, 2000). Ti še niso definirani v ustreznem podzakonskem aktu, a v praksi se kot spodnja temperaturna meja za to oznako uporablja 20 °C. Ta ločnica je uradno opredeljena tudi v Avstriji (ÖWAV, 2010) in na Slovaškem (NATIONAL COUNCIL OF THE SLOVAK REPUBLIC, 2007), medtem ko je na Madžarskem spodnja meja za omenjeno oznako 30 °C (HUNGARIAN PARLIAMENT, 1995). Severovzhodna Slovenija je ena najperspektivnejših regij za rabo geotermalne energije. Za opis stanja trenutne rabe geotermalnih vodonosnikov smo izvedli terenski popis rabe termalne vode pri uporabnikih. Z njimi smo dopolnili arhivske podatke o stanju, namenu uporabe in termalni moči posameznih virov, ki se sistematično zbirajo in interpretirajo že več kot petnajst let (RAJVER et al., 1995; KRALJ & RAJVER, 2000; RAJVER & LAPANJE, 2005; RAJVER et al., 2010). Najnovejši zbor energetskih informacij kaže, da raba geotermalne energije narašča predvsem zaradi večjega števila vgrajenih geotermalnih toplotnih črpalk, predvsem za individualne stavbe, in ne toliko zaradi dodatnega zajema termalne vode (LAPANJE et al., 2010).

Arhivske podatke o geotermalnih vrtinah smo v letih 2008–2011 dopolnili z različnimi skupinami parametrov. *Osnovni podatki o uporabniku termalne vode* sestojijo iz njegovih kontaktnih podatkov, kot so ime, naslov in spletna stran podjetja ter njihovi razpoložljivi vodni viri, torej geotermalne vrtine ali izviri. Opis termalnega vira sestoji iz več skupin. *Tehnične lastnosti objekta* obsegajo lokacijo vodnega vira, čas, namen in globino vrtanja ter cevovod, usmerjenost vrtine in globino odprtih intervalov. Iz njih smo določili glavne zajete vodonosnike, njihove *hidrogeološke lastnosti* pa smo opredelili s tipom poroznosti, izdatnostjo in temperaturo vode ter ugotovljenim medsebojnim vplivom med vrtinami. *Proizvodne značilnosti* vsebujejo podatke o obdobju delovanja vrtine, načinu pridobivanja vode, dejanskem letnem odvzemu oziroma opredeljenem v koncesijah ter tehnoloških težavah in spremembah zaradi rabe. Vpliv odvzema podzemne vode na količinsko in kakovostno stanje geotermalnih vodonosnikov je možno oceniti le, če so na voljo kvalitetni podatki spremljanja njihovega stanja, zato smo preverili delovanje *opazovalnega sistema geotermalnih vrtin* oziroma pogostost in vrsto vzpostavljenega obratovalnega monitoringa

piezometrične gladine, odvzema, temperature in kemijske sestave termalne vode. Za grobo oceno vpliva rabe termalne vode na okolje smo popisali *ravnanje z odpadno termalno vodo*, njeno temperaturo na iztoku v okolje ter lokacijo izpusta.

Zbrane podatke smo poenotili in organizirali v MS Office Access in SQL podatkovnih bazah, pridobljene informacije pa interpretirali in prikazali z različnimi statističnimi in prostorskimi tehnikami z računalniškimi programi MS Office Excel, Statistica in ArcGIS. Prostorski podatki o vrtinah so dostopni na spletnih straneh http://akvamarin.geo-zs.si/t-jam_boreholes/ in na Geopediji (GEOPEDIA.SI, 2006), interaktivna podatkovna baza uporabnikov na spletnem naslovu <http://akvamarin.geo-zs.si/users/>, medtem ko so interpretirani podatki o rabi termalne vode dostopni kot poročila v pdf datotekah preko spletnih strani <http://www.t-jam.eu> in <http://transenergy-eu.geologie.ac.at/>.

Rezultati

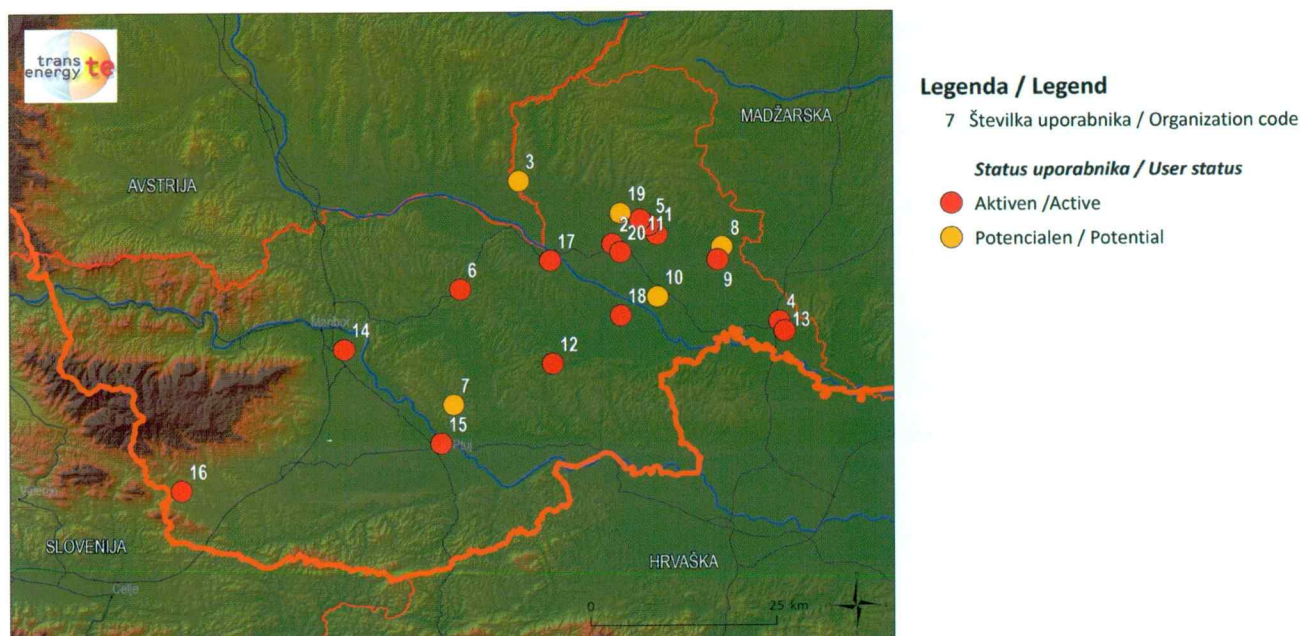
V raziskavi smo omejili 3941 km² veliko območje vzhodno od Zreč in Maribora, ki pokriva slovenski del Mursko-Zalskega bazena (sl. 3). V njem smo popisali 15 uporabnikov, ki so v l. 2011 pridobivali termalno vodo iz 26 geotermalnih vrtin, z eno pa jo vračali v vodonosnik. Poleg njih smo v raziskavo vključili 5 potencialnih uporabnikov (preglednica 1). Ugotovili smo, da je gostota aktivnih uporabnikov približno eden na 250 km², medtem ko v povprečju obratuje ena geotermalna vrtina na 145 km² (ustreza velikosti Občine Moravske Toplice). Zaradi geoloških in demografskih danosti ter različne stopnje raziskanosti geotermalnih vodonosnikov porazdelitev obstoječih uporabnikov seveda ni enotna. Največ jih je v Murski Soboti in Moravskih Topli-

cah, kjer odvzem termalne vode sega že več desetletij v preteklost.

Poleg naštetih vrtin velja omeniti, da so bile številne opuščene raziskovalne naftne vrtine po l. 2000 sanirane (sl. 4). Tri izmed njih služijo kot opazovalne točke raziskovalnega monitoringa stanja vodonosnika v Murski formaciji, ostale pa so pripravljene na izrabo (GEOPEDIA.SI, 2006; MAUČEC, 2006; LAPANJE et al., 2011). Poleg obstoječih, je bila konec l. 2011 izvrtana nova geotermalna vrtina Re-1g v Renkovcih, ki je še v testni fazi, jeseni 2012 pa je bila dokončana tudi nova vrtina Sob-3g v Černelavcih pri Murski Soboti (KRALJIĆ & TURK, 2010).

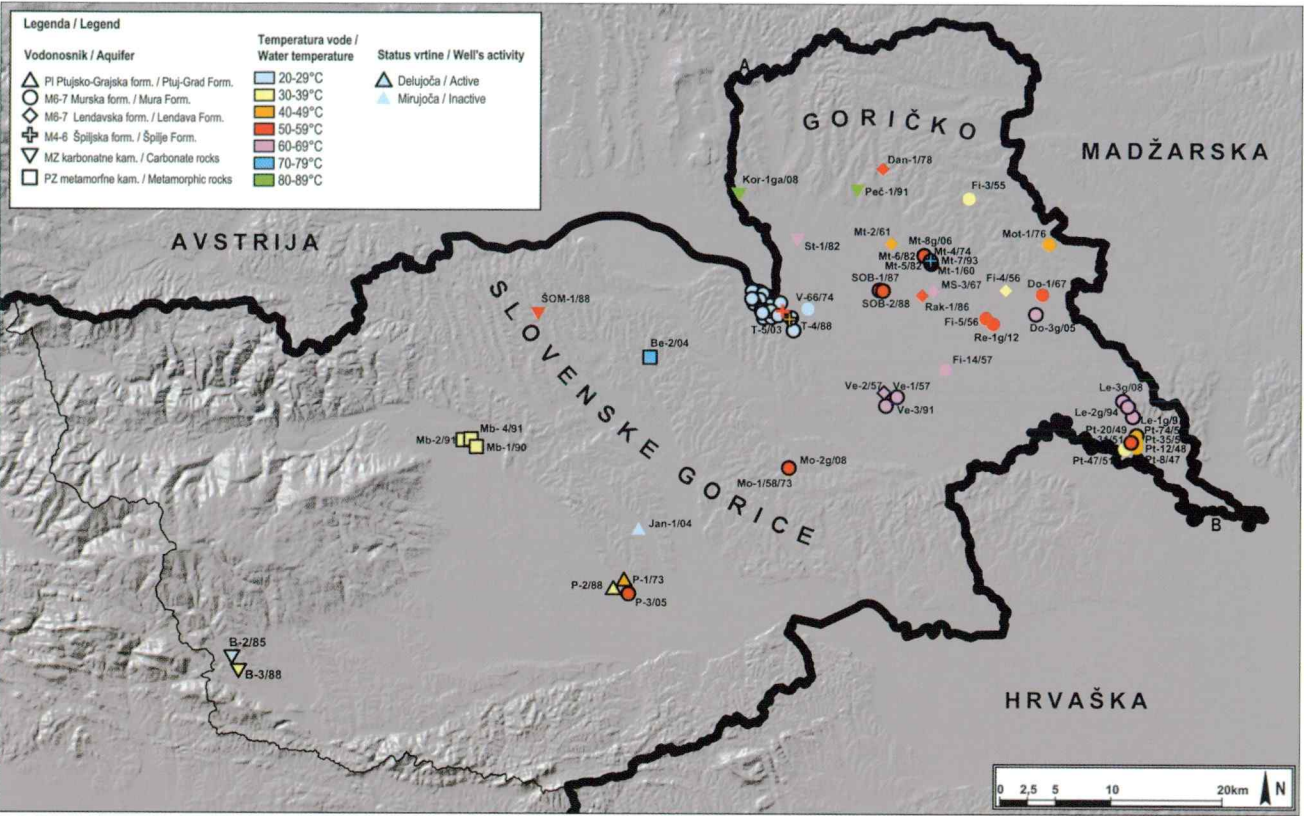
Odvzem termalne vode skozi čas

Na območju SV Slovenije so do 60. let prejšnjega stoletja izkoriščali le mineralno vodo v Radencih (ZLEBNIK, 1978). Vodonosniki v metamorfnih kamninah v podlagi so bili zajeti šele l. 1992 v Mariboru in l. 2006 v Benediktu v Slovenskih goricah, medtem ko je dolomitni vodonosnik že od 80. let prejšnjega stoletja zajet v Zrečah. Njihov skupni odvzem je l. 2011 dosegel 0,160 mio m³. Pri neuspešnih raziskavah nafte in plina v Pomurju so kmalu ugotovili, da je »črna naftna« voda iz Špiljske formacije zdravilna (CIGIT, 1975; SZABO, 1975), zato se je po letu 1962 pričel razvoj zdravilišč v Banovcih, Radencih in Moravcih (PLENIČAR, 1954; LAPANJE & RMAN, 2009). Lokalni pomen tega razvoja se kaže celo v preimenovanju kraja Moravci v Moravske Toplice l. 1984 (SEVER, 1993). Ko so kopališča pričela obratovati skozi celo leto, se je odvzem vode nekoliko povečal (sl. 5), a zaradi tehnološko zahtevnejše izrabe ni večjih novih zajemov. V letu 2011 je odvzem te vode dosegel 0,210 mio m³. Le v Banovcih se pridobiva voda pretežno iz Lendavske formacije v količini, ki je

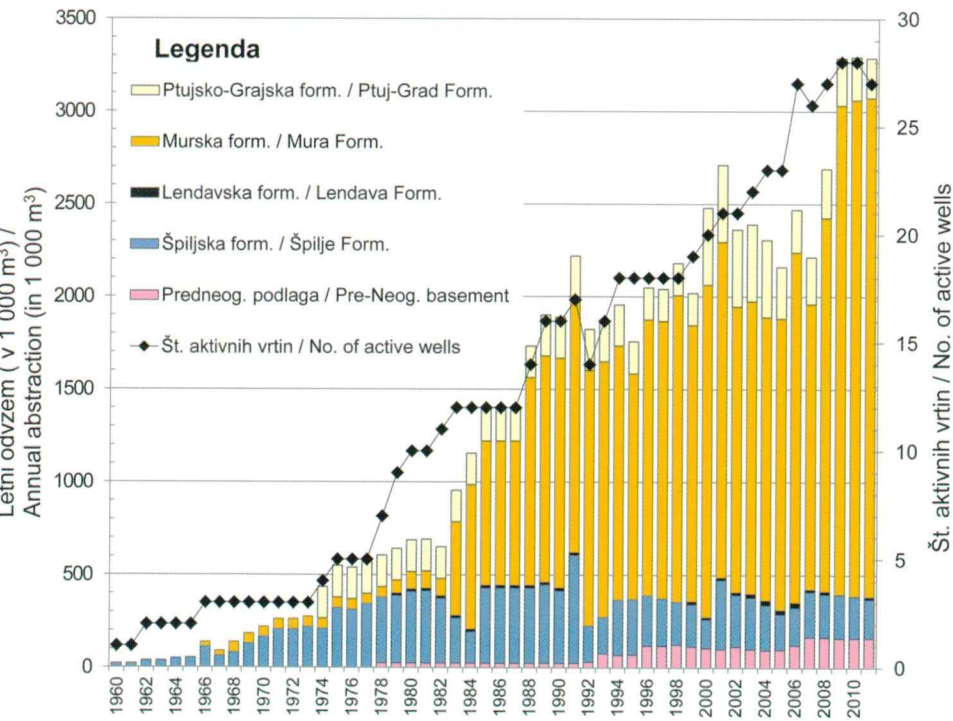


Sl. 3. Obstoječi in potencialni uporabniki termalne vode v SV Sloveniji

Fig. 3. Active and potential thermal water users in NE Slovenia



Sl. 4. Geotermalne vrtnine na raziskanem območju glede na prevladujoči vodonosnik in temperaturo vode na ustju
Fig. 4. Geothermal wells in the investigated area classified by prevailing aquifer and water wellhead temperature



Sl. 5. Število aktivnih vrtn in skupni letni odvzem termalne vode iz geotermalnih vodonosnikov v SV Sloveniji v obdobju 1960–2011
Fig. 5. Number of active geothermal wells and total annual thermal water abstraction from geothermal aquifers in NE Slovenia in period 1960–2011

l. 2011 dosegla 0,014 mio m³. Iz Murske formacije črpajo »belo« vodo, ki je bila okoli l. 1970 zajeta z opuščenimi naftnimi vrtinami v Moravcih v Slovenskih goricah in Petišovcih. Prva geotermalna vrtna v tej formaciji je bila izdelana l. 1983 v Moravcih in z njo se je pričela raba geotermalne energije za ogrevanje. V naslednjem desetletju so

sledile nove vrtnine na tej lokaciji, v Banovcih in Murski Soboti, po letu 2000 pa še v Dobrovniku, Lendavi in Renkovcih ter na Ptuj. Peski Murske formacije so zelo izdatni. Voda iz te formacije ne povzroča tehnoloških težav, zato je njen letni odvzem visok in je v l. 2011 dosegel 2,690 mio m³. Nekaj termalnih vrtn poleg Murske zajema tudi

Preglednica 1. Seznam uporabnikov termalne vode na območju SV Slovenije (številke so prikazane na slikah 4–16)

Table 1. List of thermal water users in the NE Slovenia (codes are used on figures 4–16)

Št. vrtine / Well's code	Št. uporabnika / User code	Ime uporabnika / Organization name	Vir termalne vode / Thermal water source	Pridobivanje vode / Water production
1	16	Unior Kovaška industrija d.d.	B-2/85	Da
2	16	Unior Kovaška industrija d.d.	B-3/88	Da
3	6	Občina Benedikt	Be-2/04	Da
4	8	Občina Dobrovnik	Do-1/67	Ne
5	9	Ocean Orchids, d.o.o.	Do-3g/05	Da
6	10	Panonska energetika, upravljanje z energijo d.o.o.	Fi-14/57	Ne
7	7	Občina Destrnik	Jan-1/04	Ne
8	3	Kotrman d.o.o.	Kor-1ga/08	Ne
9	13	Terme Lendava d.d.	Le-1g/97	Da
10	4	Nafta Geoterm, d.o.o.	Le-2g/94	Da
11	4	Nafta Geoterm, d.o.o.	Le-3g/08	Reinjekcija
12	14	Terme Maribor, d.d.	Mb-1/90	Da
13	14	Terme Maribor, d.d.	Mb-2/91	Da
14	14	Terme Maribor, d.d.	Mb-4/91	Da
15	12	Segrap d.o.o.	Mo-1/58/73	Ne
16	12	Segrap d.o.o.	Mo-2g/08	Da
17	5	Naravni park Terme 3000, d.d.	Mt-1/60	Da
18	19	Zdravilišče Rimska Čarda d.o.o.	Mt-2/61	Ne
19	5	Naravni park Terme 3000, d.d.	Mt-4/74	Da
20	5	Naravni park Terme 3000, d.d.	Mt-5/82	Ne
21	5	Naravni park Terme 3000, d.d.	Mt-6/82	Da
22	5	Naravni park Terme 3000, d.d.	Mt-7/93	Da
23	11	Počitek – užitek, turistično podjetje d.o.o.	Mt-8g/06	Da
24	15	Terme Ptuj d.o.o.	P-1/73	Da
25	15	Terme Ptuj d.o.o.	P-2/88	Da
26	15	Terme Ptuj d.o.o.	P-3/05	Da
27	13	Terme Lendava d.d.	Pt-20/49	Da
28	13	Terme Lendava d.d.	Pt-74/50	Da
29	2	Komunala, Javno podjetje, d.o.o.	Sob-1/87	Da
30	20	Zvezda Diana d.o.o.	Sob-2/88	Da
31	17	Zdravilišče Radenci d.o.o.	T-4/88	Da
32	17	Zdravilišče Radenci d.o.o.	T-5/03	Ne
33	18	Terme Banovci	Ve-1/57	Da
34	18	Terme Banovci	Ve-2/57	Da
35	18	Terme Banovci	Ve-3/91	Da
-	1	Grede Tešanovci, d.o.o.	Termalni odpad Term 3000	-

Preglednica 2. Aktivne in mirujoče geotermalne vrtine v SV Sloveniji v letu 2011

Table 2. Active and inactive geothermal wells in the NE Slovenia in 2011

Stanje vrtine / Well's status		Mirujoča / Inactive	Aktivna / Active	Reinjekcijska / Reinjection	Skupaj / Total
Neogenski vodonosniki (formacije) / Neogene aquifers (formations)	Ptujsko-Grajska / Ptuj-Grad	1	2	0	3
	Murska / Mura	13	14	1	28
	Lendavska / Lendava	5	1	0	6
	Špiljska / Špilje	3	3	0	6
Predneogenski vodonosniki / Pre-Neogene aquifers	Karbonatne kamnine / Carbonate rocks	3	2	0	5
	Metamorfne kamnine / Metamorphic rocks	0	4	0	4
Skupaj / Total		25	26	1	52

Lendavsko formacijo, a je delež vode iz slednje večinoma pod 5 %. Prva namenska geotermalna vrtina na tem območju je bila izvrtana l. 1973 na Ptujju ter je zajela termalno vodo v Ptujsko-Grajski formaciji. Zaradi relativno nizke temperature vode je njen odvzem še vedno nizek in je l. 2011 dosegel 0,215 mio m³.

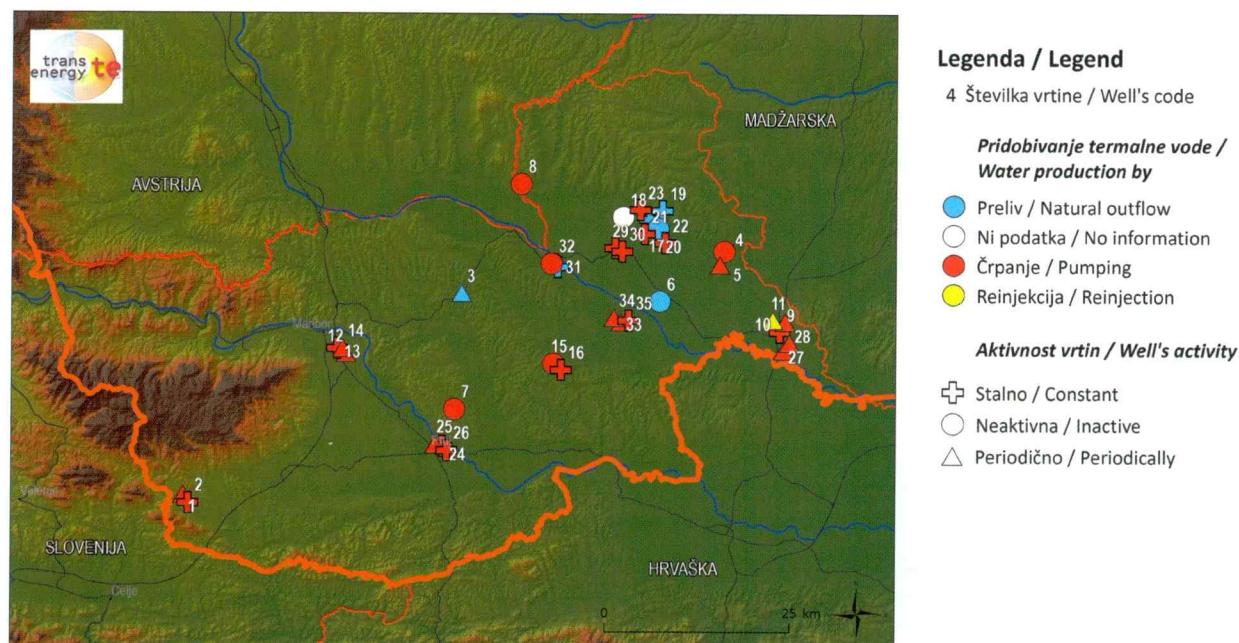
Povzamemo lahko, da je bilo l. 2011 na raziskanem območju SV Slovenije stalno ali občasno aktivnih 26 proizvodnih in 1 reinjekcijska vrtina (preglednica 2), s katerimi je bilo pridobljenih 3,289 mio m³ termalne vode. Poleg njih se je iz napajalnega zaledja regionalnih geotermalnih vodonosnikov z več kot 300 plitvimi vodnjaki načrpalo več milijonov m³ pitne in mineralne vode, katerih skupni letni odvzem po vodnih dovoljenjih lahko doseže 22 mio m³, s čimer je napajanje termalne vode bistveno znižano. Pričakovano je, da bo odvzem termalne vode naraščal, saj zaprosena letna količina odvzema v koncesijah za rabo termalne vode (z upoštevanjem 100 % reinjekcijo v Lendavi) presega 6 mio m³ (RMAN et al., 2011). Večina novih uporabnikov odvzema termalno vodo iz Murske formacije in nadaljevanje tega trenda pričakujemo tudi v prihodnje.

Pridobivanje termalne vode

Način pridobivanja termalne vode je odvisen predvsem od hidravličnega stanja geotermalnega vodonosnika (sl. 6). Voda iz arteških razpoklinskih vodonosnikov v podlagi sedimentacijskega bazena v Zrečah in Mariboru se pridobiva s črpalkami. Skupni optimalni odvzem v Zrečah je približno 8 l/s, v Mariboru pa zaradi omejenega napajanja ni mogoče odvezati več od 1,5 l/s. V Benediktu je zaradi velike vsebnosti prostega CO₂ učinek plinskega dviga (*ang. gas lift*) zelo izrazit in voda preliva s približno 8 l/s. Termal-

na voda iz razpoklinsko-medzrnskih vodonosnikov Špiljske in Lendavske formacije preliva iz vrtin v Radencih, Banovcih in Moravskih Toplicah zaradi plinskega in toplotnega (*ang. thermo lift*) dviga. V prvem primeru je iztok pod 2 l/s, v drugih dveh pa nekoliko večji, a še vedno le do 5 l/s iz posamezne vrtine. Termomineralna voda vsebuje veliko CO₂, zato morajo v vrtine dodajati inhibitor, ki preprečuje obarjanje mineralov v njej in v cevovodu sistema za izrabo. Na ustju vrtin prosti CO₂ ločujejo in odvajajo v atmosfero. V Moravskih Toplicah voda vsebuje tudi pomembno količino ogljikovodikov. Termalna voda iz medzrnskega vodonosnika Murske formacije večinoma še naravno preliva zaradi toplotnega dviga, a je količina iztoka bistveno nižja kot ob pričetku rabe. Začetna izdatnost je bila do 60 l/s, sedanjí največji odvzem s črpalko pa je v razponu 10–30 l/s, odvisno od posamezne vrtine. Voda se uporablja predvsem za ogrevanje, kjer je potreben pretok reda velikosti 10 l/s, in to je mogoče zagotoviti le z uporabo potopnih črpalk. Ta voda skorajda ne vsebuje prostega CO₂ in je tehnološko nezahtevna za izrabo. Pri delovanju premočnih črpalk ponekod iz vrtin iznaša drobnozrnato frakcijo, ki jo je potrebno pred vtokom termalne vode v sistem odstraniti s filtriranjem. Tudi v Lendavi, kjer reinjektirajo toplotno izrabljeno vodo, je vodonosnik še arteški, zato za vtiskanje uporabljajo kompresorje. Vrtine v Ptujsko-Grajski formaciji skorajda ne prelivajo več, odvzem s črpalko pa dosega povprečno 8 l/s.

S črpalnimi poizkusi so bile dokazane hidravlične povezave med bližnjimi vrtinami, od tega 2 posegata v Ptujsko-Grajsko formacijo, 17 v Mursko, 2 v Špiljsko in 5 v vodonosnike v predneogenski podlagi. Ena še neaktivna vrtina ima odprte intervale sočasno v Haloški formaciji in predneogenski podlagi, dve obenem posegata v Špiljsko in Lendavsko formacijo, v desetih pa je



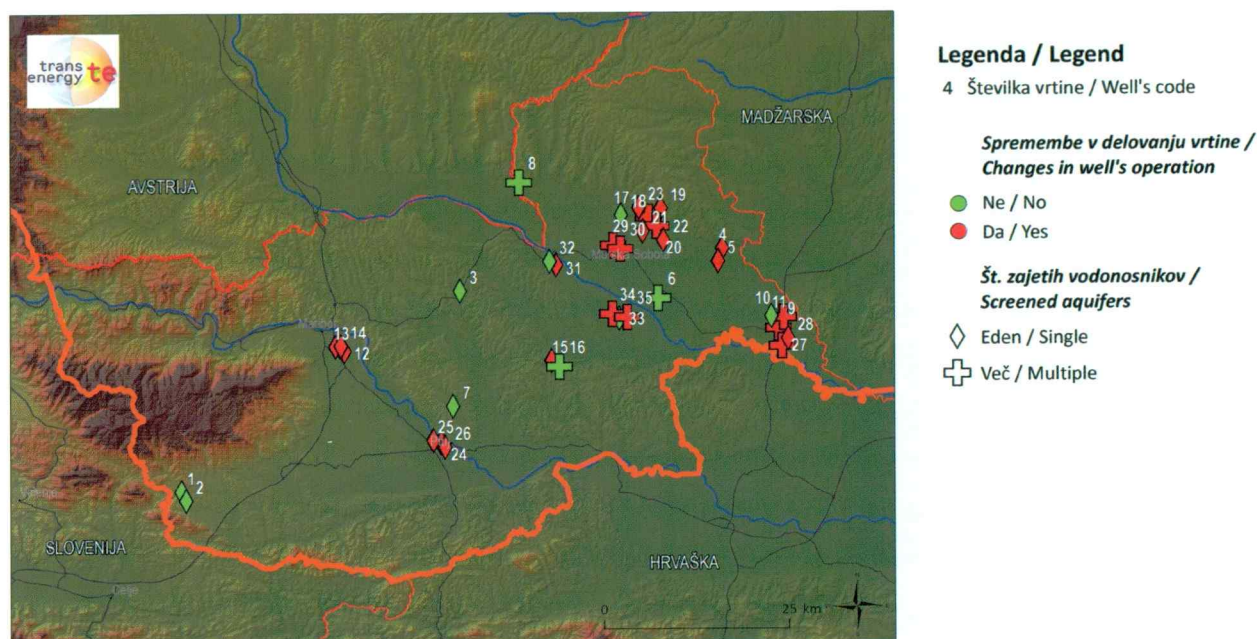
Sl. 6. Način pridobivanja termalne vode ter obdobje obratovanja vrtin
Fig. 6. Thermal water abstraction type and period of well's activity

ob Lendavski zajeta tudi Murska formacija. Kar 9 aktivnih vrtin (35 %) sočasno pridobiva vodo iz dveh formacij (sl. 7). To je v nasprotju s smernicami Vodne direktive (2000/60/EC), saj omogoča umetno pretakanje vode med sicer hidravlično ločenimi vodonosniki. S pravilno tehnično izgradnjo vrtine je možen hkraten ločen odvzem vode iz več odprtih intervalov, kar potrjuje uspešno delovanje vrtine Mt-8g v Moravskih Toplicah.

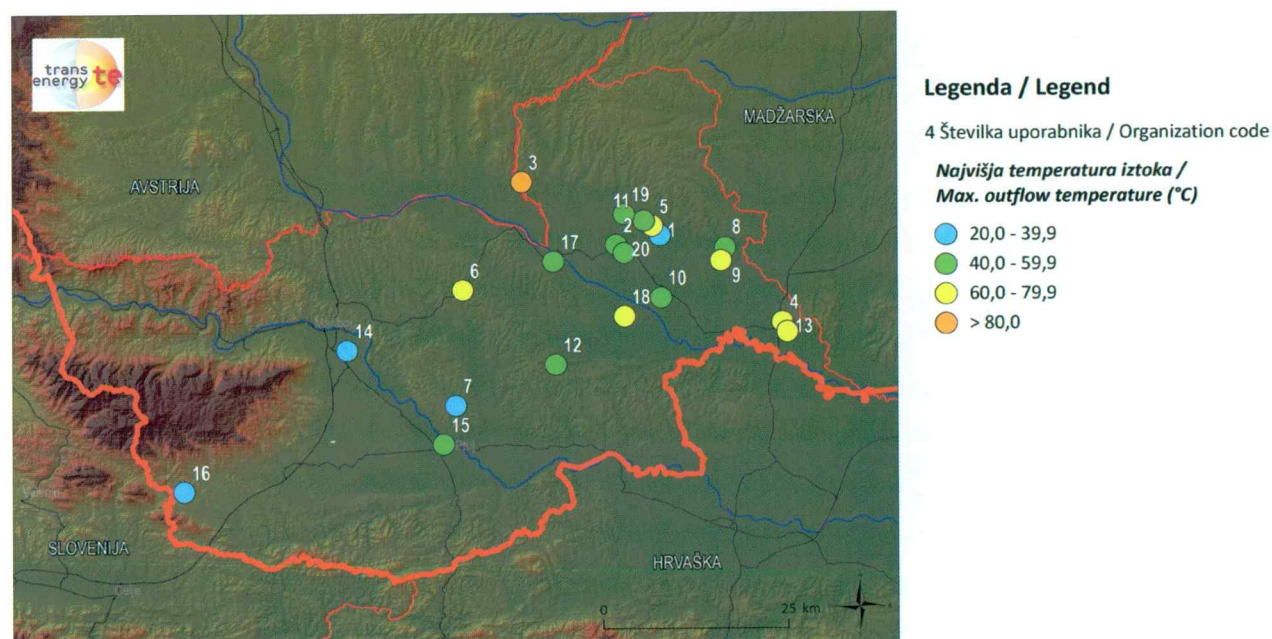
V letu 2011 je bilo stalno aktivnih 15 vrtin, občasno pa še 12 (sl. 6). Osem jih je obratovalo v hladnejšem delu leta, pretežno med oktobrom in aprilom, saj se je voda uporabljala za ogrevanje prostora ter rastlinjakov. Nasprotno so v Zrečah

in na Ptuj poleti aktivirali nekatere vrtine za polnjenje dodatnih bazenov v letnih kopališčih.

Zaradi dolgotrajnega odzema termalne vode so na 24 geotermalnih vrtinah opazili hidravlične spremembe (sl. 7). V primeru neustrezno izdelanih, vzdrževanih ali uporabljenih vrtin, še posebej starejših, so lahko spremembe posledica poslabšanja stanja same vrtine ter bližnje okolice, ne pa stanja vodonosnika. Zato bodo za natančen opis regionalnega stanja vodonosnikov ter vzrokov in posledic opaženega potrebne nadaljnje raziskave. Kljub temu lahko omenimo, da so spremembe najpogosteje izražene kot znižanje piezometrične gladine podzemne vode, zaradi če-



Sl. 7. Število zajetih vodonosnikov v vrtini ter opažene spremembe v njenem delovanju
Fig. 7. Number of captured aquifers in a single well and noticed changes in its operation



Sl. 8. Najvišja temperatura iztoka termalne vode po uporabnikih
Fig. 8. The highest thermal water outflow temperature at user sites

sar je bilo potrebno v prvotno samoizlivne vrtine namestiti črpalko ali pa jo spustiti globlje. V Moravskih Toplicah (Szűcs et al., 2012) in Murski Soboti (KRALJ & KRALJ, 2000a; KRALJ et al., 2009) je dokazano tudi spreminjanje kemijske sestave vode. Skoraj povsod voda preliha v bistveno manjši količini kot ob pričetku rabe, medtem ko spremembe temperature podzemne vode še niso bile spremljane dovolj sistematično, da bi lahko ocenili njihovo velikost. Hidravlične spremembe so ugotovljene v vseh geotermalnih vodonosnikih v SV Sloveniji, njihova izrazitost pa je odvisna od trajanja izkoriščanja in prostorske porazdelitve proizvodnih vrtin.

Temperatura termalne vode

Potreba po termalni vodi je pogojena z namenom njene uporabe in temperaturo iztoka. Najvišja ugotovljena temperatura na ustju trenutno neaktivne vrtine dosega 83 °C v Korovcih (sl. 8), kjer sta zajeta vodonosnika Haloške formacije in karbonatnih kamnin v podlagi sedimentacijskega bazena (sl. 4). Voda s temperaturo 72 °C se uporablja v Benediktu, kjer so zajete

metamorfne kamnine v podlagi, in Moravskih Toplicah, kjer izteka »črna naftna« voda iz Špiljske formacije. Visoko temperaturo dosega tudi termalna voda iz Murske formacije v Banovcih (62 °C), Dobrovniku (62 °C) in Lendavi (66 °C). Ostali uporabniki, ki izkoriščajo Murski vodonosnik, in nekatere mirujoče vrtine zajemajo vodo z nekoliko nižjo temperaturo iztoka, do 50 °C. Termalna voda iz metamorfnih kamnin v Mariboru se zaradi nizkega pretoka do ustja vrtine ohladi na 39 °C, medtem ko je voda iz dolomita v Zrečah še hladnejša in dosega okoli 30 °C. V Janežovcih je v Ptujsko-Grajski formaciji identificirana termalna voda z 28 °C na ustju vrtine, vendar se ne uporablja. Enako velja za vrtino v Rimski Čardi, kjer iz Lendavske formacije teče termalna voda s 36 °C na ustju vrtine.

Uporaba termalne vode

Raba termalne vode je v največji meri povezana z njeno temperaturo. Uporaba geotermalne toplote je bolj raznovrstna, kot je bila pred leti (RAJVER et al., 1995; KRALJ & RAJVER, 2000; RAJVER & LAPANJE, 2005; RAJVER et al., 2010), a še ve-

Preglednica 3. Izkoriščanje geotermalne energije za direktno rabo toplote v SV Sloveniji v l. 2010 (brez geotermalnih toplotnih črpalk). Številka uporabnika je enaka kot v preglednici 1.

Table 3. Utilization of geothermal energy for direct heat use in NE Slovenia in 2010 (without GHPs). User code is the same as in Table 1.

Štev. uporabnika / User code	Kategorija / Type ¹⁾	Najvišja možna raba / Max. utilization			Kapaciteta / Capacity (MWt)	Letno koriščenje / Annual Utilization		
		Pretok / Flow rate (kg/s)	Temp. / Temp. (°C)			Povp. pretok / Ave. Flow (kg/s)	Energija / Energy (TJ/yr)	Razpoložljivost/ Capacity Factor
			Vhodna / Inlet	Izhodna / Outlet				
1	G	27,8	40	30	1,16	8,3	11,0	0,30
2	D,B	10,3	49	30	0,82	9,8	24,6	0,95
4	D	25	66	40	2,72	15,0	51,4	0,60
5	H,C,B	87	61	15	15,65	30,9	126,8	0,26
6	D	10	72	55	0,71	2,1	3,1	0,14
9	G	30	62	15	5,90	2,8	17,0	0,09
11	H,C,B	12	60	29	1,56	3,8	14,5	0,30
12	H,B	22	48	27	1,97	7,1	20,5	0,33
13	H,B	14	59	30	1,70	6,7	26,1	0,49
14	B	1,5	39	13	0,16	1,4	4,8	0,95
15	H,B	23	41	29	1,15	14,0	24,6	0,68
16	H,B	27	31	26	0,57	15,0	9,0	0,50
17	B	6,5	42	28	0,38	0,3	0,5	0,04
18	H,B	24	62	15	4,59	3,7	15,8	0,11
20	H,B	12	43	22	1,05	4,5	10,6	0,32
Skupaj/Total		331,6			40,09	125,36	360,4	0,29

¹⁾ Kategorije rabe / Types of use:

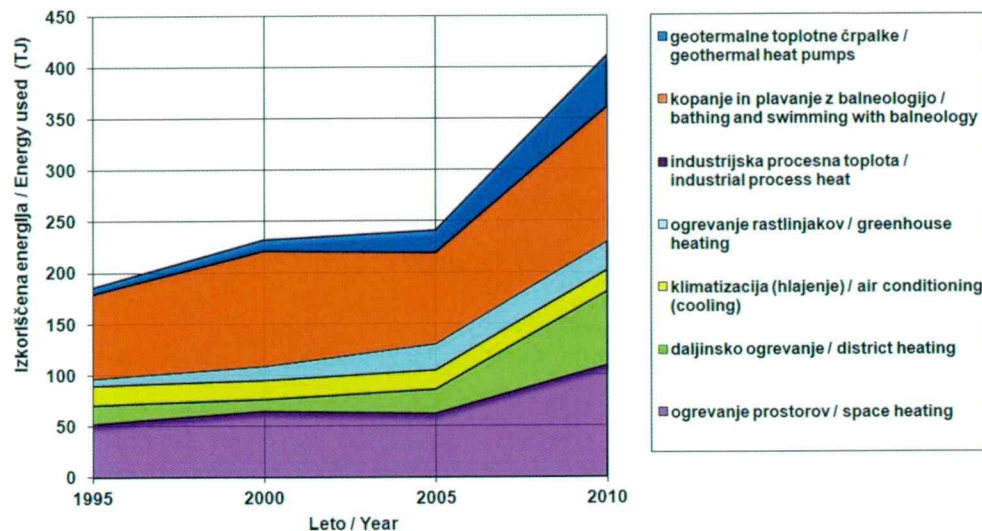
H = Individualno ogrevanje prostorov (vse razen toplotnih črpalk) / Individual Space Heating (other than heat pumps)

D = Daljinsko ogrevanje (vse razen toplotnih črpalk) / District Heating (other than heat pumps)

C = Klimatizacija zraka (hlajenje) / Air Conditioning (cooling)

B = Kopanje in plavanje (vklj. balneologija) / Bathing and Swimming (incl. Balneology)

G = Segrevanje rastlinjakov in zemlje / Greenhouse and Soil Heating

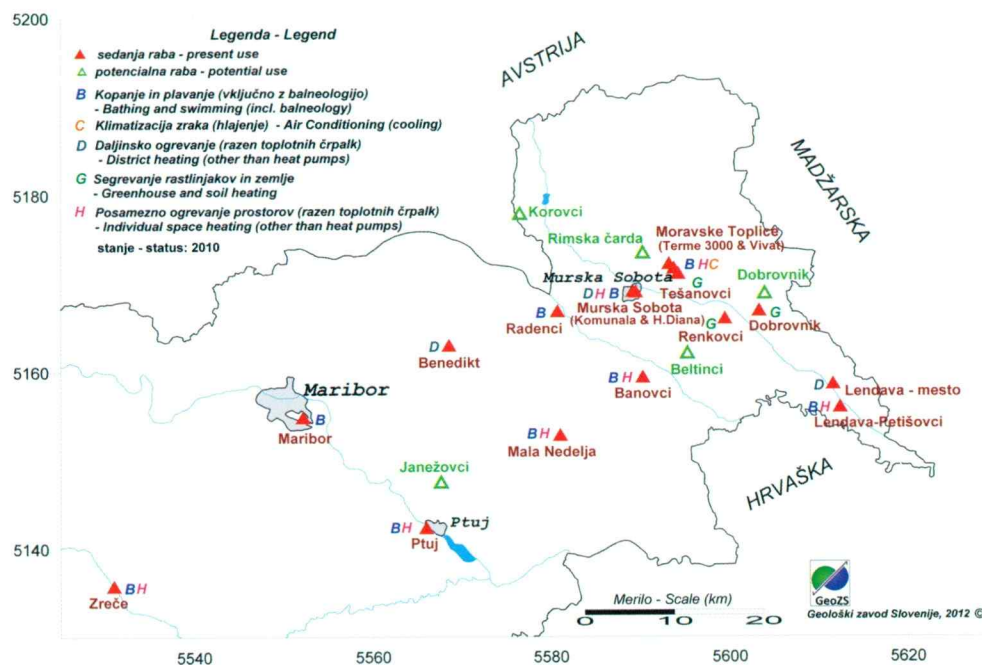


Sl. 9.

Izkoriščena geotermalna energija v SV Sloveniji v obdobju 1995–2010; skupna izkoriščena energija v letu 2010: 411 TJ

Fig. 9.

Geothermal energy used in NE Slovenia in a period 1995–2010; total energy used in 2010: 411 TJ



Sl. 10.

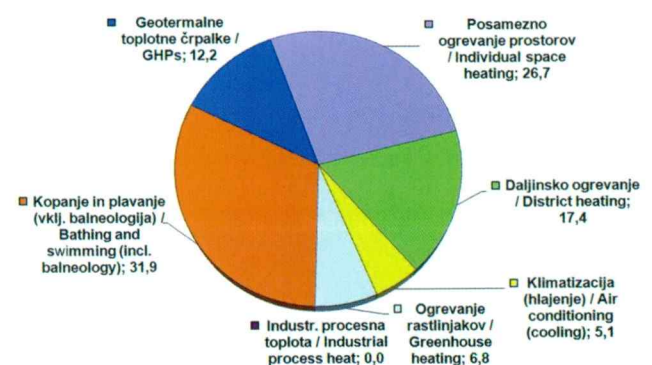
Vrste neposredne rabe toplote termalne vode

Fig. 10.

Categories of direct heat use of thermal water

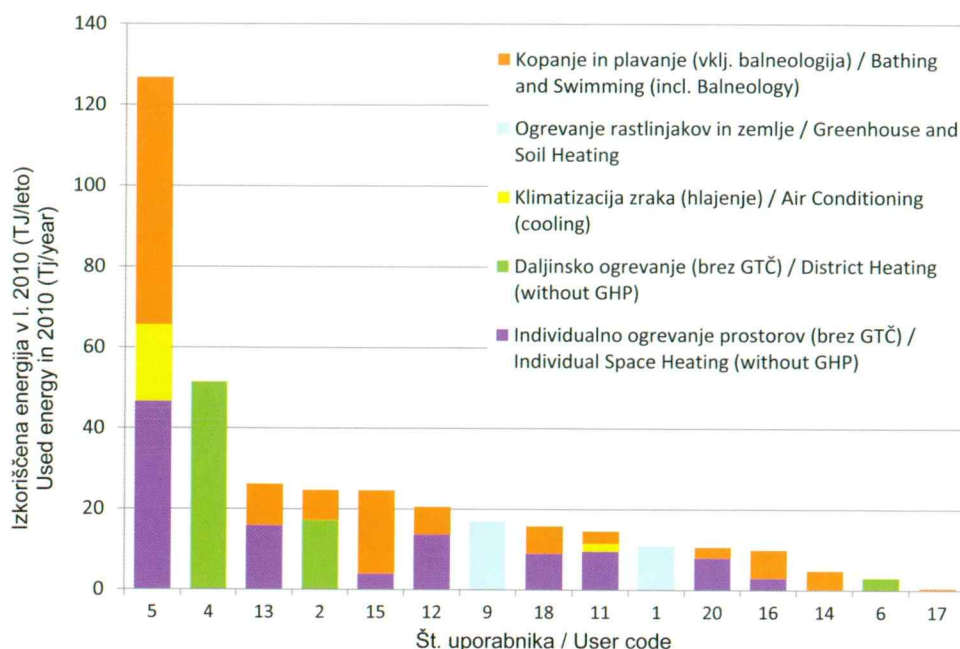
dno prevladuje posamezno ogrevanje prostorov in polnjenje bazenov za balneologijo (sl. 10 in 11). Posodobljen pregled izkoriščene geotermalne energije po uporabnikih v l. 2010 kaže preglednica 3 in slika 9. Na sliki 9 je vključena tudi energija, pridobljena z geotermalnimi toplotnimi črpalkami, ki so večinoma manjših moči in služijo individualnemu ogrevanju stavb. Njihovi podatki so zaradi nepopolnih evidenc le ocenjeni iz skupnih številke za celo Slovenijo (RAJVER et al., 2010). V preglednici 3 je vključenih vseh 15 aktivnih uporabnikov termalne vode, brez podatkov za individualne GTČ. V kolikor ima en uporabnik več vodnih virov, se njegova kapaciteta izračuna na podlagi utežene povprečne vrednosti temperatur in pretokov iz vseh vrtin skupaj (3. in 4. stolpec v preglednici 3) pri najnižji možni izhodni temperaturi vode. Količine o letni izkoriščeni energiji (8. stolpec v preglednici 3) so izračunane na podlagi dejanskih vhodnih in izhodnih temperatur termalne vode ter celoletnega odvzema iz posamične vrtine.

Tako inštalirana kapaciteta kot izkoriščena geotermalna energija beležita porast v zadnjih 15 letih pri vseh uporabnikih, ki je najbolj izrazit po l. 2005. V nekaterih kategorijah rabe je iznos



Sl. 11. Deleži izkoriščene geotermalne energije (%) po kategoriji direktne rabe v letu 2010 v SV Sloveniji

Fig. 11. Geothermal direct applications in 2010, distributed by percentage of total energy use in NE Slovenia



Sl. 12.
Izkoriščena geotermalna energija v letu 2010 po uporabnikih in kategorijah rabe
Fig. 12.
Used geothermal energy in 2010 by users distributed in categories of use

izkoriščene energije do l. 2005 naraščal počasneje (posamezno ogrevanje prostorov, ogrevanje rastlinjakov, GTČ) ali pa sploh ne (kopanje in plavanje z balneologijo, klimatizacija). Razmeroma nizka razpoložljivost z 29 % kaže na razmeroma slabo izkoriščenost razpoložljive geotermalne energije.

Znižanje izkoriščene geotermalne energije v kategoriji kopanje in plavanje z balneologijo je posledica manjšega letnega odvzema termalne vode iz posameznih vrtin v l. 2005 glede na l. 2000 in natančnejših podatkov za zadnje obdobje (sl. 9). Razlike so v oceni izkoriščene geotermalne energije v Termah 3000, Termah Ptuj, Termah Maribor in Zvezdi Diani in nekoliko manj izrazite v Termah Radenci in Banovci. Istočasno se je sicer lahko povečal odvzem iz drugih vrtin ali pa so se aktivirale vrtine, ki prej niso delovale, vendar je skupna bilanca odvzema še vedno nižja kot prej. V obdobju 2005–2010 se je povečal delež izkoriščene energije za posamezno ogrevanje prostorov in daljinsko ogrevanje (z nastopom le-tega v Lendavi in Benediktu) ter za manjše GTČ, manj pa za kopanje in plavanje.

Na obravnavanem območju smo z opravljeno raziskavo popisali 9 termalnih zdravilišč in kopališč (sl. 10). Razveseljivo je, da je kaskadna raba termalne vode pogosta, saj v sedmih primerih s termalno vodo najprej ogrevajo prostore (hotelske stavbe toplic in zdravilišč, bungalove, ipd.) in/ali sanitarno vodo, nato pa jo uporabijo za balneologijo in/ali polnjenje bazenov. Tu delujejo tudi trije sistemi daljinskega ogrevanja mest: Benedikta, Lendave in Murske Sobote, ki obratujejo v hladni polovici leta. V Lendavi je v okviru tega vzpostavljen geotermalni par vrtin in s tem delujoča reinjekcijska vrtina, edina v Sloveniji. Prav tako imajo le tu vzpostavljen sistem taljenja snega na javnih površinah. Rastlinjaka orhidej v Dobrovniku in paradižnika v Tešanovcih se ogrevata pretežno v zimskem času. Ker je temperatura termalne vode v Zrečah relativno nizka, služi

vrtina B-2 kot rezervni vodni vir za oskrbo prebivalcev s pitno vodo, običajno pa se uporablja kot dodatni vodni vir za kopališče. Izmed petih v raziskavo vključenih neaktivnih vrtin je predvideno, da se bodo Jan-1, Kor-1gα in Mt-2 uporabljale v kopališčih in zdraviliščih, Do-1 in Fi-14 pa za ogrevanje prostorov (sl. 11).

Največji koristnik termalne vode za direktno rabo toplote so Terme 3000 v Moravskih Toplicah (sl. 12). Sledijo Nafta Geoterm z daljinskim ogrevanjem Lendave, Terme Lendava z ogrevanjem prostorov in bazenske vode, Terme Ptuj z ogrevanjem bazenske vode in prostorov ter Komunala Murska Sobota z daljinskim ogrevanjem dela mesta.

Opazovanje stanja geotermalnih vodonosnikov

Vpliv odvzema termalne vode na količinsko in kakovostno stanje geotermalnih vodonosnikov lahko raziskujemo, če imamo na voljo časovne nize primerljivih meritev. Izmed 27 aktivnih vrtin v l. 2011 so v 10 (37 %) vsaj občasno izmerili piezometrično gladino podzemne vode, v 6 (22 %) pa je podatek pridobljen dnevno. Na 15 (56 %) vrtinah so vsaj občasno preverili temperaturo iztoka, dnevne meritve pa so opravljali le na tretjini vrtin. Nekoliko pogosteje so ugotavljali količino iztoka, saj so za 21 (78 %) vrtin dostopni podatki o celoletnem odvzemu termalne vode, spet pa je dnevni odvzem merjen le pri tretjini vseh aktivnih vrtin. Sistematičnih letnih kemičnih analiz termalne vode v času našega pregleda stanja v severovzhodni Sloveniji še ni bilo. Najpogostejše se kemijska sestava vode ugotavlja le občasno v okviru različnih raziskovalnih nalog in med preprečevanjem tehnoloških težav pri izrabi termalne vode.

Splošno stanje obratovalnega monitoringa ocenjujemo kot neustrezno, kajti gladino, temperaturo in odvzem termalne vode je potrebno

spremljati vsaj dnevno, saj se tekom leta potrebe po termalni vodi in s tem njene lastnosti spreminjajo. Slabo stanje monitoringa je posledica le redkih podeljenih koncesij za rabo termalne vode, zato ga uporabniki še niso dolžni vzpostaviti. Nekaj se jih zaveda pomena kvalitetnih meritev, ki omogočajo prilaganje odvzema vode dejanskim potrebam in s tem dolgoročno trajnostno rabo geotermalne energije, zato se stanje kljub pomanjkljivemu upravljanju z geotermalnimi viri počasi izboljšuje.

Ravnanje z izrabljeno termalno vodo

Dobro količinsko stanje geotermalnih vodonosnikov se ohranja, kadar odvzem vode bistveno ne presega naravnega ali antropogenega napajanja sistema. Na žalost le Nafta Geoterm vrača toplotno izrabljeno termalno vodo v nazaj v vodonosnik. V Lendavi odpadno vodo iz sistema daljinskega ogrevanja mesta s temperaturo nad 40 °C vtiskujejo v peske Murske formacije, kar je trenutno edini primer trajnostne rabe geotermalne energije pri nas. V Moravskih Toplicah lahko kot primer dobrega sodelovanja izpostavimo kaskadno rabo termalne vode za ogrevanje objektov, sanitarne vode in bazenov Term 3000, z delom toplotnega odpada pa se ogreva tudi bližnji rastlinjak paradižnika v Tešanovcih. Le štirje uporabniki kemično prečistijo odpadno termalno

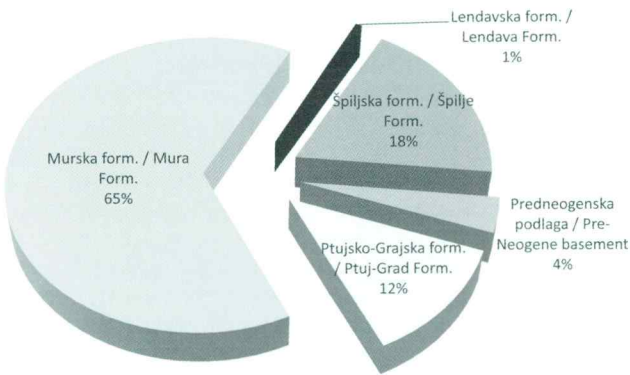
vodo, oziroma jo izpustijo v javno kanalizacijo in na komunalne čistilne naprave. Večina jo odvaja v okolje, bližnje potoke in kanale, brez posebne fizikalne in kemične obdelave. Njena temperatura je dokaj visoka, hkrati pa je zaskrbljujoče, da del odpadne vode hladijo tako, da jo pred izpustom v okolje redčijo s hladno podzemno vodo. Zaradi izpolnjevanja zahtev Uredbe o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vodo in javno kanalizacijo (ANONIMNI, 2005) se večina povprečnih letnih temperatur odpadne termalne vode giblje okoli dovoljene vrednosti 30 °C. Takšno ravnanje je ekološko in trajnostno neustrezno, saj povzroča kemično in temperaturno onesnaženje površinskih voda ter ne omogoča antropogenega napajanja uporabljenih vodonosnikov. Izkušnje v Dobrovniku in Mariboru kažejo, da je z ohladitvijo termalne vode pod 20 °C možno in smiselno izkoristiti razpoložljivo toplotno energijo.

Diskusija

Rezultati raziskave kažejo dobre in slabe strani rabe termalne vode v severovzhodni Sloveniji. To območje že danes prispeva skoraj polovico izkoriščenih geotermalne energije v Sloveniji (MG, 2010) in pričakujemo, da se bo trend nadaljeval tudi v prihodnje. V l. 2011 je bilo s 26 geotermalnimi vrtinami pridobljenih 3,29 mio m³ termalne vode, l. 2010 pa 3,15 mio m³ termalne vode. Čeprav le 54 % aktivnih vrtin zajema vodonosnik Murske formacije, te zagotavljajo kar 82 % letnega odvzema.

Količina odvzete termalne vode na obravnavanem območju od leta 1960 do 2011 je ocenjena na 68,51 mio m³ (sl. 13). Največ vode je bilo načrpano iz Murske formacije (65 %) in od tega skoraj 70 % v Murski Soboti in Moravskih Toplicah. Voda se uporablja predvsem za ogrevanje, zato je razmeroma visoka količina odvzema pričakovana. V peske Murske formacije posega tudi edina reinjekcijska vrтина, ki deluje v Lendavi od l. 2009 (TORHAČ, 2010). Lokalno je zelo pomembna za ohranjanje dobrega količinskega stanja vodonosnika, regionalno pa se skozi njo vrača manj od 3 % letnega odvzema, kar je zanemarljivo.

Če upoštevamo, da je izračunan pretok termalne vode v Murski formaciji iz Slovenije na Ma-



Sl. 13. Delež termalne vode iz različnih vodonosnikov v celotnem odvzemu v obdobju 1960-2011

Fig. 13. Shares of thermal water from different aquifers in total abstraction in period 1960-2011

Preglednica 4. Predviden bodoči letni odvzem termalne vode po vodonosnikih
Table 4. Expected future annual abstraction of thermal water by aquifers

Vodonosnik / Aquifer	Vrtine s koncesijo ali v postopku podeljevanja		Vrtine brez koncesije
	Delujoče / Active (m ³)	Mirujoče / Inactive (m ³)	Mirujoče / Inactive (m ³)
Ptujsko-Grajska form. / Ptuj-Grad Form.	441.504	220.752	
Murska form. / Mura Form.	3.933.108	656.720	1.046.995
Lendavska form. / Lendava Form.	52.560		141.912
Špiljska form. / Špilje Form.	176.602	176.602	15.768
Predneogenska podlaga / Pre-Neogene basement	362.664		189.216
Skupaj /Total	4.966.438	1.054.074	1.393.891

džarsko približno 50 l/s (Tóth et al., 2011) in njen identificiran iztok v jezero Hévíz približno 20 l/s (Tóth, 2009), njen sedanji odvzem (85 l/s) že presega identificiran naravni iztok iz sistema. Do podobnega zaključka smo prišli tudi na podlagi opazovanj regionalnega trenda nihanja piezometrične gladine. Ta se od začetka opazovanj v l. 2009 stalno niža, s hitrostjo približno pol metra na leto. Spremembe o delovanju vrtin so poročane za vse geotermalne vodonosnike, zato ocenjujemo, da odvzem že dosega ali presega naravno zmogljivost sistema. Brez ustreznih ukrepov za preprečevanja slabšanja količinskega stanja vodonosnikov, npr. reinjekcije, in ustreznega nadzora nad njihovim izvajanjem (RMAN et al., 2011), je kot bistveno posledico prekomernega odvzema pričakovati vse težjo in predvsem dražjo izrabo (še) razpoložljive geotermalne energije. Zaradi več desetletnega odvzema na območju Moravskih Toplic in Murske Sobote je osrednji del Pomurja še posebej ranljiv za dodatne zajeme termalne vode, tako v Murski kot Špiljski formaciji. V zadnjih nekaj letih se je v bližini aktiviralo nekaj novih geotermalnih vrtin, ob čemer uporabniki o vzpostavitvi reinjekcije večinoma ne razmišljajo.

Obstoječi uporabniki pričakujejo, da bodo v okviru podeljenih koncesij za rabo termalne vode lahko povečali odvzem iz sedanjih 3,29 mio m³ na 4,97 mio m³ (preglednica 4). Aktivacija mirujočih vrtin s koncesijo bi teoretično zagotovila še dodatnih 1,05 mio m³, medtem ko bi mirujoče vrtnine brez koncesije lahko dodale še 1,39 mio m³ termalne vode. Aktivne vrtnine s koncesijo v 80 % merijo na vodonosnik Murske formacije, katerega toploto bi uporabljali pretežno za ogrevanje. Tudi pri mirujočih vrtinah je največ zanimanja po termalni vodi iz Murske formacije za pridobivanje geotermalne toplote, sledi termalna voda iz Ptujsko-Grajske formacije za rabo v kopališčih in iz Špiljske formacije za zdravilišča. Na podlagi obstoječih podatkov je pričakovati, da je trend pri mirujočih vrtinah še brez vloge za koncesijo podoben. Podana ocena možnega dodatnega odvzema termalne vode upošteva le upravno omejitve, torej najvišje dovoljene količine odvzema opredeljene v podeljenih koncesijah in tistih, ki so še v postopku. Študija zaradi pomanjkanja hidrogeoloških podatkov seveda ne upošteva medsebojnega vpliva med vrtinami ter hidravličnih zmoglosti vodonosnikov. Že v prejšnjih odstavkih smo opozorili, da je povečanje odvzema termalne vode brez reinjekcije ali podobnih ukrepov omejeno z naravnimi zmoglostmi geotermalnega sistema, katerega količinsko stanje že zdaj ni zadovoljivo.

Zaključek

Izsledki opravljene raziskave kažejo, da je izraba geotermalne energije dobro razvita, saj pogosto temelji na kaskadni izrabi termalne vode. Direktna raba zajema sisteme daljinskega ogrevanja, ogrevanja rastlinjakov, individualnega ogrevanja zdraviliških in kopaliških prostorov ter sanitarne vode, uporabo za balneologijo in

kopanje, taljenje snega itd. Količina odvzema se stalno povečuje in od tega največji delež pripada geotermalnemu vodonosniku v Murski formaciji. Vanj posega tudi edina reinjekcijska vrtina v Sloveniji, ki obratuje v Lendavi, in omogoča lokalno ohranjanje dobrega količinskega stanja tega vodonosnega vira.

Opazene spremembe stanja geotermalnih vodonosnikov kažejo na njihovo prekomerno izkoriščanje, ki ga lahko označimo za »rudarjenje«. Zanj je v prvi meri odgovoren zgodovinski, več desetletni odvzem termalne vode brez vzpostavljenega sistema vračanja toplotno izrabljene vode nazaj v vodonosnik. Le ena reinjekcijska vrtina, ki šele od leta 2009 deluje v Lendavi, ne more izboljšati regionalnega stanja vodonosnika, saj je zamišljena kot geotermalni par vrtin – torej bo zagotovila obnavljanje le tiste količine termalne vode, ki se jo odvzema iz pridobivalne vrtnine v paru. Preostali uporabniki se morajo zavedati (in to tudi udejanjiti), da so zmoglosti naravnega obnavljanja obstoječega geotermalnega sistema brez antropogenega posredovanja, kot je recimo reinjekcija, zelo omejene. Poleg tega pomanjkljiv obratovalni monitoring in neustrezno ravnanje z odpadno termalno vodo dodatno zmanjšujeta ekološke prednosti, ki jih prinaša izraba tega obnovljivega vira energije. Svoj del odgovornosti nosijo tudi nacionalni upravljavci naravnih virov, kajti zapletena in nejasna zakonodaja, pomanjkljivo izvajanje podeljenih vodnih oziroma koncesijskih pravic in iz tega sledeča nenamenska poraba pridobljenih sredstev, predvsem pa nedelujoča skupna strategija upravljanja z regionalnimi vodnimi viri dodatno otežujejo načrtovanje in izvajanje potrebnih ukrepov za vzpostavitev nadzora in ohranjanje dobrega količinskega in kakovostnega stanja geotermalnih vodonosnikov. Ker je pričakovano, da se bo finančni vložek v omenjene aktivnosti povrnil šele čez nekaj časa (let), je vzpostavitev in upoštevanje skupnega dogovora o načinu izrabe obstoječih geotermalnih virov prvi pogoj za njihovo ohranitev. Ob tem pa je potrebno interes za rabo geotermalne energije z izkoriščanjem tako obstoječih kot novih vrtin razvijati in spodbujati še naprej, a le na ustrezen »trajnosten« način.

Zahvala

Za pripravo grafičnih podlag, ki so bistveno pripomogle prostorski predstavi podatkov, se zahvaljujemo S. Mozetiču, T. Fuksu in Š. Kumelj. Hvala tudi vsem uporabnikom termalne vode, ki so nam razložili delovanje sistemov izrabe geotermalne energije in omogočili dostop do potrebnih podatkov. Raziskavo smo izvedli s pomočjo sofinanciranja evropskega regionalnega razvojnega sklada slovensko-madžarskega operativnega programa 2007-2012 in projekta T-JAM (št. pogodbe SI-HU-1-2-013/01), srednjeevropskega programa 2007-2013 in projekta TRANS-ENERGY (št. pogodbe 2CE124P3) ter slovenskega programa ARRS P1-0020-0215 Podzemne vode in geokemija.

Viri in literatura

- 2000/60/EC. Direktiva Evropskega parlamenta in Sveta 2000/60/ES z dne 23. oktobra 2000 o določitvi okvira za ukrepe Skupnosti na področju vodne politike = The Water Framework Directive. Uradni list Evropske unije, 15/Zv. 5, 275-346. Dostopno 1. 11. 2012 na http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index_en.html.
- ANONIMNI, 2000: Zakon o vodah = The Water Law. Ur. l. RS, št. 67/2002. Dostopno 1. 11. 2012 na http://zakonodaja.gov.si/rpsi/r04/predpis_ZAKO1244.html.
- ANONIMNI, 2005: Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vode in javno kanalizacijo = Decree on the emission of substances and heat in the discharge of wastewater into waters and public sewage system. Ur. l. RS 47/2005. Dostopno 1. 11. 2012 na http://zakonodaja.gov.si/rpsi/r06/predpis_URED3606.html.
- AXELSSON, G. 2010: Sustainable geothermal utilization – Case histories; definitions; research issues and modelling. *Geothermics*, 39/4, 283-291, doi:10.1016/j.geothermics.2010.08.001.
- AXELSSON, G. & GUNNLAUGSSON, E. 2000: Long-term monitoring of high- and low-enthalpy fields under exploitation. Short Courses of the World Geothermal Congress. IGA, Kjushu – Tohoku: 226 p.
- BODVARSSON, G. 1973: Temperature inversions in geothermal systems. *Geoexploration*, 11: 141-149, doi:10.1016/0016-7142(73)90057.
- CHAPMAN, D. S., POLLACK, H. N. & ČERMAK, V. 1979: Global heat flow with special reference to the region of Europe. In: ČERMAK, V. & RYBACH, L. (eds.): *Terrestrial heat flow in Europe*. Springer-Verlag, 41-48.
- CHAPMAN, D. S. & RYBACH, L. 1985: Heat flow anomalies and their interpretation. *Journal of Geodynamics* 4/1-4: 3-37, doi:10.1016/0264-3707(85)90049-3.
- CIGIT, K. 1975: Kakšne probleme je prineslo odkritje in pridobivanje termomineralne vode v Moravcih? = Which problems did occur after thermomineral water in Moravci was found and exploited? *Radenski vestnik*, 11: 3-11.
- ČERMAK, V. & BODRI, L. 1986: Temperature structure of the lithosphere based on 2-D temperature modelling, applied to Central and Eastern Europe. In: BURRUS, J. (ed.): *Thermal modelling in sedimentary basins*. Éditions Technip, 7-32.
- DICKSON, M. H. & FANELLI, M. 2003: Geothermal background. In: DICKSON, M. H. & FANELLI, M. (eds.), *Geothermal energy: utilization and technology*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris: 28 p.
- FODOR, L., BADA, G., CSILLAG, G., HORVATH, E., RUSZKICZAY-RUDIGER, Z., PALOTÁS, K., SIKHEGYI, F., TIMAR, G., CLOETINGH, S. & HORVATH, F. 2005: An outline of neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian Basin. *Tectonophysics*, 410: 15-41, doi:10.1016/j.tecto.2005.06.008.
- FODOR, L., UHRIN, A., PALOTÁS, K., SELMECZI, I., NÁDOR, A., TÓTH-MAKK, Á., SCHAREK, P., RIŽNAR, I., TRAJANOVA, M., RIFELJ, H., JELEN, B., LAPANJE, A., MOZETIČ, S., MURÁTI, J., BUDAI, T. & TULLNER, T. 2011: Geološki konceptualni model v okviru projekta T-JAM = Geological conceptual model in the framework of the project T-JAM. GeoZS, MAFI, Budapest, Ljubljana. Dostopno 1. 11. 2012 na <http://www.t-jam.eu/>.
- Geopedia.si. 2006. Borehole location and datasets. Dostopno 1. 10. 2012 na http://www.geopedia.si/?params=T105_L7279_F56#T105_L7279_F56_x611455_y154762_s17_b4). LEA Pomurje, Martjanci.
- GOETZL, G., ZEKIRI, F., LENKEY, L., RAJVER, D. & SVASTA, J. 2012. Summary report: Geothermal Models at Supra-Regional Scale for Trans-energy project. MAFI, GBA, GeoSZ, SGUDS. Dostopno 1. 11. 2012 na <http://transenergy-eu.geologie.ac.at/>.
- HUNGARIAN PARLIAMENT, 1995: Act LVII of 1995 on Water Management. Dostopno 1. 10. 2012 na eusoils.jrc.ec.europa.eu/.../HungaryWaterLaw.doc.
- HURTIG, E., ČERMAK, V., HAENEL, R. & ZUI, V. 1992: *Geothermal Atlas of Europe*. Hermann Hack Verlagsgesellschaft: Geographisch-Kartographische Anstalt, Gotha.
- JELEN, B. & RIFELJ, H. 2011: Površinska litostratiografska in tektonska strukturna karta območja T-JAM projekta, severovzhodna Slovenija = Surface lithostratigraphic and tectonic map of the T-JAM project area, northeastern Slovenia, 1 : 100.000. GeoZS, Ljubljana. Dostopno 1. 11. 2012 na <http://www.geo-zs.si/podrocje.aspx?id=489>.
- JELEN, B., RIFELJ, H., BAVEC, M., RAJVER, D. & ČERTALIČ, S. 2006: Opredelitev dosedanjega konceptualnega geološkega modela Murske depresije = Definition of current conceptual geological model of the Mura Depression. GeoZS, Ljubljana. Arhiv GeoZS.
- KRALJ, P. 1993: Hidrodinamične značilnosti geotermalnega sistema Termal I na širšem območju Murske Sobote = Hydrodynamic characteristics of the geothermal system Termal I in the wider Murska Sobota area. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 40: 169-176.
- KRALJ, P. 1999: Geotermalni viri v Sloveniji: njihov potencial in izraba = Geothermal resources in Slovenia: their potential and exploitation. In: KRALJ, P. (ed.): *Geotermalna energija islandske in slovenske izkušnje*. MZT, Ljubljana, 29-42.
- KRALJ, P. 2001: Das Thermalwasser-System des Mur-Beckens in Nordost-Slowenien, doktorat. RTWH Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, Aachen: 139 p.
- KRALJ, P. 2004: Trace elements in medium-temperature (40–80 °C) thermal waters from the Mura basin (North-Eastern Slovenia). *Environmental Geology*, 46: 622-629, doi:10.1007/s00254-004-1000-9.
- KRALJ, P., KOZARSKI, A. & MLINARIC, J. 1994: Geotermalni pilotni projekt Ljutomer = Geother-

- mal pilot project Ljutomer. Komunalna energetika, 17-25.
- KRALJ, P. & KRALJ, P. 2000a: Overexploitation of geothermal wells in Murska Sobota, north-eastern Slovenia. Proceedings (elektronsko), World Geothermal Congress. IGA, Kyushu-Tohoku, 837-842.
- KRALJ, P. & KRALJ, P. 2000b: Thermal and mineral waters in north-eastern Slovenia. Environmental Geology, 39: 488-500, doi:10.1007/s002540050455.
- KRALJ, P. & RAJVER, D. 2000: State-of-the-art of geothermal energy use in Slovenia. Proceedings (elektronsko), World Geothermal Congress. IGA, Kyushu – Tohoku, 267-275.
- KRALJ, P., RYCHAGOV, S., & KRALJ, P. 2009. Changes in geothermal reservoir induced by exploitation: case studies from North-East Slovenia and South Kamchatka. Proceedings (tiskano), Applied Environmental Geochemistry – Antropogenic impact on the human environment in the SE Europe. GeoZS, Ljubljana, 71-76.
- KRALJIĆ, M. & TURK, V. 2010. Rudarski projekt za izvajanje del: izgradnja raziskovalne geotermalne vrtnice Murska Sobota - 3g (Sob-3g) = Mining project: drilling of the research geothermal borehole Murska Sobota - 3g (Sob-3g). Nafta Geoterm, Lendava. Dostopno 1. 10. 2012 na <http://www.murska-sobota.si/javni-razpis-izgradnja-geotermalnih-vrtin-sob-3-sob-4-ter-sanacija-sob-1-turisti%C4%8Dni-center>.
- LAPANJE, A., BAEK, R., BUDKOVIČ, T., DOMBERGER, G., GOETZL, G., HRIBERNIK, K., KUMELJ, Š., LETOUZE, G., LIPIARSKI, P., POLTNIG, W. & RAJVER, D. 2007: Geotermalni viri severne in severovzhodne Slovenije = Geothermal resources of northern and north-eastern Slovenia. RRA Koroška, GeoZS, Dravograd, Ljubljana: 126 p.
- LAPANJE, A., CELARC, B., FUKS, T., RAJVER, D., MARKIČ, M., KOMAC, M., LISJAK, L., HORN, B., KRALJIĆ, M., OREŠNIK, K., GRUDNIK, Z. M., MAVEC, M., TANCAR, M., SUPOVEC, I., VUKELIĆ, T. & DERVARIČ, E. 2011: Možnosti za geološko skladiščenje CO₂ v Sloveniji in izven Slovenije. Knjiga 2: Popis možnih lokacij za geološko skladiščenje v vodonosnikih z oceno skladiščne kapacitete. GeoZS, NTF, HGEM, ERICO, Nafta Geoterm, Ljubljana, Lendava, Velenje. Arhiv GeoZS.
- LAPANJE, A., RAJVER, D., SZÉKELY, E., KUMELJ, Š., MOZETIČ, S., JUHÁSZ, I., BÁNYAI, P., TÓTH, L. & HAMZA, I. 2010: Pregled izkoriščanja geotermalne energije v severovzhodni Sloveniji in na jugozahodnem Madžarskem v okviru projekta T-JAM = Review of geothermal energy utilization in north-eastern Slovenia and south-western Hungary. GeoZS, MAFI. Dostopno 1. 11. 2012 na <http://www.t-jam.eu/>.
- LAPANJE, A. & RMAN, N. 2009: Termalna in termomineralna voda = Thermal and thermomineral water. In: PLENIČAR, M. et al. (eds.): Geologija Slovenije = The geology of Slovenia. GeoZS, Ljubljana, 553-560.
- MARTON, E., FODOR, L., JELEN, B., MARTON, P., RIFELJ, H. & KEVRIĆ, R. 2002: Miocene to Quaternary deformation in NE Slovenia: complex paleomagnetic and structural study. Journal of Geodynamics, 34/5: 627-651, doi:10.1016/S0264-3707(02)00036-4.
- MAUČEC, J. 2006: Energetska vizija Pomurja 2007-2013. LEA Pomurje, Martjanci, 35-38. Dostopno 1. 11. 2012 na http://web.rra-mura.com/prenosi/Energetska_vizija_Pomurja_2007_-_2013.pdf
- MÉGEL, T. & RYBACH, L. 2000: Production capacity and sustainability of geothermal doublets. Proceedings (elektronsko), World Geothermal Congress. IGA, Kyushu-Tohoku, 849-854.
- MG 2010: Nacionalni akcijski načrt za obnovljive vire energije (AN OVE) za obdobje 2010-2020 = National action plan for renewable energy resources (AN OVE) for period 2010-2020. Ministrstvo za gospodarstvo, IJS, Ljubljana, 134 p. Dostopno 1. 11. 2012 na http://www.mzip.gov.si/fileadmin/mzip.gov.si/pageuploads/Energetika/Porocila/AN_OVE_2010-2020_final.pdf
- NÁDOR, A., LAPANJE, A., TÓTH, G., RMAN, N., SZÓCS, T., PRESTOR, J., UHRIN, A., RAJVER, D., FODOR, L., MURÁTI, J. & SZÉKELY, E. 2012: Transboundary geothermal resources of the Mura-Zala basin: joint thermal aquifer management of Slovenia and Hungary. Geologija, (v tej številki).
- NATIONAL COUNCIL OF SLOVAK REPUBLIC, 2007: Geological Act. Nr. 569/2007 Coll. on Geological Works. Dostopno 1. 10. 2012 na <http://www.vyvlastnenie.sk/predpisy/geologicky-zakon/>.
- NOSAN, A. 1973: Termalni in mineralni vrelci v Sloveniji = Thermal and mineral springs in Slovenia. Geologija, 16: 6-81.
- OTTLIK, P., GALFI, J., HORVATH, F., KORIM, K. & STEGENA, L. 1981: The Low Enthalpy Geothermal Resource of the Pannonian Basin, Hungary In: RYBACH, L. & MUFFLER, L.J.P. (eds.), Geothermal Systems: Principles and Case Histories. John Wiley & Sons, 221-245.
- ÖWAV, 2010. Regelblatt 215 Nutzung und Schutz von Thermalwasservorkommen = Utilisation and protection of thermal water resources, Vienna.
- PEZDIČ, J. 1991: Izotopi v termo-mineralnih vodnih sistemih = Isotopes in thermo-mineral aqueous systems, doktorat. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 158 p.
- PEZDIČ, J., DOLENEC, T., PIRC, S. & ŽIŽEK, D. 1995: Hydrogeochemical properties and activity of the fluids in the Pomurje Region of the Pannonian Sedimentary Basin. Acta Geologica Hungarica, 39: 319-340.
- PEZDIČ, J., VIZINTIN, G., GERIČ, N. & VERBOVŠEK, T. 2006: Dependence between exploitation, recharge and pollution sensitivity of the deep aquifers: case study in Pomurje, Slovenia. Proceedings (elektronsko), GIRE3D, Marakech, 6 p.
- PLACER, L. 1999. Prispevek k makrotektonski razjoniaciji mejnega ozemlja med Južnimi Alpami in Znanjimi Dinaridi = Contribution to

- the macrotectonic subdivision of the border region between Southern Alps and External Dinarides. *Geologija*, 41(1998): 223-225, doi:10.5474/geologija.1998.013.
- PLENIČAR, M. 1954: Obmurska naftna nahajališča. *Geologija*, 2: 36-93.
- RAJVER, D. & LAPANJE, A. 2005: The Current Status of Geothermal Energy Use and Development in Slovenia. Proceedings (elektronsko), World Geothermal Congress. IGA, Antalya, 9 p.
- RAJVER, D., LAPANJE, A. & RMAN, N. 2010: Geothermal Development in Slovenia: Country Update Report 2005-2009. Proceedings (elektronsko), World Geothermal Congress. IGA, Bali, 10 p.
- RAJVER, D., LAPANJE, A. & RMAN, N. 2012: Možnosti proizvodnje elektrike iz geotermalne energije v Sloveniji v naslednjem desetletju = Possibilities for electricity production from geothermal energy in Slovenia in the next decade. *Geologija*, 55/1: 117-140, doi:10.5474/geologija.2012.009.
- RAJVER, D. & RAVNIK, D. 2002: Geotermična slika Slovenije – razširjena baza podatkov in izboljšane geotermične karte = Geothermal pattern of Slovenia – enlarged data base and improved geothermal maps. *Geologija*, 45/2: 519-524, doi:10.5474/geologija.2002.058.
- RAJVER, D., RAVNIK, D., PREMUR, U., MIOČ, P., & KRALJ, P. 2002: Slovenia. In: HURTER, S. & HANENEL, R. (eds.): Atlas of Geothermal Resources in Europe. EC, Research Directorate, Luxembourg.
- RAJVER, D., RAVNIK, D., ŽLEBNIK, L. & ČEBULJ, A. 1995: Utilization of geothermal energy in Slovenia. Proceedings (tiskano), World Geothermal Congress. IGA, Florence, 321-326.
- RAVNIK, D. 1991: Geotermične raziskave v Sloveniji = Geothermal investigations in Slovenia. *Geologija*, 34: 265-303.
- RAVNIK, D., KOLBAH, S., JELIĆ, K., MILIVOJEVIĆ, M., MIOŠIĆ, N., TONIĆ, S. & RAJVER, D. 1992: Yugoslavia. In: HURTER, S. et al. (eds.): Geothermal Atlas of Europe. GeoForschungsZentrum, Potsdam, 102-104: 152-153.
- RAVNIK, D., RAJVER, D., POLJAK, M. & ZIVCIC, M. 1995: Overview of the geothermal field of Slovenia in the area between the Alps, the Dinarides and the Pannonian basin. *Tectonophysics*, 250: 135-149.
- RMAN, N., LAPANJE, A. & PRESTOR, J. 2011: Water Concession Principles for Geothermal Aquifers in the Mura-Zala Basin, NE Slovenia. *Water Resources Management*, 25: 3277-3299, doi:10.1007/s11269-011-9855-5.
- RMAN, N. & SZŐCS, T. 2011: Hidrogeokemični konceptualni model v okviru projekta T-JAM = Hydrogeochemical conceptual model within the framework of project T-JAM. GeoZS, MAFI, Budapest, Ljubljana. Dostopno 1. 11. 2012 na <http://www.t-jam.eu/>.
- ROYDEN, L., HORVÁTH, F., NAGYMAROSY, A. & STEGENA, L. 1983a: Evolution of the Pannonian Basin System: 2. Subsidence and thermal history. *Tectonics*, 2: 91-137.
- ROYDEN, L., HORVÁTH, F. & RUMPLER, J. 1983b: Evolution of the Pannonian Basin System: 1. Tectonics. *Tectonics*, 2: 63-90.
- RYBACH, L. 2003: Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics*, 32: 463-470, doi:10.1016/S0375-6505(03)00057-9.
- RYBACH, L. 2010: Status and Prospects of Geothermal Energy. Proceedings (elektronsko), World Geothermal Congress. IGA, Bali: 5 p.
- SEVER, B. 1993: Enciklopedija Slovenije 7, Marin – Nor. In: VOGLAR, D. & DERMASTIA, A. (eds.): Enciklopedija Slovenije. Mladinska knjiga, 217-218.
- SOPHOCLEOUS, M. 2000: From safe yield to sustainable development of water resources – the Kansas experience. *Journal of Hydrology*, 235: 27-43.
- SOPHOCLEOUS, M. 2010: Review: groundwater management practices, challenges, and innovations in the High Plains aquifer, USA-lessons and recommended actions: *Hydrogeology Journal*, 18: 559-575, doi:10.1007/s10040-009-0540-1.
- SZABO, J. 1975: O termalnih vodah v Petišovcih in Banovcih. *Radenski vestnik*, XIV: 20-24.
- SZŐCS, T., RMAN, N., SÜVEGES, M., PALCSU, L., TÓTH, G., & LAPANJE, A. 2012: The application of isotope and chemical analyses in managing transboundary groundwater resources. *Applied Geochemistry*, Special Issue, doi:10.1016/j.apgeochem.2012.10.006.
- TORHAČ, E. 2010: Eureka success story – Pumping up the heat for a climate-friendly future. Nafta Geoterm, Lendava. Dostopno 1. 11. 2012 na http://www.eurekanetwork.org/showsuccessstory?p_r_p_564233524_articleId=362473&p_r_p_564233524_groupId=10137
- TÓTH, G. 2009: Case study: XL groundwater model of the Pannonian basin and its use for transboundary consultations. Proceedings (tiskano), Workshop on Groundwater modelling TAIEX-INFRA 32389.
- TÓTH, G., MURATI, J. & RMAN, N. 2011: Matematično model toka podzemne vode v okviru projekta T-JAM = Numerical flow model within the framework of project T-JAM. GeoZS, MAFI, Budapest, Ljubljana. Dostopno 1. 11. 2012 na <http://www.t-jam.eu/>.
- TURK, V. 1993: Reinterpretacija kronostratigrafskih in litostratigrafskih odnosov v Murski udornini = Reinterpretation of chronostratigraphic and lithostratigraphic relations in the Mura Depression. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 40: 145-148.
- VIŽINTIN, G., VUKELIĆ, Ž. & VULIĆ, M. 2008: Monitoring the geothermal potential of deep Tertiary aquifers in north-east Slovenia using old abandoned oil and gas wells. Proceedings (tiskano), 2nd International Symposium Mining Energetic, Tara, 39-52.
- ZDRUŽENI NARODI, 1987. Chapter 2: Towards Sustainable Development. Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development No. A/RES/42/187. Dostopno 1. 11. 2012 na <http://www.un-documents.net/ocf-02.htm>.

ŽLEBNIK, L. 1975: Termalne in termomineralne vode v Prekmurju in Slovenskih goricah = Thermal and thermomineral waters in Prekmurje and Slovenske gorice. Radenski vestnik, XIV: 25-35.

ŽLEBNIK, L. 1978: Terciarni vodonosniki v Slovenskih goricah in na Gorickem = Tertiary aquifers in the Slovenske gorice and Goričko hills. Geologija, 21/2: 311-324.