

UDK 550.361+550.36.004.11(497.12)=863

Gostota Zemljinega toplotnega toka v konjiški udorini

Heat flow density in the fault basin of Konjice

Danilo Ravnik, Renato Verbovšek & Uroš Premru

Geološki zavod, 61000 Ljubljana, Parmova 33

Kratka vsebina

Geološka zgradba in hidrogeološke razmere v konjiški udorini kažejo na možnost akumulacije geotermične energije ter pitne in industrijske vode. Najpomembnejša vodonosna formacija je srednjetriadni dolomit, ki leži neposredno na pohorskem visokometamorfem skrilavcu in je prekrit z miocenskim laporjem. Nekorigirana gostota Zemljinega toplotnega toka v globinskem intervalu 100—400 metrov je $75 \text{ mWm}^{-2} \pm 35 \%$. Specifična entalpija iztekajoče vode je bila ocenjena na okoli 0,025 MJ/kg.

Abstract

The character of the rocks within the fault basin of Konjice and the mode of their arrangement, and the hydrogeologic conditions appear to be favourable for the accumulation and extraction of geothermal energy and water supply. Middle Triassic dolomite is believed to be the most important water bearing formation. It is underlain by high grade metamorphic schist of the Pohorje Mountains and overlain by Miocene marl. The uncorrected heat flow density determined for the depth interval of 100—400 meters amounts to $75 \text{ mWm}^{-2} \pm 35 \%$. The specific enthalpy of the discharged water was about 0.025 MJ/kg.

Uvod

Toplotni tok v vrhnjih nekaj kilometrih Zemljine skorje je posledica ohlajevanja vroče Zemljine notranjosti ter radiogene toplote v skorji. Njegovo poznavanje je pomembno za razumevanje geoloških pojavov in za modeliranje geodinamičnih procesov v Zemljini skorji. Gostota toplotnega toka je eden od parametrov, ki omogoča ekstrapolacijo temperature v kameninah do globin, ki niso dostopne za direktne metode merjenja. Iz njegove vrednosti tudi sklepamo na koncentracijo toplote pod površjem, ki je lahko ekonomskega pomena.

Toplota se v zgornjih plasteh Zemljine skorje razširja v glavnem s prevajanjem. Ekonomsko pomembna toplota pa se prenaša s strujanjem, ki je vezano

na zelo omejena območja. V to kategorijo spadajo konvekcijski hidrotermalni ali cirkulacijski geotermični izvori, katerim pripada večina danes izkoristljivih nahajališč geotermične energije.

Analize toplotnih procesov v Zemlji ter njihova regionalna klasifikacija temeljijo večidel na prenosu toplote s prevajanjem. Ko se vzpostavi stacionarno stanje toplotnega prevajanja, je gostota toplotnega toka določena s fenomenološko Fourierjevo enačbo. Ako predpostavimo enodimenzionalni stacionarni prenos toplote v izotropnem sredstvu, velja poenostavljena enačba za gostoto toplotnega toka

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (1)$$

Na toplotni tok pa vplivajo razni geološki pojavi, kot globalni tektonski procesi, sedimentacija in erozija ter vertikalno premikanje. Upoštevati moramo tudi razne korekcije, ki imajo svoj izvor v razgibani topografiji, bočnih razlikah toplotne prevodnosti kamenin, gibajoči se podzemeljski vodi ter v dolgoperiodnih klimatoloških spremembah, npr. vpliv male ledene dobe in klimatskih optimumov.

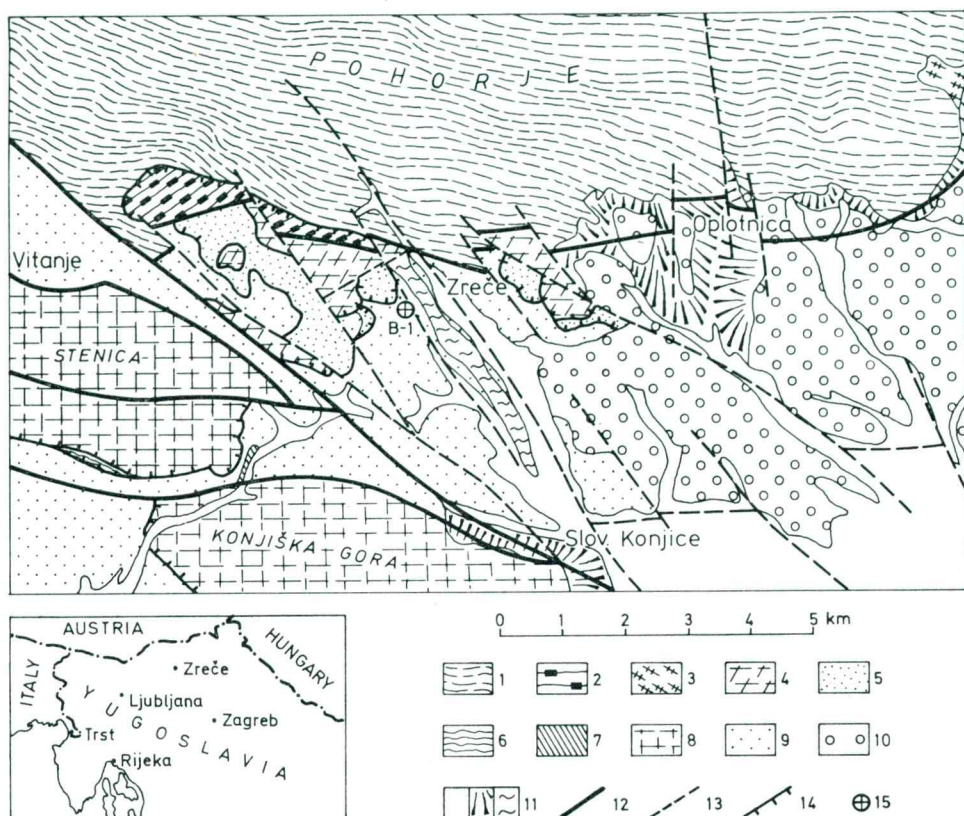
Po enačbi (1) določimo toplotni tok s pomočjo toplotne prevodnosti λ in vertikalnega geotermičnega gradienta $\Delta T/\Delta z$. V ta namen vrtajo na kontinentih globoke vrtine, na oceanih ali v globokih jezerih pa z ladje spustijo merilne naprave nekaj metrov globoko v mehko dno. Toplotno prevodnost merimo na intaktnih vzorcih kamenin v laboratoriju, v oceanih pa kar skupno z geotermičnim gradientom *in situ*. Na celini določimo geotermični gradient na podlagi temperaturnih meritev v vrtini.

Za oceno geotermičnega potenciala določenega ozemlja so pomembni podatki tako o toploti, akumulirani v podzemeljski vodi, kot njenem nosilcu na površje, kakor tudi o toplotni energiji, zbrani v kameninah do določene globine. Konduktivno izhajajoča Zemljina toplota nima ekonomskega pomena, vendar se v njeni množini odsevajo velika termodinamična in geodinamična dogajanja globoko pod Zemljinim površjem. To so pa osnovni vzroki za nakopičenje Zemljine toplotne energije blizu njenega površja.

Kot primer določitve gostote toplotnega toka podajamo rezultat geotermičnih meritev pri Zrečah v konjiški udorini. To je bila prva določitev gostote Zemljinega toplotnega toka v Sloveniji.

Geološki, hidrogeološki in geofizikalni položaj konjiške udorine

Pliokvartarna konjiška udorina leži na stičišču treh velikih tektonskih enot (sl. 1). Na severu so Avstroalpidi, na jugozahodu Južne Alpe, na jugu pa obrobni del panonske udorine. To je tudi sečišče več transkurentnih prelomov, ki so bili aktivni v več fazah. Do Vitanja je geološko viden periadriatski šiv; njegov potek dalje proti vzhodu ni več jasen. Periadriatski šiv predstavlja izvirno cono narivov. Od tu so bile konec miocena na pohorske metamorfne kamenine narinjene severne Karavanke, ki sestoje iz triadnega dolomita, zgoranjekrednega gosavskega lapornega apnenca in miocenskih klastitov. Na severo-



Sl. 1. Geološka zgradba konjiške udorine

Po geološki karti P. Mioča & M. Žnidarčiča (1977) priredil in dopolnil U. Premru

Fig. 1. Geological structure of the fault basin of Konjice

Geological map made by P. Mioč & M. Žnidarčič (1977) completed by U. Premru

1—5 Avstroalpidi, 1—3 proterozojske in staropaleozojske metamorfne kamenine, 1 blestnik in gnajs z lečami amfibolita, kvarcita in eklogita, 2 kremenovo sericitni filit, 3 serpentinit, 4—5 severnokatavanski narivi, 4 srednjetriadni dolomit, 5 zgornjekredni lapor, peščenjak in apnenec s hipuriti, 6—8 Južne Alpe, 6—7 južnokaravanški narivi, 6 zgornjekarbonski skrilavec, peščenjak in konglomerat, 7 srednjetriadni apnenec, 8 triadni apnenec in dolomit savinjskega nariva, 9 miocenski klastiti panonske udorine v narivni zgradbi Karavank, 10—11 pliokvartarne udorine, 10 pliokvartarni klastiti, 11 kvartarni aluvialni in proluvialni sedimenti, 12 transkurentni prelom, 13 gravitacijski prelom, 14 nariv, 15 vrtna

1—5 Austroalpides, 1—3 Proterozoic and Early Paleozoic metamorphic rocks, 1 Mica schist and gneiss with lenses of amphibolite, quartzite, and eclogite, 2 Quartz-sericite phyllite, 3 Serpentinite, 4—5 Thrusts of North Karavanke Alps, 4 Middle Triassic dolomite, 5 Upper Cretaceous marl, sandstone, and limestone with Hippurites, 6—8 Southern Alps, 6—7 Thrust of South Karavanke Alps, 6 Upper Carboniferous slate, sandstone, and conglomerate, 7 Middle Triassic limestone, 8 Triassic limestone and dolomite of the Savinja thrust, 9 Miocene clastic rocks of Panonian Fault Basin in the Karavanke thrust structure, 10—11 Plioquaternary depressions, 10 Plioquaternary clastic rocks, 11 Quaternary alluvial and proluvial sedimentary rocks, 12 Transcurrent fault, 13 Gravitational fault, 14 Thrust, 15 Borehole

zahodni strani konjiške udorine je narivna zgradba vidna na površju, medtem ko leži sredi udorine domnevno pod pliokvartarnimi sedimenti. Južno od periadriatskega šiva so narinjene Južne Alpe proti jugu. Metamorfne kamenine Pohorja so nastale v bajkalski in kaledonski orogenezi, tj. v času mlajšega predkambrija in starejšega paleozoika. V času zgodnje alpidске orogeneze pa so bile nagubane in narinjene proti severu, tako da leže narivi severnih Karavank na narivni zgradbi Pohorja. V jedru pohorskega metamorfnega masiva se nahaja oligocensko-miocenski tonalitni lakolit. Metamorfne kamenine in tonalit je predril v srednjem miocenu dacit.

V pliocenski epohi je zaradi lokalnih vertikalnih premikanj ob reaktiviranih transkurentnih prelomih nastala konjiška udorina. Današnje obliko je dobila v zaporednih neotektonskih aktivnostih ob gravitacijskih prelomih v pliocenu in kvartarju. Tektonska aktivnost še ni končana, kar pričajo občasni potresi na področju Konjic.

Najbolj pomembno vodonosno kamenino predstavlja triadni dolomit, ki prihaja na površje na več krajih vzhodno in zahodno od Zreč, verjetno pa leži tudi v podlagi konjiške udorine.

Geologi predpostavljajo, da se dolomit pojavlja lahko v treh narivih. Narivi sestojijo v glavnem iz plasti triadnega dolomita, diskordantno odložene gosavske krede in prav tako diskordantno odloženih helvetskih klastitov. Pred usedanjem pliokvartarnih sedimentov so bile posamezne tektonske grude dvignjene in erodirane, tako da so posebno v zgornjih dveh narivih odneseni helvetski klastiti in ponekod celo gosavske plasti. Spodnji nariv leži na metamorfnih kameninah. Vrtina je pokazala, da so v njem ohranjeni vsi trije stratigrafski členi. V ostanku srednjega nariva vzhodno od Zreč je na površju viden samo dolomit, ki leži v narivnem kontaktu s helvetskimi klastiti spodnjega nariva. Pri Stranicah leže na dolomitu delno gosavska kreda delno miocenski klastiti. Zgornji nariv, ki je na površju ohranjen severozahodno od Zreč, vsebuje samo dolomit. Enako zgradbo predpostavljamo tudi pod pliokvartarnimi sedimenti konjiške udorine. Dolomit ima ugoden položaj z vidika geotermije. V njegovi talnini in krovnini se nahajajo toplotno slabo prevodne kamenine, ki so tudi za vodo neprepustne. Na toplotne razmere ožje okolice pa poleg globoke prelomne tektonike verjetno vpliva tudi bližina felzičnih magmatskih kamenin pohorskega masiva.

Med hidrogeološkimi raziskavami v letih 1976/78 (F. Drobne, 1977; R. Verbovšek, 1979 neobjavljeno) je bila ob Dravinji pri Zrečah izmerjena povišana temperatura vode v nekaterih izvirih in močilih. Topla voda izvira ob prelomu, ki poteka v smeri približno SW-NE vzdolž severnega dela naselja Zreče. Tam prihaja na površje triadni dolomit, ki je prepusten za vodo. V rečnih naplavinah ob Dravinji je imela voda temperaturo 15 do 17,5 °C.

Južno od kontakta pohorskih metamorfnih kamenin z miocenskim laporjem je bilo izvršeno geoelektrično sondiranje. Raziskave so pokazale, da se globina do visokoupornostne podlage miocenskih sedimentov sorazmerno hitro povečuje proti jugu. Na razdalji okoli 800 m od severnega obrobja miocenske konjiške udorine pri Zrečah je bila že na globini okoli 240 m. Ker sonde niso bile zadosti dolge, nismo mogli določiti debeline te podlage niti je nismo litološko razčlenili.

Hidrogeološke in karotažne raziskave v konjiški udorini

Prvotno smo imeli namen raziskati precej strm kontakt dolomita z miocenskim laporjem. Ker to ni bilo izvedljivo, smo izbrali geološki presek pri Zrečah, okoli 750 m južno od prelomne cone, ki poteka vzdolž obrobja pohorskega metamornega kompleksa. Na sl. 2 je podana njegova poenostavljena litološka sestava. Do globine 235 m sega za vodo neprepusten miocenski lapor. Pod njim sledi najprej gosavski laporasti apnenec do 253 m in nato do globine 484 m vodonosni triadni dolomit, ki leži na pohorskem kloritno-kalcitnem skrilavcu. Ko je bila vrtina končana, so jo aktivirali s čisto vodo, nato so jo v treh odsekih obdelali še s solno kislino. Končni rezultati enomesečnega črpalnega preizkusa so bili: izdatnost 22 l/s, temperatura na ustju vrtine 21 °C, tlak zaprte vrtine 0,29 MPa, koeficient vodoprepustnosti $1,1 \times 10^{-8}$ m/s in transmisivnost $2,6 \times 10^{-3}$ m²/s. Vsi ti podatki se nanašajo na vodonosni dolomit.

Ugotovljene izdatnosti izvirov in vrtine presegajo količino infiltriranih padavin v bližnje karbonatne kamenine. Če upoštevamo po analizi Instituta »J. Stefan« še nizke vrednosti za tritij ($6 \text{ TU} \pm 85 \%$),* potem sklepamo, da je tok podtalnice relativno počasen, napaja pa se verjetno iz karbonatnih kamenin na jugu konjiške udorine. Ako privzamemo, da je referenčna temperatura okoli +15 °C, znaša specifična entalpija iztekajoče vode okoli 0,025 MJ/kg. Idealna količina energije te vode pri izdatnosti 22 l/s pa je v enem dnevu ekvivalentna energiji približno ene tone nafte.

Določitev gostote Zemljinega toplotnega toka pri Zrečah

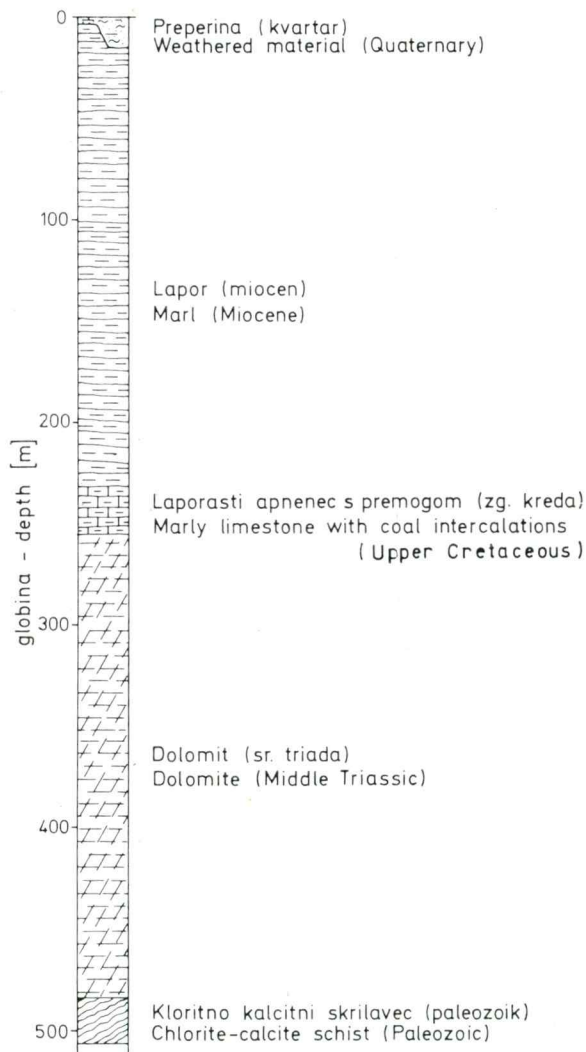
Toplotne prevodnosti kamenin so bile določene z merilnikom toplotne prevodnosti MTP-1 domače konstrukcije (P. Prelovšek, M. Babič & B. Urban, 1982). Meritve je izvedel M. Babič; ponovljivost rezultatov je bila manjša od 10 % njihove povprečne vrednosti. Rezultate meritev kaže sl. 3. Pripomniti je treba, da sta bila vzorca kamenin iz globin 239 in 501 m tektonsko spremenjena — napokana. To je vzrok njunih nižjih toplotnih prevodnosti, kot bi jih sicer pričakovali za te vrste kamenin. Omenjena vzorca sta iz odsekov povišane poroznosti in prepustnosti. Zato je tam prišlo verjetno do gibanja vode, ki je vplivala na konduktivno toplotno polje. Fourierjeve relacije pa za take odseke ne moremo uporabiti. Po obliki temperaturnega diagrama vrtine in iz karotažnih meritev v njej sklepamo, da je dolomit od globine 380 m navzdol do kontakta z metamorfnu podlago bolj prepusten in s tem tudi vodonosen.

Temperaturne meritve je izvedel eden od nas (R. V.) po metodi merjenja temperature na dnu vrtine (BHT). Uporabil je po dva maksimalna živosrebrna termometra z natančnostjo $\pm 0,2$ °C. Približno eksponentialno potekajoč proces temperaturne stabilizacije smo grafično ekstrapolirali. S tem smo dobili oceno formacijske temperature v vsakokratni globini.

Izračunanih vrednosti gostote toplotnega toka (sl. 3) nismo korigirali. Njena povprečna vrednost na mestu vrtine znaša 75 mWm^{-2} s standardno deviacijo 35 %. Pri tem smo upoštevali samo meritve v globinskem intervalu od 100 do 400 m.

* 1 TU (tritium Unit) = enota tritija (najtežji vodikov atom H³) je definirana kot en atom H³ na 10^{18} atomov H¹.

Kot dodatni podatek navajamo še rezultat visokoločljivostne radiometrične analize dveh vzorcev kamenin; eden je iz vrtine, drugi pa iz kamnoloma v pohorskem tonalitu. Procentno sestavo vseh treh elementov, pomembnih za produkcijo radiogene toplote, tj. U^{235} , Th^{232} in K^{40} , je analiziral D. Brajnik z Instituta »J. Stefan«, odsek za fiziko jedra. Za njen izračun smo uporabili revidirano enačbo po Rybachu (1981). Dobili smo naslednje rezultate:



Sl. 2. Litostratigrafsko zaporedje konjiške udorine

Fig. 2. Lithostratigraphic succession of the fault basin of Konjice

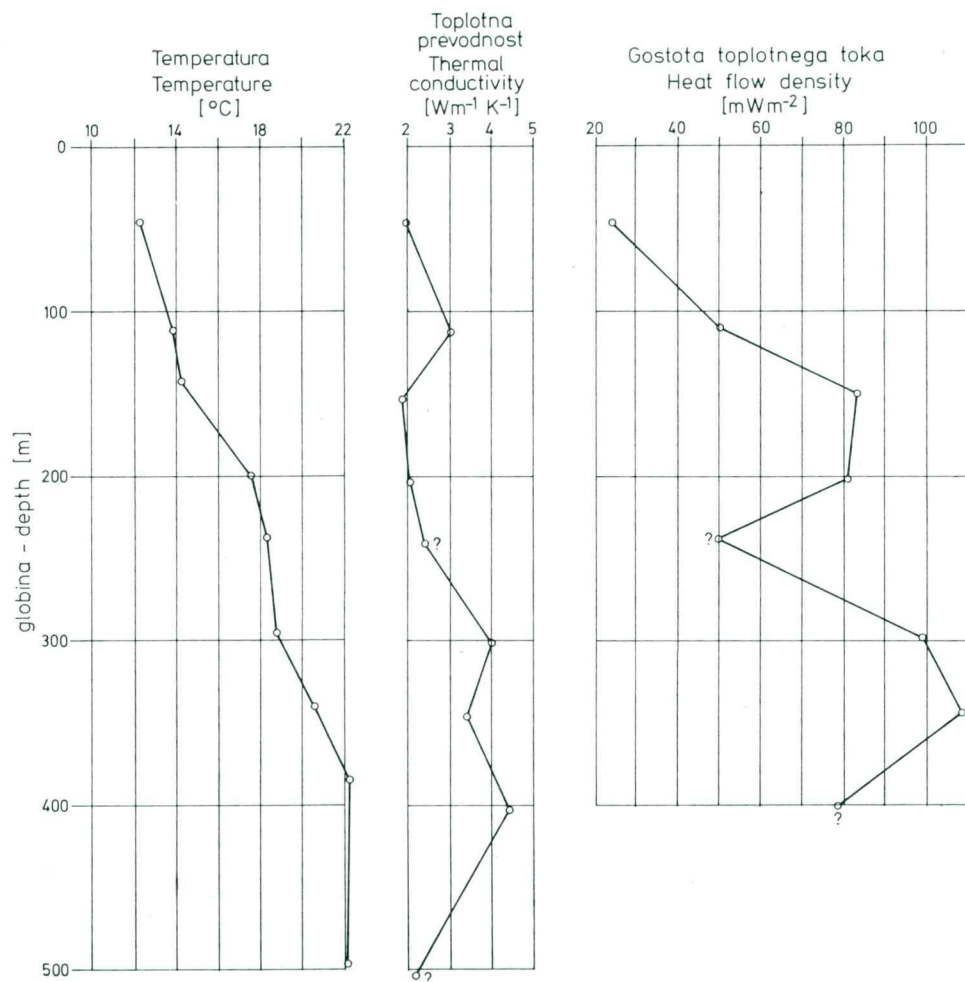
kloritno-kalcitni skrilavec pri Zrečah, globina 501,5 m
tonalit v Josipdolu na Pohorju, globina 40 m

množina toplote

$0,26 \mu\text{Wm}^{-3} \pm 25 \%$

$3,0 \mu\text{Wm}^{-3} \pm 15 \%$

Tonalitni vzorec ima povišano vrednost toplotne produkcije. Visoke vrednosti pa so eden odločilnih parametrov za oceno perspektivnosti ozemlja kot geotermičnega izvora tipa suhe vroče kamenine (HDR). To je sicer ena sama meritev, ki jo je treba preveriti še na drugih krajih.



Sl. 3. Diagrami temperature, toplotne prevodnosti in gostote toplotnega toka v severnem delu konjiške udorine

Fig. 3. Temperature log, thermal conductivity, and heat flow density in the northern part of the fault basin of Konjice

Pomen meritev v konjiški udorini

Z raziskavami na lokaciji pri Zrečah v konjiški udorini smo dobili nekatere informativne hidrogeološke in geotermične parametre dolomitskega vodonosnika, vendar njihovega dokončnega pomena še ne moremo točneje opredeliti. To so izolirani podatki, ki jih je treba potrditi in dopolniti z nadaljnjimi podobnimi raziskavami. Hidrogeološka situacija na tem območju izgleda zelo ugodna, kar je važna postavka za oceno geotermičnega nahajališča.

Vsekakor gre na območju Zreč za nizkoentalpijski geotermični izvor, ki bi bil pri skrbni izrabi lahko za gospodarstvo koristen. Ocena toplotne vsebnosti tega ozemlja zaenkrat ni možna, ker je še premalo podatkov.

Celotno toplotno moč določenega geotermičnega sistema sestavljata dva dela, konduktivni in konvektivni.

$$E = S \cdot \lambda \frac{\Delta T}{\Delta z} + V \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T' \quad (2)$$

Pri tem je S površina, ki jo pokriva anomalija gostote toplotnega toka, V je volumen tople vode, ki jo odvezujemo iz vodonosnega rezervoarja v časovni enoti, ρ in c njena gostota in specifična toplota in $\Delta T'$ temperaturna razlika med toplo vodo na površju in povprečno letno temperaturo okolice. Prvi člen nima ekonomskega pomena, predstavlja pa tisto toplotno energijo, ki je obstoječi geotermični rezervoar segrela in ga še ogreva. To ogrevanje je silno počasno, zato velja vsak geotermični izvor v človeškem časovnem merilu kot neobnovljiv. Smiselna eksploatacija mu torej določa njegovo življenjsko dobo. Povišana vrednost konduktivnega toplotnega toka je torej eden izmed pogojev za večjo verjetnost toplotne koncentracije.

Gostota Zemljinega toplotnega toka pri Zrečah (75 mWm^{-2}) je napram njeni modalni vrednosti za Evropo (60 mWm^{-2}) nekoliko povišana (V. Čermak, 1979).

Literatura

Buntebarth, G. 1980 Geothermie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Čermak, V. 1979, Heat flow map of Europe. V: Čermak-Rybach: Terrestrial heat flow in Europe str. 3—40., Springer Verl. Berlin etc. s karto Čermak V. in Hurtig E. v M = 1 : 6 000 000.

Drobne, F. 1977, Študija vodnih virov na ozemlju med Zrečami in Pohorjem, I. faza, leto 1976/77. Arhiv Geološkega zavoda Ljubljana.

Mioč, P. & Žnidarčič, M. 1977, Osnovna geološka karta, list Slovenj Gradec, M = 1:100 000. Zvezni geološki zavod Beograd.

Rybach, L. 1981, Geothermal systems, conductive heat flow, geothermal anomalies. V: L. Rybach in L. J. P. Muffler, Geothermal systems. Str. 1—36. J. Wiley & Sons, Chichester itd.

Verbovšek, R. & D. Ravnik, 1982, Raziskave termalne vode v Zrečah. Arhiv Geološkega zavoda Ljubljana.