

Geotermična slika Slovenije-razširjena baza podatkov in izboljšane geotermične karte

Geothermal pattern of Slovenia-enlarged data base and improved geothermal maps

Dušan RAJVER¹ & Danilo RAVNIK²

¹Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, 1000 Ljubljana, Slovenija, E-mail: dusan.rajver@geo-zs.si

²Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija.
E-mail: danilo.ravnik@guest.arnes.si

Ključne besede: temperatura, toplotna prevodnost, gostota toplotnega toka, geotermična anomalija, Slovenija

Key words: temperature, thermal conductivity, heat flow density, geothermal anomaly, Slovenia

Kratka vsebina

Opisane so temperaturne karte za globine 500, 1000 in 2000 m na osnovi razširjene baze geotermičnih podatkov iz 395 vrtin. Skupaj s karto gostote toplotnega toka poudarjajo geotermično anomalijo Panonskega bazena, kakor tudi nekatere druge anomalije kot je Čateško polje. V osrednji Sloveniji in na obalnem območju prevladujejo poprečne globinske temperature.

Abstract

Temperature maps for depths of 500, 1000 and 2000 m are described, based on enlarged data base of 395 boreholes with geothermal data. Together with heat flow density map they emphasize the Pannonian basin geothermal anomaly, and some other anomalies, such as the Čatež field. In central Slovenia and coastal area average depth temperatures prevail.

Uvod

V zadnjih desetletjih je postala Zemljina toplota zanimiva tudi kot energetski vir. Za izkoriščanje mineralnih ali energetskih surovin ter za njihov študij je potrebno poznavanje toplotnega stanja in toplotnih procesov v Zemljini skorji. Temperaturne karte nekega ozjega območja, ki je v fazi izkoriščanja geotermalne vode, so dober pokazatelj časovnih sprememb toplotnega polja, če je le gostota vrtin, v katerih se izvajajo meritve, zadosti velika. Koristne so ne samo za na-

črtovanje bodočih raziskav pri iskanju geotermalnih virov, temveč so kot dopolnilo ostalim geofizikalnim kartam uporabne še za hidrogeologijo podzemnih in pripovršinskih vod, ekonomsko geologijo, študij termalne evolucije sedimentnih bazenov, geodinamiko, geotermijo skorje in litosfere, ugotavljanje klimatskih sprememb v nekaj zadnjih stoletjih in tisočletjih, načrtovanje globokega znanstvenega vrtanja, itd.

Za izdelavo geotermičnih kart Slovenije so uporabljeni podatki večine od 395 vrtin iz baze geotermičnih podatkov. Še največ

vrtn z geotermičnimi podatki različne kakovosti je lociranih v severovzhodni Sloveniji. Tam so tudi enakomerneje porazdeljene. Drugod so večinoma koncentrirane v posameznih bolj ravninskih območjih, kot na primer v Velenjsko-Šoštanski kotlini, Ljubljanski kotlini, Krški kotlini in tudi na obalnem območju. Zelo malo vrtn s temi podatki pa je v hribovitem območju zahodne Slovenije, večjem delu Dolenjske in Posavja, na Koroškem, medtem ko jih na Notranjskem, v Brkinih in na širšem območju Julijskih in Kamniško-Savinjskih Alp skorajda ni. V hribovskem območju pač ni bilo potrebe po globokem zajemu vode, pa tudi pričakovana temperatura morebitne termalne vode je tam nižja od tiste, ki bi jo pridobivali iz vrtn v dolini. Seveda je ponekod tam izvrtano precej globljih vrtn za raziskave mineralnih surovin (okolica Idrije, Krmelj na Dolenjskem, Mežica, itd.), vendar te vrtnine večidel niso cevljene, zato so bile nedostopne, pa tudi nivo vode je v hribovitem delu v njih dokaj globoko, kar vse onemogoča meritev temperature. V večjem delu Slovenije so točni globinski termični podatki zato še vedno pomanjkljivi. Tu in tam so sicer bile izvrtane globoke vrtnine, v katerih smo merili temperaturo, tudi v zahodni in osrednji Sloveniji, v južni Sloveniji razen v Primorju pa jih je zelo malo ali pa jih sploh ni.

Osnove geotermičnih predvsem temperaturnih meritev v Sloveniji je podal že Ravnik (1980). V letih 1987–1991 je potekalo enotno zbiranje geotermičnih podatkov v nekdanji Jugoslaviji po navodilih »Mednarodne komisije za toplotni tok« v okviru IASPEI in Komisije Evropske skupnosti. Cilj je bil izdelava geotermičnih kart Jugoslavije za Geotermalni Atlas Evrope (Ravnik et al., 1992). Pri tem smo pridobivali podatke z meritvami v novih in starejših dostopnih vrtnah, jih ustrezno obdelovali in izdelali geotermične karte tudi za Slovenijo. Mnoge nove vrtnine niso bile le geotermične, temveč večinoma hidrološke in torej namenjene vodoskrbi ali nadaljnjim hidrogeološkim raziskavam. Meritve geotermičnih parametrov v vrtnah se nadaljujejo, vendar od leta 1995 v precej zmanjšanem obsegu, ker ni investicij v nova, predvsem globlja vrtanja.

Večina kvalitetnih geotermičnih podatkov je pridobljena v severovzhodni Sloveniji. Tam je bila temperatura merjena v številnih globokih naftnih in hidrogeoloških termalnih

vrtnah. Predvsem so dobri podatki iz termalnih vrtn, v katerih je temperatura merjena točkovno vzdolž posameznih vrtn. V naftnih vrtnah je merjena z metodami, ki so standardne v naftnih raziskavah, kot so BHT (angl. bottom hole temperature=temperatura na dnu vrtnine) in DST (angl. drill stem test=testiranje odseka vrtnine) meritve, ki so manj točne, saj so izvajane v nestabiliziranem toplotnem stanju vrtn. To so le posamezni globinski točkovni podatki. V nekaterih vrtnah so izvajali tudi karotažne meritve temperature (T in dT) kmalu po vrtanju vzdolž določenih odsekov vrtnine, prav tako v toplotno neustaljenem stanju vrtnine.

Metodologija izdelave temperaturnih kart

Temperatura, gostota toplotnega toka (GTT), toplotna prevodnost kamnin, velikost geotermičnih virov (resursov) in njihovih zalog (rezerv) so osnovni parametri, potrebni za poznavanje toplotnega stanja in procesov v Zemljini notranjosti. Prikazujemo jih v obliki kart in profilov. Za njihovo izdelavo je potrebno poznati kvantitativne vrednosti toplotnih, hidrogeoloških in geokemijskih lastnosti kamnin in fluidov v vrhnjem delu Zemljine skorje.

Širjenje toplote iz notranjosti Zemlje proti površju se v trdnih kamninah Zemljine skorje odvija s kondukcijo, s konvekcijo pa le v območjih cirkulacije vode in plinov. Zaradi pretakanja vode se toplotni tok spreminja, zato je njegov študij tako pomemben, saj karte GTT najbolj odražajo geotermično obetavnejša območja (Ravnik, 1991). Močna konvekcija termalne vode v razpokanih kamninah lahko precej poviša GTT v vrhnjem slabo prepustnem sedimentnem paketu. Pri meritvah temperature v vrtnah je za doseg pravih temperatur potrebna toplotna stabilnost vrtnine. Po pravilih »Mednarodne komisije za toplotni tok« se sme iz izmerjenih vrednosti v vrtni temperatura ekstrapolirati do največ 1,5-kratnika največje izmerjene globine, pa še to le pri poznavanju globlje litološke sestave. Če pa ni podatkov iz vrtn, se temperature v večjih globinah pri upoštevanju konduktivnega prenosa toplote določajo z rešitvijo Laplaceove enačbe. Tako smo pridobili nove točkovne podatke (ocene globinskih temperatur) praktično povsod, kjer ni direktnih podatkov oziroma nobenih pri-

mernih vrtin za meritve temperature, ali pa je premajhna gostota vrtin z geotermičnimi podatki, razen v Podravju in Pomurju. Če imamo n plasti kamnin s toplotno prevodnostjo K_i v posamezni plasti debeline z_i , potem je splošna oblika Laplaceove enačbe (Haenel et al., 1988) za izračun temperature v poljubni globini:

$$T(z) = T_0 + q_0 \sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i}{K_i} \quad (1)$$

z = globina do neke litološke plasti (m)

T_0 = povprečna letna temperatura na površini lokacije ($^{\circ}\text{C}$)

Δz_i = debelina plasti (m)

$\Delta z_i / K_i$ = termična globina ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)

q_0 = površinska gostota toplotnega toka (W/m^2)

Povprečna letna temperatura površja T_0 na različnih nadmorskih višinah je eden od robnih pogojev pri modeliranju toplotnega polja. Z enačbo (1) lahko izračunamo temperaturo na dnu vsake plasti v primeru obstoja več vodoravnih plasti z debelinami Δz_i in toplotnimi prevodnostmi K_i . Enačba je uporabna le za zgornjih nekaj kilometrov Zemljine skorje. Koncentracija radiogenih elementov (U, Th, K^{40}), predvsem v kislih magmatskih in nekaterih metamorfnih kamninah ter klastičnih sedimentih, nekoliko poveča izmerjeno vrednost GTT. Zato je bolj uporabna naslednja enačba (Haenel et al., 1988), pod pogojem, da ni vertikalne variacije v radiogeni produkciji toplote in v toplotni prevodnosti znotraj posameznih plasti:

$$T(z) = T_0 + \frac{q_0}{K_0} z - \frac{A_0}{2K_0} z^2 \quad (2)$$

A_0 = radiogena produkcija toplote (W/m^3)

Enačba (2) se uporablja za ekstrapolacijo temperature od 250 do 3000 metrov globine z upoštevanjem, da se toplota širi samo v navpični smeri, torej enodimenzionalno. Navadno pa je toplotna prevodnost kamnin spremenljiva tudi v vodoravni smeri, površje je lahko neravno, posebno velik vpliv pa ima migracija podzemne vode (Ravník, 1991). Ekstrapolirane temperature so lahko obremenjene z napako, ki je odvisna od naštetih vzrokov. Verjetnost napačne ekstrapolacije tako lahko precej naraste pri večjih globinah.

Litološka sestava posameznih plasti ali kamninskih skladov in njihove debeline so odčitane iz geoloških profilov na Osnovni geološki karti (OGK) SFRJ iz vseh njenih listov razen listov Goričko, Čakovec, Nadjkaniža in Varaždin. Na slednjih se nahaja zadostno število vrtin z globinskimi geotermičnimi podatki. Glede na predvideno litološko sestavo kamnin do željene globine pod posamezno lokacijo so privzete toplotne prevodnosti na izkustveni osnovi oziroma iz izmerjenih vrednosti na jedrovanih kamninah iz vrtin.

Vrednosti površinske GTT so odčitane iz kart, izdelanih v prejšnjih letih (Ravník et al., 1992; Ravník et al., 1995; Rajver et al., 2002). Vrednosti GTT so manj zanesljivo določene ravno na obširnih območjih zahodne, južne, severne in delno tudi osrednje Slovenije. Zato je ta vrednost v enačbi (2) še najmanj zanesljiva. V izračunih je upoštevanje parametra radiogene produkcije toplote vedno znižalo temperaturo za nekaj stopinj, posebej v napovedi za večje globine. To znižanje pa je upoštevano le delno zaradi predvidenega rahlega porasta geotermičnega gradienta globlje od 2 km, kjer konvekcija hladne meteorske vode verjetno ne vpliva več tako močno.

Po opisanem načinu je za bolj enakomerno pokritost Slovenije s točkovnimi temperaturnimi podatki v različnih globinah pridobljeno 131 dodatnih lokacij. Seveda je skupno število uporabljenih točkovnih podatkov za izris izoterm v globinah od 250 do 3000 m različno. Za vse karte do 2000 m je uporabljeno vseh 131 dodatnih lokacij, za karto v globini 3000 m pa 108 teh lokacij. Število vrtin, iz katerih so uporabljeni geotermični podatki, je največje za karto temperatur v globini 250 m (286 vrtin) in seveda najmanjše za karto temperatur v globini 3000 m (142 vrtin). Za izris najglobljih izoterm je razumljivo še najmanj dobrih geotermičnih podatkov iz vrtin. Za izris karte GTT so upoštevani podatki iz 94 vrtin in vse dodatne točke.

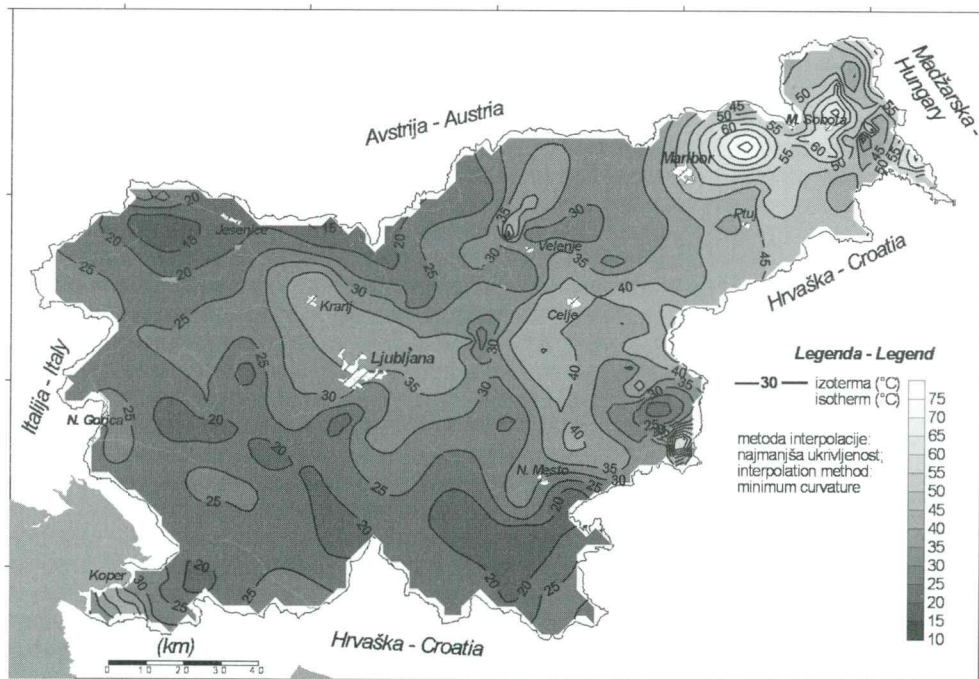
Nove ugotovitve o globinskih temperaturah

Nove karte omogočajo boljši vpogled v geotermično polje Slovenije v večjih globinah. Lahko omenimo nekaj vzrokov za precej povišane temperature nad poprečjem za

neko globino na nekaterih sicer geografsko omejenih območjih. Izoterme so bolj povišane v severovzhodni in ponekod v vzhodni Sloveniji. To je obrobje Panonskega bazena, ki je znana regionalna geotermična anomalija zaradi manjše globine do Mohorovičićeve diskontinuitete. Tudi globina do predterciarne večidel metamorfne podlage znaša tu ponekod manj kot 1 km. Vprašanje pa je, če so te kamnine res še nosilec toplote. Bolj verjetno so le delno, oziroma gre za cirkulacijo termalne vode skozi razpokane cone v podlagi ali pa nekje bolj bočno oddaljeno. Tam in pa ponekod v Pomurju, predvsem na območjih Murskosoboškega masiva (Murske Sobote z okolico) in Ormoško-Selniške anti-forme oziroma njenega podaljška pri Lendavi, so visoke temperature, v globini 500 m nad 34°C, v globini 1000 m nad 55°C (slika 1) in v globini 2000 m že nad 90°C. Vmes med obema antiformama nastopajo nižje temperature v Ptujsko-Ljutomerski sinformi, opazne že v globlinah 500 in 1000 m. Tu se nahaja poglobitev do mezozojske karbonatne ali metamorfne podlage, kjer je možna konvekcija termalne vode. Poleg tega možnega vzroka je podlaga s svojo višjo toplotno

prevodnostjo nosilec toplote in s tem vir povišanih temperaturnih gradientov v terciarnem paketu plasti povsod, kjer je dvignjena proti površini v obliki anti-form.

Lokalno povišane temperature so tudi na širšem območju Rogatca, pri Rogaški Slatini in Podčetrtku (nad 45°C v globini 1000 m). Lokalno zelo povišane vrednosti, na primer v globini 500 m precej nad 46°C, nastopajo v omejenem delu Krške kotline, točneje na Čateškem polju, zaradi močne konvekcije termalne vode v razpokani prelomni coni triasnih karbonatnih kamnin, ki tu prevladuje nad konduktivnim prenosom toplote. To se odraža v izmerjenih geotermah v tamkajšnjih vrtinah. Sicer pa na Čateškem polju temperatura še ni bila nikjer merjena do globine 1000 metrov, ker tam sploh ni tako globokih vrtin. Širše v Krški kotlini pa nikjer ni merjena do globine 2000 metrov, saj je najgloblja vrtina pri Drnovem (globine 1252 m) izmerjena v toplotno stabilnem stanju vrtine le do 640 m. Čateška anomalija je dobro vidna na kartah do globine 2000 m, v globini 3000 m pa ni več opazna. Lahko torej sklepamo na kroženje termalne vode nekje do globine 2 do 3 km.



Sl. 1. Temperatura (°C) v globini 1000 m

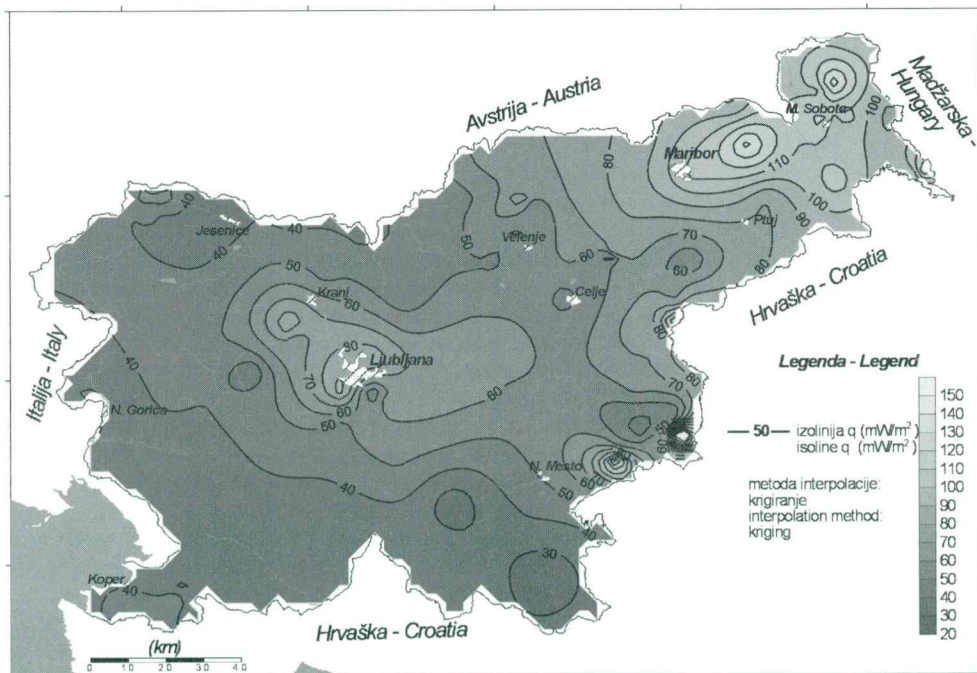
Fig. 1. Temperature (°C) at 1000 m depth

Na severnem delu Krške kotline ni znakov o kakšni geotermalni anomaliji. V dosedaj izmerjenih vrtnah tam niso nikjer ugotovljeni povišani temperaturni gradienti, celo obratno, izmerjene so nizke temperature in s tem nižji temperaturni gradienti od poprečja (30 mK/m). Najgloblje temperaturno izmerjene vrtnice v severnem delu kotline so globoke le 400 m, nikjer pa temperaturne sonde nismo uspeli spustiti prav do dna teh vrtn.

Rahlo povišane temperature imamo še v Laško-zagorski sinklinali, na zahodnem robu Krške kotline, predvsem pri Šmarjeških Toplicah (npr. v globini 500 m nad 34°C), na severu pa v Velenjski kotlini, kjer se kaže močna anomalija pri Lajšah (npr. v globini 250 m krepko nad 30°C). Ta anomalija je dobro opazna na temperaturnih kartah do globine 1000 m (slika 1). Sklepamo lahko na globino cirkulacije termalne vode okrog 1,5 km. V osrednji Sloveniji so ugotovljene rahlo povišane temperature samo v Ljubljanski kotlini na Ljubljanskem Barju ter severno proti Kranju in delno Kamniku. Vzhodno od Kamnika je pri Vasnem opazna manjša ano-

malija na kartah do globine 500 m, v globini 1000 m se pa že izgubi. V bistvu so v osrednji Sloveniji skoraj poprečne temperature, ki veljajo za vrhnje plasti Zemljine skorje. Manj zanesljiv potek izoterm je na območju magmatskih in metamorfnih kamnin v Vzhodnih Alpah, torej na Pohorju in Kozjaku, ter na območju Kamniško-Savinjskih Alp in Karavank kot delu Južnih Alp, saj tam z redkimi izjemami ni globokih vrtn z geotermičnimi podatki.

Najmočnejše geotermalne anomalije izstopajo tudi na karti površinske GTT (slika 2) z vrednostmi lokalno tudi nad 100 mW/m². Za vso ostalo Slovenijo so značilne večinoma nizke temperature, marsikje v goratem območju Julijskih Alp in Zunanje cone Dinaridov so nižje od poprečja. Vzrok so večja debelina Zemljine skorje, nad 35 km, marsikje tudi nad 40 km (Dragašević et al., 1989) in debela skladovnica karbonatnih kamnin, ki so marsikje dobro razpokane in zakrasele. S tem je omogočena globoka cirkulacija hladne meteorske vode, ki potisne izoterme v večjo globino. Prav tako ni nobenih znakov za kakšen plitvejši magmatizem



Sl. 2. Površinska gostota toplotnega toka (mW/m²)

Fig. 2. Surface heat flow density (mW/m²)

(plutonizem) kot je to možno v severovzhodni Sloveniji. Vpliv razhlajevanja je opazen na območju Žirovskega vrha, kjer z meritvami v vrtinah nismo nikjer ugotovili višjega temperaturnega gradienta od 10 mK/m. Marsikje v zahodni in južni Sloveniji sploh ni geotermičnih podatkov iz globokih vrtin. Izjema je območje Istrske platforme z rahlo pozitivno anomalijo, ki se vleče v širšem pasu od Izole proti Dragonji, vidna pa je predvsem do globine 2000 m. V globini 1000 m lahko tam pričakujemo nad 35°C. Vzrok še ni docela razjasnjen, domnevamo pa, da so ponekod v paleocenskem-eocenskem apnencu in pod njim v krednih karbonatih močnejše razpoke s termalno vodo. Nedavno odkritje podmorskega termalnega izvira pri Izoli je v skladu z našimi kartami. Drugi vzrok bi lahko bil, da so nekatere flišne plasti paleogenske in kredne starosti obogatene z bitumnom. Flišne plasti tu delujejo kot termoizolacijski pokrov, saj so laporji slabše toplotno prevodni od karbonatov. Drugod so razmere različne, odvisne so od možne konvekcije meteorske vode v karbonatnih masivih, ki so ponekod bolj razpokani in zakraseli.

Literatura

- Dragašević, T., Andrić, B., Joksović, P., 1989: SFR Jugoslavija. Strukturna karta Mohorovičičeve diskontinuitete – 1:500.000. Prognozna karta globinskega položaja geoloških elementov. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Haenel, R., Rybach, L., Stegena, L. 1988: Fundamentals of geothermics. In: Haenel, R., Rybach, L. & Stegena, L. (Eds.): Handbook of terrestrial heat-flow density determination. Kluwer Academic Publishers, 9-57, Dordrecht, Boston, London.
- Rajver, D., Ravnik, D., Premru, U., Mioč, P., Kralj, P., 2002: Slovenia. In: S. Hurter and R. Haenel (Editors), Atlas of Geothermal Resources in Europe. European Commission, Research Directorate-General. Publ. No. EUR 17811, Luxembourg.
- Ravnik, D., 1980: Geotermalna energija v Ljubljanski kotlini-III.faza. Geotermične meritve I., Geološki zavod Ljubljana, 75 p.
- Ravnik, D., 1991: Geotermične raziskave v Sloveniji. Geologija 34, 265-303, Ljubljana.
- Ravnik, D., Kolbah, S., Jelić, K., Miličević, M., Miošić, N., Tonic, S. and Rajver, D., 1992: Yugoslavia. In: E. Hurtig, V. Čermak, R. Haenel and V. Zui (Editors), Geothermal Atlas of Europe. Geoforschungszentrum Potsdam Publ., 1:102-104, 152-153.
- Ravnik, D., Rajver, D., Poljak, M., Živčič, M., 1995: Overview of the geothermal field between the Alps, the Dinarides and the Pannonian basin. Tectonophysics 250, 135-149.