

UDK 553.7+622.322(497.12)=863

Terciarni vodonosniki v Slovenskih goricah in na Goričkem

Tertiary aquifers in the Slovenske Gorice and Goričko hills

Ljubo Žlebnik

Geološki zavod, 61000 Ljubljana, Parmova 33

Kratka vsebina

Terciarne laporaste in glinaste plasti severovzhodne Slovenije vsebujejo vodonosne peščene in prodnate vložke. Voda v teh vodonosnikih je pod pritiskom. Ponekod je mineralizirana, v večjih globinah pa ima tudi višjo temperaturo. V dolinah Drave in Mure ter delno Pesnice in Ščavnice so terciarne plasti prekrите s kvartarnimi prodnimi naplavinami, ki vsebujejo največje zaloge pitne vode na tem območju. Avtor se je omejil na opis terciarnih vodonosnikov, ki vsebujejo mineralno in termalno vodo. Izračunal je njihove najpomembnejše hidrogeološke parametre na podlagi poskusnega črpanja ter ocenil zaloge nekaterih nahajališč mineralne in termalne vode.

Abstract

The land between the Mura and Drava rivers is a morphologic region made up of the Tertiary marly and clayey deposits interbedded with water bearing sand and gravel. The water occurs under sufficient hydrostatic pressure to rise above the topographic surface. In some restricted areas the mineral matter content and free carbon dioxide give it a pleasant taste. The Quaternary aquifers occurring in the adjacent Mura and Drava level fields are under water table conditions. Areally they are the most extensive and widely available source of fresh water. Thermal water was tapped in some places from the deep-seated Tertiary beds, underlying the Quaternary deposits. It is interesting to note the difference between the Miocene and Pliocene aquifers, as their hydraulic mechanisms are concerned. The geological conditions are favourable for the Pliocene aquifers. Their hydraulic characteristics depend upon the uplifted Sobota block which is considered to be a recharge area; here, highly permeable Pliocene beds appear at the land surface, overlying the north-east plunging metamorphic basement. On the other hand, the Sobota uplift is a ground-water barrier that prevents the free recharge of the deep-seated Miocene aquifers in the Radgona and Ljutomer depressions.

The most important hydrogeologic parameters involved in the thermal and mineral aquifers were established from the pumping tests. The perennial yields and withdrawals have been estimated and the question of the amount of recharge and discharge is discussed. The quantities of mineral and thermal waters in storage of the country have been estimated.

Uvod

V severovzhodni Sloveniji so največje zaloge podzemeljskih voda v kvartarnih prodnih naplavinah vzdolž Drave in Mure. Zaradi močne vodoprepustnosti usedlin je izdatnost vodnjakov na tem območju velika. Prebivalci in industrija na Dravskem in Ptujskem polju ter v Pomurju se oskrbujejo z vodo večidel iz teh vodonosnih plasti.

Gričevnato ozemlje med Dravo in Muro in severno od Mure sestoji iz terciarnih lapornih in glinastih plasti z vmesnimi peščenimi in prodnimi usedlinami, ki vsebujejo vodo pod pritiskom. Voda v teh vodonosnikih je ponekod mineralizirana, v večjih globinah pa ima tudi višjo temperaturo.

Do 2. svetovne vojne so terciarne vodonosne plasti v manjši meri izkoriščali le v Radencih, kjer so letno nalili nekaj milijonov litrov mineralne vode. Po letu 1960 so začeli v Pomurju izkoriščati tudi termomineralne in termalne vode v miocenskih in pliocenskih peščenih usedlinah, na katere so naleteli pri iskanju nafte. Močno so po drugi svetovni vojni in pozneje v letu 1965 povečali izkoriščanje mineralne vode v Radencih. Raziskali so tudi nahajališča mineralne in termalne vode v Nuskovi na Goričkem, v Ščavniški dolini, v okolici Lenarta in pri Ptuj.

Pregleden geološki opis

Severovzhodna Slovenija je po svoji geografski legi in geološki zgradbi del obrobja Panonske kotline, in sicer murske in delno dravske udorine. Obe udorini sestavlja več jarkov z vmesnimi pragi. Dna jarkov in pragovi sestoje iz metamorfnih kamenin. Na haloško-ormoškem pragu in pri Kungoti so tudi mlajšepaleozojske in mezozojske plasti. Jarke in pragove so izoblikovali tektonski premiki, ki so se vrstili verjetno še pred oligocenom. Po podatkih Z. Vončina (1965) potekajo te geološke strukture od jugozahoda proti severovzhodu, prekrite pa so z debelimi plastmi mlajšeterciarnih sedimentov in s kvartarnimi prodnimi naplavinami. Paleozojska in mezozojska podlaga je prelomljena s sistemom prelomov severozahod—jugovzhod in prečno na to smer, tako da gre za grudasto geološko zgradbo. Terciarnne plasti so zgrajene sorazmerno enostavno; v zahodnem in severozahodnem delu Slovenskih goric in Goriškega so povečini položno nagnjene proti jugovzhodu in vzhodu. Zato prihajajo na površje proti jugovzhodu vse mlajše in mlajše terciarne plasti, od starejšemiocenskih v najzahodnejšem delu, do pliocenskih pri Gradu, Ljutomeru in Ptuj (sl. 1). V Medjimurju, na Kogu in v Halozah so nagnjene terciarne plasti v obratni smeri, proti severozahodu in severu. Ob ljutomerskem prelomu, ki poteka po robu haloško-ormoškega praga, so terciarne plasti postavljene skoraj v navpično lego, delno pa so celo prevrnjene. Ob prelomih, ki sekajo celotno serijo terciarnih plasti vključno s pliocenskimi, so se tektonski premiki nadaljevali skozi ves terciar in celo v kvartarju, na kar kažejo rečne terase vzdolž Drave, Pesnice, Ščavnice in Mure. Na soboškem pragu se je izoblikovala stopničasta zgradba celotnega zaporedja terciarnih plasti, kar je posledica njegovega dviganja skozi ves terciar.

Pri raziskavah geološke zgradbe severovzhodne Slovenije so bile le v manjši meri uporabljene klasične geološke metode. Mnogo več podatkov so dala geofizikalna merjenja in globoko vrtanje. Terciarnne plasti so namreč povečini prekrite

z glinasto preperino in so izdanki zelo redki. Rečne doline so v celoti prekrите s prodnimi in glinastimi naplavinami; zato terciarnih plasti ni mogoče neposredno raziskovati s površinskim geološkim kartiranjem in z drugimi klasičnimi geološkimi metodami.

V dobršni meri so prispevale k razjasnitvi geološke zgradbe tega ozemlja raziskave nafte ter mineralnih in termalnih voda. V Prekmurju in Slovenskih goricah so bile izvedene obsežne gravimetrične, magnetometrične in seizmične raziskave in izvrtanih je bilo 44 globokih vrtin. Posebej na naftnem območju v Petišovcih in Dolini pa je bilo izvrtanih 118 globokih naftnih vrtin. Na nahajališčih mineralnih voda v Radencih, v dolinah Ščavnice in Pesnice ter v Nuskovi je bilo izvrtanih več kot 100 strukturnih vrtin, globokih 100 do 700 m. Vrtina pri Ptujju je globoka 1100 m. Po podatkih geofizikalnih raziskav, vrtin in v manjši meri tudi površinskega kartiranja je bila geološka zgradba Prekmurja in Slovenskih goríc nadrobneje razčlenjena. Na skrajnem severozahodnem robu Slovenskih goríc in Goriškega poteka prek Kungote, Cmureka in Rogaševca južnogradiščanski prag. Na njem so terciarne plasti debele manj kot 1000 m. Sestojе pa iz miocenskega laporja ter vložkov peščenjaka in konglomerata, ponekod tudi litotamniškega apnenca, oziroma peščenjaka.

Jugovzhodno od tega praga sledi plitva in ozka radgonska depresija, ki se razteza od Maribora prek Radgone proti severovzhodu. V njej so terciarne plasti debele 1000 do 2000 m. Prevladuje miocenski lapor s tanjšimi vložki peščenjaka in konglomerata. Po sredi depresije poteka prelom od jugozahoda proti severovzhodu kot podaljšek rabskega preloma.

Proti vzhodu potekata v smeri jugozahod—severovzhod dve važni strukturi, ki sestavljata večji del Slovenskih goríc in Prekmurja: široki soboški prag med Duplekom pri Mariboru in Mursko Soboto ter široka in globoka ljutomerska depresija med Slovensko Bistrico, Ptujem, Ljutomerom in Lendavo. Na soboškem pragu so terciarne plasti debele manj kot 1000 m. Prevladujejo pliocenske glinaste in peščene plasti, pod njimi leže ponekod v manjši debelini tudi miocenski lapor, peščenjak in konglomerat. Terciarnе plasti in njihovo metamorfno podlago seka sistem prelomov v smeri jugozahod—severovzhod ter prečno na to smer. Plasti so ob prelomih premaknjene za 10 do 100 m, ob ljutomerskem prelomu pa gre za znatno večje vertikalne premike, saj v ljutomerski depresiji debelina terciarnih plasti ponekod presega 4000 metrov. Sestojе zgoraj iz pliocenskega peska, peščenjaka, peščenega proda, gline in laporja, katerih skupna debelina marsikje presega 1000 m. Pod njimi leži miocenski lapor z vložki peščenjaka in redko konglomerata. Depresija je z vzdolžnim ljutomerskim prelomom smeri SW—NE razdeljena na dva dela; v jugovzhodnem prevladujejo miocenske plasti, v severozahodnem pa pliocenske. Od prečnih prelomov NW—SE so trije posebej izraziti — po dolini Ščavnice, prek Ormoža in prek Ptujja (U. Premru, 1976).

Hidrogeološki opis

Na južnogradiščanskem pragu, ki mu pripada skrajni severozahodni del Slovenskih goríc in Goriškega, so miocenske plasti povečini laporne in zelo tenke. Marsikje v globlje zarezanih grapah prihaja na površje metamorfna podlaga, pri Kungoti pa tudi apnenec in dolomit. Ker so terciarne plasti zelo

tenke, poleg tega pa večidel laporne, ni nikakih možnosti za akumuliranje podzemeljskih voda v njih. Pač pa je bil pri Nuskovi najden 10 do 25 m debel vodonosnik poroznega litotamnijskega peščenjaka z mineralno vodo. Le ta je zajeta z vrtinami Nu-4, Nu-7 in Nu-9. V vrtini Nu-3 je zajeta plast vodonosnega sarmatskega peska, ki je severno od vrtine v neposredni zvezi z litotamnijskim peščenjakom.

Plast litotamnijskega peščenjaka je nagnjena proti jugu in leži v globini 43 do 64 m. Sarmatski pesek, zajet v vrtini Nu-3, je v globini 126 m. Mineralna voda vsebuje precej plina CO₂; zato samostojno izteka iz vrtine.

Po podatkih meritev iz leta 1969 je največja možna skupna izdatnost vseh vrtin 7,4 l/s vendar pri tej količini zaradi neustreznega filtra vdira v vrtine pesek. Zato so vrtine dušene z ustreznimi šobami, njihova skupna izdatnost pa je tedaj 3,9 l/s.

Podrobnejše meritve izdatnosti vrtin v letih 1968 do 1971 so pokazale, da je količina vode v začetnem stadiju, nekako do enega meseca po zajetju, močno padala, pozneje pa vedno počasneje. Z nanašanjem podatkov izdatnosti vrtin po določenem času na diagram in s teoretičnim računom izdatnosti po določenem času po Jacob-Lohmanovi enačbi (G. P. Kruseman & N. A. De Ridder, 1970):

$$Q = \frac{4 \pi k.m.s}{2,3 \log \frac{2,25.k.m.t}{r^2}}$$

kjer je privzeto, da je depresija stalna, smo opazili, da se oba diagrama vsaj v začetnem delu dokaj dobro ujemata. Na ta način smo s približnim računom po zgoraj navedeni enačbi ekstrapolirali izdatnosti vrtin po enem letu in 10 letih. Račun kaže, da se izdatnost vrtin zmanjša po enem letu za 28 do 31 % od začetne količine. Kasnejša opazovanja so pokazala nekaj večje padce izdatnosti, kar pripisujemo medsebojnemu prekrivanju depresijskih lijakov vrtin in verjetno tudi prostorski omejenosti vodonosne plasti, tj. litotamnijskega peščenjaka. V računu po zgoraj omenjeni enačbi se namreč predpostavlja, da je vodonosna plast neomejena.

V radgonski depresiji, ki poteka od Maribora prek Radgone proti severovzhodu, so terciarne plasti debele 1000 do 2000 m. Prevladuje miocenski lapor s tanjšimi vložki peščenjaka in konglomerata. Z dosedanjimi raziskavami niso našli pomembne akumulacije vode, pač pa je pri Radkersburgu vrtina zadela v globini 270 m na tenek vodonosnik z mineralno vodo in CO₂ temperature 16 do 20° C ter majhne izdatnosti. V globoki vrtini so leta 1977 zadeli v globini 1900 m na paro in CO₂. Tudi pri Benediktu v Slovenskih goricah so v globini 90 m zadeli na tenko peščeno plast z mineralno vodo in CO₂. Kot kaže, so v večji globini tudi vodonosniki s termalno vodo in celo paro, vendar je njihova izdatnost zaradi majhne poroznosti in prepustnosti miocenskega peščenjaka in konglomerata majhna.

Soboški prag je bil med Duplekom pri Mariboru in Mursko Soboto doslej preiskan s številnimi vrtinami, ki so pokazale, da so tod terciarne plasti debele manj kot 1000 m. Temeljno gorstvo sestoji iz metamorfnih skrilavcev. Naj navedem nekaj podatkov vrtin. V vrtini T-1 v Boračevi je skupna debelina pli-

ocenskih in miocenskih plasti 730 m; v vrtini V-42 Hrastje-Mota so bile prevrtane le pliocenske plasti, debele 500 m. Pod njimi leži gnajs. V vrtini SG-1 nastopajo pliocenske plasti, debele 395 m. V vrtini MS-1 v Črnelavcih pri Murski Soboti so terciarne plasti debele 791 m. V vrtinah MS-2 v Rakičanu in Mt-1 v Moravcih, ki ležita že na vzhodnem robu masiva, so terciarne plasti debele 1183, oziroma 1295 m. Sestojе povečini iz pliocenske gline in peska, delno tudi peščenjaka, v manjši debelini pa iz miocenskega laporja z vložki peščenjaka in konglomerata. Seizmične meritve in vrtine so pokazale, da je prag presekan z več prelomi jugozahod—severovzhod in prečno na to smer.

Na soboškem pragu so v poroznih plasteh peska in peščenjaka akumulirane v manjši globini mineralne vode s CO_2 , v večji globini pa termomineralne vode s CO_2 in delno z ogljikovimi vodiki. Predvsem pliocenske plasti peska in peščenjaka so zaradi dokaj velike poroznosti (30—40 %) in prepustnosti (k je do 9×10^{-6} m/s) dokaj ugodne za pridobivanje mineralne, v večji globini pa tudi termomineralne vode.

Mineralno vodo pridobivajo v Radencih že dobrih sto let. Prva leta so napolnili le nekaj 10 000 litrov vode, na začetku prve svetovne vojne okrog dva milijona litrov in pred drugo svetovno vojno okrog 10 milijonov litrov na leto. Intenzivnejša rast proizvodnje se je začela leta 1967, ko je Geološki zavod raziskal in zajel globlje ležeče in izdatnejše vodonosne plasti z mineralno vodo. Prvotna zajetja so bila namreč plitva; segala so največ 30 m globoko. Z zaje-manjem novih vodonosnih plasti v širši okolici Radenec je bilo omogočeno nadaljnje povečanje proizvodnje, ki je leta 1972 dosegla skoraj 240 milijonov litrov slatine in deita.

V Radencih se nahaja mineralna voda v pliocenskih in delno miocenskih peščenjakih na površini okrog 26 km². Vrelčno območje sega onstran meje do Žetincev. Peščene vodonosne plasti se menjavajo z neprepustnimi glinastimi in lapornimi plastmi. Debele so šest do 45 m, nagnjene so proti jugovzhodu pod kotom 5° do 10°. Plasti so ob štirih prelomih, ki potekajo od jugozahoda proti severovzhodu, premaknjene za 10 do 70 m. Zaradi tektonskih premikov so nekatere vodonosne plasti ob prelomih zaprte z neprepustnimi glinastimi plastmi, medtem ko so druge prišle v stik s stratigrafsko mlajšimi ali starejšimi vodonosnimi peščenimi plastmi.

Poizkusna črpanja v vrtinah in piezometrih, ki jih je v Radencih že prek 70, so pokazala, da so najizdatnejše pliocenske peščene vodonosne plasti. Niže ležeče panonske in sarmatske plasti vsebujejo le tanjše vložke vodonosnega peska, katerega izdatnost je zaradi manjše poroznosti in prepustnosti znatno manjša. Poleg tega ima ta voda manj ugodno kemično sestavo. Zato je v Radencih zajeta mineralna voda le v pliocenskih plasteh, ki segajo v Meleh do globine 65 m, v Radencih do 240 m in v Hrastju-Moti do okrog 400 m. Pliocenske plasti sestojе iz menjavajočih se peščenih in glinastih usedlin. V Meleh je v pliocenskem zaporedju tri do pet peščenih plasti z mineralno vodo, debelih 6 do 25 m, v Radencih je sedem do devet plasti, debelih 7 do 45 m, in v Hrastju-Moti več kot 10 plasti, debelih 4 do 40 m. Zanimivo je, da se nahaja v Meleh in Hrastju-Moti ob stiku pliocenskih vodonosnih plasti s kvartarnim prodom nizko mineralizirana voda, ali pa sploh navadna voda, kar kaže na zvezo mineralnih vodonosnikov z vrhnjo podtalnico.

V Radencih pridobivajo mineralno vodo v glavnem z globokimi vodnjaki, le manjši del s starimi plitvimi zajetji. Skupna izdatnost vodnjakov in starih zajetij je okrog 30 l/s. Mineralna voda se delno sama izliva iz vodnjakov s pomočjo naravnega »gas lifta« (kjer je mineralna voda bogatejša s CO_2), delno pa jo črpajo. Izdatnost vodnjakov niha od 1,1 do 2,6 l/s pri znižanju gladin za 12 do 41,5 m. Izdatnost vodnjakov je odvisna predvsem od prepustnosti vodonosnih peščenih plasti in njihove debeline. Po podatkih poskusnega črpanja niha vrednost koeficienta prepustnosti od $2,5 \times 10^{-6}$ do 1×10^{-5} m/s, izjema je peščen prod v Hrastju-Moti s 2×10^{-4} m/s. Koeficient elastične izdatnosti, ki pa ni povsem zanesljivo določen, je okrog 7×10^{-4} . Laboratorijsko določena poroznost peska je 35 do 40 %. Zaradi majhne vrednosti koeficienta elastične izdatnosti so tudi depresijski lijaki posameznih vodnjakov zelo veliki; njihov polmer je dosegel med poskusnim črpanjem že po prvem dnevu črpanja več kot 1 km. Iz tega sledi, da se na radenskem območju depresijski lijaki vodnjakov medsebojno prekrivajo, kar vpliva tudi na dinamično gladino vode v vodnjakih.

Vse hidrogeološke parametre vodonosnih horizontov v Radencih smo izračunali s predpostavko, da gre za enofazni fluid, t.j. da je plin CO_2 povsem raztopljen v mineralni vodi. Meritve izdatnosti vode in plina v posameznih vodnjakih so pokazale, da niha vsebnost plina od 1 do 8 g/l vode. Ker leže zajete vodonosne plasti globlje od 100 m, sklepamo iz podatkov o topnosti plina CO_2 v odvisnosti od hidrostatskega pritiska, da je v vodonosni plasti ves plin raztopljen v vodi. Iz vode se prične ločiti šele višje v vodnem stebru vodnjaka, kjer se hidrostatski pritisk zmanjša.

Iz podatkov o debelini in poroznosti vodonosnih pliocenskih plasti smo računali tudi statične zaloge mineralne vode. Na doslej znanem vrelnem območju je okrog 900 milijonov m^3 statičnih zalog mineralne vode, ki je pa seveda ni mogoče v celoti izkoristiti. Kolikšen del teh zalog je izkoristljiv in kakšno je napajanje vodonosnih horizontov z mineralno vodo, je seveda težko ali skoraj nemogoče zanesljivo oceniti. Jasno je, da se v določeni meri, četudi majhni, terciarni vodonosniki napajajo s površja in iz podtalnice. Na površje prihajajo v gorica, v dolini Mure pa so v stiku s podtalno vodo. Na infiltracijo podtalnice v terciarne peščene plasti kažejo kemične analize vode iz vrtin. V določeni vodonosni peščeni plasti namreč pada mineralizacija vode z razdaljo do stika z vrhnjo podtalno vodo. Prodiranje podtalne vode v terciarne peščene plasti je zaradi majhnega koeficienta prepustnosti in majhnega hidravličnega strmega izredno počasno. V naravnih pogojih, t.j. pred pričetkom izkoriščanja, ko je mineralna voda iztekala iz terciarnih vodonosnih plasti na površje, oziroma se je izlivala v podtalnico le po prelomih s pomočjo naravnega »gas lifta«, je bil hidravlični strmec izredno majhen. Vsekakor sklepamo, da se je v naravnih pogojih izlivalo proti površju le nekaj l/s mineralne vode; točnih podatkov o izdatnosti prvotnih izvirov mineralne vode pa seveda ni. Sedaj, ko se izkorišča okrog 30 l/s mineralne vode, je hidravlični strmec večji in je intenzivnejše tudi prodiranje podtalnice v terciarne vodonosne plasti. Ker pa je površina, skozi katero pronica podtalnica v vodonosne plasti, sorazmerno majhna, majhna pa je tudi njihova prepustnost, je gotovo, da z izkoriščanjem 30 l/s mineralne vode presegamo njeno naravno obnavljanje in izkoriščamo v veliki meri elastično vpeto vodo, h kateri je treba prišteti še dodatne količine vode, ki se izceja iz krovinskih in talninskih polprepustnih plasti. Pri oceni elastičnih zalog seve-

da ne smemo upoštevati samo doslej znanega vrelnega območja, ki obsega okrog 26 km², ampak večji del soboškega praga in ljutomerske depresije. Znano je namreč, da so razvite pliocenske peščene plasti zvezno skoraj na celotnem omenjenem ozemlju, kar seveda najmanj desetkrat presega površino vrelnega območja. Približna cenitev elastičnih zalog na vrelnem ozemlju v Radencih je pokazala, da bi pri poprečnem znižanju piezometrične gladine za 50 m le-te zadostovale le za dvoletno do triletno obratovanje. Piezometrične gladine so se na vrelnem območju, kot kažejo opazovanja, v zadnjih dveh letih dokaj ustalile, čeprav se je črpalo v zadnjih petih letih stalno okrog 30 l/s mineralne vode. Na podlagi tega smo tudi ocenili dinamične zaloge mineralne vode po izdatnosti vodnjakov pri ustaljeni piezometrični gladini, kar skupaj preseže 40 l/s mineralne vode. Pri takšni intenziteti črpanja je seveda možno, da bosta v nekaterih vodnjakih, ki so locirani v bližini stika terciarnega vodonosnega horizonta s podtalnico, mineralizacija in vsebnost CO₂ postopno padali in končno prešli v navadno vodo. Iz tega pa sledi, da ocenjene dinamične zaloge mineralne vode niso povsem realne, v resnici so manjše. V dinamičnih zalogah mineralne vode lahko namreč upoštevamo le mineralno vodo določene kemične sestave, ne pa navadne vode.

Razen v Radencih so že od nekdaj znani naravni izviri mineralne vode manjše izdatnosti v dolini Ščavnice. Hidrološke raziskave so leta 1977 pokazale, da se nahaja mineralna voda v pliocenskih, panonskih in sarmatskih peščenih plasteh. Peščene panonske in sarmatske plasti so debele 3 do 25 m. Laboratorijsko določena poroznost je okrog 44 % in laboratorijsko določen koeficient prepustnosti okrog 10⁻⁷ m/s, to je znatno manj kot v Radencih. Točnejših podatkov o vrednosti koeficienta prepustnosti še nimamo, ker ni bilo izvedeno poskusno črpanje. Po izdatnosti vrtin, s katerimi smo zajeli posamezne panonske in sarmatske vodonosne horizonte z mineralno vodo pa sklepamo, da je njihova prepustnost znatno manjša kot prepustnost pliocenskih plasti v Radencih. Vrtine namreč dajejo s samostojnim izlivom poprečno okrog 0,5 l/s mineralne vode. Te vrednosti se ujemajo s podatki, ki smo jih dobili v Radencih. Tudi tam je izdatnost panonskih in sarmatskih plasti znatno manjša kot izdatnost pliocenskih plasti. V dolini Ščavnice, razen v Očeslavcih, pliocenske plasti ne vsebujejo mineralne vode. Raziskave v Ščavnici še niso končane; zaenkrat smo preiskali panonske in sarmatske plasti le do globine 150 m.

Poleg mineralne vode, katere temperatura v Radencih v nekaterih globlje zajetih vodonosnih horizontih preseže 20 °C, so našli v večjih globinah tudi termomineralno vodo. V širši okolici Radenec je bila najdena voda s temperaturo 35 do 40 °C v globini 350 do 400 m, izdatnost peščenega vodonosnika pa je bila do 5 l/s. V Moravcih na obrobju soboškega masiva segajo te plasti le do globine približno 900 m in še niso bile preiskane. Vodo namreč sedaj izkoriščajo iz zgornjepanonskega (miocenskega), tako imenovanega petišovskega peščenjaka v globini 1115 do 1255 m; njegova izdatnost je do 10 l/s, temperatura vode pa okrog 70 °C. Ta peščenjak ima nekoliko manjšo poroznost kot pliocenski (okrog 18 do 25 %). V skladu s tem pa je tudi nekoliko manjša njegova prepustnost; po sedanjih podatkih niha v širokih mejah od 100 do 500 milidarcyev, kar je enako vrednosti koeficienta prepustnosti $k = 7 \times 10^{-7}$ do $3,5 \times 10^{-6}$ m/s. Vrtina Mt-4, ki je bila izvrtana pri Mt-1 poševno, tako da je petišovski peščenjak zajet 700 m od nje, daje 3 l/s.

V tortonskih plasteh, kolikor so na soboškem pragu razvite (ponekod jih ni), prevladuje lapor, ponekod leži bazalni konglomerat neposredno na temeljnem gorstvu. Po podatkih laboratorijskih raziskav je njegova poroznost okrog 20 %. Termalna voda je bila doslej najdena le v miocenskem peščenjaku v vrtini MS-3 v Mlajtincih, vendar so možnosti za njeno akumuliranje tudi drugod. V vrtini MS-3 so v globini 1250 m z nastreljevanjem dobili termomineralno vodo s CO₂, temperaturo 60 °C in izdatnostjo 4 l/s.

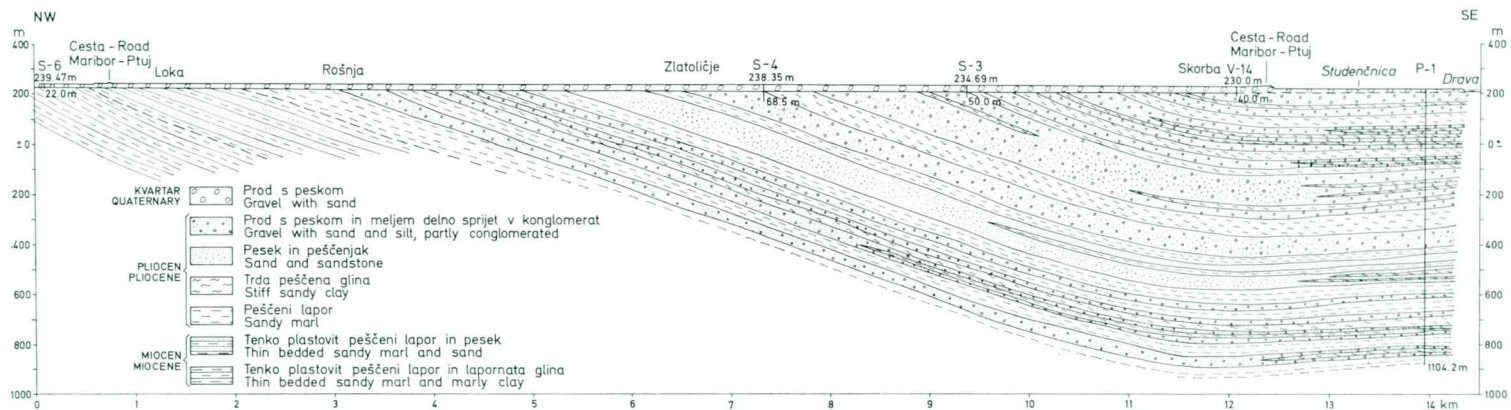
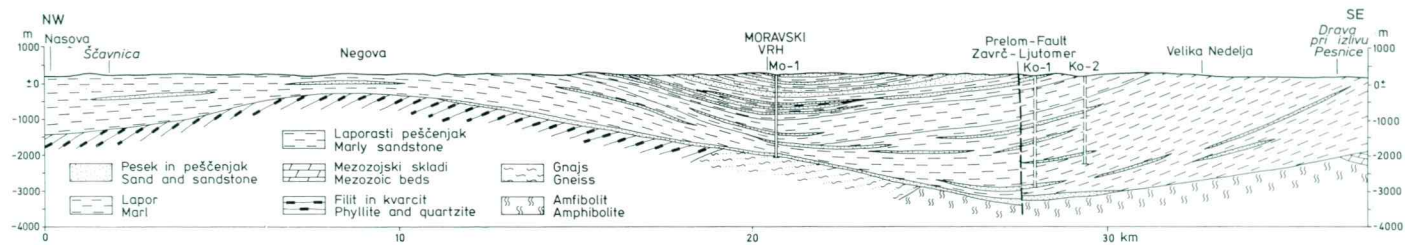
Soboški prag, posebno njegovo jugovzhodno obrobje, ima izredno važno vlogo v hidravličnem mehanizmu vodonosnikov s termalno vodo v naslednji tektonski enoti, ljutomerski depresiji. Na soboškem pragu namreč prihajajo na površje pliocenske plasti; zato je možno njihovo napajanje iz podtalnice Dravskega in Ptujkega polja. V Slovenskih goricah in na Goriškem se pliocenske plasti manj napajajo, ker jih prekriva kvartarna površinska glina.

Za globlje ležeče miocenske plasti, ki pridejo na površje na severozahodnem robu radgonske depresije, pa predstavlja soboški prag bariero, ob kateri so te plasti v večji ali manjši meri prekinjene, oziroma se močno stanjšajo. Zato se miocenske plasti na vzhodnem obrobju soboškega praga in v ljutomerski depresiji ne napajajo s površja in predstavljajo povečini zaprte vode.

Naslednja tektonska enota je globoka ljutomerska depresija, ki se razteza od Slovenske Bistrice prek Ptuja in Ljutomera proti Lendavi. Depresija je z vzdolžnim prelomom razdeljena v geološkem, posebno pa v hidrogeološkem pogledu na dva dela. Jugovzhodno od ljutomerskega preloma prevladuje miocenski lapor. V Prekmurju pa so zastopani tudi pliocenska glina, pesek in peščenjak. Miocenske plasti so na Ptujskem polju in ponekod v Slovenskih goricah postavljene skoraj v navpično lego in s tem zapirajo vodonosnike, ki so razviti v severozahodnem delu depresije. Miocenske plasti, ki so sicer v stiku s podtalnico Apaškega polja in obmurske ravnice na avstrijski strani, so prekinjene ob visoko dvignjenem soboškem pragu, ki sestoji iz metamorfnih kamenin, in zato praktično zaprte v ljutomerski depresiji. S tem je preprečeno napajanje s površja; voda, ki jo vsebujejo miocenske plasti, je vsaj delno, če ne v celoti, zaprta voda, ki je bila v dolgih geoloških obdobjih zaradi različnih procesov diageneze in drugih vplivov precej spremenjena. V globlje ležečih plasteh je slana.

Zgoraj navedeni podatki kažejo, da so v ljutomerski depresiji posebno zanimive za pridobivanje termalne vode pliocenske porozne plasti, ker so dokaj debele, in segajo povečini prek 1000 m globoko. So tudi bolj prepustne in se vsaj do določene mere napajajo s površja. Geotermični gradient je v tej depresiji večji kot na soboškem pragu; v vrtini P-1 v Ptujju je 33 m/1 °C, v vrtini Mo-1 v Moravcih v Slovenskih goricah 25 m/1 °C, medtem ko je v Petišovcih po doslej znanih podatkih enak kot na soboškem pragu, tj. 18 m/1 °C.

V Ljutomerski depresiji je bila doslej zajeta termalna in termomineralna voda v vrtinah P-1 pri Ptujju, Mo-1 v Moravcih, Ve-1 v Banovcih in Pt-20 v Petišovcih. V vrtini P-1 v Ptujju je zajeta termalna voda s temperaturo 40 °C v pliocenskih prodnih plasteh v globini 895 do 1064 m (sl. 2). Vodonosne plasti so zajete s perforiranimi cevmi. Skupna debelina zajetih plasti je 59 m. Poroznost prodnih plasti je po laboratorijskih podatkih 33 %. Vrednost koeficienta prepustnosti k je po podatkih poizkusnega črpanja $2,8 \times 10^{-6}$ m/s, koeficient elastične izdatnosti S pa 0,003. Piezometrična gladina vodonosnika je šest me-



trov nad površjem terena. V višini ustja vrtine se preliva sedaj 1,1 l/s vode s temperaturo 33 °C, pri znižanju piezometrične gladine za 73 m je bilo s črpanjem dobljeno 10 l/s vode s temperaturo 40,9 °C. V vrtini Mo-1, (opuščena naftna vrtina) so bile zajete spodnjepliocenske (pontske) vodonosne peščenice plasti v globini 845 do 1107 m s perforiranimi cevmi. Skupna debelina zajetih peščenih plasti je 109 m. Podatkov o poroznosti vodonosnih plasti ni. Po podatkih črpalnega poizkusa je bil izračunan koeficient prepustnosti $k = 1 \times 10^{-6}$ m/s. Piezometrična gladina vodonosnika je 3,45 m nad površjem terena. V višini ustja vrtine se preliva 0,6 do 0,7 l/s vode s temperaturo 30 °C. Pri znižanju piezometrične gladine za 51 m je bilo dobljeno 6 l/s termalne vode s temperaturo 42 °C. Voda ni mineralna in ne vsebuje prostega CO₂.

V vrtini Ve-1 je bila zajeta voda z nastreljevanjem v globini 1346 do 1365 m. Voda ima temperaturo okrog 65 °C in vsebuje tudi metan. Z znižanjem gladine za 50 m pridobivajo okrog 3 l/s termalne vode.

V vrtini Pt-20 je zajeta voda v pliocenskih peščenih plasteh v globini 817 do 822 m. S samostojnim izlivanjem izteka 1,5 l/s termalne vode, s črpanjem pa do 10 l/s vode s temperaturo 44 °C. Voda ne vsebuje plina CO₂.

V zvezi s pojavom nekaj 10 m debele plasti miocenskega litotamnijskega peščenjaka na južnem robu soboškega praga pri Dupleku se poraja misel, da vsebuje ta plast v večji globini termalno vodo z visoko temperaturo. V okolici Ptuja ter v Slovenskih goricah je ta plast že prek 2000 m globoko, vendar ni povsem gotovo, če se neprekinjeno nadaljuje pod mlajšeterciarnimi plastmi. Raziskave tako globoko ležeče plasti pa bi bile tudi zelo drage.

Jugovzhodno od Ljutomerskega preloma je zajeta termalna, oziroma termomineralna voda le v Petišovcih in Vučkovcu. Terciarni plasti so v tem delu Ljutomerske depresije nagnjene že proti severovzhodu, iz česar sklepamo, da se vodonosniki v teh plasteh lahko napajajo na obrobju haloško-ormoško-hohotskega praga, kjer vsaj pliocenske plasti pridejo na površje.

Nikakor pa ni povsem izključeno, da je termalna voda z zelo visoko temperaturo tudi v razpokanem apnencu in dolomitu temeljnega gorstva v južnem delu Ptujkega polja, vzhodno od Ljutomera in pri Lendavi. Te razpokane kamnine leže tod že zelo globoko, verjetno prek 4000 m. Možno je namreč, da cirkulira padavinska voda od kraja, kjer se pojavljajo na površju v jedru haloško-ormoško-hahotskega praga (Boč, Ravna gora) po številnih tektonsko zdrobljenih conah v veliko globino. Apnenec in dolomit se namreč iz jedra masiva nadaljujeta pod terciarnimi plastmi verjetno vse do Ljutomerskega preloma. Raziskave tega vodonosnika pa bi bile seveda zelo drage.

Izkoristljivost zalog termalnih in termomineralnih vod

Termalne vode v poroznih plasteh ni mogoče v celoti izkoristiti. Z navadnimi potopnimi črpalkami ni mogoče piezometrične gladine tako globoko znižati, da bi začeli neposredno izsuševati vodonosne plasti, ki leže v globini prek 500 m. Pritok vode v vrtino v takšnem primeru ni več odvisen od velikosti efektivne poroznosti, ampak od koeficienta elastične izdatnosti S . Poleg tega je vsekakor pomembna prevodnost vodonosnika T , ki je produkt debeline vodonosne plasti in koeficienta prepustnosti. Koeficient elastične izdatnosti označuje tisti del vode, ki se iztisne iz elementarne prizme vodonosnika pri določenem znižanju

pritiska na račun elastičnosti vode in deformabilnosti skeleta vodonosne plasti. Za primerjavo naj navedem, da podaja Bočever (M. Boreli, 1968) za peske vrednost efektivne poroznosti od $1,8 \times 10^{-1}$ (18 %) do $2,8 \times 10^{-1}$ (28 %), medtem ko je vrednost koeficienta elastične izdatnosti za peske od 2×10^{-3} do 2×10^{-4} , torej sto do tisočkrat manjša. Za trdne peščenjake pade ta vrednost do 1×10^{-6} .

Kot primer naj navedem, da bi dobili iz pliocenskih poroznih plasti, ki se razprostirajo po podatkih ing. Szaboja (1975) v severovzhodni Sloveniji na površini 1900 km², po enačbi

$$\Delta V_{el} = S \times F \times s = 1,12 \times 10^{-3} \times 1,9 \times 10^9 \times 5,0 \times 10^1$$

približno 106,400.000 m³ termalne vode

S = koeficient elastične izdatnosti

F = površina vodonosnika

s = znižanje piezometrične gladine.

V računu sem privzel, da je skupna debelina pliocenskih poroznih plasti (s poroznostjo 25 %) v globini pod 500 m okrog 100 m, nadalje sem predpostavil, da bi z mrežo vrtin dosegli regionalno znižanje piezometrične gladine povprečno za 50 m in da je vrednost koeficienta elastične izdatnosti $1,12 \times 10^{-3}$. Tega sem približno izračunal po enačbi (M. Boreli, 1968)

$$S = M\gamma \times n \left(\frac{1}{E_e} + \frac{1}{n \times E_{sq}} \right) =$$

$$= 1 \times 10^4 \times 0,25 \times 10^{-3} \times (0,5 \times 10^{-4} + 4,10^{-4}) = 1,12 \times 10^{-3}$$

Pripominjam, da so za zanesljivejši račun tega koeficienta potrebni podatki črpalnega poizkusa.

M = debelina vodonosne plasti (1.10^4 cm)

γ = specifična teža vode 1.10^{-3} kg/cm³

n = poroznost (0,25)

E_e = 2.10^4 kg/cm² elastični modul vode

E_{sq} = 10^4 kg/cm² elastični modul skeleta vodonosne plasti.

V pojasnilo, kaj ta količina vode pomeni, naj navedem, da bi se ta voda izkoristila približno v 30 letih, če bi na celotni upoštevani površini (1900 km²) črpali vodo iz pravilno razporejene mreže 20 vrtin s povprečno kapaciteto 6 l/s (večjo izdatnost je pričakovati samo v posameznih primerih), pri čemer bi piezometrično gladino kontinuirno zniževali, dokler ne bi po 30 letih padla na celotnem območju povprečno za 50 m. Pogoj je seveda, da se vodonosne plasti razprostirajo neprekinjeno na celotni površini, da se ne izklinjajo in da niso po prelomih razkosane v posamezne izolirane grude. Zgornji račun je zgolj orientacijski in v njem tudi nismo upoštevali delnega nadomeščanja rezerv elastično vpete vode zaradi napajanja s površja in izcejanja vode pri padcu pritiska iz krovninskih in talninskih polprepustnih plasti (L. Žlebnik, 1975).

Z večjim regionalnim znižanjem piezometrične gladine bi seveda dobili večje količine vode, ki pa ne bi bile premo sorazmerne z znižanjem, ampak

manjše. Vzrok temu je v zmanjšanju poroznosti vodonosnih plasti, ki je posledica zmanjšanja piezometričnega pritiska. Opozarjamo pa, da piezometrične gladine ne moremo v nedogled zniževati, kajti zmogljivost potopnih črpalk je omejena, razen tega pa črpalke z večjimi dviznimi višinami zahtevajo veliko več energije in večje premere vrtin.

Miocenske plasti vsebujejo na soboškem pragu in v ljutomerski depresiji pravzaprav le zaprto vodo, zato so praktično izkoristljive le zaloge elastično vpete vode, razen seveda v primeru, če bi znižali piezometrično gladino za 1000 ali več metrov. Zaloge elastično vpete termalne vode pa so precej manjše zaradi manjše vrednosti koeficienta elastične izdatnosti.

Opozoriti moramo še na drug problem, ki se lahko pojavi pri izkoriščanju termalnih voda. Soboški prag, kot tudi ljutomerska depresija sta po obstoječih podatkih preprežena s prelomi v dveh smereh, ki sta pravokotni ena na drugo. Ob prelomih so plasti, torej tudi vodonosniki, premaknjene in v posameznih primerih tudi prekinjene. Vodonosne plasti so torej razkosane v številne večje ali manjše bloke, v katerih so vodonosniki v odvisnosti od načina premikov bodisi popolnoma izolirani ali pa so hidravlično zvezani z ostalimi bloki. V primeru, da je zajeta termalna voda v majhnem izoliranem bloku, so seveda razpoložljive zaloge elastično vpete vode zaradi majhne površine bloka zelo majhne. V tem primeru bi vso razpoložljivo termalno vodo izkoristili že v sorazmerno kratkem času. Zato je treba pri zajemu termalnih voda že prej čim natančneje razjasniti geološko zgradbo v širši okolici določene lokacije.

Problemi nastanka mineralnih in termalnih vod ter plina CO₂

Omenili smo že, da so termomineralne vode v miocenskih poroznih plasteh na soboškem pragu nekoliko spremenjene reliktnne vode, tj. izvirajo iz nekdanjega panonskega morja. Na to kaže tudi precejšnja vsebnost soli v termomineralni vodi v Moravcih in Mlajtincih. V Moravcih v Slovenskih goricah in v Ptujju vsebujejo pliocenske porozne plasti (pesek-peščeni prod) navadno vodo tipa NaHCO₃. Morda je ta voda prav tako reliktna voda že sladkega panonskega jezera. Iz geološke zgradbe tega območja lahko tudi sklepamo, da je v času aktivnosti velikih prelomov na tem območju intenzivno cirkulirala voda skozi te plasti, tj. infiltrirala se je površinska voda skozi površinske golice, že ogreta voda pa je iztekala iz globoko ležečih poroznih pliocenskih plasti ob prelomih na površje. V dolgih obdobjih aktivnosti prelomov v mlajšem pliocenu je bila na ta način lahko reliktna voda iz posameznih vodonosnikov povsem izpodrinjena in nadomeščena z vodo s površja.

Posebno zanimivo je vprašanje nastanka mineralnih vod v terciarnih poroznih plasteh na soboškem pragu in v radgonski depresiji. Bistvena značilnost teh vod je, da pripadajo skupinam NaHCO₃, NaCaHCO₃ in CaHCO₃ in delno skupini NaHCO₃Cl in da vse vsebujejo večje ali manjše količine prostega CO₂. Na radanskem območju pripadajo vode skupini NaHCO₃ — delno NaCaHCO₃ in NaHCO₃Cl, v Nuskovi skupini CaHCO₃SO₄ in v Ščavnici CaHCO₃, delno CaNaHCO₃, redko skupini CaNaHCO₃Cl. Kemična sestava vod kaže, da sta na njihov nastanek vplivali do določene mere mineralna sestava porozne vodonosne plasti (na pr. v Nuskovi litotamnijski apnenec) in sestava prvotne vode iz panonskega jezera, ki je bila akumulirana v poroznih plasteh, v veliki meri

pa poznejši procesi — infiltracija vod s površja in nadomeščanje reliktnne vode v vodonosnih plasteh z vodo s površja. V Radencih, pa tudi v dolini Ščavnice, je v času intenzivnih tektonskih premikanj v pliocenu prišlo do močnih sprememb prvotne sladke vode iz panonskega jezera, ki se je bila akumulirala v poroznih pliocenskih plasteh. Ob številnih prelomih v smeri jugozahod-severovzhod je začela prodirati iz globlje ležečih panonskih in sarmatskih poroznih plasti polslana reliktna voda in se mešati s sladko vodo v pliocenskih poroznih plasteh. Prodiranje vode je omogočila poleg stalno se obnavljajočih premikov ob prelomih v bistveni meri tudi naravna sprostitvev raztopljenega CO_2 , s katerim je bila prepojena voda v globljih poroznih plasteh. Plin CO_2 je vsekar dotekal ob prelomih iz večjih globlin, bodisi da je vulkanskega ali pa metamorfnege porekla. Najprej se je topil do zasičenosti v najgloblje ležečih poroznih miocenskih plasteh in je šele nato prodiral vzdolž prelomov, skupaj z vodo v više ležeče pliocenske porozne plasti, kjer se je zopet topil v nezasičeni sladki vodi. Prodiranje in raztapljanje plina CO_2 je povzročilo nadaljnje spremembe vode v poroznih plasteh. Voda je postala agresivna in je topila minerale v samih poroznih vodonosnih plasteh. Na to kažejo na primer kaverne v litotamniskem peščenjaku v Nuskovi, ki so verjetno nastale po delovanju agresivne mineralne vode. Pozneje, v kvartarju, ko se je tektonska aktivnost umirila, je prenehalo tudi prelivanje visoko mineralizirane vode, nasičene s CO_2 , iz globokih miocenskih vodonosnih horizontov v više ležeče pliocenske vodonosne plasti. Tedaj se je začel obraten proces, tj. infiltracija in prodiranje površinske vode v pliocenske vodonosnike ob istočasnem (verjetno ne posebno intenzivnem) izlivanju mineralne vode na površje s pomočjo naravne sprostitve plina iz pliocenskih vodonosnikov skozi posamezne prelome, aktivne v kvartarju, oziroma pod površjem v podtalnico.

Iz vsega tega sledi, da so vse mineralne in termalne vode v pliocenskih kot tudi miocenskih vodonosnih plasteh po poreklu stare vode, ki pa so zaradi kasnejših procesov v veliki meri spremenjene.

O poreklu plina CO_2 sta dve teoriji, po prvi je vulkanskega, po drugi metamorfnege porekla. Velik del avtorjev, posebno sovjetskih, se nagiba k mnenju, da je metamorfnege izvora, torej je nastal v samih plasteh zaradi povišane temperature in različnih kemičnih procesov. V Radencih je poskušal ta problem rešiti inštitut Jožef Štefan na podlagi analiz izotopov C in O v plinu CO_2 . Po podatkih njihovih raziskav naj bi bil plin CO_2 nastal iz karbonatnih kamenin pri temperaturah od 50 do 120 °C. Zanimivo je da je predpostavljena temperatura nastanka plina CO_2 tem višja, iz čim globljih plasti je bil vzorec plina vzet; npr. temperatura nastanka plina CO_2 v vrtini T-1 iz globine 700 m naj bi bila prek 100 °C. Danes takih temperatur v teh globlinah ni, zato tudi ni več možno nastajanje plina CO_2 . Pač pa so bili verjetno taki pogoji v mlajšem pliocenu, ko so sorazmerno blizu Radenec (Klösch — 15 km daleč) delovali bazaltni vulkani in je bila geotermična stopnja v široki okolici vulkanov povsem drugačna. Tedaj so verjetno že v sorazmerno majhnih globlinah nekaj 100 m temperature presegele 50 °C in je lahko nastajal plin iz panonskih sarmatskih laporjev ter se raztapljal in akumuliral v bližnjih poroznih vodonosnih plasteh. Ko je vulkanska aktivnost pred nekaj milijoni let prenehala, je nehal v plitveje ležečih terciarnih plasteh nastajati plin CO_2 . Še vedno pa obstaja možnost, da nastaja plin CO_2 v globlje ležečih karbonatnih terciarnih plasteh in karbonatnih meta-

morfnih kameninah (v marmoru). Seveda so količine nastajajočega plina CO_2 omejene, prav tako je zaradi uporov pri prodiranju CO_2 navzgor omejen tudi pretok v više ležeče porozne terciarne plasti. Iz tega pa sledi, da so zaloge plina končne in omejene na tisto količino, ki je raztopljena in akumulirana v poroznih terciarnih plasteh ter na stalen dotok plina iz globine, ki je prav tako omejen. Prav lahko se zgodi, da v Radencih pri sedanjem intenzivnem črpanju mineralne vode in raztopljenega plina CO_2 že močno presegajo naravno dotekajoče količine plina iz globine ter izkoriščajo v glavnem zaloge raztopljenega plina v mineralni vodi. To pa nas navaja na misel, da bo začela v dogledni prihodnosti količina raztopljenega plina CO_2 v vodi padati in bo treba zato dobiti manjka-joče količine plina CO_2 z zajetjem globlje ležečih vodonosnikov z visoko mineralizirano vodo in velikimi količinami raztopljenega plina CO_2 . Seveda so take rešitve le začasne. Veliko bolje bi bilo že sedaj racionalizirati črpanje mineralne vode in raztopljenega plina CO_2 ter proizvodnjo prilagoditi tako, da se ohrani naravno ravnotežje.

Literatura

Boreli, M. 1968, Podzemna voda u zoni aeracije tretirana jednačinama strujanja vode u nezasićenim sredinama. Seminar — Bilans podzemnih voda, Jugoslavenski komitet za medjunarodnu hidrološku deceniju, Beograd.

Boreli, M. 1968, Odredjivanje karakteristika vodonosnih slojeva probnim crpenjem u nestacionarnom režimu. Seminar — Bilans podzemnih voda, Jugoslavenski komitet za medjunarodnu hidrološku deceniju, Beograd.

Kruseman, G. P. & De Ridder, N. A. 1970, Analysis and evaluation of pumping test data, Wageningen, The Netherlands.

Premru, U. 1976, Neotektonika vzhodne Slovenije, *Geologija* 19, Ljubljana.

Szabo, J. 1975, O termalnih vodah v Petišovcih in Banovcih. Radenski vestnik, Radenci.

Vončina, Z. 1965, Prikaz geotektonske rajonizacije Murske potoline. Nafta, letnik XVI, št. 1, Zagreb.

Žlebnik, L. 1975, Termalne in termomineralne vode v Prekmurju in Slovenskih goricah. Radenski vestnik, Radenci.