

Geofizikalne raziskave vodonosnikov v Sloveniji

Geophysical Exploration of Aquifers in Slovenia

Janez Lapajne

Geološki zavod Ljubljana

Na kratko so podani izsledki in problemi raziskav prodnatih in peščenih vodonosnikov v Savinjski dolini, na Krško-brežiškem polju in na Iškem vršaju ter kraškega vodonosnika Malni. Nadalje obravnava članek vodonosnik mineralne vode v Rogaški Slatini ter vodonosnike termalne vode v jugovzhodni Sloveniji. Prikazana je uporabnost, smotrnost in koristnost različnih površinskih metod uporabne geofizike: geoelektrike, refrakcijske seizmike, magnetometrije in gravimetrije. Večina opisanih raziskav je bila preverjena z vrtanjem in jih je zato mogoče dokaj stvarno ovrednotiti; v glavnem je bil geofizikalni prikaz hidrogeoloških razmer potrjen z vrtanjem.

The paper deals with geophysical exploration of aquifers of fresh, mineral and thermal water in Slovenia during 1970—1975 performed by the Geological Survey Ljubljana. After the general discussion some case histories are shortly described. The results of the geophysical investigations of gravel and sand aquifers of Savinja valley, Krško-Brežice field and of the Iška alluvial fan, of the carst aquifer Malni near Postojna, of the aquifer of mineral water Rogaška Slatina and of the aquifers of thermal water in south-eastern Slovenia are interpreted. The applicability, suitability and usefulness of some electrical methods, shallow refraction seismics, gravity and magnetic survey are given. Only surface methods are treated. Greater part of these investigations had been already tested with bore-holes, therefore an objective evaluation of the exploration methods and interpretation was possible. Geophysical suppositions and preestimated parameters are in a good agreement with boring results.

Uvod

Oddelek za geofiziko Geološkega zavoda Ljubljana že več kot dvajset let uvaja geofizikalne metode na raznih področjih uporabne geologije. V tem času se je nabralo toliko raziskovalnih primerov, da lahko kljub skromnim možnostim in majhnemu raziskovalnemu prostoru napravimo nekaj splošnih zaključkov o metodologiji geofizikalnih raziskav in njihovih možnostih na posameznih področjih. Zato sem v predavanjih pri Slovenskem geološkem društvu skušal

podati kratek pregled pomembnejših geofizikalnih raziskav na izbranih področjih uporabe ter prikazati nekaj teoretičnih izsledkov, ki predstavljajo naš prispevek k obdelavi in vrednotenju geofizikalnih podatkov in razlagi geoloških razmer. Predavanja naj bi rabila informiranju geologov, hidrogeologov in drugih strokovnjakov na področju geologije o uporabnosti različnih geofizikalnih metod in naj bi prispevala k tesnejšemu sodelovanju geofizike in drugih geoloških raziskovalnih vej.

V predavanju dne 20. 2. 1973 sem podal prerez geofizikalnih raziskav na slovenskem krasu in v zelo omejenem obsegu na hrvaškem krasu; obširneje sem isto snov podal v objavljenem članku (Lapajne, 1974). Dne 11. 11. 1975 sem v drugem predavanju prikazal rezultate geofizikalnih raziskav vodonosnikov sladke, mineralne in termalne vode v Sloveniji v letih 1970 do 1975. Povzetek tega predavanja je glavna vsebina tega članka.

O uporabnosti geofizikalnih metod v hidrogeologiji

Geofizikalne metode so za raziskavo vodonosnikov pomembne v dveh pogledih. Po eni strani prispevajo k obogatitvi spoznanj o vodonosniku z izsledki, ki jih ni mogoče dobiti z drugimi raziskavami, po drugi strani pa s svojo sorazmerno nizko ceno povečujejo gospodarnost raziskovalnih del. Uporabne so tako pri raziskavah sladke vode kakor tudi za reševanje vprašanj termalnih in mineralnih vrelic. Glede na geološko in hidrogeološko raznolikost problemov je tudi metodologija geofizikalnih raziskav pestra. Uporabiti moremo praktično vse metode uporabne geofizike; pri tem so za reševanje določene naloge uspešnejše ene, za reševanje drugih nalog pa druge metode. Da bi povečali zanesljivost vrednotenja geofizikalnih meritev in si omogočili celovitejšo predstavo o naravnih razmerah, moramo uporabiti hkrati več metod.

Geofizikalne raziskave vodonosnika imajo namen, da skupaj z drugimi raziskavami prispevajo k oblikovanju modela, ki omogoča vsaj približno oceno kakovosti vode, izdatnosti in najboljšega načina (optimalnega režima) izkoriščanja vodonosnika. Pod kakovostjo ne razumemo samo kakovosti same vode, temveč zajema ta pojem še plin pri mineralni vodi in primerno temperaturo pri termalni vodi. Prav tako gre pri mineralnih vodonosnikih poleg izdatnosti vode tudi za količino plina in pri termalni vodi za toplotni tok. Dalje zadeva najboljši način izkoriščanja v splošnem vodo, plin in toplotno energijo.

Vodonosnik sestoji iz geološke strukture in vode (ter plina). Če je mogoče merske količine neposredno primerjati s fizikalnimi parametri vode, vsebujejo geofizikalni podatki tudi ustrezno informacijo o vodi; v tem primeru bomo rekli, da je med geofizikalno sliko in vodonosnikom, oziroma vodo, neposredna odvisnost. Včasih sicer geofizikalni podatki nimajo nobene zveze z vodo in njenimi fizikalnimi lastnostmi, pa so vendar geofizikalne anomalije močno odvisne od pojava vode (ali plina); v takšnih primerih gre za posredno zvezo prek geološke strukture, ki daje ustrezno geofizikalno sliko in je hkrati vodonosnik.

Uporaba geofizikalnih metod v hidrogeologiji je smotrna tudi takrat, ko izsledki meritev nimajo niti neposredne niti posredne zveze z vodo. V to zvrst raziskav spada iskanje geometrijskih parametrov geološke zgradbe, npr. določanje globine oziroma reliefa vodoneprepustne podlage.

Naj omenim še to, da je mogoče koristno uporabiti neposredni vpliv vode na geofizikalne merske količine tudi v primeru, ko ne gre za raziskave vodonosnikov. Prisotnost vode oziroma vlage ali vodnega toka in pronicanje vode skozi razpokane kamenine lahko pomaga npr. pri geofizikalnem iskanju rudnih teles, kraških jam ipd.

V predstavi vodonosnika moramo razlikovati posrednik vode, vodonosnik in napajalno območje. Tudi v primeru, ko ni mogoče ostro razmejevati naštetih struktur, je delitev v raziskovalnem in ekonomskem smislu praktična in smiselna. V ekonomskem smislu razumemo pod vodonosnikom tisto geološko strukturo, iz katere moremo s primernim posegom, npr. z vrtino, pridobivati gospodarsko pomembne količine vode uporabne kakovosti in izdatnosti pri ustreznem načinu izkoriščanja. Pod napajalnim območjem navadno razumemo tisto območje, ki oskrbuje vodonosnik z vodo; upoštevati pa moramo tudi območje, ki daje plin in toplotno energijo. Iz napajalnih območij ne moremo gospodarno pridobivati ekonomsko pomembnih količin vode. Posrednik je tista geološka zgradba, ki posreduje vodo od vodonosnika proti površju ali k vrtini; s posegom vanj je z večjo ali manjšo verjetnostjo možno dobiti vodo ali plin v ustreznih množinah.

Smiselnost razločevanja omenjenih struktur se kaže tudi v metodologiji raziskav, saj so raziskave praviloma zgoščene na ožjem območju vodonosnika in posrednika vode, če je njun položaj znan. Zaradi naravne zveze vodonosnika z napajalnim območjem pa ni pametno, da se marsikdaj odpovedujemo regionalnim ali manj podrobnim geofizikalnim raziskavam na širšem območju vodonosnika, ki bi lahko dale koristne podatke za razumevanje celotnega sistema in opravičile stroške, ter posegamo po geofizikalnih metodah le na ožjem območju vodonosnika.

Po načinu izvajanja geofizikalnih meritev razlikujemo nadpovršinske ali aero-metode, površinske in podpovršinske metode. Med slednjimi se za potrebe hidrogeologije uporabljajo skoraj izključno le meritve v vrtinah, ki so tudi sicer najpomembnejše med podpovršinskimi metodami in so važen del spremljave vrtanja. Delovno področje Oddelka za geofiziko na Geološkem zavodu v Ljubljani so bile v preteklih letih predvsem površinske metode in nekatere meritve v vrtinah. Površinske geofizikalne raziskave so tudi predmet tega sestavka.

Površinske geofizikalne meritve so koristne v vseh fazah reševanja določene naloge. Njihova uporaba pred vrtanjem daje koristne podatke za oblikovanje prve geološke, litološke in hidrogeološke slike vodonosnika, ki je izhodišče za načrtovanje raziskovalnega vrtanja. Med vrtanjem pomagajo pri usmerjanju vrtalnih del: pri lociranju vrtin in načrtovanju globin vrtanja. Ker so poceni, jih je pametno uporabiti tudi kot dopolnitev raziskovalnega vrtanja.

V nadaljnjem so podani primeri geofizikalnih raziskav, ki jih je izvajal Oddelek za geofiziko Geološkega zavoda Ljubljana pod vodstvom avtorja na območju SR Slovenije. Ti primeri ilustrirajo uporabo različnih geofizikalnih metod za raziskave vodonosnikov in dajejo skromno predstavo o njihovi uporabnosti in koristnosti. Izsledki teh raziskav so povečini že preverjeni z raziskovalnim vrtanjem.

Raziskave vodonosnikov sladke vode

Splošno

Med najpomembnejšimi vodonosniki sladke vode v Sloveniji so kvartarni, redkeje pliocenski prodnati in peščeni vodonosniki. Medzrnska poroznost v zemljinah omogoča, da ima podtalna voda v enotnem vodonosniku običajno prosto gladino. Pri raziskavah teh vodonosnikov ima uporabna geofizika največkrat nalogo določiti debelino vodonosnika, njegovo litološko sestavo ter globino in relief vodoneprepustne podlage. Pri tem se večkrat postavlja zahteva po iskanju stare, z mlajšimi naplavinami zapolnjene in pokrite struge, ker je tam debelina vodonosnika praviloma največja.

Najprimernejši geofizikalni metodi za tovrstne naloge sta geoelektrično sondiranje in plitva refrakcijska seizmika. Uporaba in uspeh geofizikalnih metod sta odvisna od razlik, oziroma razmerja ustreznih fizikalnih lastnosti zemljin in kamenin, ki sestavljajo vodonosnik in njegovo podlago. Navadno se uporabljata za reševanje postavljene naloge obe metodi, ker temeljita na dveh medsebojno neodvisnih parametrih: specifični električni upornosti zemljin in kamenin ter na hitrosti razširjanja elastičnega valovanja v njih.

Gospodarnost teh raziskav ni vprašljiva, saj prispevajo pomemben delež pri oblikovanju modela vodonosnika. Z določitvijo reliefa podlage, ki omogoča oceno razsežnosti vodonosnika, pocenijo celotne raziskave, ker omeje obseg mnogo dražjih raziskovalnih vrtin na tisto število, ki je potrebno za določevanje hidrogeoloških in hidroloških parametrov ter za enolično vrednotenje geofizikalnih podatkov. Ekonomičnost uporabe geofizikalnih metod pri raziskavah prodnatih in peščenih vodonosnikov pogojuje tudi omejitev uporabe na ožje območje vodonosnika, ki je tu smotrna, ker je vrednotenje podatkov praktično neodvisno od poznavanja napajalnega območja (če izvezamo zemljine nad gladino talne vode, ki so pravzaprav tudi napajalno območje, saj skozi nje pronica padavinska voda do gladine podtalnice). Geofizikalne meritve zunaj vodonosnika imajo tu večinoma smisel le za določevanje fizikalnih lastnosti na izdankih zemljin in kamenin, ki jih moramo poznati za vrednotenje meritev na ožjem območju vodonosnika.

Problem oskrbe vode je zlasti pereč na krasu, ki zavzema v slovenskem prostoru precejšnjo površino, in zaslužijo zato kraški vodonosniki posebno pozornost raziskovalcev. Kraške vodonosnike oblikujejo zakrasele kamenine s kraško podzemeljsko vodo z večinoma nezvezno gladino. Gre torej za sistem razpok, kavern, kanalov in jam, vsaj delno zapolnjenih z vodo, ki so z ekonomskega stališča često bolj podobne posredniku vode, ker je mogoče s posegom vanje le z določeno verjetnostjo dobiti zadovoljivo količino vode. O vodonosniku v ožjem pomenu besede pa moremo v gospodarskem smislu govoriti predvsem v primeru, ko je sistem razpok in kavern dovolj gost in prepusten, kanal ali jama z vodo dovolj velika in seveda, če je vodna gladina zvezna. Takšno pojmovanje vodonosnika je vsebovano tudi v zahtevi, ki se navadno postavlja pred uporabno geofiziko: najti podzemeljski vodni kanal, oziroma vodni tok. Zaradi majhne velikosti iskanega objekta je gospodarnost geofizikalnih raziskav kraških vodonosnikov neprimerno manjša kot v primeru raziskav prodnatih in peščenih vodonosnikov. Raziskovalno območje je neprimerno večje

od razsežnosti vodonosnika. Tudi sama raziskovalna problematika je zahtevnejša, saj mora biti med geofizikalno sliko in vodonosnikom neposredna zveza.

Problematico raziskav podzemeljskih vodnik tokov moremo razčleniti na sledenje podzemeljskih vodnih poti in kanalov, iskanje smeri gibanja vode, ocenjevanje hitrosti vodnih tokov, določevanje iztekanja vode iz kraških polj oziroma jezer in akumulacijskih bazenov, raziskovanje zaledja izvirov itd. Med naštetimi nalogami sta prva in druga najzahtevnejši, vendar tudi ostale ne zaostajajo dosti. Bolj enostavni pa so primeri, ko ne gre neposredno za vodo, temveč za relief kameninske podlage kraških polj, kotlin in kotanj, za globino vrtač, debelino preperine in nanosov, za prelomne cone, smeri prevladujoče razpokanosti, cone močnejše zakraselosti, globine zakraselosti ipd. Kakovost izsledkov je tu lahko ogrožena predvsem zaradi kraške morfologije in prekrivanja vplivov raznih nehomogenosti.

Po izkušnjah raznih raziskovalcev in naših lastnih opažanjih ima za reševanje kraške problematike med klasičnimi metodami uporabne geofizike še največ uspeha geoelektrika.

Geoelektrično sondiranje in refrakcijske seizmične raziskave v Savinjski dolini

V letih 1970 in 1971 smo v Savinjski dolini z geoelektričnim sondiranjem in s plitvo refrakcijsko seizmiko v sorazmerno skromnem obsegu raziskovali litološke razmere. Geološki prerez raziskovalnega ozemlja je po podatkih vrta-nja v grobem naslednji:

kvartar: humus, melj, pesek, prod, glina, peščena glina, meljna glina;

pliocen: prod s peskom, meljem in glino, meljna glina;

oligocen: siva laporasta glina, tako imenovana sivica, andezitni tuf, tufit, tufski peščenjak.

Naloga geofizikalnih raziskav je bila, določiti globino do oligocenskih usedlin, ki jih predstavlja večidel sivica. Po litoloških podatkih je bilo mogoče sklepati, da se specifična električna upornost in hitrost razširjanja longitudinalnega elastičnega valovanja sivice ter drugih oligocenskih sedimentov toliko razlikujeta od istih parametrov pliocenskih in kvartarnih naplavin, da je smiselna uporaba obeh omenjenih metod. Geofizikalne meritve so pokazale, da ustrezata geološkemu profilu naslednji geoelektrični (upornostni) in seizmični (hitrostni) prerez:

Upornostni prerez:

20 do 2000 ohm.m: kvartarne zemljine;

20 do 150 ohm.m: pleistocenska ali pliocenska glina, meljna glina, glina s peskom in prodom;

6 do 80 ohm.m: oligocenske usedline.

Hitrostni prerez:

200 do 600 m/s : kvartarne zemljine nad nivojem talne vode;

1500 do 1900 m/s : kvartarne in pliocenske naplavine s talno vodo;

2100 do 2500 m/s in več: oligocenske usedline.

Geoelektrična slika nudi več podrobnosti in je na njej mogoče kakovostno razpoznavati več plasti kot na seizmični, vendar dokaj široki in prekrivajoči se upornostni razponi otežujejo že teoretično mnogolično vrednotenje geoelektrič-

nih sovisnic. Računska obdelava seizmičnih sovisnic je zaradi razmaknjenih hitrostnih razredov sorazmerno enostavna in je mogoče lepo slediti relief podlage ter poglobljene dele v njem, ki naj bi ustrezali stari strugi Savinje. Obseg geofizikalnih raziskav je bil glede na velikost Savinjske doline, oziroma vodonosnika, izredno majhen, število raziskovalnih vrtin, ki so sicer rabile tudi za določitev hidrogeoloških in hidroloških parametrov, pa precejšnje. Takšen način raziskav je bil delno opravičen; oligocenski sedimenti namreč niso pravo »dno« vodonosnika, ker del plasti nad njimi ni vodonosen, prave podlage pa ni bilo mogoče geofizikalno zanesljivo ugotoviti.

Poznavanje skupne debeline kvartarnih in pliocenskih naplavin je za oblikovanje predstave o vodonosniku vseeno koristno. Zato bi bilo pametneje določiti to debelino predvsem geofizikalno in le ponekod z vrtinami. Uporaba geoelektričnih in seizmičnih meritev na istih lokacijah ter skupna obdelava bi verjetno omogočili tudi boljše količinsko vrednotenje geoelektričnih sovisnic, iz česar bi morda dobili zadovoljive podatke o geoelektrično ločljivih kvartarnih in pliocenskih plasteh. Morebitne nove raziskave tega prostora bodo morale zato vsekakor upoštevati primeren obseg geofizikalnih meritev.

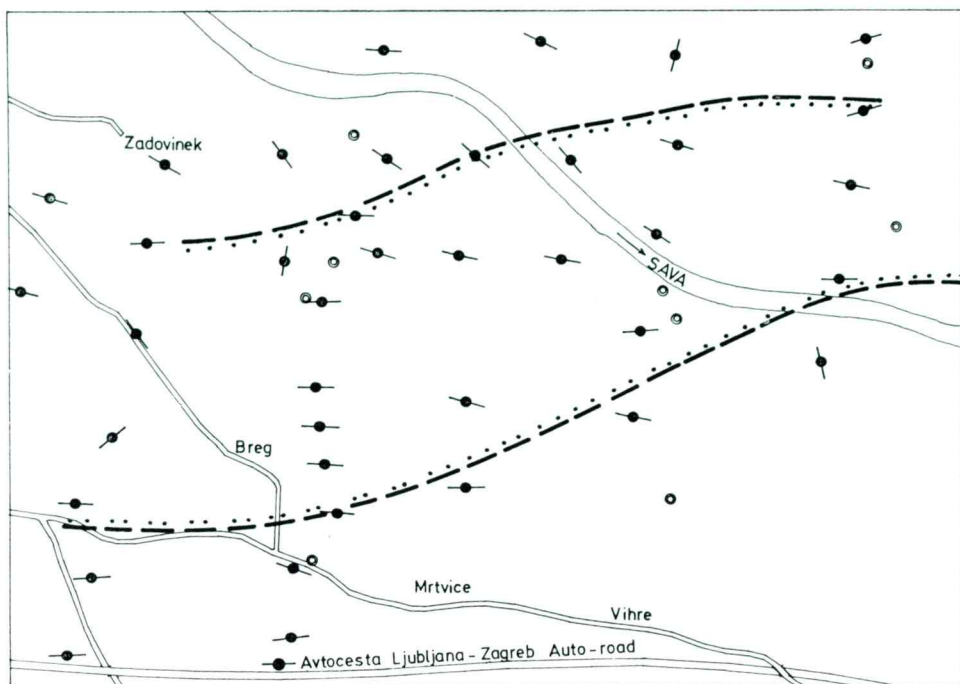
Geoelektrično sondiranje na Krško-brežiškem polju

Na Krško-brežiškem polju smo leta 1971 prav tako določevali globino do vodoneprepustne podlage, oziroma debelino kvartarnih naplavin.

Predvideno je bilo samo geoelektrično sondiranje. Primerjava geoloških in geoelektričnih podatkov je dala naslednji geološko-geofizikalni prerez:

1. plast (kvartar): 500 do 5000 ohm.m : prod s peskom;
2. plast (pliocen): 10 do 30 ohm.m : lapor, glina, glinasti melj;
100 do 300 ohm.m : prod (stisnjen).

Poleg določitve debeline kvartarnih naplavin je bilo mogoče zaradi ugodnih upornostnih razmerij litološko razčleniti podlago kvartarja ter določiti približne meje in območje pliocenskega proda, ki naj bi po geološki predpostavki zapolnjeval staro strugo reke Save. Slika 1 podaja pregledno karto dela raziskovanega ozemlja z geoelektrično določenimi mejami, oziroma območjem pliocenskega proda. Severni del te karte pokriva območje jedrske elektrarne Krško, kjer smo s plitvo refrakcijsko seizmiko potrdili izsledke geoelektričnega sondiranja; seizmično in geoelektrično določeni meji pliocenskega proda sta identični. Za hitrost razširjanja longitudinalnih valov v stisnjenem pliocenskemrodu smo dobili vrednost 2 km/s in več, za hitrost v drugih pliocenskih sedimentih pa 1,6 do 1,7 km/s, kar je zadostovalo za razločevanje. Ker je hitrost razširjanja elastičnega valovanja tudi v kvartarnih zemljinah s talno vodo približno 1,6 km/s, je bilo mogoče seizmično določiti debelino kvartarnih naplavin le tam, kjer je pod njimi pliocenski prod. V poprežju je torej geoelektrično sondiranje bolj ustrezalo za določevanje debeline kvartarnih zemljin kot refrakcijska seizmika, čeprav je bil račun debelin iz seizmičnih podatkov zanesljivejši, kjer je bil mogoč. Verjetno bi bilo koristno z refrakcijsko seizmiko preveriti geoelektrično določeno mejo pliocenskega proda tudi drugod (delno so to potrdile že vrtine), oziroma določiti njen potek natančneje, zlasti pa bi bile te meritve koristne tam, kjer iz geoelektričnih meritev ni bilo mogoče izluščiti te meje.



POJASNILA - EXPLANATIONS:

Geoelektrično določen
pliocenski prod
 Geoelectrically determined
Pliocene gravel

Električna sonda
Electrical sounding

 Vrtina
Bore hole

500 0 500 1000m

Sl. 1. Geoelektrično določen pliocenski prod na Krško-brežiškem polju
Fig. 1. Geoelectrically determined Pliocene gravel in the Krško-Brežice field

*Geoelektrično sondiranje in refrakcijske seizmične raziskave
na Iškem vršaju*

Na Iškem vršaju na južnem robu Ljubljanskega barja smo v letu 1974 imeli nalogo določiti debelino kvartarnih naplavin, oziroma globino do karbonatne podlage. Pričakovati je bilo, da se tako specifična električna upornost kot hitrost razširjanja elastičnega valovanja v kameninski podlagi jasno razlikujeta od teh lastnosti plasti, ležečih nad njo, zato smo kot raziskovalni metodi uporabili geoelektrično sondiranje in refrakcijsko seizmiko.

Iz obdelave geoelektričnih in seizmičnih sovisnic smo dobili po primerjavi z geološkimi podatki naslednja prereza:

Upornostni prerez:

- 20 do 90 (800) ohm.m: humus s prodniki (holocen);
 100 do 1000 ohm.m: prod, pesek, melj, glina, glinasti melj, meljna glina, peščena glina, grušč (holocen, pleistocen);
 nekaj 1000 ohm.m: dolomit (triada).

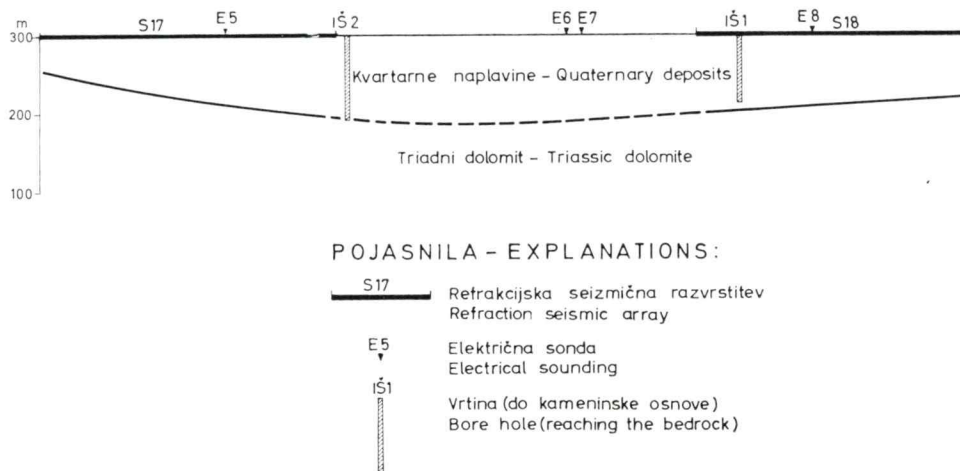
Po geoelektričnih sovisnicah je mogoče sklepati, da leži ponekod na dolomitni podlagi nizkouporna plast s specifično električno upornostjo nekaj 10 ohm.m, ki jo lahko predstavlja glina, meljna in peščena glina ali geoelektrično podoben material.

Hitrostni prerez:

- 300 do 500 m/s : kvartarne zemljine nad nivojem talne vode;
 1700 do 1900 m/s : kvartarne zemljine s talno vodo;
 3700 do 5700 m/s : triadni dolomit.

Količinsko vrednotenje samih geoelektričnih sovisnic ni bilo zanesljivo, računsko obdelava seizmičnih sovisnic pa je dala sliko kameninske podlage, ki jo delno kaže prerez na sliki 2. Predvsem na podlagi izsledkov refrakcijske seizmike sta bili določeni dve vrtini. Njuni globini do triadne podlage sta se dobro ujemali z izračunanima globinama. Vrtina IŠ-1 je zadela na dolomit v globini 87,6 m, po podatkih seizmike naj bi bila globina 98 m; odstopanje znaša 10,6 %. Druga vrtina, IŠ-2, je našla dolomit 108,5 m globoko, kar je praktično enako napovedani globini. Geofizikalne raziskave na območju vršaja Iške so torej pokazale pred vrtanjem, da je debelina kvartarnih naplavin neprimerno večja, kot so pričakovali geologi. To je bilo še posebej pomembno za načrtovanje vrtalnih del.

Obseg geofizikalnih meritev je bil tudi tu skromen. Ker je vrtanje potrdilo uporabnost refrakcijske seizmike, bi kazalo seizmično izmeriti najprej celotni Iški vršaj, nato pa postopoma na enak način obdelati še ostale dele Ljubljana-



Sl. 2. Geofizikalno določen geološki prerez Iškega vršaja

Fig. 2. Geophysically determined geological profile of the Iška alluvial fan

skega barja, da bi dobili celoten relief njegove kameninske podlage. Ne glede na težave in omejitve pri količinskem vrednotenju geoelektričnih sovisnic bi bilo koristno, da bi refrakcijske seizmične meritve spremljali z geoelektričnim sondiranjem zaradi vsaj grobega razločevanja prodnatih in peščenih zemljin od meljnatih in glinastih usedlin.

Geoelektrične raziskave zaledja izvirov Malni

Zaradi popolnejšega prikaza problematike in možnosti geofizikalnih raziskav v hidrogeologiji bom na kratko ponovil rezultate meritev v zaledju izvirov Malni, ki sem jih že objavil (L a p a j n e, 1974).

Leta 1970 smo po metodi električno nabitega telesa izmerili zaledje izvirov Malni, da bi dobili površinsko sliko električnega polja, ki bi bila v neposredni ali vsaj posredni zvezi z vodonosnikom ali posrednikom vode. Namen raziskav je bil, po meritvah treh izbranih izvirov določiti zajetje vode za postojnski vodovod.

Na raziskovanem območju, ki sestoji iz apnenca, smo ugotavljali električno polje na površju terena okoli tokovne elektrode, potopljene najprej v prvi, potem v drugi in nato še v tretji izvir, končno pa še polje linijske elektrode, potopljene vzdolž potoka Malenščice, kamor se steka voda iz vseh izvirov. Pomožna elektroda je bila tako daleč, da praktično ni vplivala na oblikovanje električnega polja.

Izolinije so bile močno popačene samo v bližini najmočnejšega, tj. najnižjega izvira. Na podlagi velikosti in predznaka anomalnih vrednosti merjenega električnega potenciala napram elektrodi — izvoru — smo sklepali, da more anomalijo povzročiti ali večja kaverna, oziroma razpokan in kavernozen apnenec, presušen nad gladino vode, ali pa zelo kompakten in suh apnenec. Po prvi razlagi bi bil kraj geoelektrične anomalije ugoden za zajetje, ker je voda morala zaradi bližine izvira zapolnjevati razpoke in kaverne pod določenim nivojem, po drugi pa bi bil seveda popolnoma neprimeren. Prva možnost se nam je zdela bolj verjetna, ker je bilo v zaledju izvira pričakovati kraške kaverne, pa tudi razpokanost v prelomni coni. Na geoelektrično anomalnem kraju smo izvedli raziskovalno vrtanje. Ugodni rezultati vrtn z barvanjem vode so odločili, da je bilo na tem kraju zgrajeno črpališče.

Raziskave vodonosnikov mineralne vode

Splošno

Zaradi raztopljenih mineralnih snovi, ogljikovega dioksida in navadno velikih globin je oblikovanje predstave o vodonosniku mineralne vode bolj zapleteno kot pri sladki vodi (izhajam predvsem iz raziskovalnih problemov v slovenskem prostoru), čeprav kompleksnosti te raziskovalne problematike ne kaže primerjati s težavnostjo raziskav kraških vodonosnikov. Mineralne snovi in zlasti plin še trdneje povezujejo napajalna območja, vodonosnik in posrednik v celoto. Oblikovanje modela vodonosnika mineralne vode zahteva vsestransko preučevanje celotnega sistema.

V Sloveniji sta dve pomembni območji mineralnih vrelov: Radenska Slatina in Rogaška Slatina. V prvem primeru gre za peščen(e) vodonosnik(e) z med-

zrnsko poroznostjo, v drugem pa za vodonosnik(e) z razpoklinsko poroznostjo. Kljub obsežnim raziskovalnim delom na območju Radenske Slatine geofizikalnih metod tu niso uporabili. Zato bom obravnaval le takšen tip vodonosnikov mineralne vode, kakršnega predstavlja Rogaška Slatina, kjer so bile vključene tudi geofizikalne raziskave.

Geološke in hidrogeološke raziskave v Rogaški Slatini so začeli z vrtanjem na ožjem vrelnem območju, od koder so se nato tipaje oddaljevali. Z oddaljevanjem od površinskih znakov (izvirov) pa postaja predstava vedno manj določena. Poleg površinskih geoloških in hidrogeoloških ter hidrokemičnih raziskav so potrebne tudi geofizikalne metode, ki dajejo podatke o globinski zgradbi. V ta namen so zaradi raznolikosti geoloških in hidrogeoloških razmer takih vodonosnikov primerne vse metode uporabne geofizike, ki lahko prispevajo kakovostne in količinske podatke. Kot primer podajam uporabo magnetometrije.

Geomagnetne raziskave na širšem območju Rogaške Slatine

Meritve relativnih vrednosti vertikalne komponente gostote magnetnega polja in težnosti v Halozah, na Kozjanskem in Bizeljskem v letih 1958 in 1959 so bile izvedene po programu raziskav nafte in plina in niso bile vrednotene glede na mineralno vodo v Rogaški Slatini. Na geomagnetni karti, izdelani na podlagi teh meritev, je med Podplatom in Rogatcem jasno izražena pozitivna anomalna cona, ki se je delno ujemala s takratnim vrelnim območjem. Zato je vzbudila pozornost geologa A. Nosana, ki je sklepal, da utegne biti struktura, ki povzroča anomalijo, v kakšni zvezi z vodonosnim horizontom. Na podlagi te predpostavke je lociral na dveh anomalijah znotraj celotne anomalne cone dve vrtini, in sicer V-3/66 pri Podplatu in Sč-1/67 pri Sečovem. Obe vrtini dajeta Rogaški Slatini že nekaj časa glavne količine mineralne vode in ogljikovega dioksida.

Tudi ti dve vrtini sta, kot vse prejšnje na ožjem vrelnem območju, potrdili, da je vodonosnik, ali vsaj posrednik mineralne vode, andezitni tuf, pokrit z vodoneprepustnim oligocenskim laporjem. Verjetna se je zdela tudi razlaga, da povzroča magnetno anomalijo andezitni tuf ali morda pod njim ležeči andezit. Obe pozitivni vrtini sta kazali na to, da so lahko magnetne anomalije vodilo za lociranje vrtin; zato smo se lotili detajlnih geomagnetnih meritev. Prejšnje meritve so bile namreč dokaj redke — 2 do 3 merska stališča na km², pa še te so bile zgoščene vzdolž važnejših cest.

Leta 1974 in 1975 smo izvedli meritve totalne vrednosti gostote magnetnega polja na ozemlju s površino približno 300 km². Osrednji del tega območja, ki zajema praktično celotno anomalno cono med Rogatcem in Podplatom, meri kakih 50 km². Tu smo meritve znatno bolj zghostili kot na ostalem merskem območju.

Detajlna geomagnetna karta odraža pozitivno anomalno cono, ki se razteza približno v smeri zahod-vzhod. V grobem se prekriva s sliko, ki so jo dale prejšnje meritve vertikalne komponente magnetnega polja, posamezne anomalije (»vrhovi«) znotraj anomalne cone pa so šele na detajlni karti prišle pravilno do izraza. Anomalija pri Rogatcu je izražena bolj jasno kot na prejšnji karti. Prvotno enotna anomalija na osrednjem delu je razbita na anomalijo

pri Sečovem in anomalijo na ožjem območju Rogaške Slatine. Za anomalijo pri Podplatu pa se je pokazalo, da ima maksimum južno od Kostrivnice. Ta štiri anomalna območja bomo na kratko analizirali.

Najdlje poznano in najbolj raziskano je ožje vrečno območje Rogaške Slatine. Tu se andezitni tuf najbolj približa površju, saj se nahaja neposredno pod kvartarnimi usedlinami. Magnetno polje ima tu visoke vrednosti, z oddaljevanjem od središča anomalije pa hitro pojema zlasti proti severu in proti jugu. Kraj pozitivne vrtine V-6/67, najpomembnejše na ožjem vrečnem območju, je blizu vrha anomalije, čeprav je J. Bač ni lociral na podlagi geomagnetnih raziskav, temveč le glede na bližino drugih vrtin in površinskih pojavov vode.

Anomalija pri Sečovem je po gostoti magnetnega polja enaka prvi, čeprav so doslej določene globine do tufa večje. Najbliže površju je najden tuf v vrtini Sč-1/67, in sicer približno v globini 135 m. Polje tudi tu z oddaljevanjem hitro pojema, prav tako se tudi globina do tufa hitro povečuje. V vrtini Sč-2/68, ki je približno 800 m severno od Sč-1/67 zunaj anomalije, je najden tuf šele v globini 675 m, če zanemarimo vložek od 419 m do 444 m.

Za Podplat in Kostrivnico je značilna blaga in široka anomalija, ki kaže, da je andezitni tuf sorazmerno globoko. To potrjujejo tudi vrtine, saj je bil najden tuf v vrtini V-3/66, ki je na robu anomalije, šele v globini 530 m ter tanjši vložek od 310 do 320 m globine. Na podlagi nove podrobne geomagnetne izmere je J. Lapajne na csrednjem delu te anomalije predlagal lokacijo vrtine K-2/75, ki daje večje količine mineralne vode in plina kot druge vrtine. S to vrtino je ponovno potrjena posredna zveza magnetnih anomalij in pojavov vode oziroma plina. Globina do vodonosnega tufa je tu 484 m, vložek »jalovega« tufa pa je že v globini 298 do 313,5 m.

Anomalno območje pri Rogatcu je še popolnoma nepoznano. Tu ni bilo niti detajlnih geoloških raziskav niti raziskovalnega vrtanja. Po velikosti anomalije je mogoče sklepati, da je tu globina do andezitnega tufa večja kot na območju anomalije pri Sečovem in manjša kot na anomalnem območju pri Podplatu in Kostrivnici.

Pri lociranju vrtin na podlagi kvalitativnega vrednotenja je treba upoštevati, da je zaradi magnetne inklinacije vrh anomalije premaknjen nekoliko proti jugu glede na položaj telesa, ki povzroča anomalijo; premik je odvisen od globine telesa, ki povzroča anomalijo: čim globlje leži telo, tem večji je premik. Na kakovostno vrednotenje smo bili vezani predvsem zato, ker meritev še nismo končali, ko se je že pričelo raziskovalno vrtanje. Vsekakor pa bo treba čimprej napraviti kvantitativen model vodonosnika mineralne vode in plina ter upoštevati izsledke geoloških, geofizikalnih, fizikalnih, kemičnih in drugih raziskav.

Dobra predstava ni potrebna zgolj zaradi izbire lokacij za vrtanje, saj je razmerje pozitivnih in negativnih vrtin že sedaj izredno ugodno, temveč predvsem zaradi smotrnega izkoriščanja mineralne vode in plina ter ocene življenjske dobe vodonosnika.

K oblikovanju modela geološke zgradbe lahko znatno prispeva matematični model »geomagnetne strukture«, za kar so potrebne meritve magnetne susceptibilnosti in remanentnega magnetizma kamenin. V načrtu imamo sistematične meritve fizikalnih lastnosti na vzorcih iz izdankov in na jedrih iz vrtin. Doslej smo kar s terenskim magnetometrom ugotovili naslednje:

- lapor ni vplival na magnetometer,
- vzorci različkov andezitnega tufa so sicer različno vendar neznatno vplivali na magnetometer,
- hiperstenov andezit iz opuščenega kamnoloma pri Trličnem ob Sotli je edina kamenina na širšem območju Rogaške Slatine, ki močno vpliva na magnetometer.

Po zelo grobih ocenah magnetne susceptibilnosti sklepamo, da andezitni tuf ne povzroča magnetnih anomalij oziroma anomalnih con na ozemlju Rogaške Slatine, ker je njegova doslej določena magnetna susceptibilnost vsaj deset do stokrat prenizka. Magnetna susceptibilnost hiperstenovega andezita v splošnem ravno zadostuje za razlago anomalij. Ta ali njej sorodna kamenina povzroča povečanje gostote magnetnega polja in verjetno ne bi bilo treba znatno poglobiti vrtin na vrhovih anomalij, da bi iz tufa prišli vanjo. Glede na največje vrednosti gostote magnetnega polja leži ta kamenina najbližje površju na ožjem vrelčnem območju Rogaške Slatine in Sečovega. Ker leži tuf na tej kamenini, so anomalije posredno tudi merilo za njegovo globino.

Vse vrtine, ki so bile doslej izvrtane na geomagnetnih anomalijah, dajejo mineralno vodo in plin, vse ostale pa so negativne. To nas navaja k sklepu, da obstaja močna zveza med magnetnimi anomalijami in vodonosnikom. Na geološki karti doslej ni uspelo odkriti enakovredne korelacije.

Kot sem že omenil, je vodonosni horizont, oziroma posrednik, andezitni tuf, ki pa, kot kaže, ne povzroča magnetnih anomalij, ali pa je njegov prispevek k anomalijam majhen. Magnetne anomalije najverjetneje kažejo na vulkanske izlive andezita vzdolž močnejšega preloma, ki je verjetno tudi posrednik plina. Morda se območja najmočnejših izvorov plina ujemajo z območji geomagnetnih anomalij. Če predpostavimo, da prispeva k dvigu vode na površje največ plin, imamo že eno možno razlago posredne zveze magnetnih anomalij z vodo in plinom.

Iz tega razmišljanja sledi, da bi s poglobitvijo vrtin na magnetnih anomalijah morda prišli v cono, iz katere bi dobivali samo plin, ali pa bi dobili toplejšo mineralno vodo.

Raziskave vodonosnikov termalne vode

Splošno

Podobno vlogo kot jo ima plin v problematiki raziskav vodonosnikov mineralne vode ima toplota pri raziskavah vodonosnikov termalne vode. Za razumevanje teh vodonosnikov je treba rešiti vprašanje, kje se voda segreva, oziroma, odkod toplotna energija. Predstava o vodonosnikih termalne vode je navadno še skromnejša kot v primeru vodonosnikov mineralne vode. V splošnem razlikujemo pri nas plitve vodonosnike z medzrnsko poroznostjo, vodonosnike v prelomnih conah in globoke vodonosnike z razpoklinsko ali medzrnsko poroznostjo. V plitvih vodonosnikih se meša termalna voda, ki prihaja iz večjih globin, s hladno podtalnico in je zato temperatura takšne vode sorazmerno nizka. V prelomnih conah moremo dobiti praviloma toplejšo vodo. To so pravzaprav posredniki termalne vode in se v njej lahko oblikujejo vodonosniki pod slabše prepustnimi, oziroma milonitiziranimi conami. Vodonosniki, ki se nahajajo

pod globoko ležečimi zapornimi plastmi, so najzanimivejši, saj pomeni uspešen poseg vanje velike količine vode z visoko temperaturo.

Tudi termalno vodo so pri nas začeli izkoriščati na ožjih vrelnih območjih plitvih vodonosnikov. Zaradi nižjih temperatur in nezadostnih količin tople vode so pozneje v bližini naravnih izvirov locirali kaptažne vrtine. Ker plitvi vodonosnik tudi ne zadovoljuje potreb trajno, so skušali poiskati prelomne cone kot posrednike termalne vode in iz njih iz večje globine dobiti primerne količine dovolj tople vode. Pri iskanju pokritih prelomov in geoloških mej ter določevanju debeline mlajših sedimentov so uspešne geofizikalne metode, npr. geoelektrika ali plitva refrakcijska seizmika. Poseben raziskovalni problem predstavljajo termalni izviri v kraškem svetu, kjer posredujejo vodo močnejše zakrasele cone. Tu je zelo majhna verjetnost, da zadene vrtina vodonosne kaverne ali razpoke, geofizikalno pa njihovega položaja ni mogoče najti. Meritve temperature in temperaturnega gradienta navadno tudi niso vodilo pri raziskavah v krasu, ker cirkulira hladna voda zelo globoko in popači mersko sliko toplotnega polja.

O globokih vodonosnikih imamo slabo predstavo ali pa sploh nobene. Zato so tembolj pomembne geofizikalne raziskave, ki lahko kaj povedo o globinski zgradbi. Površinske metode, primerne za takšne raziskave, so reflektivna seizmika, globoko geoelektrično sondiranje, gravimetrija in magnetometrija.

Trije primeri ilustrirajo uporabo geofizikalnih metod in kažejo smotrnost njihove uporabe.

Geoelektrično sondiranje in refrakcijske seizmične raziskave pri Kostanjevici

Geofizikalne raziskave na območju toplih izvirov Topličnik pri Kostanjevici leta 1971 in 1972 niso imele zveze z vodonosnikom, ampak so bile namenjene samo za raziskavo litoloških razmer v manjših globinah. Določiti je bilo treba relief kameninske podlage kvartarnih in miocenskih sedimentov. Geofizikalne raziskave naj bi rabile za načrtovanje globin vrtanja. V ta namen smo uporabili geoelektrično sondiranje in plitvo refrakcijsko seizmiko. Raziskave so dale naslednji geološko-geofizikalni prerez raziskovanega ozemlja:

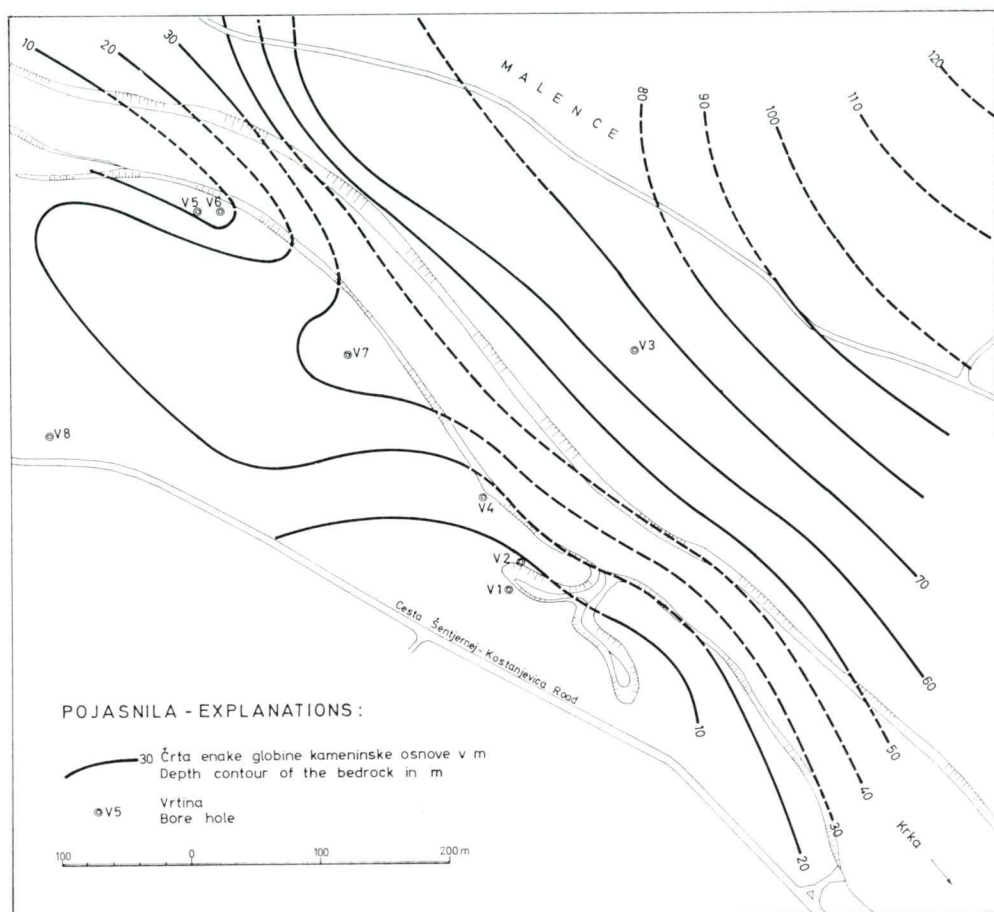
30 do 100 ohm. m in več / 1100 do 1600 m/s : kvartarna glina, pesek in prod z vodo;

10 do 20 ohm. m / 1600 m/s : miocenski lapor;

vsaj nekaj 100 ohm. m / preko 3000 m/s : miocenski litotamnijski apnenec, kredni apnenec, jurski dolomit.

Slika 3 kaže rezultat vrednotenja, to je karto globin podlage z veliko hitrostjo razširjanja longitudinalnega valovanja in z veliko specifično električno upornostjo, kar ustreza karbonatnim kameninam — predvsem krednemu apnencu, ponekod tudi litotamnijskemu apnencu, medtem ko jurskega dolomita verjetno nismo zajeli. Geofizikalno določene globine so se zelo dobro ujemale s kasnejšimi vrtinami. Geofizikalne raziskave so na desnem bregu omejile območje z globoko kameninsko podlago. Vrtina V-7 je to potrdila, napovedana globina pa je nekoliko odstopala od prave, ker je bilo količinsko vrednotenje na tem območju zaradi bočnih vplivov manj zanesljivo.

Kot običajno je bilo mogoče količinsko nedvoumno vrednotiti le seizmične meritve ter predvsem iz njih dobiti podatke o globini kameninske podlage. Za



Sl. 3. Geofizikalno določen relief kameninske podlage na območju Topličnika
Fig. 3. Geophysically determined bedrock shape in the Topličnik area

razločevanje kvartarnih naplavin od miocenskega laporja pa je bila uspešnejša geoelektrika; z njo smo ugotovili, da se na območjih, kjer leži podlaga globlje, nahaja pod kvartarnimi naplavinami miocenski lapor, kjer pa je do podlage le nekaj metrov, npr. v obeh plitvih območjih na desnem bregu, pa te plasti ni.

Geoelektrične in refrakcijske seizmične raziskave na območju Čateških Toplic

Te raziskave obravnavam v posebnem članku (Lapajne, 1975); zato jih tu podajam prav na kratko. V letih 1970 in 1971 smo na Čateškem polju imeli namen predvsem raziskati litološke razmere v manjših globinah; večjih raziskovalnih globin zaradi neugodnih terenskih razmer ni bilo mogoče doseči. Z geoelektričnim sondiranjem in profiliranjem ter plitvo refrakcijsko seizmiko smo zelo lepo litološko razčlenili podlago kvartarnih naplavin in obenem določili

pokrite prelomne ccne, kjer smo locirali dve vrtini. Obe sta bili pozitivni, kar utrjuje predpostavko o posredni odvisnosti geofizikalne slike od vodonosnika, oziroma posrednika termalne vode.

Geofizikalne raziskave na območju termalnih izvirov jugovzhodne Slovenije

Obširne večletne geološke, hidrogeološke in geofizikalne raziskave smo leta 1973 zastavili na območju, ki zajema znana zdravilišča Čateške, Šmarješke in Dolenjske Toplice ter termalne izvire pri Bušči vasi, Kostanjevici, Otočcu in Klevevžu. Naravni topli izviri na tem območju imajo temperature 19 do 38° C, le v Čateških Toplicah dosežejo 55° C. Z raziskavami posameznih območij v prejšnjih letih je uspelo dobiti nekaj višje temperature, na območju Čateških Toplic celo do 64° C. Pomemben prispevek teh raziskav pa so bile nove količine termalne vode

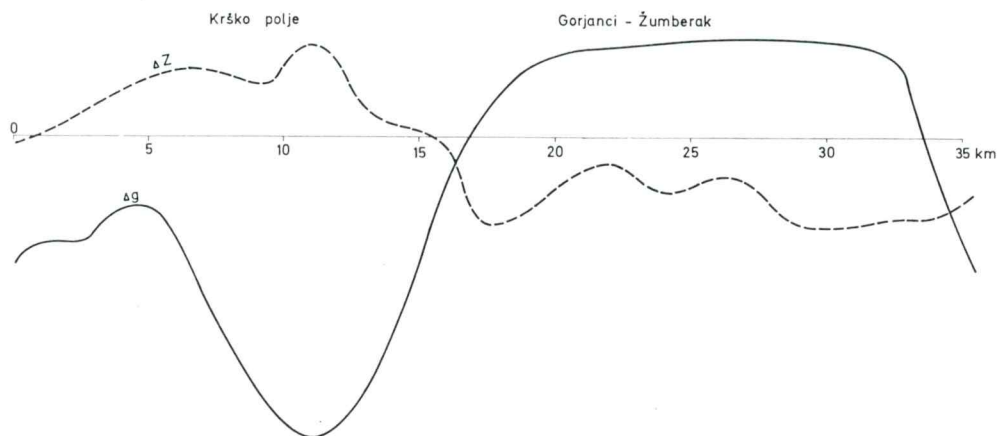
Poleg omenjenih vrelcev na severnem, oziroma severovzhodnem obrobju Gorjancev so termalni izviri tudi na obrobju Žumberaka in Samoborske gore na hrvaški strani, pri Samoboru na vzhodu in pri Sv. Jani na jugu. Večina naštetih izvirov je ob pregibih Krško polje—Gorjanci, dolina Save in Gorjanci—Samoborska gora in Jastrebarsko—Žumberak. Krško polje, savska dolina in Jastrebarsko polje so tektonske udorine, med njimi pa leže dvignjene grude Gorjancev, Žumberaka in Samoborske gore.

Za te grude je značilen izrazit gravimetrični maksimum, za tektonske udorine pa močno izraženi minimumi. Omenjeni maksimum je eden največjih v vrsti gravimetričnih anomalij na slovensko-hrvaškem mejnem ozemlju med Kolpo in Muro. Podoben gravimetrični maksimum je na območju Medvednice, kjer so znane Stubiške Toplice in termalni izvir pri Podsusedu. Iz regionalne gravimetrične karte lahko sklepamo, da so na gravimetrične anomalije vezani tudi termalni vrelec pri Podčetrtku ter Krapinske, Varaždinske in druge Toplice na hrvaški strani.

Precej manj izrazita je regionalna magnetna karta. Tu ne moremo govoriti o kakšni izraziti anomaliji. V poprečju je za območje, kjer imamo pozitivno gravimetrično anomalijo, značilna negativna magnetna anomalija in obratno. Slika 4 kaže gravimetrični in magnetometrični profil Krškega polja, Gorjancev in Žumberaka do Jastrebarskega polja.

Primerjava gravimetrične in geomagnetne karte z ustrezno geološko, tektonsko in neotektonsko karto kaže, da se geofizikalna slika dokaj dobro ujema z geološko. Vse važnejše geološke strukture in tektonski elementi se lepo odražajo na gravimetrični karti ter v njenih transformirankah. Po gravimetričnih podatkih je mogoče na splošno oceniti, da Krško udorino zapolnjujejo kamenine z manjšo gostoto in da sestoji jedro gorjanško-žumberaške grude iz kamenin z večjo gostoto od poprečne gostote kamenin obravnavanega območja. Za oblikovanje natančnejšega modela bodo potrebne meritve gostote na vzorcih iz izdankov. Kljub temu pa bo treba sliko še zelo poenostaviti in se opreti na dvomljive predpostavke, dokler ne bodo na voljo globoke vrtine.

Največ termalnih izvirov je v prelomnih conah med gorjanško-žumberaško grudo in obdajajočimi udorinami. Po njih si termalna voda utira pot proti površju in so zato bolj posrednik kot vodonosnik. Čeprav lahko poseg vanje prinese večje količine termalne vode, kot npr. v Čateških Toplicah, moramo



Sl. 4. Težnostni in geomagnetni profil preko Krškega polja, Gorjancev in Žumberaka
Fig. 4. Gravity and magnetic profile across the Krško field, Gorjanci and Žumberak mountains

verjetno prave vodonosnike iskati v večjih globinah pod še nepoznanimi zapornimi plastmi. Globinski vodonosniki so osrednji predmet kompleksnih raziskav termalnih izvirov v jugovzhodni Sloveniji. Ker pa o njih nimamo zanesljivih podatkov, so raziskave usmerjene v preučevanje prelomnih con kot posrednikov termalne vode ter napajalnega območja. V zvezi s slednjim pa je reševanje najvažnejšega vprašanja: Od kod toplotna energija? Možni so trije viri: tektonska toplota, normalni temperaturni gradient in magmatska toplota.

V prvem primeru se voda segreva v globokem prelomu, v drugem v večjih globinah v Krški in drugih udorinah, v tretjem primeru pa bi lahko bil vir toplotne energije magmatsko telo pod Gorjanci in Žumberakom.

Zaenkrat ni mogoče zavreči nobene od naštetih možnosti, vendar bi bilo po drugi težko razložiti temperaturo 64° C v Čateških Toplicah. Izsledki geofizikalnih raziskav so zaenkrat najbližje tretjemu viru. Kot sem že omenil, je treba za razlago gravimetrične slike predpostaviti pod Gorjanci in Žumberakom telo z večjo gostoto; to telo bi lahko tudi bilo vir toplotne energije za vodo. Negativno magnetno anomalijo na območju Gorjancev in Žumberka povzročajo kamenine s poprečno manjšo magnetno susceptibilnostjo. Magnetna susceptibilnost kamenin je odvisna predvsem od vsebnosti magnetita. Nizko magnetno susceptibilnost bi lahko npr. povročila hidrotermalna sprememba magnetita v pirit. Torej bi lahko skleпали na intenzivnejšo hidrotermalno aktivnost znotraj gorjanško-žumberaške grude. Gravimetrična karta pa kaže tudi na močne prelomne cone in globoke udcrine in zato ne zavrača ostalih dveh možnosti.

Na celotnem raziskovanem ozemlju ni na voljo še nobene globoke vrtine; zato samo po površinskih raziskavah ni mogoče sklepati kaj določenega o globinskih razmerah. Prva naloga sedanjih raziskav je torej izbira primerne kraja za globoko vrtino. Ena sama vrtina bo seveda premalo, o obsegu vrtnih del pa bodo odločala finančna sredstva. Navezava na podatke raziskovalnega

vrtanja bo omogočila zanesljivejše vrednotenje geofizikalnih meritev. Pričakujemo, da bo geofizikalni model bistveno pripomogel k razumevanju raziskovalnega prostora.

Povzetek

Vrednotenje geofizikalnih meritev kaže, da so za iskanje vodonosnikov primerne praktično vse površinske metode uporabne geofizike. Pri raziskavi plitvih litoloških razmer sta ustaljeni metodi geoelektrika in plitva refrakcijska seizmika. Določevanje globine do vodoneprepustne plasti ali kameninske podlage je s seizmiko dokaj zanesljivo in natančno; zato ima v tem pogledu prednost pred geoelektričnim sondiranjem. Za razločevanje prodnatih in peščenih plasti od meljnatih in glinastih vložkov ter za ugotavljanje raznih drugih nehomogenosti pa je povečini občutljivejša geoelektrika; posebno primerna je za kakovostno vrednotenje, za količinsko obdelavo pa je nujna navezava na poznane razmere, npr. v vrčinah. Hkratna uporaba obeh metod lahko dá pri ne premajhnem obsegu meritev zelo koristne podatke o vodonosniku. Raziskave kraških vodonosnikov spadajo med najtežje raziskovalne naloge. Od klasičnih metod uporabne geofizike ima še največ uspeha geoelektrika, ker je električno polje še najbolj občutljivo za kraške nehomogenosti.

Za raziskave globljih geoloških struktur, kar je v okviru potreb hidrogeologije v slovenskem prostoru zlasti pomembno pri raziskavah vodonosnikov mineralne in termalne vode, sta za določevanje geometrijskih parametrov primerni metodi geoelektričnega sondiranja in seizmike (predvsem reflektivna seizmika), vendar slednja v ta namen zaradi visoke cene ni bila uporabljena, prva pa v zelo skromnem obsegu. V splošnem metodologija raziskav teh vodonosnikov ni ustaljena in je izbira raziskovalnih metod od primera do primera različna. Kot sem pokazal na primerih, kjer sta bili uporabljeni magnetometrija in gravimetrija, je odvisno od specifičnih geoloških razmer, katera metoda je primernejša. Najbolje je uporabiti več različnih metod, ki lahko kakorkoli prispevajo k oblikovanju modela vodonosnika.

Literatura

- F a n i n g e r, E. 1966, Hiperstenov andezit pri Sv. Roku ob Sotli. *Geologija* 9, Ljubljana.
- L a p a j n e, J. 1974, Geofizikalne raziskave na krasu. *Acta carsologica* VI/27, Ljubljana.
- L a p a j n e, J. 1975, Geofizikalne raziskave na območju Čateških Toplic. *Geologija* 18, Ljubljana.
- N o s a n, A. 1973, Termalni in mineralni vreli v Sloveniji. *Geologija* 16, Ljubljana.