

GEOFIZIKALNE RAZISKAVE NA KRASU

(s 13 slikami v besedilu)

GEOPHYSICAL EXPLORATIONS IN KARST

(with 13 Figures in Text)

JANEZ LAPAJNE

(Geološki zavod v Ljubljani)

Uvod

Predmet geofizikalnih raziskav na krasu je ugotavljanje reliefa podlage kraških polj, kotlin in kotanj, globine vrtač, debeline preperine in nanosov, prelomnih con, smeri prevladujoče razpokanosti, con močnejše zakraselosti, globine zakraselosti, iskanje praznih in zapolnjenih kraških jam, boksitnih in drugih teles, sledenje podzemeljskih vodnih poti in kanalov, ugotavljanje smeri gibanja vode, ocenjevanje hitrosti filtracije vode, določevanje mest iztekanja vode iz kraških polj oziroma jezer in akumulacijskih bazenov, raziskovanje zaledja izvirov ipd.

Ob takšni raznolikosti problemov ni mogoče predpisati splošnega načina raziskovalnega dela. Na podlagi teoretičnih izsledkov in praktičnih izkušenj je mogoče v splošnem samo ocenjevati uporabnost posameznih raziskovalnih metod, sicer pa je treba obravnavati vsako nalogo glede na konkretne geološke in geofizikalne pogoje.

Pri predpripravi so koristni predhodni izsledki modeliranja. Da lahko modelne rezultate npr. v obliki krivulj smiselno uporabimo, moramo najprej postavljene raziskovalni problem čim bolj formulirati in sicer v mejah, ki jih postavljajo razpoložljivi podatki.

Teoretično je dokaj dobro obdelan problem ugotavljanja kraških jam ter drugih teles in tudi mi smo mu v preteklih letih posvetili več pozornosti, o čemer bomo obširneje govorili v okviru modelnih raziskav. Poglejmo si, kako v praksi oblikujemo problem ugotavljanja takšnih teles.

Rezultati modeliranja jasno kažejo, da je mogoče kraške votline in rudna telesa neposredno ugotavljati le v sorazmerno majhnih globinah. Po drugi strani pa so nekateri rezultati terenskih raziskav navidezno v nasprotju s tem izsledkom; maksimalne vrednosti terenskih anomalij so namreč često nekajkrat večje od teoretičnih. Marsikdaj dobivamo močne anomalije od globoko ležečih teles, od katerih sploh ne bi pričakovali merljivih anomalij.

Za terenski profil s sl. 4 je mogoče hitro oceniti, da bi dana jama v najboljšem primeru povzročila spremembo navidezne specifične upornosti na geoelektričnem profilu Wennerjeve razvrstitve za kakih 10 %. Kot je znano, mora merljiva sprememba določene fizikalne količine presegati dvakratno vrednost merske napake, ki v tem primeru prav gotovo ni manjša od 5 %. Zato takšne spremembe pri razgibanem in nehomogenem terenu ne moremo niti kvalitativno vrednotiti. Očitno izražena možna anomalija v tem in mnogih drugih primerih terja zato neko sprejemljivo razlago.

Problem ugotavljanja raznih teles moremo dokaj jasno, čeprav morda ne povsem zadovoljivo formulirati v splošni obliki.

Geofizikalno ugotavljanje nekaterih kraških teles, ki leže pod površino, je mogoče razdeliti na:

1. Neposredno ugotavljanje, če povzroča anomalijo iskano telo samo; pri obdelavi in vrednotenju se poslužimo laboratorijskega in matematičnega modeliranja.

2. Posredno ugotavljanje — anomalijo povzroča »telo«, ki obsega poleg iskanega telesa še precejšen del njegove okolice; često je namreč prisotnost iskanega telesa povezana s tolikšno spremembo obdajajočih kamenin, da pravzaprav le-te skupaj z vodo, glino ipd. predstavljajo »anomalno telo«, ki ima lahko bistveno večje razsežnosti kot iskano telo samo; često je prispevek iskanega telesa k anomaliji zanemarljiv.

V kolikor gre za neposredno ugotavljanje, je mogoče podati kvantitativne podatke o občutljivosti in globinski dosegljivosti metode za splošen primer.

Pri posrednem ugotavljanju ne moremo ničesar napovedati vnaprej, ker je uspešnost metode odvisna od konkretnih terenskih razmer.

Večinoma so razmere ravno takšne, da gre lahko kvečjemu za posredno ugotavljanje. V tem primeru je treba za razlago anomalije zadovoljivo opisati omenjeno »anomalno telo« in nikakor ni umestna primerjava izmerjene anomalije z anomalijo nekega modela, ki sploh ne ustreza razmeram v naravi. Načeloma je mogoče tudi v tem primeru problem obravnavati z modeliranjem, velikokrat pa so terenske razmere takšne, da je mogoče podati le kvalitativen opis »anomalnega telesa« glede na tehnične, časovne in ekonomske omejitve. Če gre samo za določitev lokacije, kvalitativna slika običajno zadostuje.

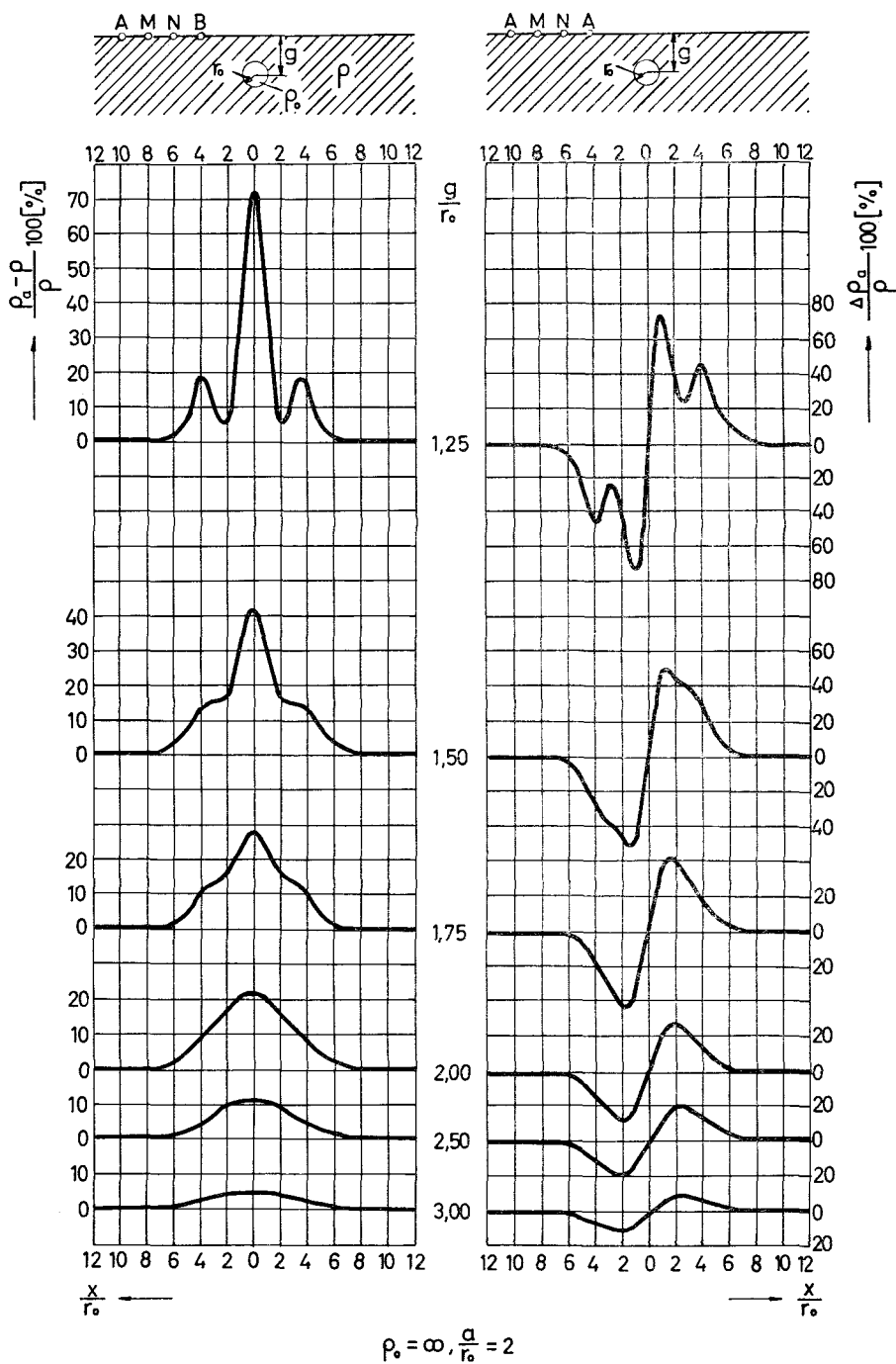
GEOELEKTRIČNE MODELNE RAZISKAVE

Osnovna naloga uporabne geofizike je oblikovanje predstave oz. slike raziskovanega terena na podlagi podatkov terenskih meritev. Iz danih meritev je torej treba izračunati fizikalne in geometrijske parametre geološke strukture. Ta problem v splošnem ni rešljiv zaradi dveh osnovnih vzrokov.

Prvi je neenoličnost rešitve, kar pomeni, da lahko ustreza določeni množici merskih vrednosti več možnih različnih geoloških konfiguracij, drugi vzrok pa je nekorektnost danega problema, kar pomeni, da lahko poljubno majhnim merskim napakam ustrezajo poljubno velike napake v rešitvi. Ti zapreki lahko uspešno odstranimo samo z dodatnimi informacijami, ki niso vsebovane v merjeni količini. Te informacije dobimo iz geoloških in vrtnih del, deloma pa z ugotavljanjem drugih geofizikalnih parametrov, ki so neodvisni od že ugotovljenih.

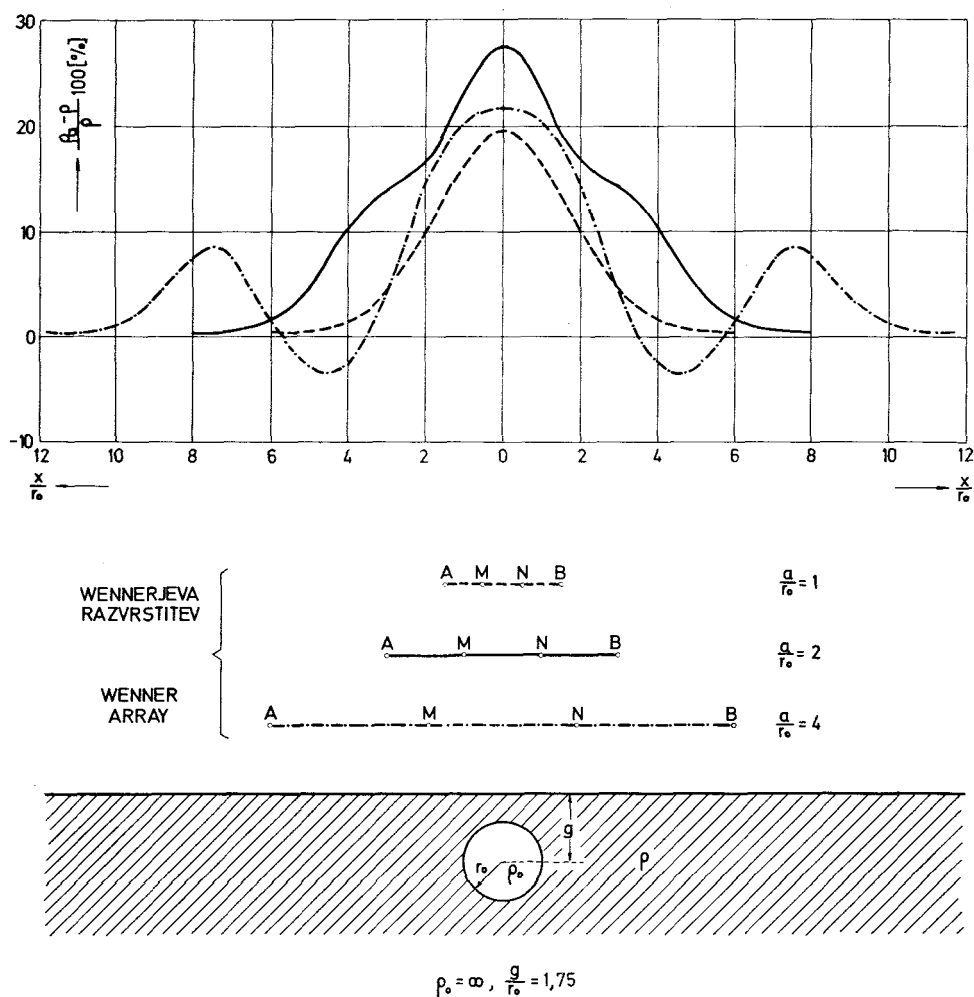
Način reševanja postavljene naloge poteka običajno posredno s pomočjo modeliranja. Glede na merske podatke se na nek način napravi model raziskovanega terena. Nato se izračuna učinek oz. polje tega modela in se le-to primerja z merskim poljem. Po potrebi se vnese popravek v model in se ponovno izračuna polje itd. Tako se postopoma približujemo neki možni rešitvi, ki se zdi zadovoljiva. Z dodatnimi informacijami poskrbimo, da je dobljena rešitev čim vernejša podoba razmer v naravi.

Razlikujemo laboratorijsko in matematično modeliranje. Izbira med enim in drugim je odvisna od omejitev enega in drugega, od cene in potrebnega časa. Za nekatere probleme je primernejše prvo, za nekatere drugo. S prihodom hitrih



Sl. 1. Laboratorijske modelne krivulje za valj v homogenem izotropnem polprostoru.
Upornostne krivulje za razne globine valja

Fig. 1. Laboratory model curves for cylinder in homogeneous isotropic halfspace.
Resistivity curves for several cylinder depths



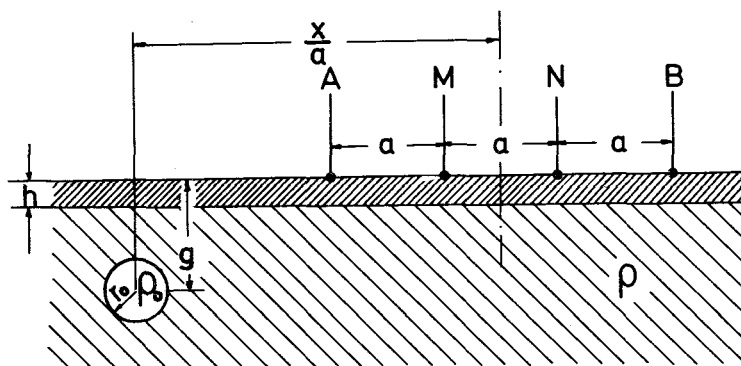
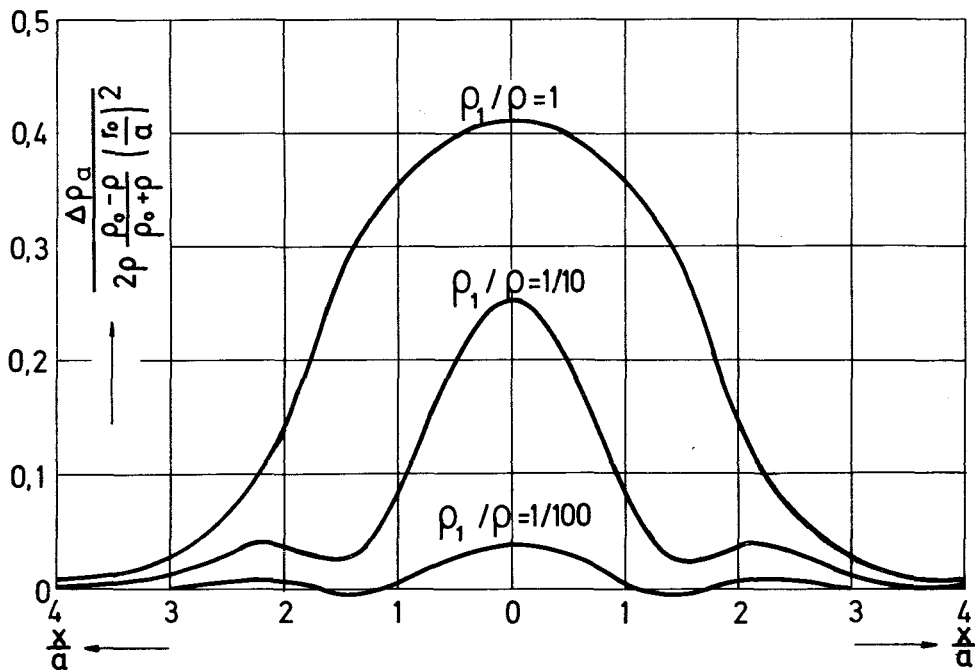
Sl. 2. Laboratorijske modelne krivulje za valj v homogenem polprostoru. Upornostne krivulje za različne dolžine Wennerjeve razvrstitve

Fig. 2. Laboratory model curves for cylinder in homogeneous isotropic halfspace. Resistivity curves for different dimensions of Wenner array

elektronskih računalnikov se je težišče pomaknilo na računalniško modeliranje, ki postaja eden najuporabnejših postopkov v procesu vrednotenja.

Za programiranje raziskovalnih del in oceno uporabnosti neke metode ter za samo vrednotenje so zelo koristne vnaprej izračunane ali izmerjene modelne krivulje. Često so to povsem zadovoljiv pripomoček za vrednotenje.

Na Geološkem zavodu v Ljubljani smo se intenzivneje bavili z modeliranjem kraške problematike v obdobju od 1963. leta, ko smo pričeli z laboratorij-



$$h/a = 1/4$$

$$g/a = 1$$

$$\Delta \rho_a = \rho_a(\rho, \rho_1, \rho_0) - \rho_a(\rho, \rho_1)$$

$$r_0/g \leq 1$$

$$\rho_1/\rho = 1, 1/10, 1/100$$

Sl. 3. Matematične modelne krivulje za valj v dvoplastnem polprostoru. Upornostne krivulje za različne vrednosti specifične električne upornosti površinske plasti

Fig. 3. Mathematical model curves for cylinder in twolayer halfspace. Resistivity curves for various resistivities of overburden

skimi modelnimi raziskavami, pa do leta 1968. V tem času smo izvajali meritve na modelih po metodi navidezne specifične upornosti, inducirane polarizacije in z elektromagnetno metodo z galvanskim napajanjem, ki je pravzaprav metoda električno nabitega telesa. Zaradi težav pri izbiri modelnih materialov in konstrukciji modelov smo se omejili na enostavne modele kraških jam in kanalov ter rudnih teles.

Osnovno sredstvo, v katerem smo merili, je bila običajna voda, v katero smo potopili model. Kot modeli so služile v večini primerov krogle in valji iz medenine (»neskončna« prevodnost) in juvidurja (»neskončna« upornost).

Z običajno dvopolno in enopolno *Wennerjevo* elektrodno razvrstitevijo smo izmerili (oz. posneli) večje število modelnih krivulj. Kot spremenljivki sta služili globina modela in razsežnost razvrstitve (ter premer krogle oz. valja). Sl. 1 prikazuje nekaj takšnih krivulj za »neskončno« uporen valj. Iz slike je razvidno, kako je anomalija odvisna od globine telesa.

Mimogrede naj omenimo, da je mogoče dobiti modelne krivulje za trielektrodno razvrstitev enostavno s seštevanjem anomalij enopolne in dvopolne razvrstitve.

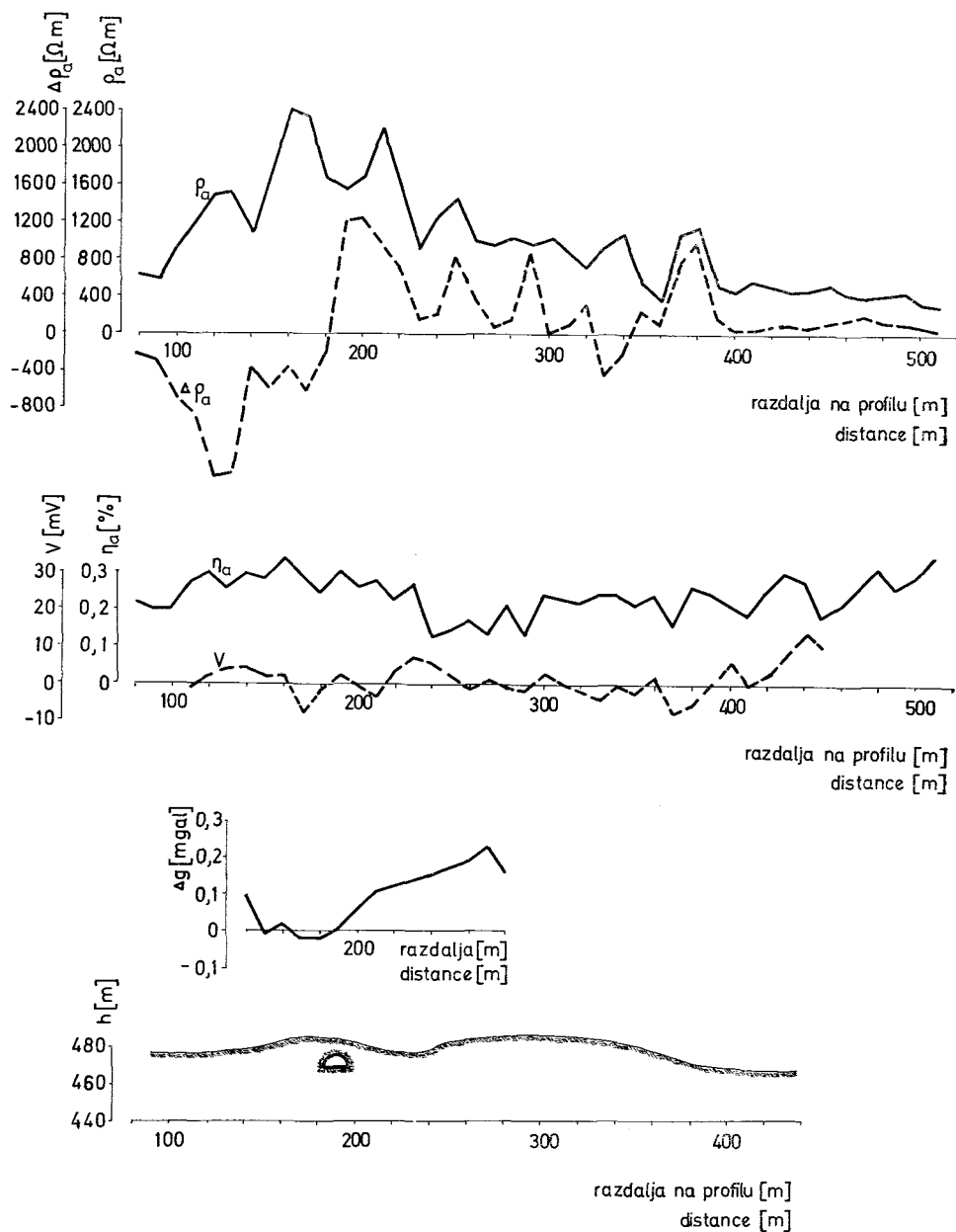
Modelne raziskave nudijo možnost raznih analiz, ki nam koristijo v konkretnih raziskavah oz. v pripravi nanje.

Tako smo z merjenjem pri različnih razsežnostih elektrodne razvrstitve študirali vpliv velikosti razvrstitve na velikost dobljene anomalije. Sl. 2 jasno kaže, da obstaja neka optimalna dimenzija razvrstitve, pri kateri je maksimum anomalije največji. Če povečamo ali zmanjšamo razvrstitev, bo merski učinek slabši. Optimalna razsežnost je seveda pri različnih terenskih (geometričnih) razmerah različna.

Meritve smo izvedli na modelih v razmeroma majhnih globinah. Praktično rezultati iz večjih globin niso več zanimivi, ker, kot smo videli iz sl. 1, občutljivost metode z globino hitro pada. Poleg tega z uporabljenimi laboratorijsko tehniko nismo mogli registrirati šibkejših anomalij. Za večje globine je mogoče razmeroma enostavno izračunati modelne krivulje, ker lahko uporabimo aproksimacije, ki zelo olajšajo matematično modeliranje.

Kot smo že omenili, šibke anomalije, ki jih iz terenskih meritev niti ne moremo izluščiti, nimajo neposredne praktične vrednosti, utegnejo pa nam kako drugače koristiti. Tako smo izračun takšnih anomalij izkoristili za oceno vpliva nizkouporne površinske plasti pri geoelektričnem ugotavljanju praznih ali zapolnjenih kraških jam in rudnih teles (*J. Lapajne*, 1968). Sl. 3 prikazuje matematične modelne krivulje, ki kažejo, da nizkouporna površinska plast bistveno poslabša občutljivost geoelektrične metode. Laboratorijsko bi takšen problem zelo težko modelirali.

V grobem moremo smatrati za modelne raziskave tudi terenske meritve na že dobro poznanem objektu. Slaba stran takšnega modela je to, da ne moremo poljubno spreminjati parametrov modela, niti dovolj učinkovito kontrolirati raznih stranskih vplivov, temveč smo vezani na dane terenske razmere, dobra stran pa je v tem, da preizkusimo uporabnost neke metode v naravnih pogojih. Iz podanega pregleda geofizikalnih raziskav je razvidno, da smo se večkrat zatekali k meritvam na »naravnih modelih«. Kot tipičen primer takšnih raziskav naj omenimo meritve na območju Željnskih jam pri Kočevju. Del podatkov teh raziskav podaja sl. 4. Nad skico profila terena so dani geoelektrični profili na-



Sl. 4. Profil navidezne upornosti, inducirane polarizacije, lastnega potenciala in Bouguerjevih vrednosti težnosti ter ustrezni prerez terena (Željnske jame pri Kočevju)

Fig. 4. Resistivity, induced polarisation, self potential and Bouguer gravity profiles and the corresponding field cross section (Željne caves near Kočevje)

videzne specifične upornosti, inducirane polarizacije in lastnega potenciala ter gravimetrični profil. Našteti profili dajejo več ali manj jasne anomalije nad položajem jame; najizrazitejše so v tem primeru upornostne anomalije.

Med terenskimi modelnimi raziskavami zavzemajo posebno važno mesto poskusne raziskave, ki se po potrebi izvajajo pred planiranjem širših geofizikalnih raziskovalnih del. Takšne meritve izvajamo na terenu z enakimi ali podobnimi karakteristikami, kot jih ima teren, ki je predviden za širše raziskave. Model lahko predstavlja tudi območje, kjer smo že po izvršenih meritvah le-te kontrolirali z vrtanjem. Raziskave, katere smo programirali na podlagi predhodnih poskusnih raziskav in katere spremlja kontrolno vrtanje, imajo zagantirano smiselnost in v primeru geološke pogojenosti tudi uspeh. Kot takšne sistematične raziskave lahko štejemo npr. raziskave na Planinskem polju leta 1955 in 1956 ter raziskave boksitov v Istri leta 1966.

OBČUTLJIVOST GEOELEKTRIČNIH METOD

Rezultati laboratorijskih in matematičnih modelnih raziskav nedvoumno kažejo, da je globinska dosegljivost geoelektrične upornostne metode, h kateri se raziskovalci zaradi interpretacijskih, tehničnih in ekonomskih razlogov najraje zatekajo, razmeroma majhna, če gre za neposredno ugotavljanje raznih teles. V okviru upornostnih meritev je sicer zelo važno, kakšno mersko razvrstitev izberemo (pri tem je pomembna dolžina razvrstitve, način razmestitve elektrod v razvrstitvi — npr. Schlumbergerjeva razvrstitev je praviloma bolj občutljiva kot Wennerjeva, diferencialne razvrstitve so bolj občutljive kot integralne ipd.), izbira neke optimalne razvrstitve pa omogoča samo to, da se čimbolj približamo danim omejitvam, ne moremo pa jih bistveno omiliti ali odstraniti.

Na srečo so geološke in hidrogeološke razmere na terenu često takšne, da dopuščajo neposredno ugotavljanje. V takšnih pogojih izmerimo neko anomalijo, ki je ni povzročilo samo telo, ki ga iščemo, temveč predvsem njegova okolica oziroma krovina. Včasih je namreč prisotnost oz. nastanek raziskovanega telesa v taki meri povezan s spremembo (ali pa tudi z nastankom) neposredne okolice, da se opazno spremenijo povprečne fizikalne lastnosti obdajajočih kamenin oziroma krovine. Tako je okolica neke kraške jame običajno močnejše skrasela kot kamenine dlje od nje. »Anomalno telo«, ki zajema poleg raziskovanega telesa še večji ali manjši del njene okolice, je lahko bistveno večjih razsežnosti kot samo iskano telo in lahko povzroča merljivo anomalijo, ki nam odkrije sicer neugotovljiv objekt.

Gornje ugotovitve o mejah globinske dosegljivosti ne veljajo v primeru, če se raziskovano telo v umetno ustvarjenem primarnem električnem polju tako močno polarizira, da ustvari merljivo sekundarno polje. Ta pojav izkoriščamo pri metodi inducirane polarizacije, kjer merimo ugašanje sekundarnega polja po izključitvi napajanja, se pravi primarnega polja. Kako globoko lahko ugotavljamo takšna telesa, je odvisno predvsem od njihove polarizivnosti.

Občutljivost neposrednega ugotavljanja lahko povečamo še na ta način, da izvedemo ustvarjanje električnega ali elektromagnetnega polja neposredno

v samem objektu raziskovanja. Praktično napravimo to tako, da eno elektrodo ozemljimo direktno v izdanek tega telesa (npr. v nek izvir, vrtino in podobno, če gre za ugotavljanje podzemeljskega vodnega toka). Takšnemu merskemu postopku pravimo metoda električno nabitega telesa.

Iz gornjega lahko povzamemo, da lahko globinsko občutljivost geoelektričnih metod pri primernih geoloških pogojih bistveno povečamo na tri načine:

- s posrednim ugotavljanjem,
- z merjenjem sekundarnega polja in
- z neposrednim uvajanjem električnega toka v raziskovano telo.

V praktičnih primerih moremo posredno ugotavljati predvsem rudna telesa (npr. boksit) in kraške jame, inducirana polarizacija je lahko uspešna pri iskanju z glino zapolnjenih votlin in razpokanih con, pri ugotavljanju vodnih tokov pa je običajno najuporabnejša metoda električno nabitega telesa.

Kakšna je možna globina ugotavljanja, je odvisno od konkretnih razmer na terenu. Pripomnimo naj le to, da med površinskimi raziskavami v okviru iskanja raznih kraških teles verjetno obetajo največ ravno naštetih trije merski postopki, predvsem metoda električno nabitega telesa. Pri tem se moramo zavesti, da so anomalije od globoko ležečih teles zelo razvlečene, ali drugače povedano — anomalne merske vrednosti so zelo razpršene.

Za plitve raziskave utegne biti zelo uporabno krožno merjenje lastnega potenciala, s pomočjo katerega moramo ugotavljati smer vodnega toka in filtracije ter relativno oceniti jakost vodnega toka. Metoda daje dobre rezultate na terenih, kjer ni električnih motenj. Na območjih, kjer so razni industrijski objekti, daljnovodi, električna železnica ipd., pa metoda odpove. Morda bi se dalo te težave obiti s primernim diferencialnim merjenjem in predvsem dobrim filtriranjem, bi pa bilo treba instrumentalno tehniko šele razviti. Če bi ta problem uspešno rešili, bi lahko npr. študirali podzemeljski vodni režim in iztekanje vode na Cerknškem in drugih kraških poljih, kjer zaenkrat onemogoča takšno merjenje bližina električne železnice.

PREGLED GEOFIZIKALNIH RAZISKAV NA SLOVENSKEM KRASU

Prve geofizikalne meritve na našem krasu in menda na krasu sploh so stare že okoli 40 let. Takrat se je uporabna geofizika ravno začela uveljavljati pri reševanju problemov praktične geologije.

Leta 1931 sta nemška geofizika A. Löhnberg in W. Stern sondirala po metodi navidezne specifične električne upornosti na Cerknškem polju. Namen njunih raziskav je bil določevanje podzemeljskih vodnih tokov v dnu polja.

Tri leta pozneje je V. Šlebingger na Dolenjskem krasu z elektromagnetno metodo ugotavljal podzemeljski tok reke Temenice v Lukanjski dolini severno od Novega mesta v dolžini 6 km.

V povojnem obdobju je z geofizikalnimi raziskavami v Sloveniji začel R. Vodušek. V letu 1948 je izvedel poskusne gravitacijske in geoelektrične upornostne meritve na Planinskem polju.

Na Geološkem zavodu smo pričeli s sistematskimi terenskimi raziskavami pred 20 leti. Prva naloga je bila leta 1953 geoelektrično (profiliranje in sondiranje po metodi nav. spec. upornosti) ugotavljanje podzemeljskih vodnih tokov med Postojno in Staro vasjo za potrebe postojnskega vodovoda. Rezultate raziskav bi bilo potrebno preveriti z vrtanjem, vendar do tega ni prišlo.

Leta 1954 smo pričeli načrtneje študirati in ugotavljati uporabnost geofizikalnih metod za razreševanje praktičnih problemov na krasu. Nad poznanim podzemeljskim potokom Šice v Račni pri Grosuplju smo preizkusili gravimetrično in geoelektrično metodo. Obe metodi sta dali sicer šibke, vendar razmeroma jasne indikacije. Isto leto smo tudi prvič geoelektrično sondirali na Cerkniskem polju.

Prve večje raziskave na krasu smo izvedli leta 1955 in 1956 na Planinskem polju. Najprej smo na delu terena, kjer so bile na voljo vrtine, izvedli poskusne geoelektrične meritve. Na podlagi teh je bil izdelan program, po katerem smo nato celotno polje detajlno profilirali in sondirali. S skrbnim vrednotenjem in primerjavo z rezultati kontrolnih vrtin smo dokaj natančno določili relief karbonatne podlage.

Naslednje leto smo napravili preizkus uporabnosti geoelektričnih metod — navidezne specifične upornosti, lastnega (naravnega) potenciala in elektromagnetne Turam metode na Cerkniskem in Planinskem polju. Pri galvanskem napajanju je dala elektromagnetna metoda dobre rezultate. Merjenje naravnega potenciala v glavnem ni uspelo zaradi motenj električne železnice.

Po nekajletnem presledku smo v letu 1962 nadaljevali z geofizikalnimi meritvami za razreševanje kraške problematike. V tem letu smo spet raziskovali na Planinskem in Cerkniskem polju in v Račni. To so bile pretežno poskusne raziskave za ugotavljanje podzemeljskih vodnih poti z metodo navidezne specifične upornosti, inducirane polarizacije in naravnega potenciala. Poleg tega smo z geoelektričnim sondiranjem določevali globino zakrasedlosti.

Z metodo inducirane polarizacije in navidezne specifične upornosti smo v letu 1964 in deloma 1965 skušali ugotoviti podzemeljski vodni tok med Veliko Karlovico in Rakovim Škocjanom. Raziskave niso imele uspeha, ker so terenske razmere na tem območju zelo neugodne za takšne raziskave.

Leta 1966 smo v Ribnici za potrebe kanalizacije z zelo skromnim obsegom meritev (profiliranje po metodi navidezne specifične upornosti) uspešno določili lokacijo, ki služi kot požiralnik za odtočno vodo.

V okviru raziskav za avtocesto smo v letu 1967 med Dervišami in Postojno določevali z geoelektričnim profiliranjem prelomne cone, podzemeljske jame in druge nehomogenosti.

Leta 1967 smo z geoelektričnim profiliranjem in merjenjem vertikalne komponente magnetnega polja raziskovali območje med Kozino in Podgradom, da bi odkrili morebitna boksitna telesa. Kompleksne geološko-geofizikalne raziskave so dale glede obstoja dovolj velikih boksitnih teles negativen odgovor.

Vzporedno z gornjimi raziskavami smo od leta 1965 do 1968 v širšem obsegu študijsko razvijali geofizikalne metode za ugotavljanje vodnih kanalov na krasu. Najprej smo napravili poskusne terenske meritve na območju Željnskih jam pri Kočevju. Te jame so služile kot naravni model, na katerem smo ugotavljali določljivost gravimetrije in geoelektrike. Od geoelektričnih metod smo pre-

izkusili metodo navidezne specifične upornosti, inducirano polarizacijo in lastni potencial. Vzporedno smo delali po metodi navidezne specifične upornosti meritve na modelih v laboratoriju, nekatere probleme pa smo reševali z matematičnim modeliranjem. Študijsko smo obdelali električno polje vodnega toka in filtracije. Za zaključek smo preizkusili metodo navidezne specifične upornosti in lastni potencial na Cerkniškem polju.

Metodo električno nabitega telesa smo uporabili za ugotavljanje podzemeljskih vodnih poti leta 1969 pri Žejah v okolici Pivke. Tem raziskavam, ki niso dale željenih rezultatov, so sledile naslednje leto uspešne meritve po isti metodi v okviru raziskav za določitev lokacije zajetja vode za oskrbo Postojne v zaledju izvirov Malni.

V letu 1971 smo izvedli na območju predvidenega akumulacijskega bazena ČE Požarje pri Zagorju podobne raziskave kot leta 1955 in 1956 na Planinskem polju, le da v precej manjšem obsegu. Z geoelektričnim sondiranjem in profiliranjem smo ob pomoči kontrolnih vrtin ugotavljali debelino glinaste preperine.

Poleg naštetih raziskav na območju slovenskega krasa smo v precej manjšem obsegu raziskovali tudi na območju hrvaškega krasa. Tako smo leta 1966 prvič geofizikalno ugotavljali rudna telesa na krasu. Takrat smo v okolici Karojbe v Istri raziskovali boksitna nahajališča. Izbira merske metode na podlagi poskusnih raziskav in sprotne primerjava geoloških podatkov in geoelektričnih profilov ter kontrolnega vrtanja je dala glede na dane terenske razmere zelo dobre rezultate.

Naslednje leto smo v zaledju vrulje Golubinke pri Zadru geoelektrično ugotavljali cone najmočnejše zakraselosti in smeri prevladujoče razpokanosti, da bi ugotovili morebitni večji podzemeljski tok. Na podlagi geoloških in geofizikalnih raziskav ter kontrolnih vrtin ni bilo mogoče sklepati na kak pomembnejši podzemeljski vodni tok.

Zelo zanimive raziskave smo še isto leto opravili na Korčuli, kjer smo iskali mesta iztekanja talne vode iz Blatnega in Velega polja. Kompleksne geoelektrične meritve po metodi navidezne specifične upornosti (profiliranje in sondiranje), inducirane polarizacije (profiliranje in sondiranje), lastnega potenciala (profilno in krožno merjenje) in metodi električno nabitega telesa so dale zelo lepo sliko. Žal do predvidenega kontrolnega vrtanja ni prišlo.

Zaradi zaokroženosti naj omenimo še gravitacijske in magnetne meritve na območju primorskega in dolenskega krasa v letih od 1959 do 1965 ter globoko geoelektrično sondiranje od leta 1961 do leta 1968. Rezultati teh izmer podajajo regionalno strukturo in tektonsko sliko raziskovanega ozemlja.

Iz gornjega je razvidno, da je bilo težišče lokalnih raziskav na geoelektričnih metodah. Gravimetrija je sicer zelo primerna, so pa zahteve po natančnosti takšne, da kraška morfologija omejuje uporabnost te metode. Poskusne magnetne meritve na območju boksitnih nahajališč v Istri niso dale pametnih rezultatov in smo se je zato posluževali v omejenem obsegu. Plitvo refrakcijsko seizmiko smo na krasu uporabili samo za določevanje hitrosti longitudinalnih valov za ugotavljanje možnosti ripanja (Anhovo, 1970 in Postojna, 1970) in konstrukcijskih zahtev (Rijeka, 1970). V okviru regionalnih raziskav je bila poleg gravimetrije, magnetometrije in geoelektrike uporabljena tudi reflektivna seizmika; reflektivne seizmične meritve je na Slovenskem krasu izvajal Zavod za geološka i geofizička istraživanja iz Beograda.

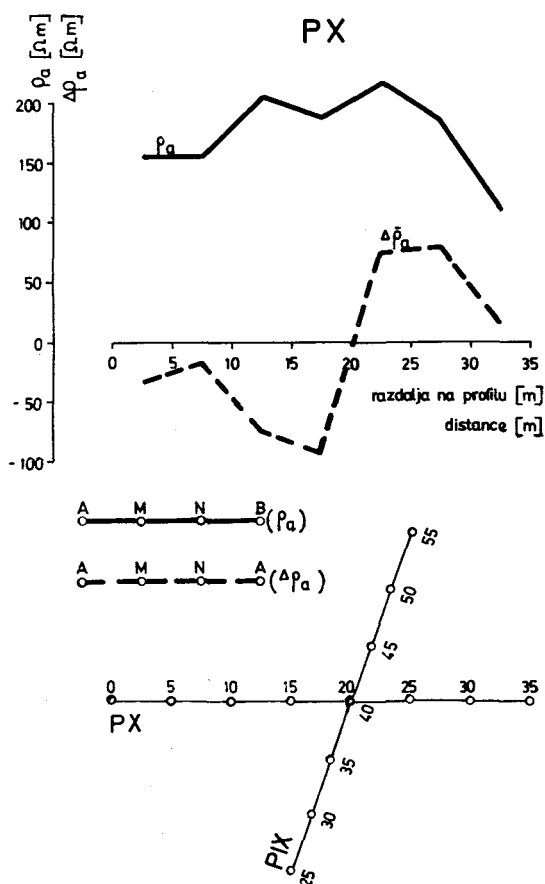
PRIMERI TERENSKIH RAZISKAV

Iskanje pokritih kraških jam v Ribnici

Leta 1966 smo v Ribnici za potrebe kanalizacije nove šole iskali primerno kraško jamo, ki bi lahko služila kot požiralnik za odtočno vodo. Teren, ki smo ga raziskovali, tvori apnenec, pokrit z neenakomerno razmeroma tanko plastjo zemlje. Pod površino se nahajajo tu in tam kraške jame, razpoke in podobno.

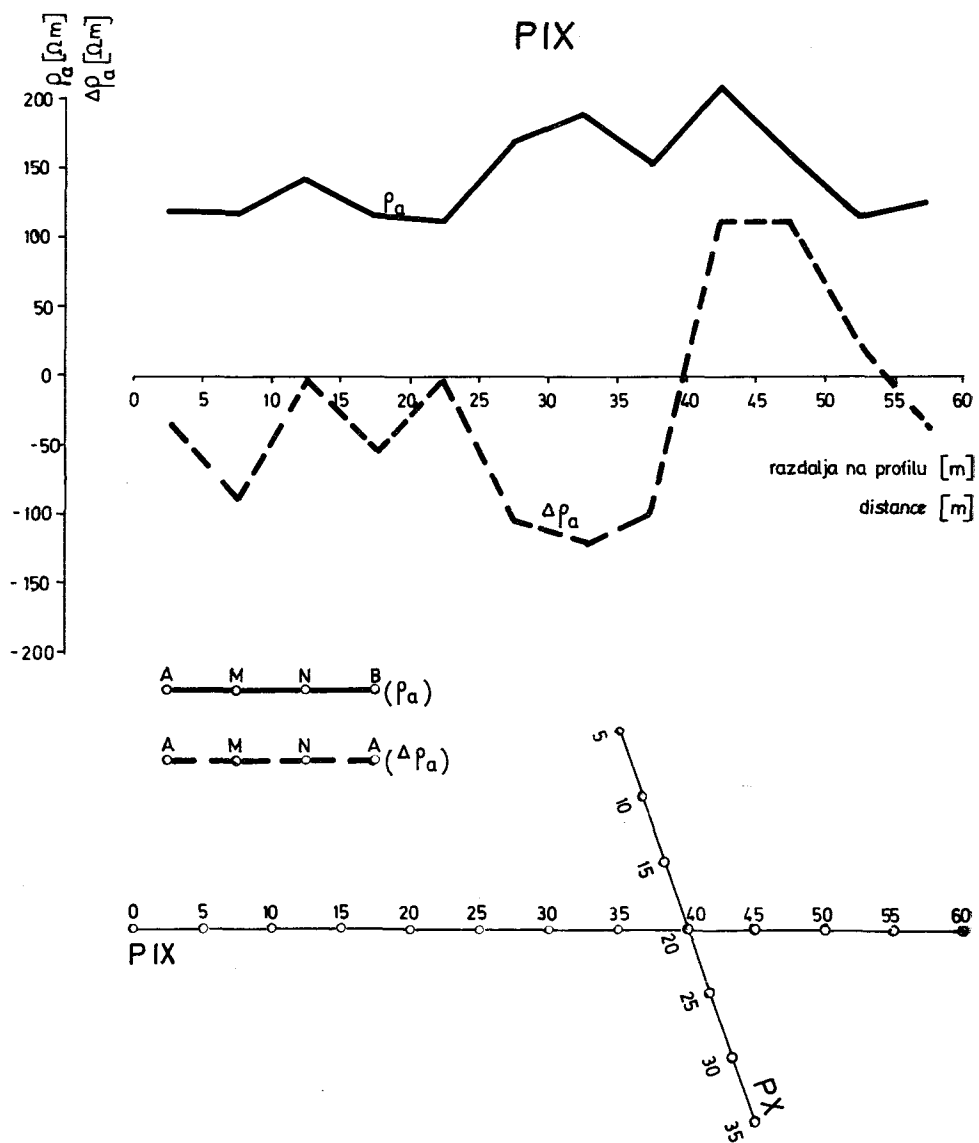
Zaradi zelo skromnih finančnih sredstev smo lahko napravili le majhno število meritev. Kljub temu smo odkrili štiri anomalna mesta, od katerih smo dva priporočili kot najverjetnejši lokaciji jam. Že pri kopanju na prvem izbranem območju so našli več manjših odprtin. Gradbeniki so se zadovoljili z ugotovitvijo, da odprtine dovolj hitro požirajo odtočno vodo in niso posebej skušali ugotoviti kaj več.

Sl. 5 in sl. 6 prikazujeta geoelektrična profila preko izbrane lokacije. Uporabljali smo Wennerjevo enopolno in dvopolno razvrstitev z elektrodnim



Sl. 6. Profil navidezne upornosti (Kraške kaverne v Ribnici)

Fig. 6. Resistivity profile (Karst cavernes in Ribnica)



Sl. 5. Profil navidezne upornosti (Kraške kaverne v Ribnici)
Fig. 5. Resistivity profile (Karst caverns in Ribnica)

razmikom 5 m; zlasti s prvo smo dobili zelo lepe anomalije. Merska profila sta se sekala na mestu anomalije približno pod kotom 70°, kar so pogojile razmere na terenu, ker smo profile razmestili med raznimi gradbenimi objekti.

Mimogrede naj omenimo, da v šestih letih uporabe ni bilo še nobenih težav niti ni bilo potrebno čiščenje. V koliko je takšen način odstranjevanja odpadnih vod primeren, je drugo vprašanje.

Geoelektrične raziskave boksitnih nahajališč v Istri

Te raziskave so bile deloma obravnavane že v posebnem članku (Lapajne, 1969), zato bomo podali predvsem dodatne informacije.

Boksitna nahajališča smo prvič raziskovali na območju Karojbe v Istri leta 1966.

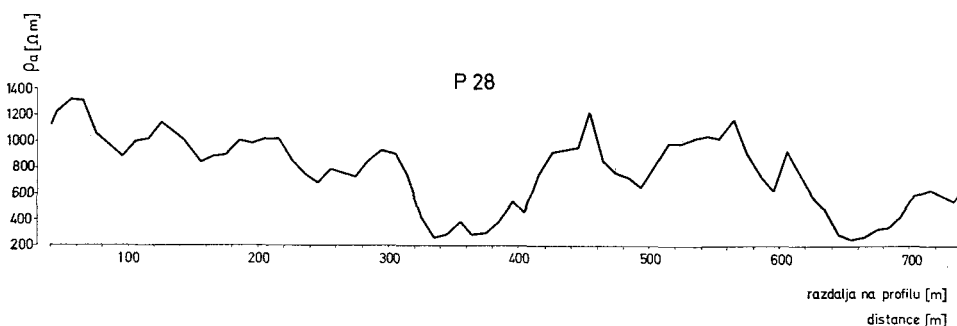
Boksiti v Istri se nahajajo v žepih krednega apnenca, njihova krovina pa je eocenski apnenec. Pregled že odkritih boksitnih teles je pokazal, da le-teh povečini ni mogoče neposredno ugotavljati. Poleg tega so bila plitvo ležeča telesa ugotovljena najprej in so zato praktično že vsa izkopana.

Zato smo s poskusnimi raziskavami preverili možnost posrednega ugotavljanja. Sl. 2 omenjenega članka kaže rezultate poskusnega upornostnega profiliranja, iz česar moremo sklepati na ugodne pogoje za posredno določevanje verjetnih lokacij boksitnih teles.

Iz poskusnih meritev smo tudi ugotovili, da niso potrebne meritve različno velikih elektrodnih razvrstitev, ker to v danem primeru ne poveča bistveno količine vsebovanih informacij (prispevek boksitnega telesa samega k anomaliji je povečini itak zanemarljiv), poveča pa stroške raziskav. Zato smo se več elektrodnih razvrstitev poslužili samo v toliko, da smo določili primerno velik elektrodni razmik.

Na podlagi primerjave geoelektričnih profilov in geoloških podatkov, ki smo jih črpali iz odkopanih, deloma odkopanih in odkritih boksitnih teles oz. žepov smo si lahko ustvarili zadovoljivo razlago anomalij oz. »anomalnih teles«.

Kljub dokaj jasni predhodni predstavi raziskovalnega problema je bilo vrednotenje geoelektričnih meritev zelo zahtevno in precej negotovo. Težavnost



Sl. 7. Profil navidezne upornosti (Boksitna telesa v Istri)
Fig. 7. Resistivity profile (Bauxite bodies in Istria)

in negotovost vrednotenja ilustrira za raziskovani teren povsem običajen geoelektrični profil, ki ga podaja sl. 7. Iz samega diagrama nikakor ne bi mogli zaključiti, da bi na dolžini 500 m na profilu lahko bila pozitivna anomalija. In vendar smo na tem mestu odkrili manjšo količino boksita. Iz diagrama prav tako ni razvidno, da poteka merski profil deloma po krednem, deloma po eocenskem apnencu; slika je praktično ista na enem in drugem območju. Kolikor toliko uspešno vrednotenje takšnih geoelektričnih profilov je možno samo ob skrbni primerjavi vseh razpoložljivih geoloških in geofizikalnih podatkov in izsledkov.

Pri vrednotenju smo ubrali takšno pot, da smo najprej izločili vse anomalije, katere smo mogli pripisati nezaželenim površinskim vplivom, kot so npr. zapolnitve vrtač in podobno ter močnejši topografski vplivi. Debelino terra rosse oz. glinaste preperine slabše izraženih kotanj in vrtač smo ocenjevali z ročnim vrtanjem s pomočjo »baramine« in izločili anomalije na vseh lokacijah, kjer je debelina nizkouporne površinske plasti presegala 2 m (to je bila globina, ki smo jo dosegli z ročnim vrtanjem; kaj več si v danih finančnih okvirih nismo mogli privoščiti). Kjer je prišlo slučajno do prekrivanja koristnih in nekoristnih anomalij, smo na ta način verjetno spregledali marsikatero boksitno telo. To smo morali sprejeti kot nujno zlo, ker bi bilo vrtanje na vseh anomalijah ekonomsko nesmiselno.

Za preostale anomalije je obstajala že dokaj večja verjetnost, da imajo vzrok v strukturah, ki bi utegnile skrivati boksitna telesa. Na teh anomalijah smo raziskave po potrebi dopolnili z dodatnimi profili, ki so potekali vzporedno ali pravokotno na prvotne. Tako smo zaradi večje sigurnosti obdelali tudi nekatere anomalije, ki smo jih sicer lahko pripisali razgibani topografiji ali pa vplivu terra rosse, glin ali humusa na površini.

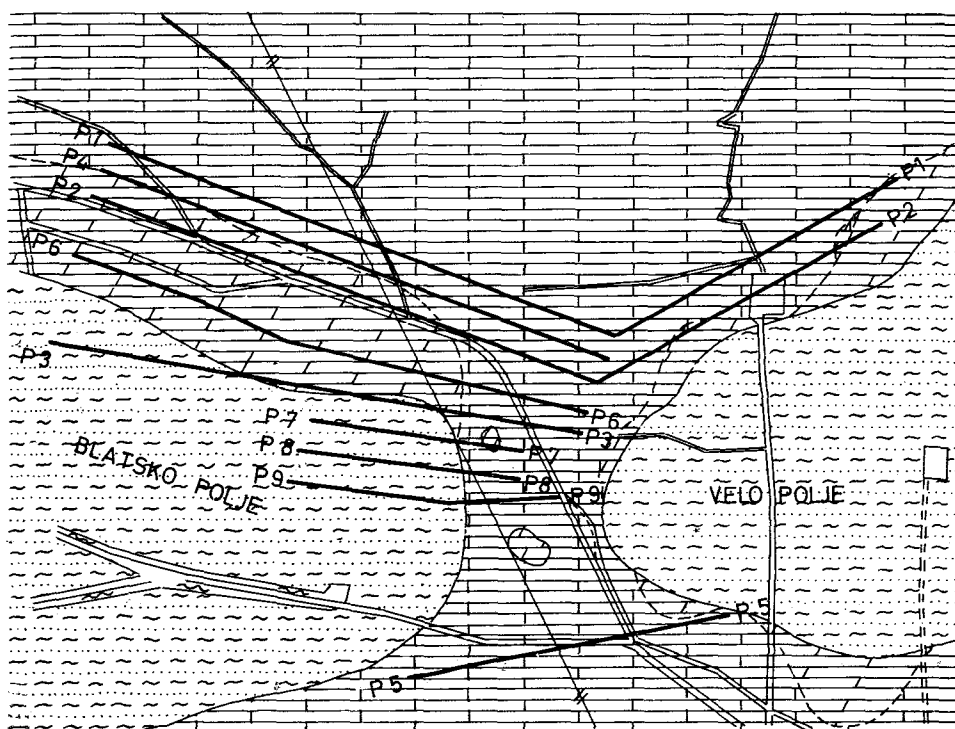
S pomočjo diagramov in lokalnih kart izoohm (primer takšne karte podaja J. Lapajne, 1969, sl. 3) smo na izbranih mestih locirali raziskovalne vrtine. Del izbranih območij je imel tudi potrditev v površinski geologiji. Od 75 izvrtanih geofizikalnih lokacij je bilo 19 lokacij z boksitom, 39 z glino, 17 anomalij pa so povzročili drugi faktorji. 7 boksitnih teles je bilo ugotovljenih samo na podlagi geofizike. Poleg gornjih 75 lokacij je bilo izvrtanih na podlagi geoloških raziskav še 13 lokacij, ki niso imele potrditve v geofiziki; vseh 13 lokacij je bilo negativnih.

Vzporedno z geoelektričnimi raziskavami smo preizkusili uporabnost magnetometrije. Iz opravljenih meritev ni bilo mogoče izluščiti jasne povezave med boksitnimi telesi in spremembami vertikalne magnetne intenzitete.

Geoelektrične raziskave na Korčuli

Leta 1967 smo na Blatskem in Velem polju na Korčuli geoelektrično ugotavljali iztekanje talne vode iz tega območja. Geofizikalnim raziskavam žal iz razlogov, ki niso bili geološke narave, ni sledilo predvideno vrtanje. Zato dobljeni rezultati niso preverjeni. Kljub temu smo se namenili, da damo kratek opis teh raziskav zaradi zanimivih izsledkov.

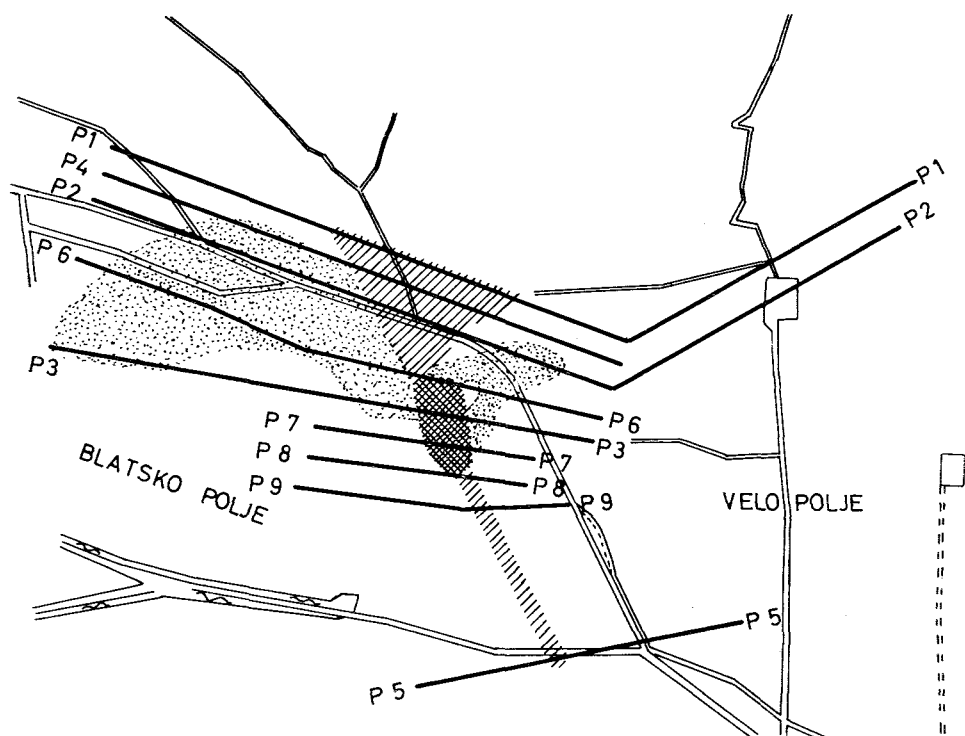
Območje Blatskega in Velega polja je pokrito s kvartarnimi glinasto peščenimi nanosi. Debelina teh nanosov po razpoložljivih podatkih na Blatnem polju ne presega 5 m, na Velem polju pa doseže kvečjemu 3 m. Obe polji ob-



LEGENDA - LEGEND:

-  Glinasto-peščeni nanos - Clayey sand
 -  Apnenec - Limestone
 -  Dolomit - Dolomit
 -  Geološka meja - Geological boundary
 -  Postopni prehod - Gradual transition
 -  Fotogeol. ugotovljen prelom - Photogeological determined
 -  P9 - Geoelektrični profil - Geoelectrical profile
- 50 0 50 100 m

Sl. 8. Geološka karta in situacija geoelektričnih profilov (Blato na Korčuli)
 Fig. 8. Geological map and geoelectrical profile sites (Blato on the Korčula island)



LEGENDA - LEGEND :

P9 — Geoelektrični profil - Geoelectrical profile

Prelomna cona - Faulting zone

Območje s povečano kol. gline - Zone with increased amount of clay

Obm. moč. podpovršinskih tokov - Zone of stronger underground streams

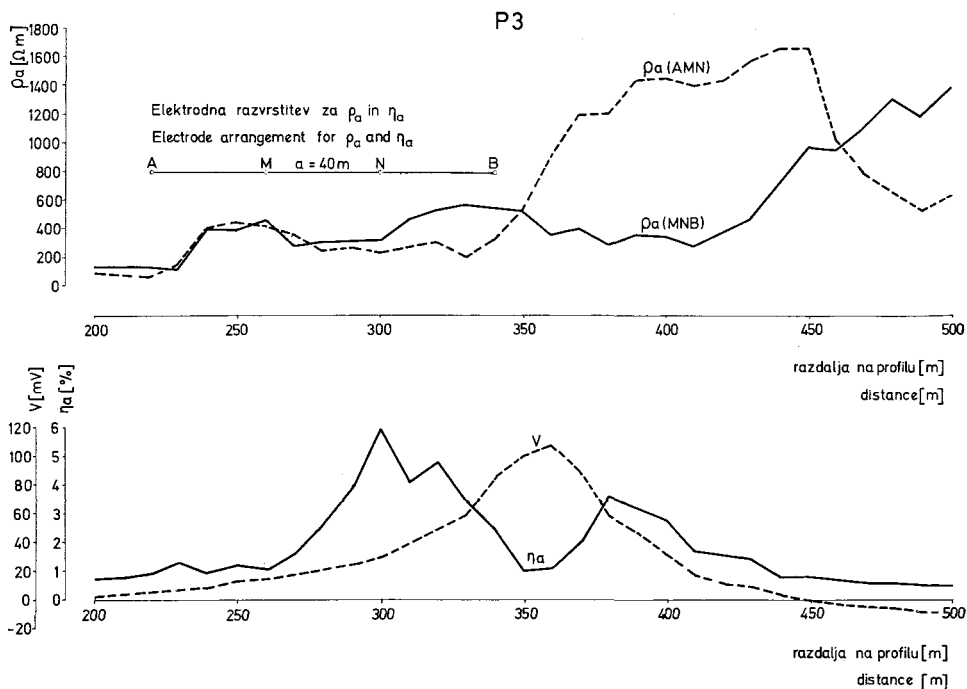
50 0 50 100 m

Sl. 9. Vrednotenje geoelektričnih raziskav (Blato na Korčuli)

Fig. 9. Interpretation of geoelectrical exploration (Blato on the Korčula island)

roblja dolomit in apnenec zgornje krede. Fotogeološki podatki kažejo na prelom med obema poljema. Iz meritev razpok je mogoče sklepati, da je smer prevladujoče razpokanosti severozahod-jugovzhod, kar je tudi smer fotogeološko ugotovljenega preloma. Sl. 8 prikazuje geološko karto raziskovanega območja in situacijo geoelektričnih meritev.

Območje geofizikalnih raziskav je bilo izbrano na podlagi predhodnih hidrogeoloških raziskav. Raziskovalne metode so bile profiliranje in sondiranje po metodi navidezne specifične upornosti in inducirane polarizacije, profiliranje in



Sl. 10. Profili navidezne upornosti, inducirane polarizacije in lastnega potenciala (Blato na Korčuli)

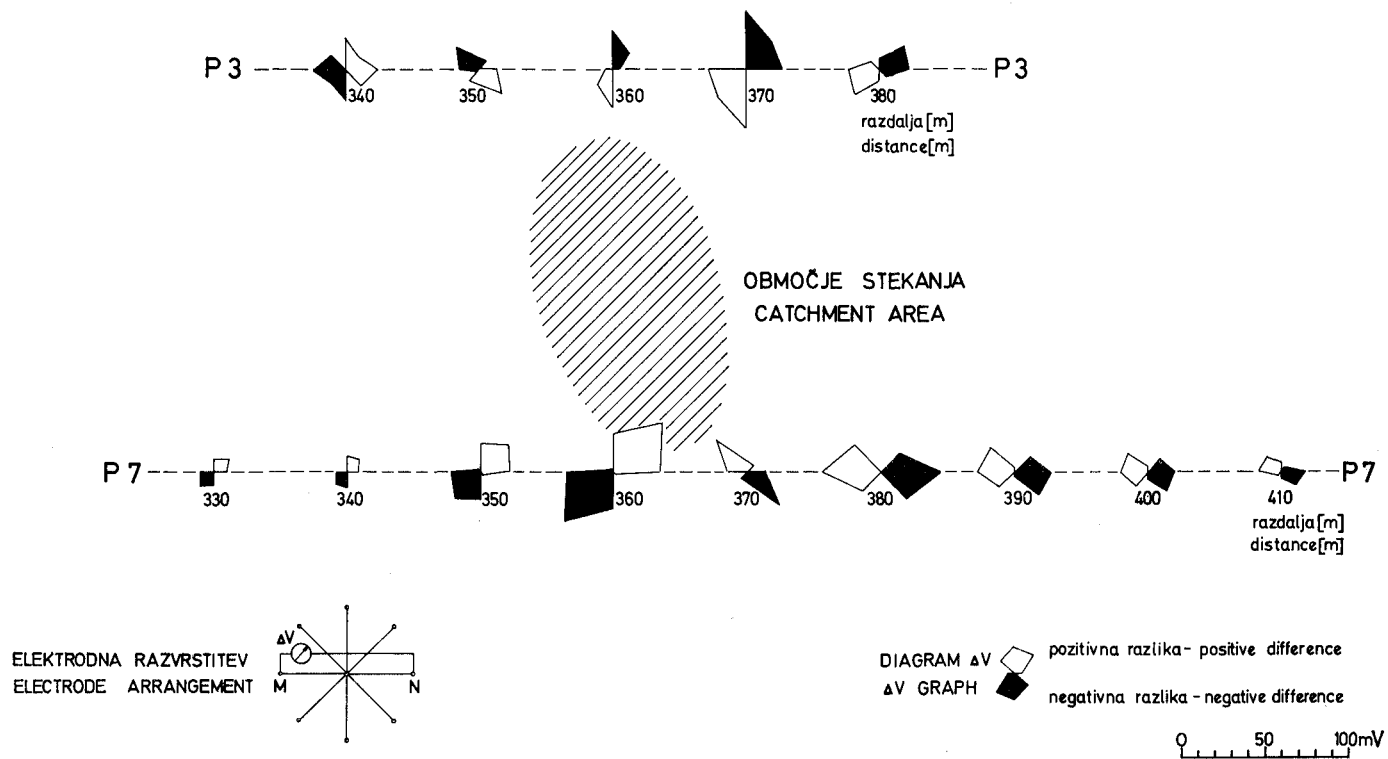
Fig. 10. Resistivity, induced polarisation and self potential profiles (Blato on the Korčula island)

krožno merjenje lastnega potenciala ter metoda električno nabitega telesa. Od naštetih raziskav bomo podali nekatere zanimive izsledke.

S profiliranjem in sondiranjem po metodi navidezne specifične upornosti je ugotovljena dokajšnja nehomogenost terena, kar odgovarja bolj ali manj intenzivni zakrasedlosti. Potrjena je prelomna cona, ugotovljena na podlagi avio-posnetkov. Metoda inducirane polarizacije je izdvojila zaglinjena območja, iz meritev lastnega potenciala pa smo sklepali na močnejše podzemeljske tokove oz. filtracijo vode. Z metodo električno nabitega telesa smo ugotavljali smer in ocenjevali hitrost gibanja vode v okolici enega od vodnjakov.

Sl. 9 prikazuje rezultate vrednotenja, sl. 10 pa najzanimivejši del geo-električnega profila P 3 z ustreznimi diagrami navidezne specifične upornosti, inducirane polarizacije in lastnega potenciala. Lastni potencial zavzema največje vrednosti tam, kjer moremo iz geoloških podatkov in navidezne specifične električne upornosti sklepati na prelomno cono. Povečane vrednosti inducirane polarizacije so običajno v okolici anomalij lastnega potenciala; na profilu P 3 spremljata anomalijo lastnega potenciala na obeh straneh po ena anomalija inducirane polarizacije.

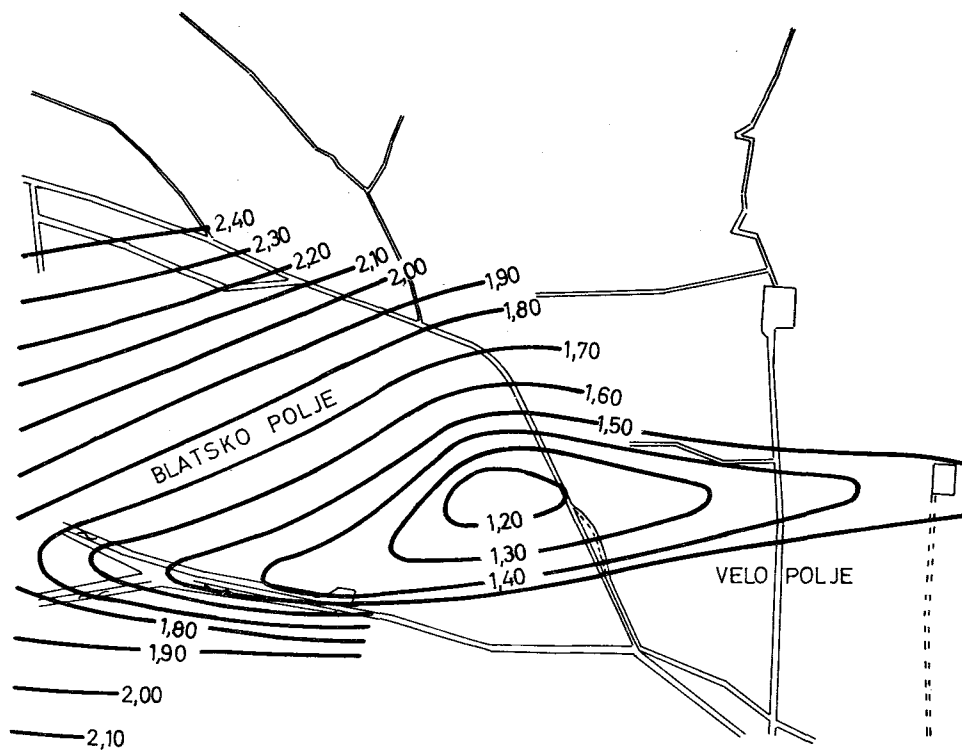
Rezultati omenjenih raziskav dovoljujejo naslednje sklepanje. Na območju anomalnih vrednosti lastnega potenciala je gibanje vode intenzivnejše; to se



Sl. 11. Krožno merjenje lastnega potenciala (Blato na Korčuli)
 Fig. 11. Circular measurements of self potential (Blato on the Korčula island)

sklada tudi z ugotovitvijo, da sovpada to območje s prelomno cono oz. delom le-te. Povečano inducirano polarizacijo verjetno povzroča fino granulirana peščena glina, katero je voda pri iztekanju iz enega in drugega polja odnašala s seboj in odlagala na svoji poti. S tem si je verjetno zapirala obstoječe poti in si iskala nove. Zato lahko območja povečane inducirane polarizacije smatramo kot nekdanja mesta intenzivnejšega pretakanja vode, lahko pa so to še danes, če gre le za delno zapolnitev z glino.

Da bi dobili popolnejšo predstavbo, smo s krožnim merjenjem lastnega (oz. naravnega) potenciala poskusili določiti smer filtracije in podzemeljskih tokov vode. Te meritve smo izvedli na območju, kjer smo z običajnim merjenjem dobili maksimalne vrednosti naravnega potenciala. Situacijo teh meritev

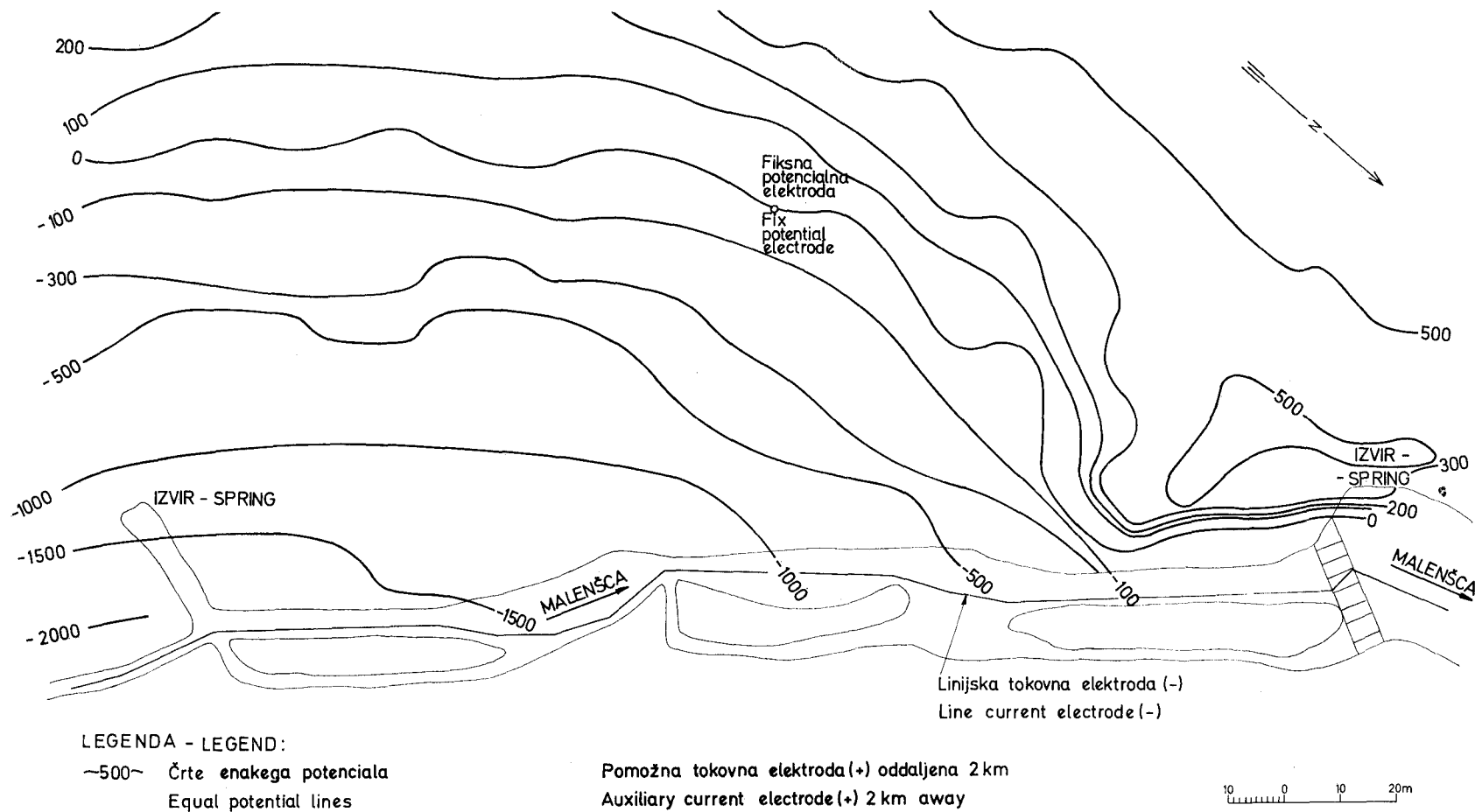


LEGENDA - LEGEND:

—1.40— Hidroizohipse (23. 8. 1966) - Hydroisohipses (8 / 23 / 1966)

50 0 50 100 m

Sl. 12. Hidroizohipse (Blato na Korčuli)
Fig. 12. Water table contours (Blato on the Korčula island)



Sl. 13. Električni potencial linijske elektrode (Izviri Malni)
Fig. 13. Potential of line current electrode (Malni springs)

ter izmerjene potencialne razlike podaja sl. 11. Potentialne razlike smo merili v štirih smereh na vsakem merskem stališču. Dobljene vrednosti smo povezali tako, da smo dobili simetrične figure, od katerih so polovice, kjer so vrednosti naravnega potenciala negativne glede na središčno točko (mersko stališče) izpolnjene temno. Pričakuje se, da odgovarja smer od negativnih k pozitivnim vrednostim lastnega potenciala smeri gibanja vode. Glede na velikost opisanih figur lahko kvalitativno sklepamo na jakost podzemeljskih tokov. Sl. 11 skoraj sili k zaključku, da se večina vode steka proti enemu mestu; na sliki je to mesto šrafirano. Na tem mestu moremo pričakovati iztekanje vode iz polja.

Za primerjavo podajamo v sl. 12 karto vodostajev, izmerjenih v sušnem obdobju leta 1966. Na podlagi krožnega merjenja lastnega potenciala ugotovljeno mesto iztekanja ne sovпада popolnoma z najnižjimi vodostaji v tej karti, temveč se nahaja nekaj 10 m bolj severno.

Geoelektrične raziskave na območju izvirov Malni

V okviru raziskav za določitev lokacije zajetja vode za oskrbo Postojne v zaledju izvirov Malni smo v letu 1970 izvedli geofizikalne meritve po metodi električno nabitega telesa.

Na območju Malnov lahko govorimo predvsem o treh sistemih izvirov v krednem apnencu. V sušnem obdobju dva od teh presahneti.

Najprej smo ugotavljali porazdelitev električnega polja okoli vsakega sistema izvirov tako, da smo eno tokovno elektrodo potopili v izvir, drugo pa tako daleč, da ni vplivala na oblikovanje polja v okolici izvira. Kot najzanimivejše se je pokazalo območje med spodnjim in srednjim izvirom. Zato smo v tem predelu izvedli še meritve z linijsko ozemljitvijo, ki smo jo izvedli vzdolž Malenščice; linijsko elektrodo smo enostavno potopili v potok. Pomožna elektroda je bila tudi v tem primeru tako daleč, da praktično ni vplivala na oblikovanje polja na raziskovalnem območju.

Rezultate meritev z linijsko ozemljitvijo prikazuje sl. 13. Najzanimivejša je neposredna okolica spodnjega izvira oz. predel med staro črpalko in tem izvirom, kjer smo dobili močno anomalijo. Na tem mestu smo predlagali vrtnanje in najprimernejšo lokacijo novega črpališča. Izbira lokacije se je pokazala kot zelo primerna.

ZAKLJUČEK

V članku smo podali nekaj teoretičnih izsledkov in pregled lokalnih geofizikalnih raziskav na slovenskem krasu ter nekaj meritev na območju hrvaškega krasa.

Geološki zavod iz Ljubljane, ki je izvajal ta dela, je uporabljal predvsem geoelektrične metode in sicer merjenje navidezne specifične upornosti, inducirane polarizacije in lastnega potenciala, v manjšem obsegu pa se je posluževal gravimetrije, magnetometrije in plitve refrakcijske seizmike.

Na podlagi večletnih izkušenj smatramo, da je za večino raziskovalnih problemov na območju krasa najprimernejša ravno geoelektrika. Električno polje je še najbolj občutljivo za kraške nehomogenosti. Razni raziskovalci si veliko obetajo od izredno natančnih in občutljivih meritev težnosti, žal pa razgibana

kraška morfologija zelo omejuje uporabnost gravimetrije. Iz magnetnih meritev običajno ni mogoče izluščiti nedvoumne povezanosti z raziskovanimi objekti in je zato magnetometrija malokdaj primerna za razreševanje problematike na krasu. Večina raziskovalnih nalog je takšna, da tudi plitve refrakcijske seizmike ne moremo uporabiti v večjem obsegu. Morda bi mogli koristneje vključiti plitvo reflektivno seizmiko, katere instrumentalna tehnika je še v razvijanju in izpopolnjevanju.

Za konec naj poudarimo, da je treba vedno težiti k temu, da se pred vsakim večjim obsegom geofizikalnih raziskav izvršijo poskusne meritve na enakem ali podobnem znanem terenu. Šele rezultati in izsledki predhodnih poskusnih raziskav omogočajo pametno programiranje nadaljnjih raziskav. Smotrne raziskave naj spremlja kontrolno vrtnanje, predvsem pa plodno vzporejanje vseh razpoložljivih geoloških, hidrogeoloških, geofizikalnih in drugih podatkov in izsledkov. Pametno bi bilo da bi na raziskovanem terenu meritve večkrat ponovili, da bi dobili sliko v različnih obdobjih; najmanj, kar bi morali imeti, bi bili merski sliko terena v deževnem in sušnem obdobju, koristno pa bi bilo tudi kakšno vmesno merjenje. V okviru ekonomskih in drugih možnosti ter vrednosti dobljenih podatkov bi morali stremeti k temu, da bi se tudi geofizikalne meritve izvajale podobno kot hidrogeološka in hidrološka opazovanja.

Summary

GEOPHYSICAL EXPLORATION IN KARST

The author wants to inform geologists, hydrogeologists, speleologists and other specialists in karst research of the so far carried-out geophysical investigations — above all in the Slovene and, in some instances, in the Croat Karst —, of the various methods and their usefulness, the emphasis being on geoelectrical methods.

The paper comprises five parts. In the introduction a formulation of the research problem is given. The second part deals with mathematical and laboratory modelling and with the exploration of natural models. In the next part some possibilities of increasing the sensitivity and depth determination of geoelectrical methods are listed. The fourth part is a brief of the geophysical investigations performed by the Geological Survey of Ljubljana. In the final part four field examples are shortly described.

Literatura

- Lapajne, J., 1969. Geoelektrične raziskave boksitnih nahajališč (Geoelectrical Exploration of Bauxite Deposits). *Geologija* 12, 153—159, Ljubljana.
- 1968. Vpliv nizkouporne površinske plasti pri geoelektričnem ugotavljanju rudnih teles (Influence of the Low Resistivity Surface Layer in Geoelectric Mining Prospecting). *Rudarsko-metalurški zbornik* 3, 271—276, Ljubljana.
- Löhnberg, A., 1934. Zur Hydrographie der Zirknitzer Beckens (Ein Beitrag zur Karstforschung). *Mémoires de la Société de Géographie de Beograd*, 3, 114, Beograd — Göttingen.

- Löhnberg, A., W. Stern, 1932. Ein neuer Weg der Karsthydrologischen Forschung durch Anwendung geoelektrischer Methoden. Zeitschrift für Geophysik 8/6—7, 283—305.
- Miklić, F., 1955. Geofizikalne meritve pri Postojni (Geophysical Surveys in the Vicinity of Postojna). C. R. Congr. Yougoslave Speleol., 112—116.

Poročila

(Tipkopisi v arhivu Geološkega zavoda Ljubljana)

- Buser, S., J. Lapajne, E. Lukacs, 1967. Boksiti — Poročilo o geološko-geofizikalnih raziskavah v okolici Karojbe (Srednja Istra), 1966—67.
- 1967. Poročilo o geološko-geofizikalnih raziskavah na boksitih Slovenije, 1966—67.
- Georgievski, P., 1967. Izveštaj o probnim ispitivanjima elektromagnetnom »Turam« metodom u cilju otkrivanja podzemnih kanala u karstnim terenima Cerkniškog i Planinskog polja N. R. Slovenije. Zavod za geološka, geofizička i rudarska istraživanja u Beogradu, 1967.
- Lapajne, J., 1970. Anhovo — Seizmične meritve, 1970.
- 1967. Geoelektrična ispitivanja — Blato na Korčuli, 1967.
- 1967. Geofizička istraživanja — Zadar. Istraživanja u zaledju »Golubinke«, 1967.
- 1966. Geofizikalne raziskave v Ribnici — Pokrite kraške jame, 1966.
- 1965. Modelne laboratorijske raziskave — metoda inducirane električne polarizacije, 1964—65.
- 1965. Modelne laboratorijske raziskave — metoda navidezne specifične električne upornosti, 1964—65.
- 1966. Modelne laboratorijske raziskave — metoda navidezne specifične električne upornosti, 1965—66.
- 1970. Postojna — Refrakcijska seizmika, 1970.
- 1970. Raziskave za določitev lokacije zajetja vode za oskrbo Postojne v zaledju izvirov Malni, 1970.
- 1970. Rijeka — Gornja Vežica, Seizmične meritve, 1970.
- Lapajne, J., A. Kelhar, 1968. Razvijanje geofizikalnih metod za ugotavljanje vodnih kanalov na krasu (II), 1967—68.
- Lapajne, J., A. Kelhar, F. Pušnik, 1971. ČE Požarje — Geofizikalne raziskave, 1970.
- 1969. Pivka — Geoelektrične raziskave, 1969.
- Miklić, F., 1954. Geoelektrično sondiranje na severnem delu Cerkniškega polja. Predhodno poročilo, 1954.
- 1953. Poročilo o geoelektričnem raziskovanju na Kočevski Reki, 1953.
- 1954. Poročilo o meritvah navideznega specifičnega upora pri Stari vasi — Postojna, 1953.
- Ravnik, D., 1957. Geoelektrične meritve na Planinskem polju, 1955—56.
- 1967. Geoelektrične raziskave na trasi hitre ceste med Dervišami in Postojno, 1967.
- 1954. Geoelektrične meritve pri Račni, 1954.
- 1962. Geofizikalne raziskave na krasu — električno sondiranje, 1962.
- 1958. Poizkusne geoelektrične meritve na Cerkniškem polju, 1957.
- Ravnik, D., B. Čibej, J. Lapajne, 1967. Razvijanje geofizikalnih metod za ugotavljanje vodnih kanalov na Krasu (I), 1965—67.
- Ravnik, D., D. Vovk, J. Lapajne, 1968. Elektromagnetne metode geofizikalnih raziskav, 1967—68.
- Slebinger, V., 1934. Strokovno poročilo o podzemeljskih pritokih Lukanjske doline z ozirom na izrabljivost vodnih sil, 1934.
- Šumi, F., 1962. Geofizikalne raziskave na krasu — nagnjeni geološki stik, 1962.
- 1963. Geofizikalne raziskave na krasu — podzemeljski vodni tokovi, 1962.
- 1965. Geofizikalne raziskave na krasu — podzemeljski vodni tokovi, 1964—65.
- 1964. Modelne raziskave v geoelektriki z metodo inducirane polarizacije in navidezne specifične upornosti, 1963.
- Urh, I., 1954. Gravimetrično raziskovanje kraške jame pri Račni — Grosuplje, 1954.