

Električno sondiranje vzdolž trase avtomobilske ceste prek Ljubljanskega barja

Danilo Ravnik
Naciones Unidas, Cochabamba, Bolivia

Sondiranje po metodi navidezne specifične upornosti je imelo namen, določiti debelino mehkih kvartarnih sedimentov na barjanskem delu avtomobilske ceste Ljubljana—Vrhnika ter globino in oblikovitost trdne podlage. Terenske meritve je interpretiral avtor po metodi superpozicije in pomožnih točk ter primerjal relief kameninske podlage po podatkih vrtanja in geoelektrike. Na kratko je prikazal probleme, ki se pojavljajo pri interpretaciji električnega sondiranja in njihovo reševanje.

Uvod

Da bi pomagali izbrati traso za barjanski del avtomobilske ceste St. Ilj—Nova Gorica, so geofiziki Geološkega zavoda Ljubljana leta 1967 na površini okoli 40 km² izmerili na 414 stališčih 434 električnih sond. Poleg tega je J. Lapajne za preiskavo korozivnosti tal izbrane trase izmeril še 24 električnih sond. Istega leta je bilo izvrtanih na tem delu barja okoli 40 vrtin, leta 1972 pa vzdolž izbrane trase še okoli 160 vrtin.

Trasa, opisana v tem članku, je bila z nekaterimi manjšimi odstopanji privzeta za avtomobilsko cesto, poteka pa v neposredni bližini stare ceste Ljubljana—Vrhnika.

Splošna geologija in hidrologija

Geološke in hidrološke podatke o severozahodnem delu Ljubljanskega barja in njegovega obrobja, kjer poteka trasa avtomobilske ceste Ljubljana—Vrhnika (sl. 1, tabla 1), sem prevzel po Zlobnikovem (1969) poročilu o hidrogeoloških razmerah v zahodnem in osrednjem delu Ljubljanskega barja. Dopolnil pa sem jih po Buserju (1969) in Pleničarju (1967 in 1970).

Barjanska kotlina je povečini zapolnjena s holocenskimi in pleistocenskimi jezerskimi, močvirskimi in rečnimi naplavinami, na obrobju pa z vršaji. Litološko so to šota, šotno blato, jezerski melj (polžarica), glina, peščena glina, pesek prod in gruč. Pod vrhnjimi šotnimi, meljnimi in glinastimi plastmi slede lahko-



Sl. 1. Položajna skica

Fig. 1. Location map

gnetna jezerska glina in glinasti melj ter bolj trda peščena glina. Med njimi so vložki močvirske organske gline in šote, ponekod peska in proda. Vzhodno od osamelca Plešivica prevladujejo peščenoprodne plasti.

Iz barjanske ravnine se dvigajo osamelci, zgrajeni iz triadnega dolomita in permokarbonskega, delno pa triadnega skrilavca. Majhen padec Ljubljance in njenih pritokov ter neprepustne površinske plasti povzročajo delno zamočvirjenost ozemlja. Dno barja sestoji iz istih kamenin kot njegovo obrobje in osamelci. Glavne tektonske črte na tem delu barja so mišjedolski, borovniški in viški prelom. Vsi ti in tudi manjši prelomi so važni za podzemeljski režim kraških voda.

V barjanskih sedimentih je več plasti s podtalno, ponekod arteško ali sub-arteško vodo. Te plasti so med seboj povečini ločene z neprepustnimi plastmi. Sicer pa je nivo podtalnice tik pod površjem. Podtalnica se nahaja pod pritiskom tudi v dolomitni podlagi. Apnenec ima razpoklinsko poroznost in je prepusten le, če je tektonsko razpokan. Permokarbonski sedimenti so neprepustni in ne vsebujejo podtalnice.

Električne upornostne meritve

Naiprej smo električno sondirali le trase, ki jih je predložil investitor, kasneje pa smo z meritvami pokrili vso površino med severozahodnim obrobjem barja ter južno dotikalnico osamelcev.

Pri konstrukciji geoelektričnega profila smo uporabili 93 električnih sond, ki razen redkih izjem leže znotraj stometrskega pasu s traso ceste kot osjo. Električno smo sondirali z enosmernim tokom in uporabili Schlumbergerjevo elektroodno razvrstitev. Razdalje med tokovnimi elektrodami so znašale 400 do 2000 m, med centri sond pa okoli 170 m. Elektroodne razvrstitve so bile razen redkih izjem zaradi terenskih možnosti v glavnem paralelne osi trase. V bližini električne železnice so bile meritve nekoliko motene, zato so rezultati tam manj zanesljivi.

Terenske krivulje sondiranja smo vrednotili po superpoziciji s teoretičnimi krivuljami in predvsem z metodo pomožnih točk. Vsaka sonda je bila interpretirana večkrat z upoštevanjem različnih geoelektričnih lastnosti kamenin, po-

sebnost pri sistemih s štirimi ali več plastmi. Za končno interpretacijo vsake sonde, ki predstavlja aritmetično sredino vseh najbolj verjetnih rešitev, je podan še relativni variacijski koeficient. Njegov račun se nanaša samo na določitev globine do predkvartarne podlage. Ta koeficient je izražen v procentu poprečne interpretirane globine do podlage in je odraz minimalne zanesljivosti interpretacije. Prave globine podlage se lahko gibljejo v teh mejah, lahko pa so odstopanja večja. Krivuljo relativnega variacijskega koeficienta dopolnjujejo tipi sond, ki smo jih pri interpretaciji privzeli kot najbolj verjetne.

Geoelektrični profil sestavljajo interpretirane debeline h in specifične upornosti geoelektrično različnih plasti (tabla 2, sl. 1). Skala pravih specifičnih upornosti je bila izbrana v geometričnem zaporedju 10, 30, 100, 300, 1000 in 3000 ohm.m, ki v glavnem tudi ustreza specifičnim upornostim litoloških enot tega ozemlja. Pri debelih plasteh so njihove upornosti v geoelektričnem profilu napisane, pri tanki površinski plasti pa smo jih izpustili, njihovo debelino pa označili s horizontalno črtico.

Relief kameninske podlage po podatkih vrtanja

Podatke za konstrukcijo reliefa predkvartarne podlage (tabla 2, sl. 2) smo vzeli iz geotehničnih profilov vrtin, ki so jih v letih 1967 do 1970 obdelali sodelavci geomehanskega oddelka Geološkega zavoda v Ljubljani F. Vidic, M. Marin in J. Ivankovič.

Uporabili smo le globino, kjer je vrtina zadela na predkvartarno podlago, ali pa njeno celotno globino, če vrtina ni dosegla podlage. Pri konstrukciji profila smo upoštevali 171 vrtin, od katerih so 103 dosegle predkvartarno podlago. Povprečna razdalja med vrtinami je znašala manj kot 100 m.

Iz vzdolžnih geotehničnih profilov trase smo prenesli v naš profil šoto, polzarico ter druge zemljine lahkognetne in židke konsistence kot skupno enotno plast s slabimi geomehanskimi lastnostmi. Ostali kvartarni sedimenti pa pripadajo zemljinam srednjegnetne in težkognetne konsistence ter prodni in peščeni glini. Prikazana je tudi litološka diferenciacija podlage v apnenec, dolomit, glinasti skrilavec in peščenjak. Nad profilom so narisane približne konture značilnih topografskih oblik obroboja, ki leže blizu trase avtomobilske ceste. Njihovo podaljšanje v barjanskem dnu potrjuje relief podlage po konstrukciji iz podatkov vrtin.

Vrtine nosijo poleg številčne tudi črkovno oznako. Zaradi enostavnosti smo črkovno oznako «B», ki je najbolj pogostna, opustili, ostale pa smo obdržali.

Geoelektrična interpretacija in primerjava s podatki vrtanja

Pri krivuljah upornostnega sondiranja na barju prevladujeta v bistvu osnovna naraščajoča tipa II in A. To kaže na višjo upornost podlage, ki sestoji iz apnenca, dolomita, glinastega skrilavca in peščenjaka. Na tej delno neprepustni podlagi leže nekonsolidirani jezerski in rečni sedimenti z nižjimi specifičnimi upornostmi; samo pri Kozarjah na severozahodnem delu profila se pojavljajo visokoupornostni peščenoprodni sedimenti. Določitev reliefa od četrtega cestnega kilometra dalje do konca profila je bila sorazmerno enostavna, raznere na začasnih štirih kilometrih pa so bolj komplicirane. Tu tvorijo podlago prevodne

kamenine, ki ponekod segajo tudi prek 200 m globoko; na primer med sondama 74 in 68. Običajno pa se na tem odseku javljajo kamenine visokih specifičnih upornosti le do 60 m globoko ter ponovno od globine 100 m, oziroma 220 m navzdol. Prve nedvoumno pripadajo meljnim peščenoprodnim usedlinam, druge pa naj bi ustrezale permokarbonskim kameninam. Njihove specifične upornosti (250 do 400 ohm. m) so namreč podobne vrednostim, ki smo jih izmerili na karbonskih izdankih. Na sondah 428, 429 in 430 so znašale 230 do 350 ohm. m. Kasneje je bilo ugotovljeno, da imajo tudi permokarbonske usedline nizke upornosti, če so preperete ali zdrobljene in so zato bolj vlažne kot običajno. To potrjuje večina vrtin, ki so te kamenine navrtale. Razlikovanje kvartarnih in paleozojskih kamenin je bilo posebno težko med sondama 75 in 288, kjer so na obliko manj izrazitih večplastnih krivulj sondiranja vplivale še motnje električne železnice. Pri končnem razlikovanju so bili zelo koristni podatki vrtin 108 in 115, ki sta edini na tem območju zadeli na permokarbonske plasti, in deloma nekoliko globlja vrtina G-8. Pri prvi interpretaciji leta 1967 smo preperete permokarbonske sedimente povečini prišteli h kvartarju.

Debelina teh »preperelih« permokarbonskih sedimentov je med sondama 74 in 69 precejšnja (povprečno 160 m), kar govori za tektonsko spremenjeno podlago. Po geološki karti to območje dejansko ustreza mišjedolskemu in delno viškemu prelomu. Podlaga pa tudi na ostalem delu profila ne tvori električno homogenega sredstva, temveč opazujemo variacije v njeni upornosti. Večina sond pa ni bila izmerjena do takih elektrodnih razmikov, ki bi bolj zanesljivo dopustili njihovo vrednotenje za večje globine. Cone znižanih specifičnih upornosti leže na več območjih in so posledica tektonike. Vsa ta anomalna področja se v glavnem skladajo z geološko predpostavljenimi tektonskimi črtami na barju.

V podlagi opazamo dvoje območij visokih specifičnih upornosti nad 1000 ohm.m. Prvo leži od km 14 dalje do konca profila, drugo pa predstavlja sorazmerno ozek pas med km 6 in 7. Samo za dopolnitev splošne slike je treba še omeniti visokoupornostne kamenine južno od našega profila med km 1,8 in 3, ki leže do 200 m globoko pa tudi več. Po svojih vrednostih ustrezajo apnencu in dolomitu.

Prva dva intervala specifičnih upornosti, 10 do 30 in 30 do 100 ohm.m, pripadata izključno kvartarnim sedimentom. Ker so verjetno ti sedimenti zasičeni s podtalnico, izvirajo razlike v njihovi upornosti predvsem iz litološke sestave. Podtalnica in površinske vode imajo na raziskanem ozemlju vrednosti med 15 in 35 ohm.m. Višje specifične upornosti povzročajo peščenoprodni sedimenti, medtem ko jih večja vsebnost melja in gline niža. Nanosi finih frakcij leže na območju med km 8,6 in 10,3 ter km 10,8 in 13,8. To se v glavnem ujema tudi z geomehansko neugodnimi zemljinami po sl. 2 (tabla 2). Vrednosti upornostnih intervalov med 300 in 3000 ohm.m. pripadajo samo predkvartarnim kameninam; nižje ustrezajo permokarbonskemu skrilavcu in peščenjaku, višje pa triadnim in jurskim apnencem in dolomitom. Vrednosti tretjega upornostnega intervala med 100 in 300 ohm.m. pa imajo peščno prodni kvartarni nanosi zahodnega dela profila pri Kozarjah in tektonsko spremenjene kamenine predkvartarne podlage.

Nad geoelektričnim profilom smo napisali tipe upornostnih sond, ki ustrezajo tri, štiri ali petplastnim sistemom. Krivulja sondiranja je tem bolj komplicirana čim bliže poteka trasa barjanskemu obrobju in nad tektonskimi conami. Varia-

cijski koeficient interpretiranih globin do predkvartarne podlage leži med nekaj procenti do $\pm 30\%$, povprečna vrednost za ves profil pa znaša $\pm 15\%$.

Površje predkvartarne podlage po podatkih geoelektrike in vrtanja (tabla 1, sl. 2) kaže nekatere razlike. Vseh razlik pa ne smemo imeti za napake. Po obeh načinih določena globina do podlage je prikazana s točko, povezava med točkami pa je konstruirana. Diference med obema reliefoma pri cestnih km 6,1, 7,7, 8,5, 10,4, 10,8, 12,1 in 13,5 so nastale zato, ker tam ni bilo geoelektričnih meritev. Obratni primer predpostavljamo lahko povsod tam, kjer ni bilo vrtin ali te niso dosegle podlage, razpolagamo pa z geoelektričnimi meritvami. Vzrok za nekatere razlike je tudi različna lokacija stališč vrtin oziroma sond. To je pomembno povsod tam, kjer se relief podlage hitro spreminja, npr. med km 7 in 8. Točna primerjava med lokacijami vrtin in sond je bila otežena tudi zaradi različnih topografskih osnov in načinov lociranja.

Iz krivulj sondiranja smo določili vrednosti vsote vseh vzdolžnih prevodnosti

$$\Sigma S = \sum_i \frac{h_i}{\rho_i};$$

če je bil naklon zadnjega dela krivulje manjši od 45° , smo upora-

bili določitev po Orellani (1966). Visoke vrednosti vzdolžnih prevodnosti kažejo na nizke filtracijske sposobnosti kvartarnih sedimentov (Plotnikov, 1972), ki jih opažamo nad vsemi poglobljenimi deli reliefa podlage od cestnega km 7 dalje. Na odseku do km 7 pa sta le dve področji slabih filtracijskih lastnosti med 0,7 do 1,2 km ter med 1,5 in 2 km. Vsa ostala področja pripadajo kameninam z višjo filtracijo. Vendar moramo dodati, da na vrednosti vzdolžnih prevodnosti vpliva tudi oblika reliefa neprepustne podlage.

V glavnem je dala interpretacija geoelektričnih podatkov nekoliko večje globine kot vrtanje. V električnem smislu kaže to na postopen prehod kvartarnih sedimentov prek preperela ali zdrobljene podlage v bolj kompaktno kamenino. To na več krajih potrjujejo tudi vrtine. Opažamo pa, da se tudi manjše razlike v reliefu podlage, določene z geoelektriko, zadovoljivo ujemajo z dejanskim stanjem. Prisotnost ozkega dolomitnega grebena pri Sinji gorici se dá razložiti z zelo razčlenjeno podlago na obrobju tega osamelca. Od petih vrtin (35, 36, 90, 91 in 182) na 100 m dolgem odseku trase ga je našla samo ena (36), vse druge pa so naletele na podlago šele globlje od 30 m. Tudi električna sonda 213 blizu vrtine 36 sploh ni registrirala dolomita, ležečega samo dober meter globoko. Bila je izmerjena pravokotno na smer predpostavljenega grebena v podlagi. To je največje nesoglasje v globini podlage, dobljene po obeh metodah.

Gostota sondiranja je bila majhna. Iz primerjalnih diagramov na sl. 2 (tabla 1) vidimo, da bi bilo treba vsaj ponekod obstoječo razdaljo 170 m med sondami zmanjšati. Zelo koristno bi bilo trase najprej upornostno kartirati, kar bi zagotovo signaliziralo vse morebitne anomalije blizu površja in bolj ustrezno usmerjalo kasnejše sondiranje.

Oblikovitost podlage imamo v našem profilu vsaj ponekod dobro določeno. Zato lahko primerjamo tudi valovitost podlage po podatkih vrtanja in geoelektrike. Največje odstopanje od povprečne globine podlage je znašalo po rezultatih elektrike in po podatkih vrtanja okrog 10 m. Na tekoči kilometer profila sta prišli popročno nekaj manj kot dve vzpetini in dva jarka, globina podlage pa je znašala 12 do 40 m. Samo pri geoelektrično določeni podlagi so znašala odstopanja

od poprečne globine okrog 18 m v globini 27 do 80 m pri nekaj več kot eni vzpetini in jarku na kilometer. Razmerje med dolžino ene vzpetine in pripadajočega jarka je v obeh primerih skoraj enako. Iste vrednosti smo našli tudi pri reliefu na obrobju barja. Iz tega sledi, da je bila oblikovitost podlage lahko določena še v globinah, ki so bile 2 do 10 krat večje od največjega odstopanja od poprečne globine. Na njeno določitev vpliva tudi kontrast specifičnih upornosti med podlago in na njej ležečimi kameninami. V našem primeru je znašal 2 za skrilavo permokarbonsko podlago, za apneno-dolomitno mezozojsko podlago pa 20.

Interpretacija električnega sondiranja

Interpretacija je najbolj važen pa tudi najtežji del metode sondiranja navidezne specifične upornosti. Njene osnove leže v teoretičnih odnosih med vzorčevanjem navidezne specifične upornosti na zemljskem površju in porazdelitvijo električno različnih plasti pod njo. Matematično predstavlja to zvezo Stefanescujev integral, ki je ena od osnovnih funkcij geoelektrične prospekcije (Stefanescu in M. Schlumberger, 1930). Te odvisnosti so nam znane in so teoretično recipročne. V praksi je sicer lahko izračunati krivuljo navideznih specifičnih upornosti s privzetimi parametri, obratna naloga, ki nam jo praksa vedno postavlja, pa ima veliko različnih rešitev. Iz navideznih specifičnih upornosti, vzorčenih le na nekoliko mestih in z nezadostno natančnostjo, ni mogoče določiti pravih geoelektričnih parametrov h in ρ , ki so tak potek krivulje povzročili. Drugo osnovno funkcijo geoelektrične prospekcije prikazuje Dar Zarroukova

krivulja (Maillet, 1947) s parametrom vzdolžne enote prevodnosti $S_i = \frac{h_i}{\rho_i}$ in prečne enote upornosti $T_i = h_i \cdot \rho_i$. Pri analizi podatkov sondiranja nam ta funkcija bolj nazorno podaja geoelektrično situacijo kot samo parametra h in ρ .

V vsej uporabni geofiziki in tudi pri upornostnem sondiranju sta dve možnosti interpretacije: direktna in indirektna. Pri prvi skušamo neposredno določiti geoelektrične parametre iz terenskih podatkov vzorčevanja. Nasprotno pa pri indirektni metodi dobimo rezultat s primerjanjem terenske krivulje z ustrezno teoretično krivuljo znanih parametrov. Pri eni kot drugi pa moramo imeti neko koncepcijo o geometričnih in upornostnih razmerah sistema, ki ga želimo analizirati. Ta je vedno idealizirana, in čim bližja je dejanskemu stanju, tem bolj je njena interpretacija uporabna. Ne glede na kvaliteto približka pa tako pri ročni kot avtomatski interpretaciji predstavljajo največjo oviro integralnost metode, princip ekvivalence in zastiranja ter električna anizotropija (Maillet, 1947; Kalenov, 1957; Kunetz, 1966; Koefoed, 1969; Orellana, 1972). Zato nam sonda brez prejšnjih geoloških informacij ali vrtanja navadno dá različne rezultate majhne praktične vrednosti. Nasprotno pa sondiranje vzdolž profilov geološko raziskanih področij lahko zelo reducira ali celo eliminira mnogoličnosti interpretacije.

Vse interpretacije so bile osnovane na nekaterih poenostavitvah, ki morajo biti vsaj približno izpolnjene. Te so: horizontalne plasti ter njihova električna izotropnost in homogenost. Zato je geoelektrično sondiranje najuspešnejše na mladih sedimentnih področjih, kjer podtalnica še izboljša približek k poenostavitvam.

Za geoelektrični opis horizontalno plastovitega sistema, ki ga sestavlja n električno različnih plasti, je potrebno $2n-1$ geoelektričnih parametrov, to je debelin plasti in njihovih upornosti. Od tega števila moramo z interpretacijo in drugimi informacijami določiti $2n-3$ parametrov. Interpretacija se opira na obliko upornostnih sond. Značilne oblike krivulj, kot so ekstremi, infleksije in asimptote ter njihove kombinacije, odražajo geoelektrično sestavo tal kot zaporedja plasti raznih parametrov. Pri sistemu z n plastmi je možnih 2^{n-1} različnih kombinacij upornostnih parametrov, ki jih označujemo kot tipe krivulj. Za interpretacijo so posebno važni vsi štirje tipi triplastnega sistema A , H , K in Q , ki obenem predstavljajo osnovne elemente za nomenklaturu kakršnekoli upornostne sonde. Iz integralnosti metode sledi važen sklep, da morajo debeline plasti, ki jih želimo identificirati z interpretacijo, z globino hitreje naraščati kot po aritmetičnem zaporedju. Obenem pa morajo biti zadosti veliki tudi kontrasti specifičnih upornosti med plastjo ter njeno talnino in krovino.

Iz vseh teh razlogov vidimo, da podatki električnega sondiranja ne zadoščajo za enolično interpretacijo in jih moramo dopolniti z drugimi informacijami. Pogosto zelo koristijo preiskave morfologije krivulj sondiranja in uporaba korelacijske tehnike (Anstey, 1964; Habberjam, 1970).

Sondiranje po metodi navidezne specifične upornosti se uporablja že dobrih petdeset let. Za empiričnimi metodami vrednotenja so se kmalu pojavili poskusi matematično in fizikalno utemeljenih interpretacij. Prvi eksaktni prijem indirektna interpretacije je bila metoda superpozicije (Roman 1931), katere bistvo je bila primerjava terenske krivulje z ustreznim izračunanim modelom, oba pa sta prikazana v bilogaritmičnem merilu.

Sisteme z več kot tremi plastmi je mogoče reševati s postopno redukcijo dveh plasti v eno. Ta in dve naslednji plasti nam dajo zopet triplastni sistem, ki ga primerjamo z enim od osnovnih tipov H , K , A ali Q . To je metoda pomožnih točk, ki se je od vseh indirektnih metod najbolj obnesla v praksi (Hummel, 1929; Ebert 1942; Mailliet, 1947; Cagniard, 1953; Dahnov, 1953; Kalenov, 1957; Lasfargues, 1957; Koefoed, 1960; Zohdy, 1965; Orellana in Mooney, 1966 in drugi).

Metodo superpozicije in metodo pomožnih točk smo uporabili tudi v našem primeru. To je edina interpretacijska metoda, ki ima prednost pri raziskavah manjšega obsega. Primerna je za raziskovalne terene, oddaljene od računskih centrov. Uporabna je kot predhodnica direktni interpretaciji ter je dostopna vsem manjšim geofizikalnim organizacijam, ki nimajo svojih računalnikov. Edini pogoj je, da razpolagamo s čimbolj izpopolnjeno zbirko modelnih krivulj, predvsem triplastnih.

Francozi so že v letih 1933—36 izračunali prve triplastne sisteme, publicirali pa so jih mnogo kasneje (La Compagnie Générale de Géophysique, 1955 in 1963). Sovjetski instituciji Vsesoi (Vsesojuznyj geologičeskij institut) in GSGT (Gosudarstvennyj sojuznyj geofizičeskij trest) sta jih deloma dopolnjene izdali prvič že pred francoskim izidom. Najbolj popolni publicirani zbirki triplastnih krivulj pa predstavljata atlasa Orellana in Mooney (1966) ter nizozemskega Rijkswaterstaata (1969). Vse te krivulje so računane za Schumbergerjevo elektrodno konfiguracijo in za 12 do 14 različnih debelin druge plasti.

V parametričnem diagramu na sl. 2 smo prikazali vse publicirane triplastne sisteme po njihovih relativnih parametrih specifičnih upornosti $\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ in $\mu_3 = \frac{\rho_3}{\rho_1}$. Skupno je to okoli 290 triplastnih familij krivulj Schumbergerjeve

razvrstitve. Zaradi preglednosti ponovitev nismo prikazali. Ravna diagrama je razdeljena v osem oktantov. V prvem in petem sta tipa krivulj A in Q, ostalih šest oktantov pa pripada tipoma K in H. Za vse vrednosti μ_2 , ki so večje ali manjše od 1, so dvoplastni sistemi zbrani na premicah $\mu_2 = 1$ in $\mu_2 = \mu_3$. Premici razdelita diagram na štiri sektorje, ki ustrezajo osnovnim triplastnim sistemom. Krivulje tipov z upornostjo podlage, ki je ali neskončno velika ali neskončno majhna, leže na premicah, paralelnih ordinati, kot je označeno na levi in desni strani slike. Diagram kaže, da leži večina izračunanih krivulj, ki jih pri interpretaciji največ uporabljamo, med vrednostmi parametrov μ_2 in $\mu_3 = 0,01$ in 100. Da bi zadostili vsem primerom iz prakse, bi potrebovali okrog dvakrat več krivulj, kot jih kaže diagram.

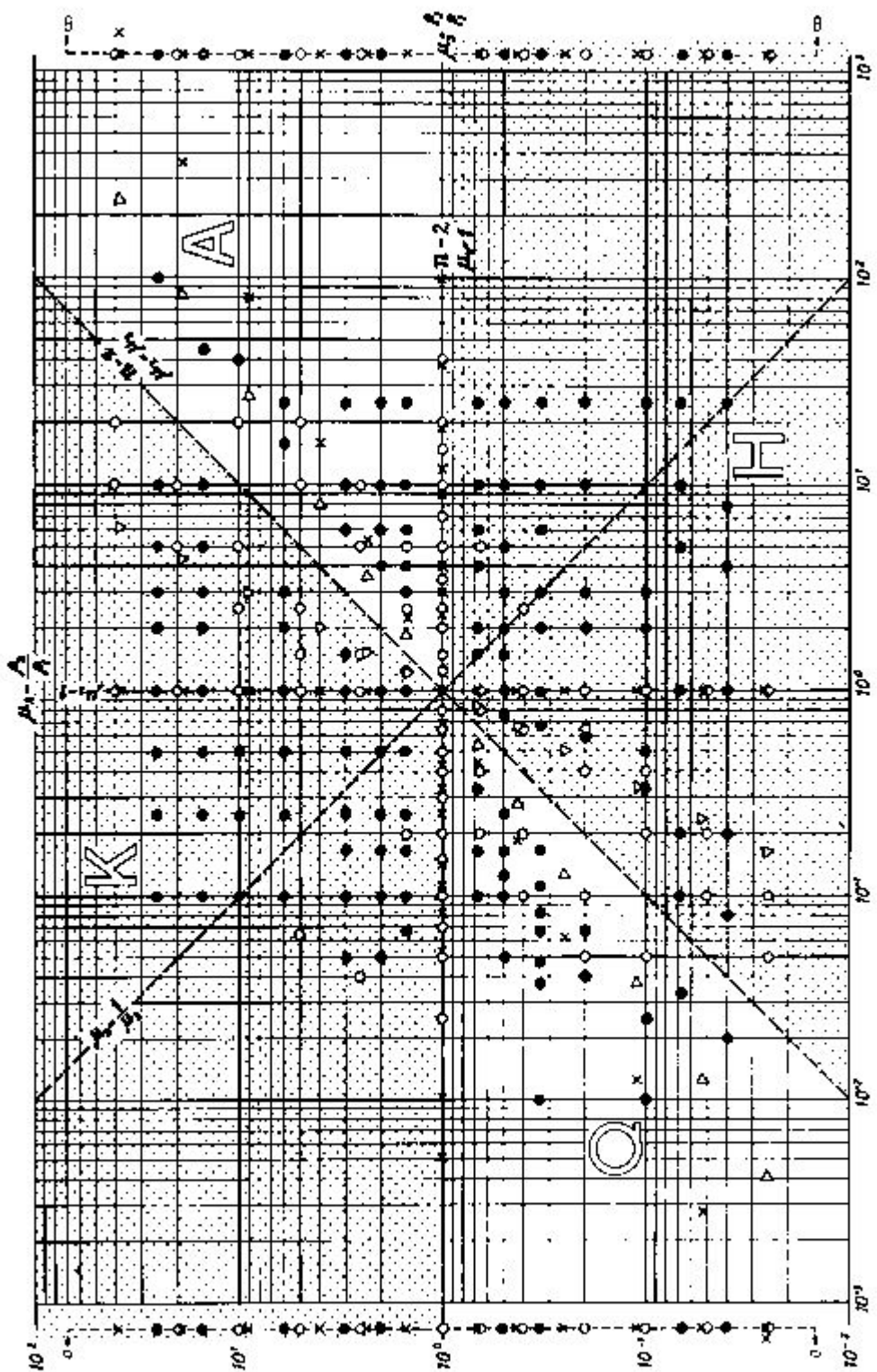
Večje geofizikalne organizacije imajo za svoje potrebe še dosti obsežnejšo zalogo teoretičnih krivulj, kot jih je bilo publiciranih doslej. Vsakdo, kdor se ukvarja z indirektno metodo interpretacije upornostnega sondiranja, vedno znova ugotavlja pomanjkanje zadostnega števila triplastnih krivulj. Med obstoječimi izračunanimi familijami krivulj so »luknje«, katerih ne moremo zadovoljivo premostiti samo z interpolacijo. Tedaj si je treba manjkajoče krivulje izračunati. Za to je izhodišče zopet Stefanescujev integral. Tako so jih računali C. G. G. (1955), Flathe (1955), Mooney-Wetzel (1956), van Dam (1965), Orellana in Mooney (1966), Deppermann (1973) in z uporabo linearnega filtra Ghosh (1971a). Račun se izvede z računalniki, nekateri načini (Flathe, van Dam, Ghosh) pa so prirejeni tudi za računanje z enostavnejšimi pripomočki. Vendar te »ročne« metode le niso tako enostavne, hitre in vsestransko uporabljive, kot bi želeli.

Empirične in indirektno metode rešujejo interpretacijske probleme le približno in z znatno uporabo časa. Konceptija direktne interpretacije je obljubljala več, vendar zaradi kompliciranega računanja ni našla uporabe, dokler ji ni v zadnjih desetih letih odprla vrata v prakso hitra računalniška tehnika.

Danes lahko hitro dobimo najpopolnejše aproksimacije poteka navideznih specifičnih upornosti, ki jih vzorčujemo na terenu, problem pa je njihova kore-

Sl. 2. Parametrični diagram računanih triplastnih sistemov
Fig. 2. Parametric diagram of precalculated three layer systems

- Rijkswaterstaat (Van Dam, Meulenkamp)
- Mooney, Orellana
- x La Compagnie Générale de Géophysique
- △ Gosudarstvennyj sojunzjy geofizičeskij tres:
- n število plasti
- number of layers
- specifična upornost
- ρ resistivity
- A, K, H, Q tipi krivulj
- types of the curves



lacija z geološkim modelom. Tu naletimo na ovire, ki nam jih postavlja poleg integralnosti metode, principa ekvivalence in zastiranja ter anizotropije še neskladnost interpretacijske koncepcije z razmerami v naravi. Popolna skladnost terenske upornostne krivulje z avtomatsko dobljeno sliko njene interpretacije je sicer potreben, ne pa že zadosten pogoj pravilne rešitve. V zadnjih letih se je pojavila vrsta raznih direktnih in poldirektnih metod z različnimi zanimivimi pristopi glede čim boljšega približka k enolični rešitvi. Nekaj jih bomo našli kronološko, kakor so se pojavljale: Koefoed (1965a, b, 1968); Kunetz-Rocroi (1970); Szaraniec (1970); Lee (1972); Lee-Green (1973); Inman, Jisoo Ryu, Ward (1973); Ghosh (1971b); Marsden (1973).

Množica raznih metod jasno dokazuje pospešen razvoj direktnih interpretacijskih metod v zadnjih letih na ozkem področju uporabne geofizike, kot ga predstavlja sondiranje specifičnih upornosti. Bodočnost uporabne geofizike je odvisna v glavnem od njene učinkovitosti in preciznosti interpretacije. Za oboje so nam porok tako analogna računalna kot digitalni računski stroji. Sorazmerno hitro dobljene terenske podatke je treba pravočasno in zadosti natančno razložiti. To je naloga kvantitativne interpretacije, posebno direktne, ki pa zaenkrat še zastaja za merilno tehniko. Vendar tako kalkulator kot računalnik opravljata obsežno računsko delo, ki ročni obdelavi ni dostopno. Računalniško obravnavanje geofizikalnih podatkov in raznih dopolnilnih informacij dá razne verjetne rešitve, med katerimi mora interpretator sam določiti najustreznejšo.

Povzetek

Na 15,5 km dolgi trasi bodoče avtomobilske ceste med Ljubljano in Vrhniko smo izvedli električno upornostno sondiranje, da bi določili globino trdne podlage. Trasa ceste poteka v glavnem po obrobju Ljubljanskega barja, ki sestoji iz geomehansko neugodnih kvartarnih usedlin različnih debelin (tabla 1, sl. 1). Delno pred meritvami, predvsem pa kasneje je bilo po tej trasi ali v njeni neposredni bližini izvršanih 171 vrtin, od katerih so 103 dosegle predkvartarno podlago.

Terenske podatke je avtor interpretiral po metodi superpozicije in pomožnih točk ter primerjal oblikovitost trdne podlage, dobljene z geoelektričnim sondiranjem in vrtanjem. Skladnost med njima je zadovoljiva kljub neugodnim razmeram zaradi bližine heterogenega obroba barja in težav pri ločitvi kvartarnih usedlin od preperelih ali tektonsko spremenjenih permokarbonskih kamenin. Variacijski koeficient globin do predkvartarne podlage po geoelektriki (tabla 2, sl. 1) je ocenjen s približno $\pm 15\%$, kar odraža tudi minimalno zanesljivost interpretacije. Odstopanja so vidna iz grafične primerjave med podlago, določeno električno, in z vrtanjem na sl. 2 (tabla 1). Odstopanja izvirajo iz prereditve izmerjenih električnih sond, razlike v stališčih električnih sond in vrtin ter lokacijskih netočnosti, delno pa so posledica teoretičnih možnosti metode same.

Valovitost podlage je avtor določil v globinah, ki so dva do desetkrat večje od največjega odstopanja od poprečne globine podlage, ki je znašala okrog 10 m. Na tekoči kilometer trase odpadeta po ena ali dve taki vzpetini in jarka.

Geoelektrično sondiranje je dalo tudi nekatere anomalije, ki so posledica tektonike. V geoelektričnem profilu se jasno izraža mišjedolski prelom, manj

izrazite, toda še vedno jasne so tudi druge tektonske črte, ki jih predpostavljajo geologi.

Iz terenskih krivulj sondiranja je avtor določil vrednosti vsote vseh vzdolžnih prevodnosti S . Visoke vrednosti na zahodni polovici trase od Loga dalje so vedno nad poglobljenimi deli podlage in kažejo na nizke filtracijske sposobnosti sedimentov. Razen manjših območij takih lastnosti na vzhodni polovici trase pa imajo vsi drugi kvartarni sedimenti višjo filtracijo. Na te vrednosti pa nekoliko vpliva tudi oblikovitost podlage.

Pri geoelektričnih meritvah na barju in drugje je treba v bodoče najprej kartirati po metodi navideznih specifičnih upornosti, v primerih podobnosti električnih lastnosti kamenin pa uporabiti še refrakcijsko seizmiko. Slednja naj bi dopolnjevala geoelektrične meritve povsod tam, kjer postane mnogoličnost električne interpretacije tako velika, da se ne moremo približati uporabnemu rezultatu. Sicer neodvisni metodi pa se istočasno še kontrolirata.

Resistivity Sounding Survey along the Route of the Motorway across the Ljubljansko Barje

Danilo Ravnik

Naciones Unidas, Cochabamba, Bolivia

Along the route of the motorway St. Ilj—Nova Gorica a resistivity survey was carried out in the 15.5 km long section between Ljubljana and Vrhnika across the Ljubljana Moor. The aim of this investigation was to help in the selection of the best location of the highway, regarding the thickness of soft clayey deposits and the depth of the bedrock. The method of auxiliary point method was applied for the interpretation of resistivity soundings. The results of 23 soundings and data from 171 boreholes were used for the construction of the two cross sections along the selected route. The correspondance between them was satisfactory. All geologically supposed tectonic lines in the bedrock were confirmed by geophysics. In a short review, the auxiliary point method and direct interpretation techniques are discussed.

In the year 1967 several routes for the new motorway St. Ilj—Nova Gorica between Ljubljana and Vrhnika across the Ljubljana Moor were proposed for the research. A resistivity sounding survey was carried out along some of them with the aim to help in the selection of the best location, regarding the thickness of soft clayey sediments and the depth to the bedrock. Later this in-line investigation was extended to the area of about 40 km², comprising about 440 resistivity soundings. The Schlumberger array with current electrode distances up to 2 km was used.

Partly before the execution of geophysical measurements and especially during the last few years, an intensive drilling program was fulfilled close to the selected route of the highway.

The Ljubljana Moor is a tectonical depression in the zone of inner Dinarides, filled up with predominantly Holocene and Pleistocene deposits of lacustrine, moor, and fluvial origine with alluvial fans in the marginal parts. Lithologically they represent different clays, silt, sand, gravel, rubble, and peat. Many-storey aquifers are usually intercalated in a predominantly clayey material with artesian or subartesian water; but also the dolomite bedrock is water-bearing. The surrounding rocks as well as the island hills in the moor are composed of Permian and Carboniferous shale and sandstone, and of Triassic and Jurassic limestone, dolomite, and shale. Numerous fractures cross the moor in different directions, which are important for the karst groundwater system.

For the interpretation of resistivity sounding data the methods of superposition and auxiliary point method were applied. As the result of field work, a map of bedrock configuration was prepared.

In this paper the cross section along the selected 15,5 km long route of the future motorway across the Ljubljana Moor is analysed (Plate 1, fig. 1). It was constructed on the base of the interpretation of 93 resistivity soundings (Plate 2, fig. 1). For comparison, data from 171 boreholes offered the base for another construction of the bedrock topography along the same line (Plate 2, fig. 2). Unfortunately, only 103 boreholes reached the pre-Quaternary bedrock and especially the first four kilometres of the route are practically without a direct bedrock control.

Correspondance between both ways of determination is satisfactory (Plate 1, fig. 2). Several deviations originate from lower density of resistivity soundings in comparison to that of boreholes (93 soundings versus 171 boreholes), and in different locations of boreholes and soundings, but they represent also theoretically limited resolution power of the method itself. The geoelectrically interpreted depths to the bedrock have in an average a variation coefficient of $\pm 15\%$, what represents also the minimum reliability of the interpretation.

The scale of true resistivities corresponds very good with the lithological and stratigraphical units of the investigated area. Thus, the values between 10 and 100 ohm. m belong exclusively to the Quaternary fill of the moor depression, whereas the intervals within 300 to 3000 ohm.m are related to all pre-Quaternary sediments of the bedrock. The intermediate interval 100-300 ohm. m covers only coarse sandy and gravely Quaternary deposits in the Kozarje region (fault zone) and the disturbed pre-Quaternary rocks of the bedrock.

The bedrock undulations were determined to the depths, which are two to ten times higher then the maximum departure of the bedrock from its average depth on the spot of a certain undulation. These departures were in the order of ten metres. One kilometer of the route crossed one to two of such undulations. Regarding the determination of undulations also the resistivity contrast between the bedrock and Quaternary overburden is important. This amounts in this area from two to twenty.

Although the main problem was to determine the depth of the bedrock, we succeeded also to confirm all geologically established fracture zones in the bedrock.

At the end a short review of different interpretation techniques for resistivity sounding is discussed. The theoretical limitations of the interpretation principles, such as the integral character of the resistivity method, the principles of anisotropy, equivalence, and suppression represent a serious limitation of the

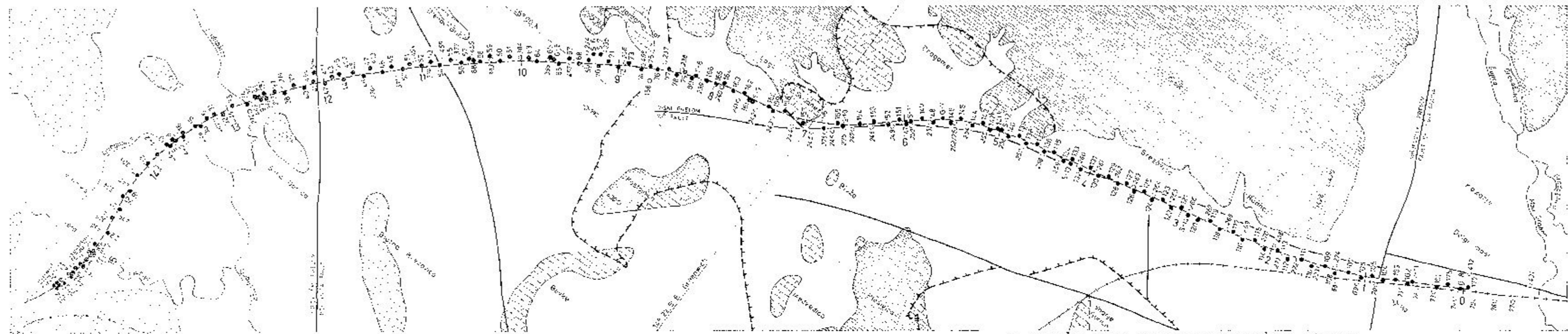


Fig. 1 GEOLOGICAL MAP SHOWING THE DISTRIBUTION OF BOREHOLES AND RESISTIVITY SOUNDINGS ALONG THE ROUTE OF MOTORWAY LJUBLJANA - VRHNKA

Fig. 1 GEOLOGICAL MAP SHOWING THE DISTRIBUTION OF BOREHOLES AND RESISTIVITY SOUNDINGS ALONG THE ROUTE OF MOTORWAY LJUBLJANA - VRHNKA

Table 1
Plate I

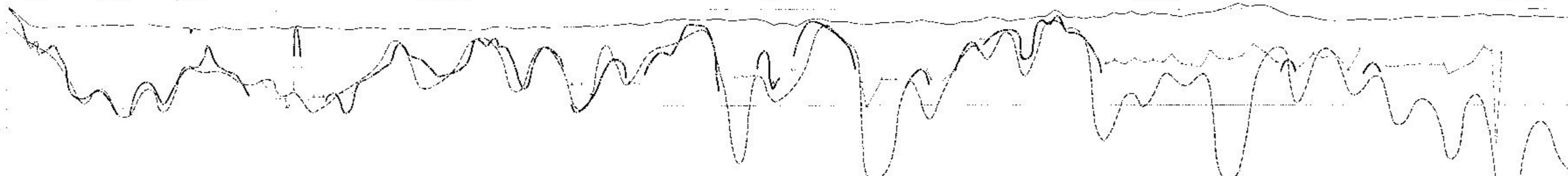


Fig. 2 PRIMERJAVA POVRŠJA PREDKVARTARNE PODLAGE PO PODATKIH GEOELEKTRIKE IN VRTANJA VZDOLJ TRASE AVTOMOBILSKE CESTE LJUBLJANA - VRHNIKA VERTIKALNO MERILO 20 KRAT PREVIŠANO

Fig. 2 COMPARISON OF THE SURFACE OF PRE-QUATERNARY BEDROCK BETWEEN GEOELECTRICAL RESULTS AND BOREHOLE DATA ALONG THE ROUTE OF MOTORWAY LJUBLJANA - VRHNKA VERTICAL SCALE 20 TIMES EXAGGERATED

Fig. 2 COMPARISON OF THE SURFACE OF PRE-QUATERNARY BEDROCK BETWEEN GEOELECTRICAL RESULTS AND BOREHOLE DATA ALONG THE ROUTE OF MOTORWAY LJUBLJANA - VRHNKA VERTICAL SCALE 20 TIMES EXAGGERATED

unequivocal determination of the results. More interest is devoted to the auxiliary point method which is at present mostly applied interpretation method in practice. The basic condition of a reliable interpretation, using this method lies in a sufficient collection of precalculated model curves. This is illustrated in the parametric diagram of all published three-layer sounding curves in relation to their resistivity contrasts (fig. 2).

Development of direct interpretation methods promises to give some impetus to new ideas and interpretation conceptions combined with better resolution power. The rapid propagation of computer techniques and the availability of small sized computers enables their utilization also for small geophysical organizations, although the role of the interpreter is still indispensable in the final selection of computer solved results.

Literatura

- Anstey, N. A. 1964, Correlation techniques - A review, *Geophysical Prospecting*, vol. 12, str. 355—382, The Hague.
- Cagniard, L. 1953, La prospection géophysique des eaux souterraines. Colloque d'Ankara sur l'hydrologie de la zone aride. UNESCO, str. 184—190, Ankara.
- Buser, S. s. sodelavci 1969, Osnovna geološka karta SFRJ, list Ribnica. M 1:100.000, Beograd.
- Compagnie Générale de Géophysique, 1963, Master curves for electrical sounding, 2nd revised edition, E.A.E.G., The Hague.
- Dahnov, V. N. 1953, Električeskaja razvedka neftjanyh i gazovyh mestoroždenij. Gostoptehizdat, Moskva.
- Deppermann, K. 1973, An interpretation system for geo-electrical sounding graphs, *Geophysical Prospecting*, Vol. 21, str. 424—463, The Hague.
- Ebert, A. 1942, Grundlagen zur Auswertung geoelektrischer Tiefenmessungen. Beitr. z. angew. Geophysik, Bd. 10, str. 1—17.
- Flathé, H. 1955, A practical method of calculating geoelectrical model graphs for horizontally stratified media. *Geophysical Prospecting*, vol. 3, str. 268—294, The Hague.
- Flathé, H. 1974, Comment on "The automatic fitting of a resistivity sounding by geometrical progression of depths". *Geophysical Prospecting*, vol. 22, str. 176—180, The Hague.
- Ghosh, D. P. 1971 a, The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. *Geophysical Prospecting*, vol. 19, str. 192—217, The Hague.
- Ghosh, D. P. 1971 b, Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally stratified earth. *Geophysical Prospecting*, vol. 19, str. 769—775, The Hague.
- Habberjam, G. M. 1970, The association of resistivity soundings. *Geophysical Prospecting*, vol. 18, str. 199—214, The Hague.
- Hummel, J. N. 1929, Der scheinbare spezifische Widerstand. *Zeitschrift für Geophysik*, Bd. 5, str. 89—104.
- Inman, J. R., Jisoo Ryu, Ward, S. H. 1973, Resistivity inversion. *Geophysics*, Vol. 38, str. 1068—1108, Tulsa.
- Kalenov, E. N. 1957, Interpretacija krivyh vertikalnogo električeskogo zondirovanija. Gostoptehizdat, Moskva.
- Koefoed, O. 1960, A generalized Cagniard graph for the interpretation of geoelectrical sounding data. *Geophysical Prospecting*, vol. 8, str. 459—469, The Hague.
- Koefoed, O. 1965 a, A semi-direct method of interpreting resistivity observations. *Geophysical Prospecting*, vol. 8, str. 259—282, The Hague.
- Koefoed, O. 1965 b, Directed methods of interpreting resistivity observations. *Geophysical Prospecting*, vol. 13, str. 588—591, The Hague.

- Koefoed, O. 1968, The application of the kernel function in interpreting geoelectrical resistivity measurements. Gebr. Borntraeger, Berlin.
- Koefoed, O. 1969, An analysis of equivalence in resistivity sounding. *Geophysical Prospecting*, vol. 17, str. 327—335, The Hague.
- Kunetz, G. 1966, Principles of direct current resistivity prospecting. Gebr. Borntraeger, Berlin.
- Kunetz, G., Rocroi, J. P. 1970, Traitement automatique des sondages électriques. *Geophysical Prospecting*, vol. 18, str. 157—198, The Hague.
- Lasfargues, P. 1957, Prospection électrique par courants continus. Masson, Paris.
- Lee, T. 1972, A general technique for the direct interpretation of resistivity data over two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, vol. 20, str. 847—859, The Hague.
- Lee, T., Green, R. 1973, A method for the direct interpretation of electrical soundings made over a fault or dike. *Geophysics*, vol. 38, str. 762—770, Tulsa.
- Mallett, R. 1947, The fundamental equations of electrical prospecting. *Geophysics*, vol. 12, str. 529—558, Tulsa.
- Marsden, D. 1973, The automatic fitting of a resistivity sounding by a geometrical progression of depths. *Geophysical Prospecting*, vol. 21, str. 286—289, The Hague.
- Mooney, H. M., Wetzel, W. W. 1956, The potentials about a point electrode and apparent resistivity curves for a two-, three- and four-layered earth. Minneapolis. University of Minnesota Press.
- Orellana, E., Mooney, H. M. 1966, Master tables and curves for vertical electrical sounding over layered structures. Interclencia, Madrid.
- Orellana, E. 1972, Prospección geoelectrica en corriente continua. Paraninfo, Madrid.
- Pleničar, M. s sodelavci, 1967, Osnovna geološka karta SFRJ, list Postojna, M 1:100.000, Beograd.
- Pleničar, M. 1970, Tolmač k osnovni geološki karti SFRJ, list Postojna, Beograd.
- Plotnikov, N. I. redaktor 1972, Metody geofiziki v gidrogeologii i inženernoj geologii. Nedra, Moskva.
- Ravnik, D., 1965, Geoelektrične raziskave na Ljubljanskem barju. *Geologija*, 8 knjiga, str. 80—91.
- Rijks waterstaat, The Netherlands, 1969, Standard graphs for resistivity prospecting. E.A.E.G., The Hague.
- Roman, I. 1931, How to compute tables for determining electrical resistivity of underlying beds and their application to geophysical problems. U.S. Dep. of Commerce, Bureau of Mines, Technical Paper 502, str. 1—44.
- Szaraniec, E. 1970, Interprétation directe des courbes de sondage électrique et le problème de différents dispositifs de mesure. *Geophysical Prospecting*, vol. 18, str. 1—13, The Hague.
- Szaraniec, E. 1970, La résistivité apparente comme transformation linéaire du potentiel et la transformation inverse. *Geoph. Prospecting*, vol. 18, str. 818—825, The Hague.
- Stefanescu, S. et Schlumberger, C. & M. 1930, Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales, homogènes et isotropes. *Le Journ. de Phys. et le Radium*, VII, p. 132—140.
- Van Dam, J. C. 1965, A simple method for calculation of standard-graphs to be used in geo-electrical prospecting. *Geophysical Prospecting*, vol. 13, str. 37—65, The Hague.
- Zohdy, A. A. R. 1965, The auxiliary point method of electrical sounding interpretation, and its relationship to the Dar Zarrouk parameters. *Geophysics*, vol. 30, str. 644—660, Tulsa.
- Zlebnik, L. 1969, Poročilo o hidrogeoloških razmerah v zahodnem in osrednjem delu Ljubljanskega barja. Arhiv Geološkega zavoda Ljubljana.