

GEOELEKTRIČNA ISPITIVANJA U DINARSKOM KRŠU

S 10 slika u tekstu i 2 u prilogu

U raspravi se prikazuju osnovna gledišta na geoelektrična ispitivanja te na mogućnosti i perspektive primjene geoelektrike u kršu.

Uz kratki stratigrafsko-litološki opis naslaga u Dinarskom kršu navode se njihovi specifični otpori, uvjeti i osnovni problemi geoelektričnih ispitivanja s posebnim osvrtom na raspucanost karbonatnih stijena te mjesto i odnos geoelektrike prema ostalim metodama u sklopu kompleksnih istraživanja u kršu.

Nešto detaljnije se prikazuje geoelektrično sondiranje kao vodeći mjerni postupak praktične geoelektrike. Ističe se sličnost općeg oblika dijagrama sondiranja u kršu s onima u nekrškim terenima. Diskutiraju se pojmovi »paket slojeva« i »geoelektrična sredina«. Nešto opširnije se prikazuju geoelektrični odnosi i kriteriji kvantitativne interpretacije dijagrama sondiranja na krškim poljima kao i ispitivanje prodora morske vode u kopno. Pregledno se opisuju geoelektrično profiliranje, kružno sondiranje, metoda električki nabijenog tijela, rezistivimetrijska ispitivanja te električna mjerenja u bušotinama.

S više praktičnih primjera opisuje se primjena geoelektričnih ispitivanja u Dinarskom kršu na hidrogeološkim inženjersko-geološkim i naftno-geološkim zadacima.

SADRŽAJ

1. Uvod	348
2. Kratki stratigrafsko-litološki opis naslaga Dinarskog krša. Geoelektrična svojstva geoloških vodiča u Dinarskom kršu	349
3. Kratki osvrt na hidrografske i hidrogeološke odnose	350
4. Geoelektrična ispitivanja u kršu	351
4.1. Opće postavke i razmatranja	351
4.2. Geoelektrično sondiranje	356
4.3. Geoelektrično profiliranje	366
4.4. Geoelektrično kružno sondiranje	366
4.5. Metoda električki nabijenog tijela	368
4.6. Rezistivimetrijska ispitivanja	368
4.7. Električna mjerenja u bušotinama	370
5. Primjena geoelektričnih ispitivanja u Dinarskom kršu	371
5.1. Primjena na hidrogeološkim zadacima	371
5.2. Primjena na inženjersko-geološkim zadacima	373
5.3. Primjena na naftno-geološkim zadacima	374
6. Zaključak	377
Literatura	379
Geoelektrische Untersuchungen im Dinarischen Karst (Zusammenfassung)	381

1. UVOD

Posljednjih nekoliko godina bilježi se daljnje povećanje obima geofizičkih ispitivanja na svim područjima njihove praktične primjene. To se odnosi u posebnoj mjeri na geoelektrična ispitivanja u Dinarskom kršu.

Gotovo isključiva praktična primjena geofizičkih metoda ispitivanja tla u Hrvatskoj odvija se unutar djelatnosti poduzeća »Geofizika« u Zagrebu. Godine 1961. »Geofizika« je proslavila desetgodišnjicu svog postanka kao privredna organizacija za izvođenje svih vrsta geofizičkih ispitivanja. Predavnje J. Baturića (1962) »Uloga geofizike u geološkim istraživanjima« na proslavi desetgodišnjice Hrvatskog geološkog društva 1961. godine dalo je u velikoj mjeri prikaz radova u pojedinim granama praktične geofizike, što ih je izvela »Geofizika« u periodu od 1951. do 1961. godine.

Period tih deset godina može se smatrati prvom razvojnom fazom intenzivnije djelatnosti na uvođenju i primjeni metoda praktične geofizike na rješavanju različitih zadataka u geologiji i rudarstvu. Slijedeći period, tj. posljednjih nekoliko godina, može se pak smatrati drugom fazom u razvoju praktične geofizike u Hrvatskoj. Proširuje i obogaćuje se tematika ispitivanja, poboljšava se metodika terenskih radova i interpretacije, studiraju i usvajaju se novi postupci izvođenja i obrade rezultata mjerenja i u svemu sve se više postižu rezultati, koji prelaze nacionalne okvire, izjednačuju se i ponekad prelaze nivoe istovrsnih radova u zemljama s izvjesnom geofizičkom tradicijom.

U posebnoj mjeri odnosi se to na *geoelektrična ispitivanja* u Dinarskom kršu i to zato, jer se posljednjih godina stalno povećava obim te vrste geofizičkog ispitivanja na rješavanju praktičnih zadataka hidrogeološkog, inženjersko-geološkog i naftno-geološkog karaktera. Učvršćuje se već ranije zacrtana osnovna metodika rada, razjašnjava se mjesto i odnos geoelektrike prema drugim metodama istraživanja kod u većini slučajeva nužnog i u praksi uglavnom i primijenjivanog sistema kompleksnih istražnih radova u kršu, usavršava se tehnika izvođenja »klasičnih« postupaka geoelektričnog ispitivanja, uvode se i uspješno u praksu primijenjuju novi mjerni postupci, unapređuju se metode interpretacije mjernih podataka, davajući kod toga težište na nužnu tijesnu povezanost geofizičke i geološke interpretacije rezultata geoelektričnih mjerenja. Kod svega toga vrše se također nastojanja, da se nađe kako zajedničko gledište tako i zajednički jezik (ili terminologija) geoelektričara i ostalih stručnjaka, napose hidrogeologa i građevinaca te projekatanata, kod obrade pojedinih praktičnih zadataka.

Cilj je ove rasprave, da prikaže osnovna gledišta na današnje stanje geoelektričnih ispitivanja u Dinarskom kršu, mogućnosti i granice efektivne primjene i neke perspektive geoelektrike u kršu. Kako najveći dio postojećeg dokumentacionog materijala otpada na »klasični« mjerni postupak praktične geoelektrike – geoelektrično sondiranje, bit će najveći dio ovog prikaza posvećen obradi spomenute tematike u odnosu na geo-

električno sondiranje. Izvršit će se samo obrada dokumentacionog materijala iz fonda »Geofizike«.

Kod mnogih razmatranja krša uzeti su u obzir podaci, mišljenja i rezultati ranijih radova J. Baturića (1953, 1955, 1961), koji do danas uglavnom nisu bili objavljeni, a u spomenutom predavanju J. Baturića (1962) bili su samo pregledno navedeni. Ti su radovi izvršeni dijelom zajedno, a dijelom paralelno s prvom fazom razvoja odnosno primjene praktične geoelektrike kod rješavanja hidrogeoloških zadataka na području krša u okviru djelatnosti »Geofizike«.

Primjena praktične geoelektrike kod traženja i ispitivanja rudnih ležišta u kršu nije ovdje obrađena. Više ili manje detaljni prikazi odnosno problematike kod geoelektričnih ispitivanja boksitnih ležišta, ekonomski najvrijednijeg i najraširenijeg rudnog blaga na području Dinarskog krša, već su objavljeni u stručnoj literaturi (npr. Z. Krulc & N. Vidović, 1960).

2. KRATKI STRATIGRAFSKO-LITOLOŠKI OPIS NASLAGA DINARSKOG KRŠA. GEOELEKTRIČNA SVOJSTVA GEOLOŠKIH VODIČA U DINARSKOM KRŠU

Najstariji sedimenti pripadaju *mladem paleozoiku* te se većinom sastoje od glinenih škriljavaca i pješčenjaka. Na tim nepropusnim stijenama oblikovao se normalni reljef, koji se ispoljava kao oaza usrijed pretežno golog kamenitog krškog susjedstva.

Najveće prostranstvo zauzimaju *mezozojski sedimenti*, a među njima prevladavaju vapnenci. Verfenski slojevi donjeg trijasa sastoje se od pjeskovitih i laporovitih tinjčastih škriljavaca, vapnenaca, nešto dolomita i konglomerata. Srednji trijas dolazi u dva razvoja: vapnenačko-dolomitnom i karbonatno-klastičnom. Prvom razvoju dominiraju gromadasti vapnenci i dolomiti, ali ima ih i lijepo uslojenih. Drugi razvoj predstavljaju buhenštajnsko-vengenske naslage. U gornjem trijasu dolaze lokalno razvijene laporovite i boksitične naslage karnika; preteže, međutim, debela serija dolomita, u kojima se samo mjestimično javljaju vapnenci. Čitava je jura razvijena u vapnenačko-dolomitnom facijesu i predstavlja jedan od dominantnih stratigrafskih elemenata u većem dijelu dinarskog područja. Donja kreda utvrđena je samo na nekoliko mjesta, a gornja je kreda poput jure zastupana vapnenačko-dolomitnim naslagama, među kojima se ističu rudistični vapnenci. To je drugi dominantni stratigrafski element u Dinaridima.

Naslage *paleozojske* starosti u širem području Dinarida imaju prema dosad izvršenim geoelektričnim ispitivanjima specifični otpor ispod 700 om. m, a mjestimice i ispod 200 om. m. Viša vrijednost specifičnog otpora odgovara pretežnom udjelu pješčenjaka, a niža pretežnom udjelu glinenih škriljavaca u paketu paleozojskih naslaga. Cijela se paleozojska serija jasno razlikuje po svom specifičnom otporu od serija mezozojskih karbonatnih stijena. Ukoliko u paketu trijaskih naslaga prevladava karbonatni sastav, razlikovat će se trijaska serija jasno od paleozojske po svom specifičnom otporu. Sresti se može, međutim, i suprotni krainji slučaj, kada će se specifični otpor trijaskе serije zbog pretežnog udjela glinovito-škriljavih stijena približiti specifičnom otporu paketa paleozojskih naslaga.

Za seriju *trijaskih* naslaga ne može se dati neka prosječna vrijednost specifičnog otpora, jer od mjesta do mjesta čak i znatno varira omjer

stijena glinovito-škriljavog prema karbonatnom razvoju. Karbonatni razvoj stijena srednjeg i gornjeg trijasa pokazuje iste geoelektrične karakteristike kao jurske naslage – visoke vrijednosti specifičnog otpora (većinom preko 5000 om.m. kod čvrstih, kompaktnih stijena). Na onima područjima, gdje se javljaju stijene trijaskе serije na površini terena, mogu se kod geoelektričnih ispitivanja jasno odvajati glinovito-škriljave od karbonatnih stijena kako u smjeru horizontalnog tako u izvjesnoj mjeri i u smjeru vertikalnog prostiranja. Kada se paket trijaskih naslaga nalazi u većoj dubini, geoelektrički će se ispoljavati s nekim srednjim specifičnim otporom, koji će ovisiti o količinskom omjeru između glinovito-škriljavih i karbonatnih stijena u paketu. Stupanj ispoljavanja paketa trijaskih naslaga ovisi nadalje jako i o vrsti i debljini stijena iznad trijaskе serije. Kada su razvijene glinovito-škriljave stijene u sva tri dijela trijasa, može se orijentaciono računati sa srednjim specifičnim otporom cijele trijaskе serije od oko 1500 om. m.

Jurske i kredne stijene imaju u čvrstom, kompaktnom, stanju specifični otpor preko 5000 om. m, često i do 20.000 om. m. Raspucane i zdrobljene ove stijene imaju dosta niski specifični otpor, ako se u njihovim pukotinama i šupljinama nalazi voda ili crvenica (specifični otpor vode kreće se u granicama od 30 do 60 om. m, a crvenice najčešće od 10 do 20 om. m). Zbog mogućih velikih razlika i varijacija u raspucanosti stijena odnosno u sastavu obzirom na eventualnu (i moguću) laporovitu komponentu lako je shvatiti, zašto karbonatnim stijenama variraju specifični otpori u dosta širokim granicama. Rijetko će im, međutim, specifični otpor biti niži od 1000 om. m.

Tercijarne stijene karbonatnog razvoja imaju slične geoelektrične karakteristike kao kredne naslage – iako im je srednji specifični otpor (oko 2000–3000 om. m) nešto niži radi čestih laporovitih primjesa – i one se zajedno sa slojevima kredne serije mogu jasno i jednoznačno odvajati od glinovitih stijena mlađeg tercijara. Specifični otpor glinovitih stijena mlađeg tercijara rijetko je preko 300 om. m.

Specifični otpor kvartarnih stijena je vrlo različit i promjenljiv zbog nejednolikog sastava. Dok se gline ističu po svom veoma niskom specifičnom otporu (10–30 om. m), mogu imati suhi krupni šljunci specifični otpor 3000 om. m i više. Vapnene breče i obronačno kršje može također imati visoki specifični otpor, ali će ovaj biti u slučaju i male količine gline u pukotinama stijena ili u vidu primjesa dosta niži od specifičnog otpora stijena karbonatnog razvoja bilo koje starosti, na kojima se breče i obronačni materijal nalazi.

Svi litostratigrafski elementi opće geološke građe Dinarida igraju dakako veliku ulogu kod formiranja oblika krivulja prividnog specifičnog otpora kod geoelektričnog sondiranja i ponekad otežavaju, pa i onemogućavaju jednoznačnu interpretaciju tih krivulja.

3. KRATKI OSVRT NA HIDROLOSKE I HIDROGEOLOSKE ODNOSI

Opća karakteristika hidrografije krških terena ogleda se u tome, što je podzemna vodena mreža daleko bogatija od nadzemne. Kretanje voda u krškom podzemlju bilo

je već davno predmet ispitivanja i proučavanja mnogih autora. O tom kretanju ima nekoliko teorija koje se međusobno bitno razlikuju. Vrlo lijep i kritičan pregled odnosne materije daje F. Jenko (1959).

»Neko jedinstveno vodno lice u kršu zagovaraju Grund i Davis, odlučno ga otklanjaju Katzer, Bock, Lehmann i Biese, govoreći samo o podzemnim vodotocima. Izgleda da su »osnovna voda« prve i podzemni vodotoci druge grupe istraživača hidrološke krajnosti krša. Sadašnja hidrogeološka ispitivanja neborivo su potvrdila u sklopu krških vodotoka postojanje osnovne vode u kršu suvislih nivoa ograničenog prostiranja i pokazala, kako je Grund bio usprkos nekih stranputica bliže stvarnosti od Katzera. Isto tako je Grund pravilno pretpostavljao, da može biti pored nepropusnih škrljavaca i drugih stijena i dolomit barijera i vododjelnica različitih »osnovnih voda« u kršu, dok Katzer čak negdje naglašava, da je vapnenac nepropusniji od dolomita. Prema istraživanjima i iskustvima u kršu te hidrauličkim zakonima gibanja vode i svojstvima karbonatnih stijena može se zaključiti na trostruku bit krških voda:

1. krške osnovne vode,
2. ponornice (i vodni mlazevi),
3. dubinski tokovi (dubinske vodne žile).

Takva podjela krških voda zadovoljavajuće zahvaća pojave u kršu i istovremeno odgovara stručnoj obradi krša. Sve te vode u kršu samostalno osciliraju i u najrazličitije propusnoj krškoj masi međusobno raznovrsno komuniciraju. Prema tome, hidrološki postoje tri zone: prozračno-propusna zona izvan oscilirajućih osnovnih voda i ponornica, plavljeni prostor u području osciliranja voda temeljnica i ponornica te vodna zona u samim vodama temeljnicama« (F. Jenko, 1959).

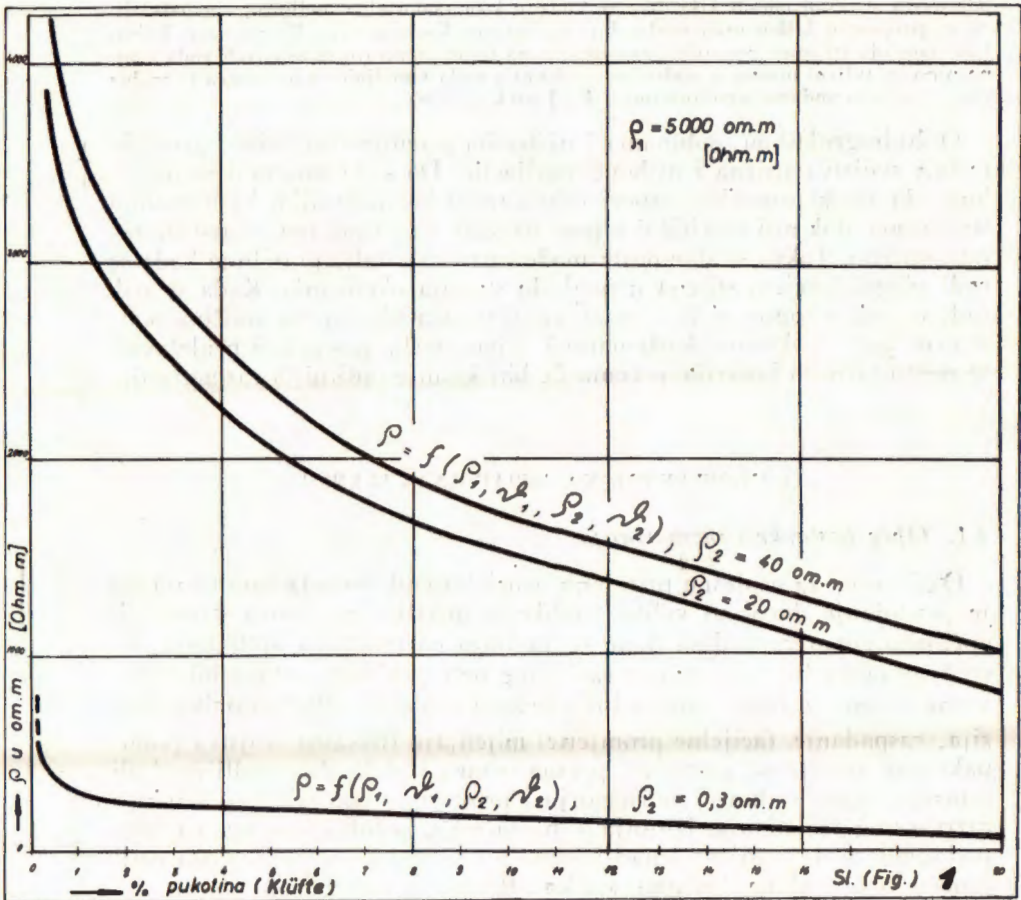
O hidrogeološkim osobinama i njihovim promjenama ovise i geoelektrična svojstva stijena i njihove varijacije. Do sada smatralo se pravilom, da visoki specifični otpori odgovaraju kompaktnijim karbonatnim stijenama, dok niži specifični otpori ukazuju na raspucanu, »karstificiranu« stijenu. Takvo se stanovište može smatrati i dalje pravilnim kada se radi o općoj ocjeni stijena u pogledu stupnja okršivanja. Kada se pak radi o vodoopisnosti ili o mogućnosti nalaza iskoristivih količina podzemne vode u okršenoj karbonatnoj stijeni, treba postaviti i pridržavati se nešto tačnijih kriterija, o čemu će biti kasnije opširnijih razmatranja.

4. GEOELEKTRIČNA ISPITIVANJA U KRŠU

4.1. Opće postavke i razmatranja

Opći uvjet za uspješnu primjenu geoelektričnih metoda ispitivanja tla je postojanje dovoljno velike razlike u specifičnom otporu stijena ili općenito govoreći sredina, koje se javljaju na području ispitivanja. Te sredine mogu biti bilo stijene različitog petrografskog sastava bilo istovrsne stijene, kojima se uslijed djelovanja geoloških sila (tektonika, erozija, raspadanje, facijelne promjene) mijenjaju fizikalna svojstva (kompaktnost, poroznost, gustoća i prema ovome i električna vodljivost) ili osnovni uvjeti njihovog zalijeganja i prostornog položaja (višestruka i raznovrsna rasjedanja, boranja i navlačenja, položaj obzirom na nivo podzemne vode – stijene iznad i ispod nivoa podzemne vode, vrsta podzemne vode – slana, bočatna, slatka). Razlike u specifičnom otporu sredina su najveće, kada se radi o stijenama jako različitog petrografskog sastava (npr. glineni škrljavci, lapori i gline prema karbonatnim stijenama).

ma) ili o istovrsnoj stijeni u blizini mora, u kojoj su pukotine i šupljine jednim dijelom ispunjene vodom ili štaviše nezapunjene (»ispunjene« zrakom). U ovom drugom slučaju razlike u specifičnom otporu su razumljivo velike zato, jer ima morska voda specifični otpor oko 0,3 om. m, pa se njezino prisustvo u stijenskoj masi već i kod malih postotaka pukotina jasno raspoznaje kod geoelektričnih mjerenja. Geoelektrički se mogu jasno registrirati i one raspucane stijene, u kojima su pukotine ispunjene slatkom vodom ili crvenicom (ili glinom), jer ima slatka izvorska voda specifični otpor oko 40 om. m, a crvenica (glina) najčešće 10–20 om. m. Sl. 1 prikazuje ovisnost specifičnog otpora smjese o postotku pukotina (zapunjenja) u »smjesama« vapnenac + slatka voda, vapnenac + crvenica i vapnenac + slana voda u pukotinama. Ovdje je za vapnenac uzeta vrijednost specifičnog otpora 5000 om. m, što odgovara »čistom«, kom-



Sl. 1.

paktnom vapnencu kao jednoj komponenti razmatranih smjesa. Vrijednosti specifičnih otpora komponenata predstavljaju srednje vrijednosti sa više lokaliteta u našem kršu u priobalnim područjima i otocima. Nacrtane krivulje predstavljaju »srednje krivulje« nacrtane na osnovu linearne interpolacije (kao prve aproksimacije stvarnim »srednjim« odnosima) između krivulja dobivenih računskim putem prema dvije najpoznatije (i dosta ekstremne) jednadžbe za specifični otpor smjesa prema poznatim teorijama smjesa (V. F r i t s c h, 1960). Ovakve »srednje krivulje« najbolje odgovaraju praktički dobivenim vrijednostima. Na osnovu jednadžbi tih teorija smjesa mogu se računskim putem iz izmjerenih odnosno utvrđenih vrijednosti specifičnih otpora stijena i slobodne vode u njihovim pukotinama odrediti približni postoci pukotina.

Prema gornjim dvjema krivuljama na sl. 1 može se zaključiti, da je i teoretski uzeto nesigurno razlikovati zapunjenje pukotina u stijeni (vapnencu) sa slatkom vodom ili sa crvenicom. U praksi je to još teže zbog toga, pošto su stvarno utvrđene razlike u slučaju tih dvaju najčešćih zapunjenja pukotina u raspucanim vapnencima donekle unutar tačnosti samih geoelektričnih mjerenja, a još više unutar mogućih – i u kršu čestih – poremećenja mjernih podataka uslijed nehomogenosti u površinskom dijelu tla, na kome se vrše mjerenja. U naročito nepovoljnim prilikama ili tačnije izvjesnim geološkim situacijama (npr. ograničene nehomogenosti, vertikalni tanki sloj, vertikalni kontakt različitih stijena) mogu biti ova poremećenja jako velika; ovaj je problem za geoelektrično sondiranje kod nas djelomice već obrađen (S. K o v a č e v i ć, 1963a). S druge strane praktički je teško samo na osnovu geoelektričnih mjerenja razlikovati kompaktnu od raspucane karbonatne stijene iznad nivoa podzemne vode i bez zapunjenja pukotina crvenicom ili glinom odnosno sa zrakom u pukotinama.

Iz ovisnosti prikazanih na Sl. 1 može se dalje zaključiti, da može specifični otpor karbonatnih stijena i usprkos navedenih nepovoljnih okolnosti odnosno izvjesnih nesigurnosti biti dragocjen orijentacioni inženjersko-geološki i hidrogeološki parametar. Sam po sebi kompaktni, »čisti« (bez primjesa lapora npr.) vapnenac specifičnog otpora od 5000 om. m imat će uz 1% pukotina kod zapunjenja istih sa slatkom vodom otpor samo još oko 3550 om. m, kod zapunjenja pukotina crvenicom oko 3150 om. m, a uz 3% pukotina otpor samo oko 2800 om. m (zapunjenje sa slatkom vodom) odnosno oko 2500 om. m (zapunjenje s crvenicom). Ova računanja i razmatranja izvršena su na osnovu teoretskih postavki i ona su sama po sebi jednostavna. U praksi ima, međutim, napose u našem kršu, mnogo faktora koji utječu na specifični otpor »smjesa« i kojih se utjecaj ne može tačno uzeti u obzir. Zbog toga mogu se stvarno opažane vrijednosti specifičnih otpora dosta razlikovati od prikazanih. O tim odnosima nema za Dinarski krš gotovo nikakvih podataka, još manje neke statističke i naučne obrade i tome bi trebalo u buduće posvetiti odgovarajuću pažnju. Na mnogim područjima, posebno na područjima već izgrađenih i planiranih hidroenergetskih objekata u Dinarskom kršu, izvršena su opsežna kompleksna istraživanja (među njima i geoelektrična ispitivanja), pa bi bilo od koristi za daljnje radove na osnovu postojećeg dokumentacio-

nog materijala i interpretacije ispitivanja u bušotinama te nekih dopunskih geoelektričnih ispitivanja izvršiti obradu geoelektričnih mjerenja u tom smislu.

Kako je poznato, krški su fenomeni najbolje razvijeni u tektonski poremećenim terenima; voda je najjače djelovala upravo tamo, gdje su vapnenci i dolomiti bili više razlomljeni i gdje nije bilo nepropusnih interkalacija (M. H e r a k, 1957). Pošto mogu s druge strane vapnenci i dolomiti biti mjestimično jako kompaktni i nepropusni, ukazivat će varijacije u izmjerenom specifičnom otporu u horizontalnom i vertikalnom smjeru na promjene u kompaktnosti odnosno poremećenosti tih stijena po prostanstvu i po dubini. Prikladno predočeni utvrđeni specifični otpori dat će dragocjenu orijentaciju o intenzitetu i dubini procesa okršivanja karbonatskih stijena i o prevladavajućim pravcima ili zonama tektonskih poremećenja, kojima je uvjetovano okršivanje. Ponekad će ta predstava dati samo relativne odnose, ali vezanjem geoelektričnih mjerenja na strukturne bušotine i podatke ispitivanja vodopropusnosti bit će taniranjem rezultata geoelektrike moguće utvrditi i neke kvantitativne odnose. U tom pogledu do sada kod nas nije bilo učinjeno gotovo ništa. Kontrolna i druga istražna bušenja izvedena nakon izvršenih geoelektričnih ispitivanja na nekim područjima kompleksnih istraživanja u Dinarskom kršu potvrđuju u većoj mjeri ili potpuno rezultate odnosno prognoze, što ih je u tom smislu dala geoelektrika.

U posljednje vrijeme izvršeno je više detaljnijih geoelektričnih ispitivanja na inženjersko-geološkim zadacima i utvrđene su neke – za sada samo grubo postavljene i nedovoljno statistički obrađene – zakonitosti između veličine specifičnog otpora karbonatnih stijena i utvrđenog koeficijenta vodopropusnosti. Na tom području trebalo bi svakako poraditi više i izvršiti potrebna dopunska geoelektrična površinska i elektrokarotazna mjerenja uz prikladnu statističku obradu dobivenih podataka te konačnu kompleksnu korelaciju i inženjersko-geološko-geoelektričnu interpretaciju.

Ponekad se za geoelektrički utvrđenu granicu između okršene i kompaktnije karbonatne stijene upotrebljava izraz »baza karstifikacije«. Obzirom na rezultate naših istraživača (J. R o g l i ć, 1961; J. B a t u r i ć, 1961) a posebno F. J e n k a (1959), da »vapnenac može biti duboko ispod visine erozione baze vodopropustan i dakle okršen« treba svakako kod postavljanja takvog zaključka uzeti u obzir sve geološko-tektonske i hidrogeološke uvjete. Kod kompleksne, napose inženjersko-geološke i hidrogeološke, interpretacije rezultata geoelektričnih ispitivanja može dakako doći do korekcije izvjesnih stavova i kriterija, do kojih se je došlo samo na osnovu geofizičke interpretacije mjernih podataka. Ocjena sadašnjih pojmova »baza karstifikacije« i »karstifikacija« (okršivanje) prelazi okvire ove rasprave. Može se ipak ukazati na potrebu, da se diskusije o geološkoj terminologiji skrenu i na ovo područje i zahvate i geofizička ispitivanja.

Kada treba geoelektrički ispitivati istovrsne stijene i utvrđivati promjene i razlike u njihovim inženjersko-geološkim i hidrogeološkim osobinama, može doći bilo do neefikasne primjenljivosti geoelektrike u slu-

čaju premalih razlika u specifičnom otporu bilo do višeznačnosti dobivenih rezultata. Dvoznačnost ili tačnije nemogućnost geološke i hidrogeološke identifikacije uzročnika sniženja specifičnog otpora u raspucanoj vapnenoj stijeni odnosi se prvenstveno na zapunjenje pukotina crvenicom (glinom) i slatkom vodom, pošto su specifični otpori tih dvaju geoloških vodiča vrlo bliski međusobno (reda veličine 10^1 om. m) u odnosu na razmjerno visoki spec. otpor stijene (reda veličine 10^3 om. m). Češći je ovaj drugi slučaj, jer je u međuvremenu toliko usavršena mjerna tehnika, da se mogu sigurno registrirati i najmanje razlike u geoelektričnim svojstvima stijena te je time povećana opća tačnost mjerenja. Zbog toga se osjeća potreba za dopunskim ispitivanjima s posebnim geoelektričnim i drugim geofizičkim metodama; veoma lijep i informativan prikaz primjene geofizičkih metoda na rješavanju zadataka inženjerske geologije i hidrogeologije dao je D. Arandelović (1962). Ne samo u slučajevima i mogućnostima dvoznačnosti već i općenito treba geoelektrična ispitivanja prvo vezati, a zatim i provjeravati strukturnim bušenjem i drugim metodama istraživanja na interesantnijim i kritičnim mjestima. Rezultati geoelektričnih ispitivanja u kršu mogu se sigurno i svrsishodno interpretirati tek na osnovu usporedbe istih s geološkim profilima bušotina i ispitivanjima s drugim metodama. U ovome se kod nas do sada često u osnovi griješilo i od geoelektrike ponekad tražilo više, no što ona može dati, a pogotovo kada se geoelektrika primijeni sasvim samostalno i neovisno o drugim načinima istraživanja te bez potrebnog najnužnijeg broja repernih bušotina. Svrha svih geofizičkih metoda na svim područjima njihove primjene jeste u tome, da se njima dopune i prošire opća i specijalna geološka površinska istraživanja te da se najsvrsishodnije i najracionalnije planiraju i izvrše mnogo skuplja i dugotrajnija direktna istraživanja, prvenstveno bušenja.

Ima podataka koji pokazuju, da ni između geološke determinacije jezgara i utvrđene vodopropusnosti u bušotinama nema uvijek zakonomjernog podudaranja. Zato se kod suvremenih kompleksnih istraživanja u kršu nameće potreba za fizikalnim metodama i to napose za geoelektričnim površinskim mjerenjima i karotažnim ispitivanjima u bušotinama. Rezistivimetrijska i elektrokarotažna mjerenja u bušotinama u kršu sve se više u svijetu primjenjuju i trebalo bi ih primijeniti i na području Dinarskog krša.

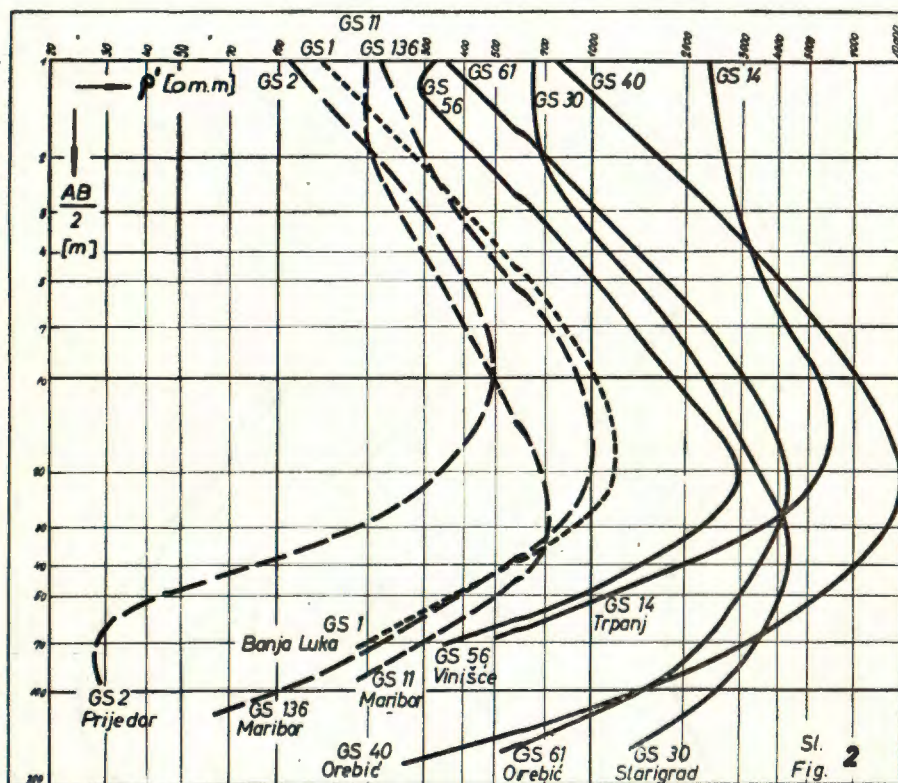
Mnoga istraživanja u našem kršu već su pokazala opravdanom primjenu geoelektričnih metoda ispitivanja, ali samo u pravilnom sklopu i odnosu s ostalim metodama istraživanja. U takvom sklopu su geoelektrična ispitivanja neophodna, jer se postižu traženi rezultati na najbrži način i uz ulaganje najmanjih sredstava. Geoelektrična mjerenja odlikuju se važnom prednosti: za kratko vrijeme mogu se zahvatiti velike površine istraživanog područja i dobiti time dragocjeni orijentacioni podaci i predodžbe o nekim osnovnim elementima podzemne građe. Za daleko skuplja i sporija bušenja odabiru se karakteristična i kritična mjesta prema rezultatima geoelektrike. Nakon usporedbe i kompleksne interpretacije podataka svih istražnih radova mogu se i sa manjim brojem bušotina dobiti traženi podaci za cijelo područje ispitivanja.

Kod geoelektričnih ispitivanja u kršu rješavaju se gotovo na svakom zadatku posebni, drukčiji problemi, pa stoga nema neke opće »šablone« ni za izvođenje ni za geofizičku interpretaciju mjerenja. Iskustva sa sličnih ispitivanja na nekrškim područjima ne mogu se a priori primijeniti i koristiti na području krša. Ista je samo opća shema redoslijeda odnosno sklopa kompleksnih istražnih radova na rješavanju zadataka inženjerske geologije i hidrogeologije: geološka – hidrogeološka istraživanja – geofizička ispitivanja – mehanička bušenja (ili drugi direktni istražni radovi kao rudarski, kopanje pokusnih i istražnih jama) i geomehanička, hidrološka i ostala ispitivanja u bušotinama te specijalne metode ispitivanja (bojenja i dr.). Općenito je već usvojena praksa, da se u toku geoelektričnih (ili općenito geofizičkih) ispitivanja izvrši istražno bušenje za potrebe geofizičke interpretacije geoelektričnih mjernih podataka. Kod istraživanja nafte u vanjskoj zoni Dinarida poduzeta su intenzivnija geološka i geofizička ispitivanja tek u posljednjih nekoliko godina. Geofizička, napose geoelektrična ispitivanja metodom dubokog geoelektričnog sondiranja, imaju za sada još uglavnom tzv. super-regionalni značaj. Na širem području Dinarskog krša, izuzev Crnogorskog Primorja, izbušeno je (ili se još buši) nekoliko dubokih istražnih bušotina sa svrhom, da se dobiju za pojedina područja osnovni orijentacioni podaci o debljinama i sastavu pojedinih geoloških formacija. Svi istražni radovi će još i dalje kroz izvjesno vrijeme zadržati regionalno-integralni značaj.

4.2. Geoelektrično sondiranje

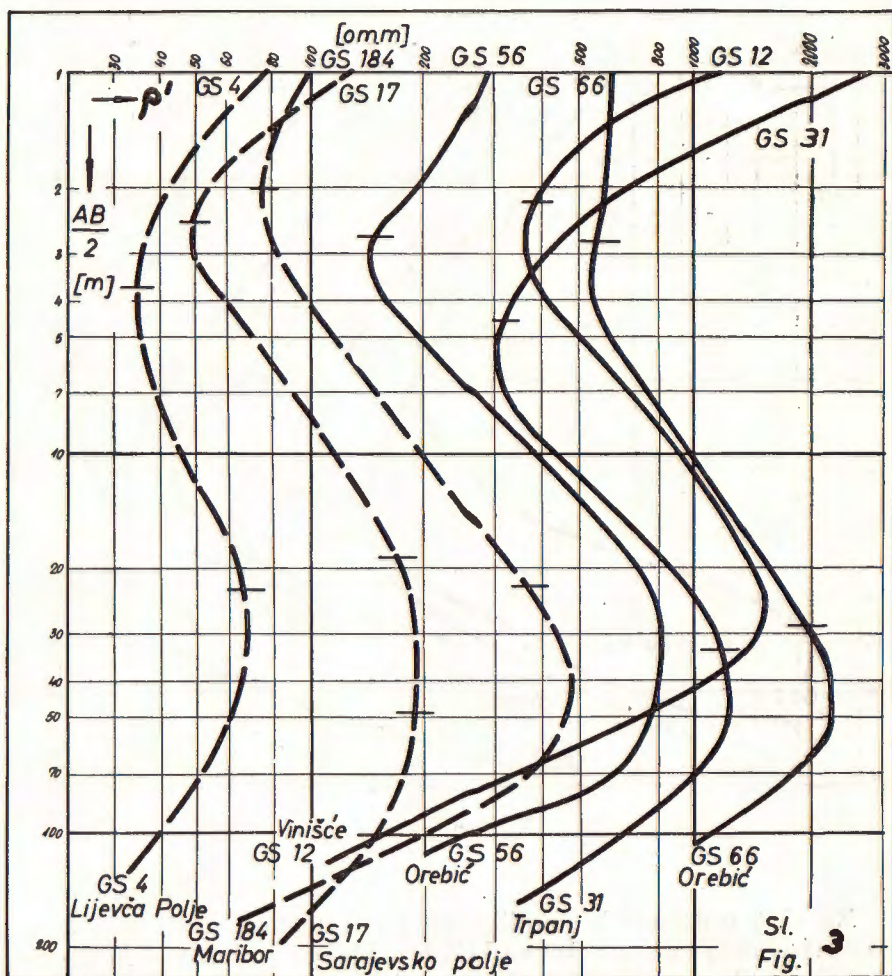
Među brojnim mjernim postupcima praktične geoelektrike zauzima vodeće mjesto geoelektrično sondiranje. Može se reći, da moderna geoelektrika zahvaljuje svoje značenje prije svega baš tom postupku. Na području Dinarskog krša također se od geoelektričnih mjernih postupaka geoelektrično sondiranje najviše primjenjuje na rješavanju svih vrsta zadataka. Posebno se zdvajaju tzv. duboka geoelektrična sondiranja, koja se izvode za rješavanje naftno-geoloških zadataka i imaju za sada tzv. super-regionalni karakter. Kod ovih sondiranja su razmaci elektroda ili općenito mjerne linije veoma veliki, reda veličine 10^3 – 10^4 metara. Tome odgovarajuće dubine sondiranje iznose od 6000–12000 metara, čime se dobiju sigurni podaci interpretacije (kod ovakvih super-regionalnih sondiranja dakako u prvom redu geofizičke interpretacije) do oko 3000 m, a procjene dubine onih geoelektričnih sredina, koje se jasno izdvajaju, kreću se i do 4–5 km.

Kod općeg oblika krivulja prividnog specifičnog otpora (ili drugim nazivom dijagrama geoelektričnog sondiranja) izmjerenih kako kod plićih tako i kod dubokih i najdubljih sondiranja na području našeg krša zapaža se često velika sličnost istih s krivuljama izmjerenim u nekrškim terenima. Ta se sličnost ne zapaža samo na onim predjelima krša, gdje je sastav podzemlja u geoelektričnom smislu »dvoslojan« ili »troslojan« – to su krška polja sa tanjim ili debljim pokrovnim naslagama glina ili crvenice, već i na područjima, gdje dolaze samo karbonatne stijene. Nekoliko praktičnih primjera i usporedaba najbolje će ilustrirati tu sličnost.



Sl. 2.

Na sl. 2 prikazano je nekoliko krivulja prividnog specifičnog otpora približno istog tipa sa nekoliko krških i nekrških područja. Krivulje pokazuju velike promjene prividnog specifičnog otpora i to od razmjerno niskih i jako niskih u plićem i najdubljem dijelu podzemlja do visokih i jako visokih vrijednosti specifičnog otpora u srednjem dijelu. Krivulje sa nekrških područja (u lijevom dijelu slike, u području nižih vrijednosti električnog otpora) izmjerene su na terenima s dosta jednoličnim litološkim sastavom: u plićem dijelu podzemlja dolaze šljunci i pijesci, a kao podloga javljaju se gline (Prijedor, Maribar) i lapori (Banja Luka). Krivulje sa krškog područja zauzimaju desni dio sl. 2 – područje viših vrijednosti električnog otpora, a izmjerene su na terenima s izdancima krednih vapnenaca; jako smanjenje prividnog specifičnog otpora u najdonjim dijelovima krivulje ukazuje na prisustvo slane, morske, vode u pukotinama vapnenaca. Krivulje su jako slične po obliku, samo su međusobno »pom aknute« u odnosu na vrijednosti specifičnog otpora srednjeg dijela krivulja odnosno srednjeg dijela podzemlja.



Sl. 3.

Sl. 3. prikazuje druge dvije skupine krivulja prividnog specifičnog otpora približno istog tipa s tom razlikom prema krivuljama na sl. 2, što se veće razlike u toku krivulja zapažaju u njihovim gornjim dijelovima, što opet odgovara promjenama u plićem dijelu podzemlja. Odnosi u vrijednostima specifičnog otpora isti su u odnosima, što ih prikazuju krivulje na sl. 2.

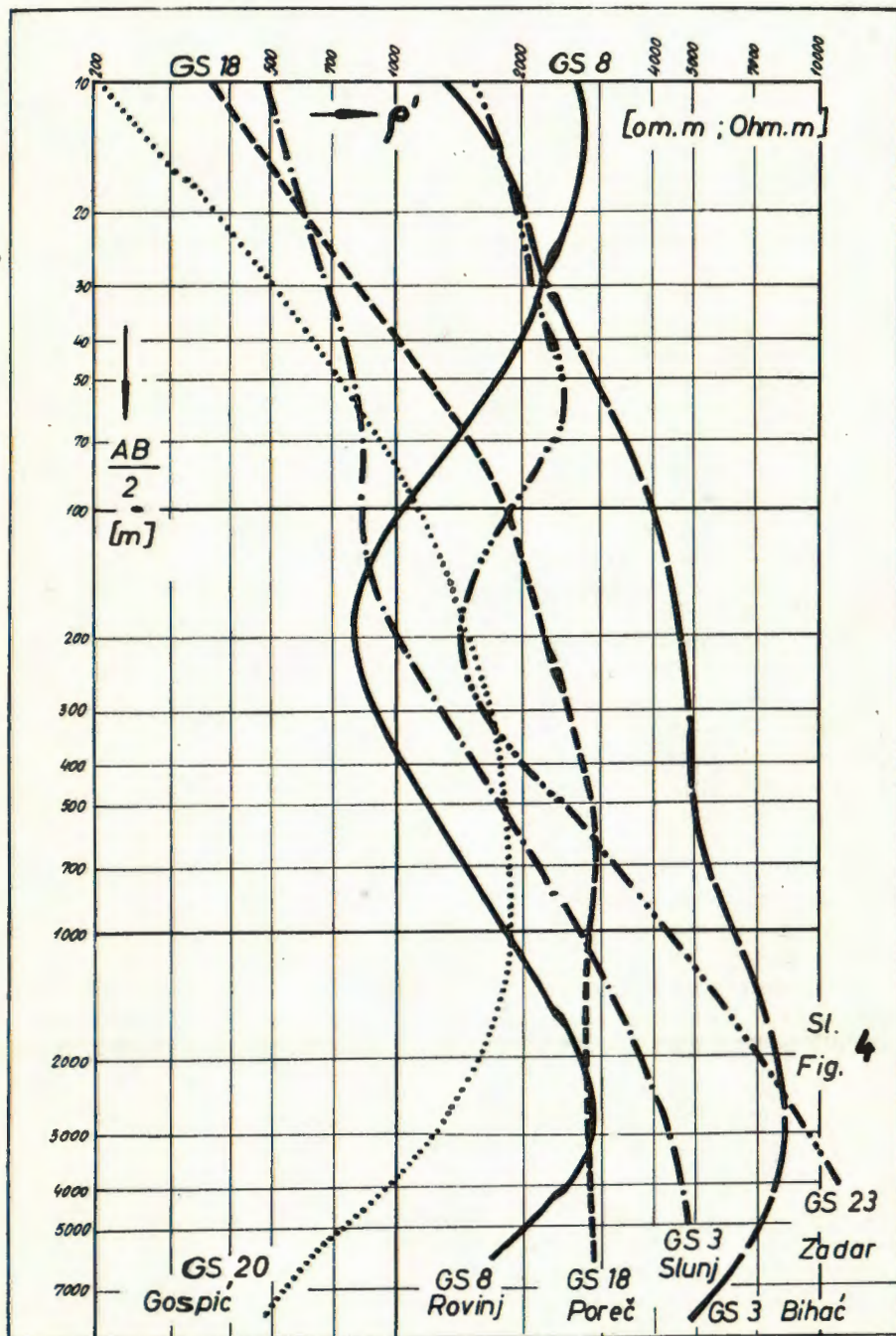
Kako je poznato, geoelektrično sondiranje je osobito prikladno za utvrđivanje promjena specifičnog otpora u podzemlju po vertikali, tj. za izdvajanje horizontalnih slojeva ili geoloških vodiča različitih specifičnih otpora. Već jednostavnom ocjenom oblika izmjerenih dijagrama sondira-

nja (jedan od postupaka kvalitativne interpretacije) dobije se na nekrškim terenima približna slika o broju »slojeva« različitih fizičkih svojstava. Postupcima kvantitativne interpretacije dijagrama geoelektričnog sondiranja (za višeslojne slučajeve najviše se primjenjuje H u m m e l o v a metoda pomoćnih tačaka (A. E b e r t, 1942)) mogu se odrediti debljine i dubine te specifični otpori pojedinih slojeva. Na sl. 3 prikazane krivulje izmjerene na nekrškim terenima pokazuju troslojnu građu podzemlja, ne računajući kod toga površinski vrlo tanki sloj humusa. Krivulja GS 17 – Sarajevsko Polje je samo prividno troslojna: između drugog i trećeg sloja homogenog, jednoličnog sastava javlja se serija tanjih slojeva pijeska, pjeskovite gline i gline. Za takvu seriju tanjih slojeva različitog litološkog sastava obično se u geoelektrici upotrebljava naziv »paket slojeva«, koji se ispoljava u krivulji prividnog specifičnog otpora kao jedan »sloj«. Na krivuljama u lijevom dijelu sl. 3 ucrtane su granice pojedinih slojeva – u krivulji GS 17 i granice »paketa« slojeva.

Istovrsnom ocjenom oblika izmjerenih dijagrama geoelektričnog sondiranja na području krša dobije se pak približna slika o promjenama geoelektrične građe podzemlja. Odgovarajući različiti dijelovi krivulja (kao npr. u desnom dijelu sl. 3) ne odgovaraju kod toga različitim »slojevima«, već različitim *geoelektričnim sredinama* ili tačnije sredinama ili dijelovima podzemne građe različitih geoelektričnih svojstava. Često se radi kod toga o istoj stijeni, kojoj su se uslijed djelovanja geoloških sila promijenila fizikalna svojstva ili neki uvjeti njihovog zalijeganja. Približne granice ovih promjena utvrđuju se za sada kvantitativno također pomoću već spomenute H u m m e l o v e metode pomoćnih tačaka. Po analogiji na slične odnose kod krivulja u nekrškim terenima, napose kada se radi o debljim i jasno izraženim geoelektričnim sredinama različitih specifičnih otpora (kao npr. na sl. 3, desni dio krivulja, te sl. 4), može se izvršiti takva geofizička interpretacija dijagrama geoelektričnog sondiranja. Usporedba s podacima istražnog bušenja na mnogim područjima našeg krša opravdava ovaj način interpretacije; vezanjem geoelektričnog sondiranja na istražne bušotine mogu se postići više nego zadovoljavajući rezultati u određivanju dubina takvih fizikalnih promjena u građi podzemlja. Do sada su bušenjem gotovo redovito dobivene npr. manje dubine čvrste, »neokršene« stijene u odnosu na geoelektrične prognoze. Za sada još nema dovoljno korelacionog materijala, da bi se mogao odrediti neki opći faktor korekcije za dubinu, što se određuje geoelektrički. Za svako područje ispitivanja dobiva se za sada najbolja korekcija vezom geoelektričnih sondiranja na istražne bušotine i kompleksnom interpretacijom dobivenih podataka. Za sada također još nema neke druge iskustvene ili drukčije metode kvantitativne interpretacije dijagrama sondiranja izmjerenih u kršu. U geofizičkoj literaturi nalazi se, međutim, na nove metode kvantitativne interpretacije krivulja prividnog specifičnog otpora (npr. B. V. D o r o f e e v, 1957; I. I. K r e i n e s, 1957; A. K. K o z y r i n, 1959; B. V. D o r o f e e v, 1959; O. K o e f o e d, 1960; V. D. K u k u r u z a, 1962). Te su metode namijenjene za interpretaciju dijagrama geoelektričnog sondiranja na horizontalno slojevitim terenima, ali se mogu koristiti i za približno utvrđivanje dubina i debljina različitih geoelektričnih

sredina iz dijagrama sondiranja u kršu. Iz godine u godinu povećava se obim geoelektričnih ispitivanja u Dinarskom kršu, napose dubokih geoelektričnih sondiranja na naftno-geološkim istraživanjima i pomalo također prikuplja korelacioni materijal. Zato treba u skorjoj budućnosti izvršiti studiju o teoretskim i praktičnim mogućnostima kvantitativne interpretacije dijagrama geoelektričnog sondiranja izmjerenih u Dinarskom kršu pomoću »klasičnih« metoda takve interpretacije za horizontalno slojevitou građu podzemlja. Na sl. 4 je prikazano nekoliko karakterističnih dijagrama dubokog geoelektričnog sondiranja iz našeg krša, izmjerenih na područjima s karbonatnim stijenama na površini tla. Očita je prividna »višeslojnost« krivulja prividnog specifičnog otpora i njihova podudarnost po obliku s krivuljama sa nekrških terena sa stvarno horizontalnim slojevima različitog specifičnog otpora i različitog litološkog sastava.

Dok su iskustva na kvantitativnoj interpretaciji dijagrama geoelektričnog sondiranja izmjerenih na područjima s karbonatnim stijenama još razmjerno mala, pošto je korelacioni materijal dosta skromnog obima, već su danas odgovarajući odnosi i kriteriji kod kvantitativne interpretacije dijagrama sondiranja na krškim poljima prilično jasni. Izmjereni dijagrami imaju lijepe »glatke« oblike. Promjene oblika dijagrama jasno i jednoznačno pokazuju i promjene u litološkom sastavu pokrovnih naslaga. Krivulje prividnog specifičnog otpora imaju u svom najdonjem dijelu karakterističan oblik: stalan porast prividnog specifičnog otpora u vidu pravca, koji s vertikalom zatvara kut od 45° . Taj oblik odgovara u teoriji metode geoelektričnog sondiranja podlozi odnosno terena sa vrijednošću specifičnog otpora jednako $\rho_k = \infty$. Takvi se dijagrami sondiranja mogu kvantitativno interpretirati po Hummelovoj metodi pomoćnih tačaka kao i pomoću izračunatih tro- i četveroslojnih skupova krivulja. Takva je interpretacija opravdana, jer su specifični otpori dosta različiti, a debljine pojedinih slojeva razmjerno velike (vidi sl. 5). Pojedini slojevi pokrivača na krškim poljima jesu većinom više-manje horizontalno slojeviti i različitog litološkog sastava; većinom su to gline, crvenica, pijesci, sedra, lapori. Ponekad se radi o istovrsnom geološkom materijalu, kome se mijenja stupanj vlažnosti (crvenica, pijesak) ili količina primjesa (pjeskovita glina s više ili manje pijeska) te se takve promjene ispoljavaju kao različite geoelektrične sredine. Katkad se opet kršje vapnene stijene pomiješano s glinom ili crvenicom ili pak jako raspucana stijena s glinom ili crvenicom u pukotinama više ili manje jasno ispoljava u dijagramu geoelektričnog sondiranja kao zaseban sloj. Izvjesne dvoznačnosti i nejasnoće kod geološke identifikacije geoelektričnih slojeva (sredina) kao i potrebne korekcije geoelektrički utvrđenih dubina i debljina pojedinih sredina dobiju se vezom geoelektričnih sonda na istražne bušotine. Do sada su bušenjem gotovo redovito dobivene manje dubine do čvrste karbonatne stijene u odnosu na dubine utvrđene samo geofizičkom interpretacijom dijagrama geoelektričnog sondiranja. Izvođenjem potrebnog broja korelacionih istražnih bušotina može se postići veoma velika tačnost određivanja debljine, dubine i vrste pojedinih geoelektričnih sredina na područjima krških polja. Do sada su bila kod mnogih geoelektričnih ispitivanja te vrste izvršena istražna korelaciona bu-

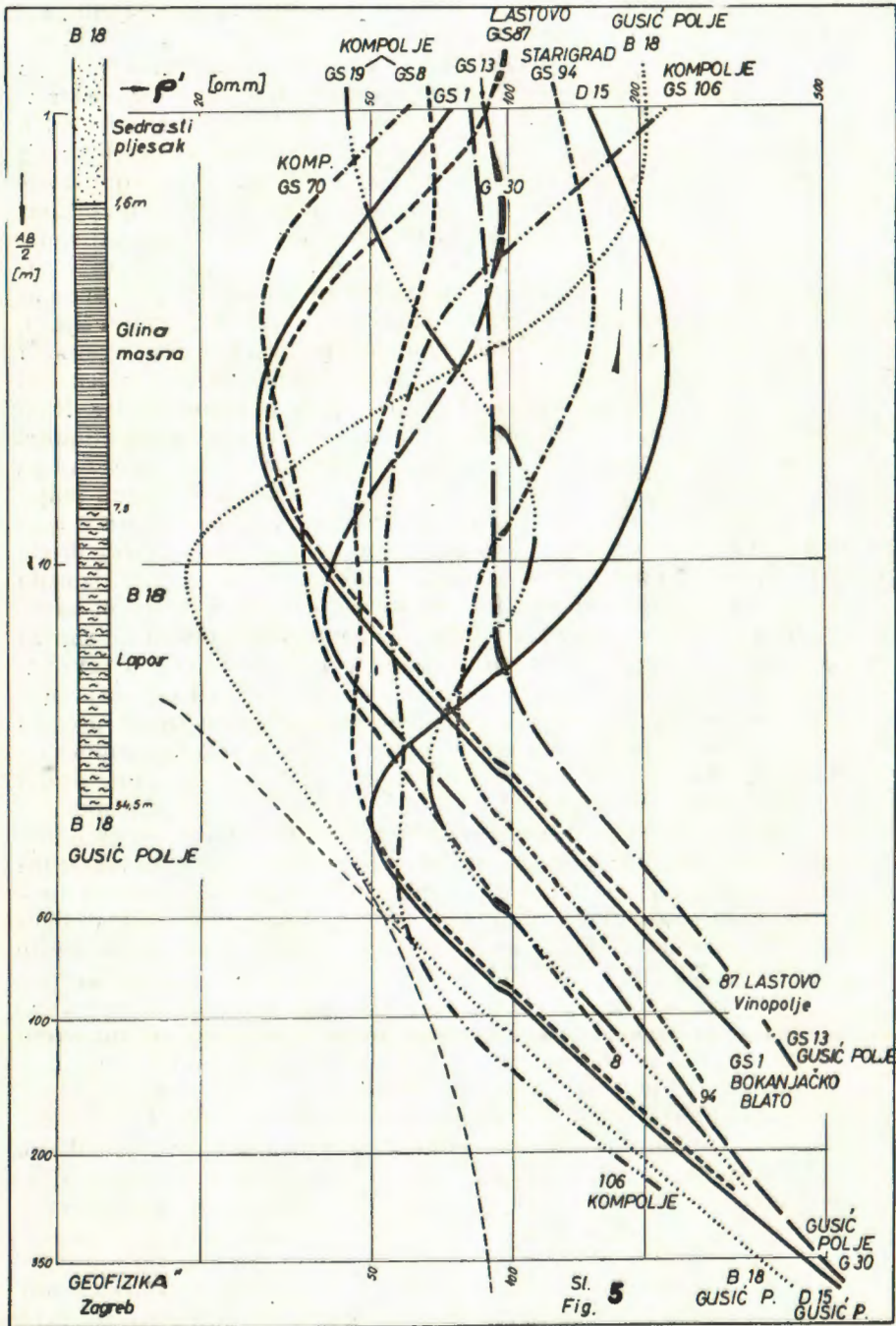


Sl. 4.

šenja u premalom obimu ili nakon potpuno završenih geoelektričnih ispitivanja.

Sl. 5. prikazuje nekoliko karakterističnih dijagrama geoelektričnog sondiranja sa nekih krških polja. Najčešći i najbrojniji su »troslojni« dijagrami sondiranja, kao npr. GS 1 (Bokanjačko Blato) i GS 87 (Vinopolje, Lastovo), koji se sreću kod manjih debljina pokrovnih naslaga na poljima. Kod većih debljina pokriva bilo je obično i više faza i vrsta taloženja nanosnog materijala, pa su prema tome i krivulje prividnog specifičnog otpora četiri- i višeslojnog karaktera (npr. GS 19 i GS 8 Kompolje, D-15 Gusić polje i dr.). Posebno je interesantan dijagram sondiranja B-18 na Gusić polju. Iza točke oštre promjene oblika dijagrama kod $AB/2 = 10$ m krivulja otpora pokazuje prvo lagani, a tek od $AB/2$ jednako približno 60 m zapaža se brzi porast prividnog specifičnog otpora i krivulja ima dalje nagib 45° prema vertikali. Odgovarajuća teoretska krivulja otpora pokazuje za »prelazni« dio dijagrama sondiranja od $AB/2 = 10$ do $AB/2 = 60$ m specifični otpor odgovarajuće geoelektrične sredine ispod 100 om. m, što ne može biti karbonatna stijena. Na tom je mjestu predloženo istražno bušenje i u dubini od 7,5 do 34,5 m utvrđeni su glinoviti lapori, što je bilo izvjesno iznenađenje. Na Gusić polju bile su naime od kvartarnih naslaga do tada utvrđene samo gline i sedra. Bušotina B-18 nije došla do stjenovite podloge polja, što je sačinjavaju jurski vapnenci i dolomiti.

Kako je već spomenuto, najveće razlike u specifičnom otporu različitih geoelektričnih sredina zapažaju se kod istovrsnih stijena u blizini mora, kada su pukotine i šupljine stijena jednim dijelom zapunjene slanom (morskom) vodom, a drugim dijelom zapunjene slatkom vodom ili nezapunjene. Ove se razlike veoma jasno ispoljavaju u dijagramima geoelektričnog sondiranja. Na sl. 2 i 3 prikazano je više dijagrama sondiranja s izrazito jakim smanjivanjem prividnog specifičnog otpora u dubini, koje se može svesti samo na prisustvo slane (morske) vode u pukotinama karbonatnih stijena. Posebno su oštre razlike u specifičnim otporima npr. u dijagramu GS-40 Orebić (sl. 2); srednji dio dijagrama ukazuje na vapnenu stijenu specifičnog otpora preko 10.000 om. m, dok najdonji dio ima tendenciju veoma jakog smanjivanja prividnog specifičnog otpora (vjerojatno i ispod 100 om. m). Na taj način može se geoelektričnim sondiranjem vrlo lako i brzo ispitati i ograničiti po prostranstvu i približno i po dubini prodor morske vode u kopno. Takvi prodori mogu biti daleko u kopno i na nekim mjestima i u velikoj dubini (J. Baturić, 1961)). Geoelektrična ispitivanja kod Primoštena pokazala su da je more prodrlo u kopno i na daljini od oko 2 km od obale (S. Kovačević & Z. Krulc, 1963). Geoelektričnim sondiranjem na području strukture Rovinj praćena je jasno izražena niskootporna geoelektrična sredina; ova je sredina blizu mora posve plitko, a od mora u unutrašnjost zaliježe u sve veću dubinu i prati se kontinuirano na cijelom profilu geoelektričnih sonda. Kompleksna interpretacija podataka pokazuje, da niskootporna geoelektrična sredina ne može odgovarati nabušanim klastičnim sedimentima, pošto oni leže znatno dublje od geoelektrične sredine, već da odgovara zoni prodora morske vode u kopno. Ovaj prodor iznosi prema poda-



Sl. 5.

cima geoelektrike preko 6 km, a uvjetovan je povoljnim položajem geoloških granica, pošto one sijeku morsku obalu (S. K o v a č e v i ć, 1963b).

Sl. 6. prikazuje zanimljiv slučaj prodora morske vode u kopno odnosno kako se to odrazuje u geoelektričnim mjerenjima. Radi se o geoelektričnom profilu na o. Lastovo od morske obale kod Ublija dolinom do u Nizno polje. Na sl. 6 (u prilogu) prikazani su dijagrami geoelektričnog sondiranja, a dolje približni dubinski položaji prodora morske vode u stijeni u podzemlju. Jedino se tako može tumačiti jako smanjivanje prividnog specifičnog otpora u izmjerenim dijagramima. To je smanjivanje najjače uz morsku obalu, gdje pada izmjereni prividni specifični otpor na vrijednost oko 0,2 om. m, ali je, idući od obale u unutrašnjost, sve slabije. Dijagrami sondiranja 65-59-55-52 pokazuju izraziti nagib u lijevo, u niže vrijednosti otpora, te malu dubinu tačke pregiba krivulja otpora. U krivulji otpora geoelektrične sonde 66, koja je samo 50 m udaljena od sonde 52, nalazi se tačka pregiba krivulje otpora prilično dublje. Radi toga može se između geoelektričnih sonda 52 i 66 utvrditi diskontinuitet u geoelektričnim odnosima. Dijagrami sondiranja 66-71-74 istog su tipa i razlikuju se od slijedećeg niza dijagrama 79-83-88 na Niznom polju. Krivulja otpora 68 jako se razlikuje od krivulja svog niza samo u gornjem dijelu po veoma visokoj vrijednosti specifičnog otpora plićeg dijela podzemlja, dok ima u donjem dijelu istu karakteristiku svog niza. Između sonda 74 i 79 opet se može utvrditi diskontinuitet u geoelektričnim odnosima. Od dijagrama sondiranja 79 dalje u unutrašnjost otoka ne zapaža se više smanjivanje prividnog specifičnog otpora, koje je već u »graničnom« dijagramu 74 dosta slabo izraženo. Radi zornijeg prikazivanja promjena u geoelektričnim odnosima spojene su međusobno tačke pregiba krivulja otpora; pošto krivulje otpora nisu nacrtane prema stvarnim razmacima (u odgovarajućem mjerilu), ima šrafirana spojna linija uvjetni, relativni, značaj. Razlike u izmjerenim električnim odnosima svakako su odraz određenih geoloških, tektonskih i hidroloških odnosa u podzemlju. Kao najvjerojatnije prvo približenje stvarnim odnosima u prirodi prikazan je u Sl. 6 dolje približni dubinski položaj prodora morske vode u podzemlje. Diskontinuiteti u geoelektričnim odnosima odgovaraju vjerojatno po svojoj hidrološkoj funkciji nekoj pregradi u smislu tumačenja J. B a t u r i ć a (1953, 1961). Posebno je zanimljiv dijagram geoelektričnog sondiranja 59 razmjerno blizu obale, jer se u dubini od oko 15 m zapaža mali porast prividnog specifičnog otpora, što se ima svesti na pojavu kompaktne stijene, bez morske vode u pukotinama i šupljinama. I nakon bušenja, što je slijedilo geološkim i geofizičkim radovima, ostali su neki hidrogeološki problemi zapadnog dijela otoka Lastovo nerazjašnjeni. Postignuti rezultati vodoistražnih radova na zapadnom dijelu otoka Lastovo daju malo izgleda za neki veći uspjeh u pogledu eksploatacije podzemne vode (R. S a r n a v k a, 1958). Ma da je dokazano postojanje podzemne vode, ustanovljene količine su male; postignuti rezultati su upravo obrnuti od pretpostavljenih, pošto se obzirom na prostranstvo, veliko slivno područje, povoljne morfološke oblike, geološku građu i hidrološke uvjete očekivalo, da će to područje biti najpovoljnije na otoku Lastovo za uspjeh vodoistražnih radova (R. S a r n a v k a, 1958).

Smatra se, da je takav prodor morske vode u podzemlje odnosno nisko-otporna geoelektrična sredina prema ranije iznijetom primjeru identična s granicom slatke i slane vode. To je sigurno tako u onom slučaju, kada je ta granica utvrđena ispod nivoa mora (npr. kod GS 71 = Np-3, Lastovo, sl. 6; bušotina je duboka 40 m i dno se nalazi na koti - 12 m, ali se nije našlo na slanu vodu). Zbog razlike u specifičnoj težini između slane i slatke vode između njih postoji hidrostatska ravnoteža. Položaj granične zone između slane i slatke vode ispod nivoa mora ukazuje na postojanje slatke vode, koja pliva na slanoj u vidu leće. Svakako se radi o izvjesnoj prelaznoj zoni između slatke i slane vode, a ne o »čistom« kontaktu. Iako ima miješanja voda, ova prelazna zona se može zanemariti u odnosu na ostale dvije geoelektrične sredine, koje se međusobno jako razlikuju po specifičnim otporima, naime stijena saturirana slanom vodom i stijena saturirana slatkom vodom. U blizini obale, gdje će biti stupac slatke vode u stijeni razmjerno malen i gdje ima uslijed uticaja plime i oseke jačeg miješanja slatke i slane vode, bit će svakako uticaj prelazne zone kod određivanja dubine granice slana - slatka voda pomoću geoelektričnog sondiranja veći, nego dalje u unutrašnjosti. Premda ima premalo korelacionih podataka i ne mogu se dati nikakvi broječni podaci, dosadašnja geoelektrična ispitivanja ukazuju na zadovoljavajuću tačnost određivanja dubine granice između slane i slatke vode u raspućanim karbonatnim stijenama u našem kršu.

F. M o s e t t i (1961) navodi, da se je interpretacija dijagrama geoelektričnog sondiranja u okolici Trsta mogla dobro približiti uobičajenim shemama za »slojevita« područja i utvrđeno je izvrsno podudaranje dubina različitih horizonata izdvojenih geoelektrički s rezultatima direktnih istraživanja. Jasna granica između dvije sredine različitog specifičnog otpora od kojih gornja odgovara pretežno impregnaciji sa slatkom vodom, a donja odgovara pretežno stijeni saturiranoj sa slanom vodom, podudara se s tokom jedne izohaline. Ako je formacija u prosjeku homogena propusna, geoelektrična granica odgovara u čitavoj formaciji određenoj izohalini (F. M o s e t t i, 1961).

Radi potpunosti ovog prikaza treba spomenuti ovdje rezultate kompleksnih hidrogeoloških ispitivanja u dolini Marina - Stupin kod Trogira, što su ih izvele ekipe Zavoda za geološka i geofizička istraživanja iz Beograda. Geoelektričnim sondiranjem nije se mogla utvrditi jasna granica između slane i slatke vode, ali je sigurno ustanovljeno, da slatka voda pliva na slanoj. Konstatirano je, da se okršena vapnenačka masa nalazi duboko ispod morskog nivoa. Geofizičkim ispitivanjima izdvojeni su dijelovi terena izgrađeni od relativno kompaktnih i relativno okršenih vapnenaca. Relativno kompaktna masa vapnenca kod Marine čini relativan zagat slanoj vodi (nepropusna barijera u smislu tumačenja I. B a t u r i ć-a, 1953, 1961) i otežava prodiranje bočatne vode u dolinu odnosno u unutrašnjost od obale (M. J e v r e m o v i ć & M. M l a d e n o v i ć, 1959).

4.3. Geoelektrično profiliranje

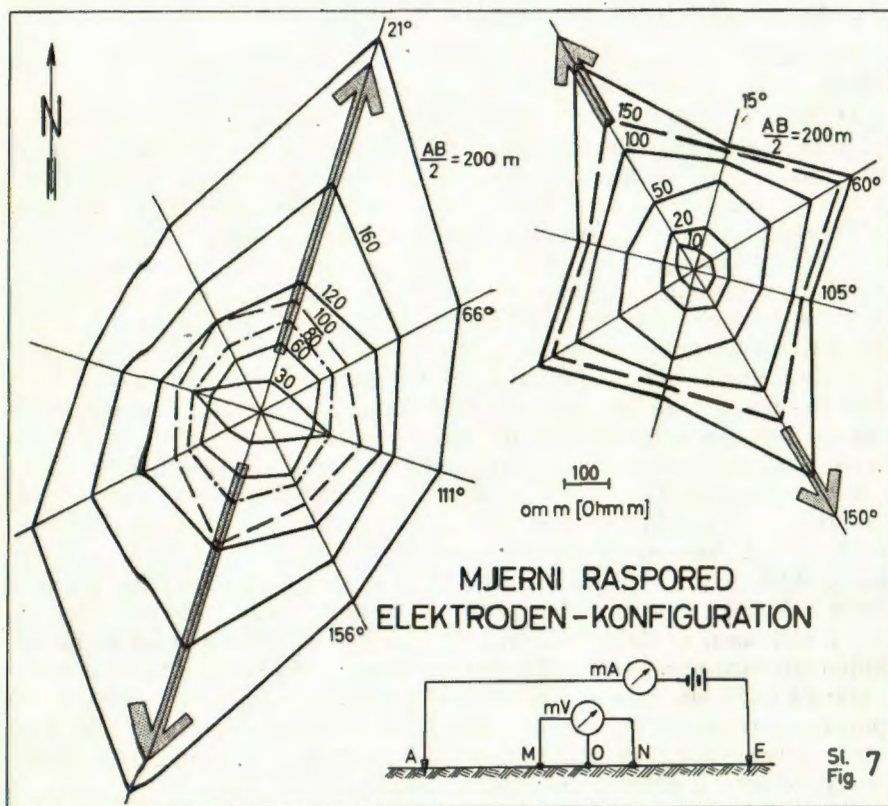
Kod geoelektričnog profiliranja ispituju se promjene prividnog specifičnog otpora podzemlja u horizontalnom smjeru. Zbog stalnog razmaka elektroda (za 1, 2 ili više dubinskih zahvata) ispituje se podzemlje u istoj (ili više istih) dubina, pa je geoelektrično profiliranje u izvjesnoj mjeri istovjetno s geološkim kartiranjem. Zbog stalnog pomicanja svih elektroda znatno je veći utjecaj površinskih nehomogenosti, nego kod drugih geoelektričnih metoda. Zato se dobiju osobito veliki »skokovi« u dijagramima profiliranja na rubovima krških polja, tj. na dodiru pokrovnih naslaga sa stijenama na rubovima. Kod profiliranja nad izdancima vapnenih stijena nakon eliminacije anomalija od površinskih nehomogenosti mogu se dobiti iz karata otpora veoma dragocjeni orijentacioni podaci o relativnom stupnju raspucanosti stijena, o zonama tektonskih poremećaja i o većim promjenama u građi podzemlja u horizontalnom smjeru.

Geoelektrična profiliranja primijenjuju se u našem kršu za sada samo na inženjersko-geološkim i hidrogeološkim zadacima.

4.4. Geoelektrično kružno sondiranje

Filtracija podzemnih voda u karbonatnim stijenama općenito, a kretanje podzemne vode u vidu vodenih tokova posebno, vrši se u pukotinjskim sistemima. Zato je od posebnog interesa kod inženjersko-geoloških i hidrogeoloških zadataka poznavanje smjera prevladavajuće raspucanosti stijena. Geološkim snimanjem pukotina dobiju se dragocjeni podaci o raspucanosti stijena u površinskim izdancima, a posebnim geoelektričnim mjernim postupkom – kružnim sondiranjem – dobiju se podaci o pravcu raspucanosti karbonatnih stijena i po dubini. Ovim se postupkom utvrđuje električna anizotropija podzemlja, tj. nejednolika električna vodljivost u različitim pravcima.

Istu uvjetuje raznolikost smjera pružanja raspucane zone u čvrstoj stijeni ili škriljavosti u nekim stijenama. Specifični otpor tih zona odnosno takvih stijena niži je, u pravilu, u pravcu raspucanosti i škriljavosti nego okomito na taj pravac. Prema tzv. paradoksu anizotropije bit će prividni specifični otpor anizotropne sredine izmjeren s elektrodnim rasporedom orijentiranim okomito na raspucanost niži nego kod mjerenja u pravcu raspucanosti (J. V. Jakubovskii & L. L. Ljahov, 1956). U slučaju anizotropne sredine u podzemlju dijagrami kružnog sondiranja imaju oblik elipsi slične figure, čija je duža os orijentirana u pravcu najviših vrijednosti prividnog specifičnog otpora. Veličina omjera najveće i najmanje vrijednosti prividnog specifičnog otpora za raspucane stijene karakterizira stupanj njihove raspucanosti. Prema promjeni tog koeficijenta eliptičnosti (raspucanosti) s promjenom veličine razmaka strujnih elektroda može se suditi o pravcu raspucanosti po dubini i njezinom intenzitetu.



Sl. 7.

Na sl. 7 prikazana su dva dijagrama kružnog sondiranja sa područja našeg krša. Prvi (na sl. 7 lijevo) pokazuje s iznimkom prvog mjernog zahvata $AB/2 = 30$ m jasno izduženje dijagrama u smjeru SSW-NNE, što odgovara prevladavajućem pravcu raspucanosti vapnenih stijena prema gornjim postavkama. Dijagram ukazuje na opću tendenciju porasta raspucanosti s povećanjem dubine. Utvrđeni pravac podudara se s općim smjerom kretanja podzemnih voda na tom području. Drugi dijagram pokazuje za manje dubine ispitivanja jedan, a za veće dubine drugi smjer izduženja. Interesantniji je onaj za veće dubine, jer se odnosi na prevladavajući smjer raspucanosti stjenovite podloge ispod kvartarnog pokrivača.

Za prosuđivanje uspješnosti geoelektričnog utvrđivanja pravca prevladavajuće raspucanosti vapnenih stijena u našem kršu nema još dovoljno podataka. Izvršena ispitivanja pokazuju podudaranje s geološki utvrđenim pravcima pukotina na istim područjima.

4.5. Metoda električki nabijenog tijela

Od naročito značenja kod inženjersko-geoloških i hidrogeoloških zadataka jeste utvrđivanje i praćenje podzemnih tokova.

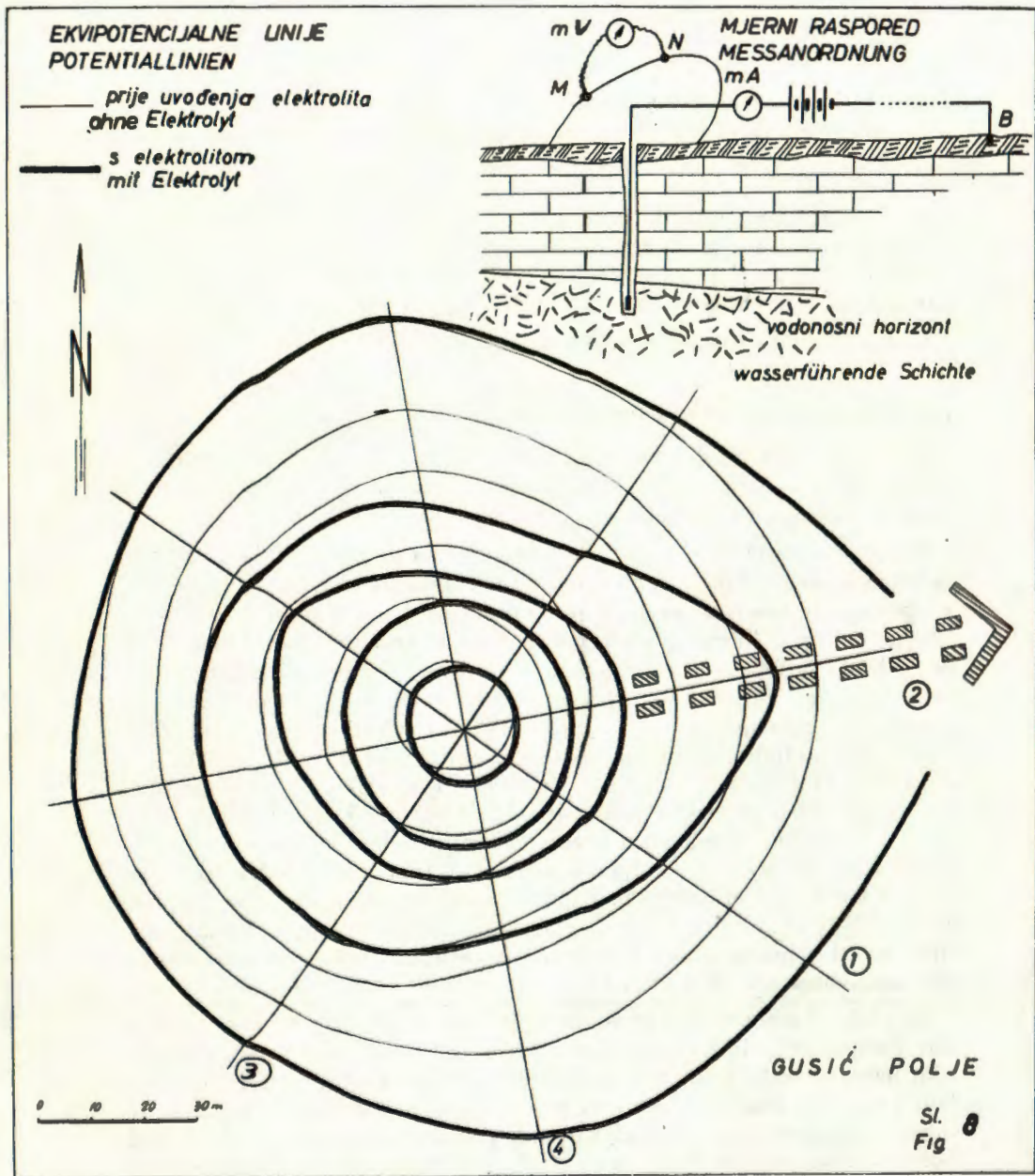
Do sada se je za direktno utvrđivanje podzemnih tokova u našem kršu primjenjivala elektromagnetska »TURAM«-metoda. U povoljnim uvjetima mogu se dobiti tom metodom dobri rezultati, samo je njezin domet u dubinu razmjerno malen. Radi toga je za određivanje pravca daljnjeg podzemnog toka voda, koje se gube u ponorima, primijenjena metoda električki nabijenog tijela (nazvana također metodom elektrode u masi ili tačnije: metoda umjetnog potencijala s elektrodom u masi). Ova se geoelektrična metoda mnogo primijenjuje za određivanje pravca i brzine kretanja podzemne vode pomoću samo jedne bušotine ili bunara.

U bušotinu ili bunar izbušen do vodonosnog horizonta, odnosno u našem slučaju u vodu koja ulazi u podzemlje, stavi se otopina soli. Podzemna voda u smjeru svog kretanja nosi sa sobom elektrolit, čime se u podzemlju obrazuje područje dobre vodljivosti električne struje – zona elektrolita. U elektrolit u bušotini, bunaru ili ponoru stavi se jedna strujna elektroda, a druga se smjesti vrlo daleko od prve. Uključenjem struje obrazuje se oko bušotine odnosno ponora električno polje, kojeg oblik ovisi o geološkoj građi podzemlja, utjecaju nabijene zacičljene bušotine (ili stupca slane vode u bušotini) i o zoni širenja elektrolita u vodonosnom sloju. Veličina zone elektrolita povećava se uz neprekidno ubacivanje otopine soli u pravcu širenja toka elektrolita. Na odgovarajući način mijenja se i električno polje oko bušotine ili ponora. Na površini terena utvrđuju se ove promjene električnog polja u toku vremena. Ekvipotencijalne se linije izdužuju u pravcu pružanja zone dobre vodljivosti, tj. u pravcu podzemnog toka.

Na sl. 8 prikazan je jedan praktični primjer praćenja vodenog toka, koji nestaje u ponoru na jednom krškom polju. Radi korelacije i sigurnosti ispitivanja izvršeno je najprije utvrđivanje ekvipotencijalnih linija bez puštanja vode u podzemlje; ekvipotencijalne linije imaju oblik višemanje koncentričnih kružnica, što ukazuje na normalno električno polje. Nakon puštanja elektrolita u podzemlje izmjerene ekvipotencijalne linije jasno se izdužuju u smjeru ENE, tj. u pravcu podzemnog toka vode. Mjerenja su trajala dva radna ekvipotencijalna, a potrošeno je oko 400 kg industrijske soli.

4.6. Rezistivimetrijska ispitivanja

Za utvrđivanje podzemnih vodnih komunikacija na manjim područjima mogu veoma dobro poslužiti površinska rezistivimetrijska ispitivanja pomoću električnih mostova (obično *Wheatstonov* most). Osjetljivost mjernih instrumenata može se izabrati tako, da se može promjena električnog otpora jasno zapaziti još kod koncentracije elektrolita u vodi od 1/100 g/litri. Kao elektrolit upotrebljava se kuhinjska (ili tzv. industrijska) sol. Kao elektrode se najsvrsishodnije upotrebljavaju ploče od bakarnog lima; da se izbjegnu polarizacione pojave na elektrodama, mijenja se u toku ispitivanja polaritet strujnog kruga.



Sl. 8.

Zanimljiv praktični primjer opisuje A. Schouppé (1952) sa područja austrijskog krša. Trebalo je utvrditi podzemnu vezu između potoka, koji nestaje u sistemu špilje, s tri izvora koji dolaze iz odgovarajućeg hidrografskog područja. Rezistivimetar je bio Wheatstonov most s mA-metrom kao mjernim instrumentom; upotrebljena je istosmjerna struja. Odmah nakon primijećenog početka pada električnog otpora izvršilo se 10-minutno uzimanje uzoraka vode. Pokazalo se, da je u isto vrijeme porasao sadržaj Cl-iona, tj. da je očekivana sol stvarno u to vrijeme počela polako proticati. Do promjene električnog otpora došlo je samo na jednom mjestu, čime je jednoznačno dokazano, da je samo jedan izvor nastavak u špilji nestalog potoka (A. Schouppé, 1952).

Kod nas se takva ispitivanja još nisu izvršila.

4.7. Električna mjerenja u bušotinama

Kod rješavanja nekih hidrogeoloških i inženjersko-geoloških zadataka sve se više u svijetu primjenjuju rezistivimetrijska i neka elektrokarotажna ispitivanja u bušotinama.

Rezistivimetrijskim ispitivanjem u bušotinama mogu se i u područjima okršenih stijena lokalizirati po dubini dotoci podzemnih voda u bušotinu, a u povoljnim uvjetima moguće je do promjeni koncentracije elektrolita odrediti i brzine filtracije podzemnih voda u različitim dubinama. Kod većeg broja bušotina daje primjena rezistivimetrijskih ispitivanja punu i diferenciranu karakteristiku kretanja podzemnih voda u okršenim stijenama, a korelacijom odgovarajućih podataka dobije se brzo predodžba o tom važnom hidrogeološkom faktoru za veliko područje (A. A. Ogilvi, 1962a; Ogilvi & Nečeva, 1962). Kod velikog broja bušotina na većem području veoma je svrsishodna kombinacija geofizičkih i hidroloških metoda određivanja brzine filtracije vode u stijenama: na nekoliko bušotina izvrši se crpljenje, a na svim rezistivimetrijska ispitivanja; na korelacionim bušotinama izrade se korelacioni dijagrami (napose za specifičnu izdašnost). Za sve ostale bušotine može se specifična izdašnost odrediti prema brzini filtracije, utvrđenoj pomoću rezistivimetrijskih ispitivanja (A. M. Gorelik i dr., 1961).

Za *elektrokarotажna mjerenja* treba primijetiti, da ona nisu kod nas u dovoljnoj mjeri primjenjivana pri istraživanju podzemnih voda. Pomoću njih mogu se vrlo jasno, tačno i sigurno pratiti pojedini tanji slojevi, koji mogu biti značajni i korisni kod hidrogeološkog istraživanja, a ne mogu se prepoznati kod geoelektričnih površinskih mjerenja ili se kod bušenja, zbog male debljine, brzo prođu i ne zapaze. Kod hidrogeoloških ispitivanja čvrstih stijena može pružiti elektrokarotажa veliku pomoć kod utvrđivanja šupljina i pukotina.

5. PRIMJENA GEOELEKTRIČNIH ISPITIVANJA U DINARSKOM KRŠU

Za bolju ilustraciju mogućnosti i postignutih rezultata geoelektričnih ispitivanja u našem kršu prikazano je nekoliko praktičnih primjera sa područja primjene geoelektrike u hidrogeologiji, inženjerskoj geologiji i naftnoj geologiji.

5.1. Primjerza na hidrogeološkim zadacima

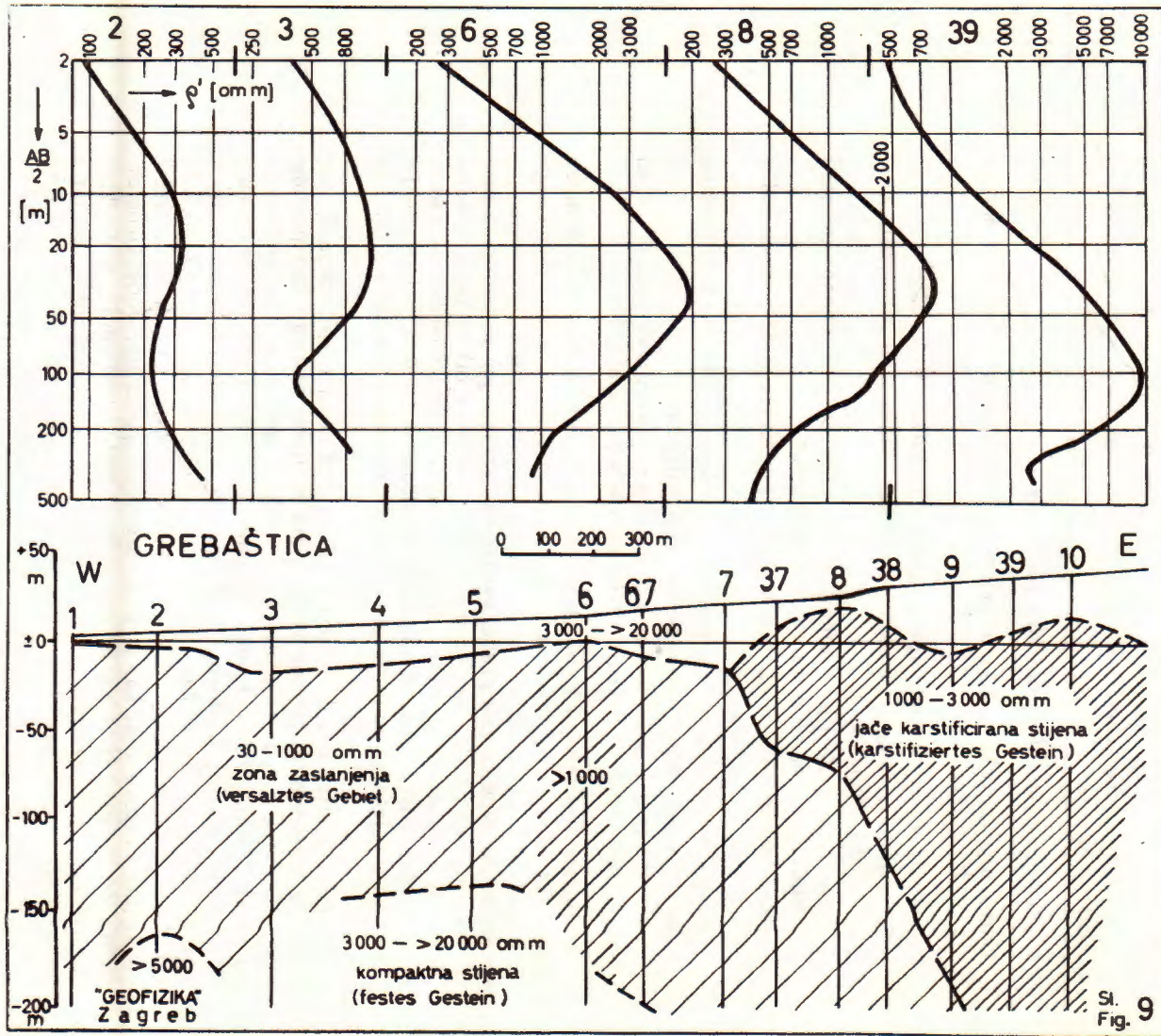
Osnovni i najčešći zadaci primjene geoelektrike u hidrologiji odnose se na vodoistrage; to su:

- određivanje prevladavajućeg pravca raspucanosti stijena,
- utvrđivanje intenziteta okršivanja (karstifikacije) i izdvajanje zona različitih raspucanosti,
- određivanje debljine, kontinuiteta, prostiranja i vodopropusnosti glinovito-pjeskovitih prokrovnih naslaga,
- određivanje pravca i brzine kretanja podzemne vode pomoću jedne bušotine ili bunara,
- pronalaženje i praćenje podzemnih tokova ograničenih dimenzija,
- utvrđivanje nepropusnih podzemnih barijera,
- utvrđivanje granice slatka-slana voda u priobalnom području i na otocima odnosno utjecaja morske vode u podzemlju kopna.

Rezultati dosadašnjih kompleksnih vodoistražnih radova u kršu mogu se smatrati zadovoljavajućima i ohrabrujućima obzirom na stečena velika iskustva, koja uvjetuju sve svrsishodnija, racionalnija i sigurnija rješavanja. Ne čine se više grube, početničke greške, jer je pionirska faza tih radova već prošla. Kao veoma važan, čak bitan faktor uspjeha kompleksnih vodoistražnih radova javlja se sistematski i koordiniran rad te kompleksno povezivanje rezultata svih istražnih metoda. To je drugim riječima najtješnja suradnja geologa, hidrogeologa, geofizičara i hidrologa.

Kod jačeg crpljenja došlo je na nekim područjima ispitivanja do povećanja saliniteta podzemne vode. Zato se može smatrati kao posebno važan zadatak utvrđivanje utjecaja (prodora) morske vode u podzemlju od obale u unutrašnjost kopna (ili otoka). Tri primjera već su opisana (Primošten, Rovinj, Lastovo). U slijedećem se opisuje još jedan primjer.

Jači priobalni izvori kao i morfološke te geološko-hidrološke prilike zaleđa uvala Grebašnice južno od Šibenika ukazuju na postojanje jačih podzemnih tokova vode kao i većih rezervoara podzemne vode. Geoelektrična ispitivanja izvršena su nakon geoloških istraživanja, a direktne istrage bušenjem izvršene su na geoelektrički određenim interesantnim i povoljnim područjima. Prvo su razdvojene zone s vapnencima od zone s flišnim naslagama na površini. U zoni vapnenaca utvrđen je dubok prodor mora u podzemlju uvale. Najdalje je morska voda prodrla u kopno duž osi uvale. U ovoj zoni treba očekivati, da je podzemna voda više ili manje zaslanjena. Izvan dosega morske vode u stijenama u kop-



nu utvrđena su dva područja, u kojima treba očekivati jaču okršenost i slatku vodu u pukotinama (S. K o v a č e v i ć, 1962). Sl. 9 prikazuje nekoliko tipičnih dijagrama geoelektričnog sondiranja duž uvale i dubinske odnose geoelektričnih sredina. Podaci istražnih bušenja potvrđuju rezultate geoelektričnih ispitivanja. Utvrđene su izvjesne količine slatke vode, a na jednom mjestu veći salinitet podzemne vode, kako se to i pretpostavilo.

5.2. Primjena na inženjersko-geološkim zadacima

Osnovni i najčešći zadaci primjene geoelektrike u inženjerskoj geologiji u kršu jesu:

- utvrđivanje intenziteta i dubine okršivanja vapnenih stijena i izdvajanje zona različite raspucanosti odnosno kompaktnosti zbog prosuđivanja mehaničkih kvaliteta stijena;
- određivanje debljina i dubina različitih geoloških vodiča (stijena), kada se uz vapnene javljaju i druge stijene, pa je njihovo razdvajanje moguće zbog razlika u specifičnim otporima;
- utvrđivanje reljefa stjenovite podloge krških polja;
- određivanje debljine, dubine i vrste različitih materijala unutar mladih naslaga u krškim depresijama (poljima) te praćenje njihovog kontinuiteta;
- određivanje prevladavajućeg pravca raspucanosti vapnenih stijena;
- utvrđivanje i ispitivanje hidrogeoloških karakteristika podzemne građe na inženjersko-geološkim objektima i to: određivanje pravca i brzine kretanja podzemne vode pomoću jedne bušotine, bunara ili ponora; traženje i praćenje podzemnih tokova ograničenih dimenzija; ispitivanje (ocjenjivanje) vodopropusnosti stijena;
- utvrđivanje i praćenje rasjeda i strmih geoloških granica (kontaktata).

Za neka područja postoji već izvjestan korelacioni materijal, pa se o funkcionalnoj vezi između specifičnog otpora, raspucanosti i vodopropusnosti karbonatnih stijena može za sada reći slijedeće. Iznad nivoa podzemne vode ukazuju utvrđeni visoki specifični otpori bilo na jače raspucanu stijenu bez zapunjenja pukotina – stijena je vodopropusna, bilo na kompaktnu i vodonepropusnu stijenu. Niži specifični otpori stijena iznad nivoa podzemne vode ukazuju na prisustvo zapunjenja (glina, crvenica, lapor) u raspucanoj stijeni, ali stijena može biti sasvim vodonepropusna. Za stijene ispod nivoa podzemne vode dobivaju se pouzdani i jednoznačni podaci. Viši specifični otpori odgovaraju većoj kompaktnosti i manjoj vodopropusnosti vapnenih stijena. Niski specifični otpori pokazuju pak, da je stijena raspucana, ali su pukotine u njoj zapunjene glinom, crvenicom, laporom i vodom, te je stijena vodonepropusna.

Usporedba rezultata geoelektričnog sondiranja s podacima ispitivanja VDP-a i geološkim profilom bušotina na jednom krškom polju pokazuje,

da u većini slučajeva geoelektrički kompaktna stijena (povišeni specifični otpor) doista odgovara kompaktnijoj, manje vodopropusnoj stijeni. Stvarni rezultati mogu međutim biti i povoljniji, nego što to izlazi prema podacima geoelektrike, tj. manje vodopropusne stijene leže i pliće, no što je utvrđeno geoelektričnim sondiranjem. Objašnjenje tome daje pretpostavka o zapunjenju pukotina glinom ili crvenicom, što čini vapnenu stijenu manje vodopropusnom, a istodobno snižava specifični otpor stijene (S. Kovačević, 1964).

Sl. 10 (u prilogu) prikazuje dio geološkog profila (presjeka) tla na jednom krškom polju. Geoelektričnim sondiranjem uz vezu na mehaničke bušotine bilo je moguće prilično tačno izdvojiti sedrasti pijesak od glina i lapora, a sve te različite materijale pokrova od stjenovite (vapnene) podloge. Prema veličini specifičnog otpora glinovitog sloja mogao se u izvjesnoj mjeri prosuđivati i karakter i sastav glina (masna, mršava, sa šljunkom ili pijeskom).

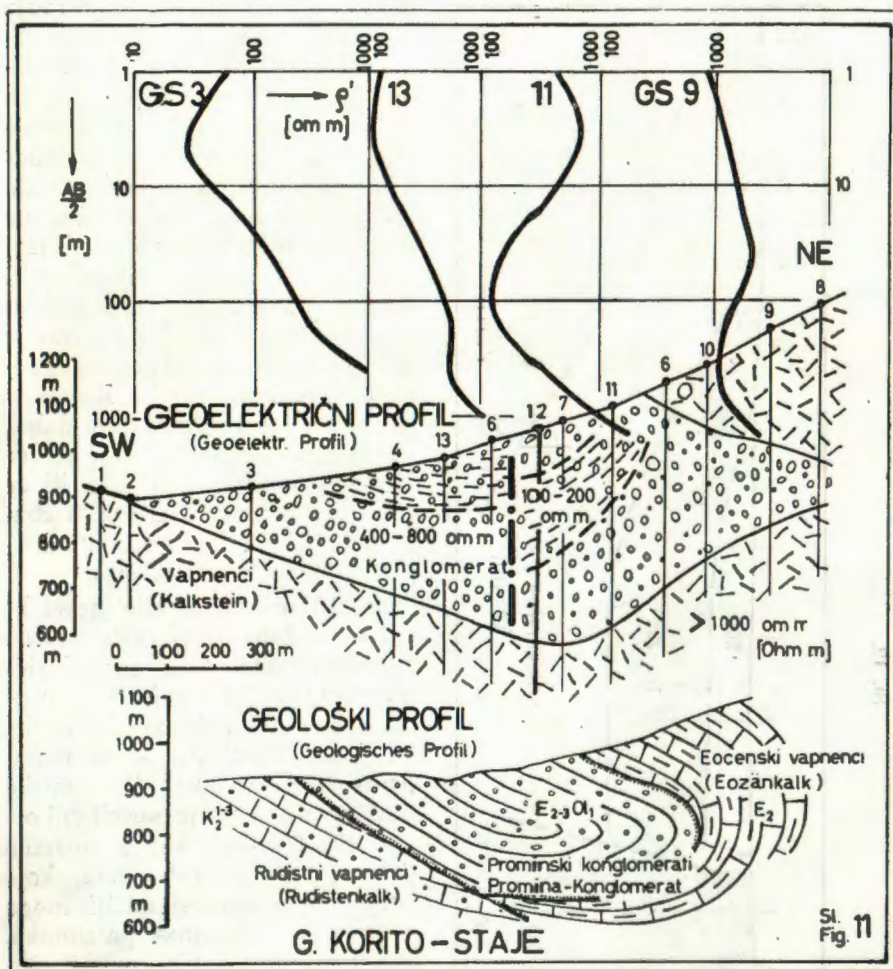
Sl. 11 prikazuje određivanje približnih dimenzija polegle sinklinale, čija je jezgra izgrađena od prominskih konglomerata. Ovi su konglomerati dobro uslojeni vapneni konglomerati s valučicama najčešće vezanim s vapnenim, a rjeđe laporovitim vezivom. Unutar konglomerata mjestimice dolaze tanki proslojci lapora i laporovitog vapnenca. Geoelektrična ispitivanja pokazala su, da imaju alveolinsko-numulitni i rudistni vapneni oko konglomeratne sinklinale specifične otvore preko 1000 om. m, dok je specifični otpor prominskih konglomerata dosta niži od 1000 om. m (D. Sviben & Z. Krulc, 1964). Radi toga bilo je moguće geoelektrički izvršiti odjeljivanje tih dviju vrsta stijena. Unutar prominskih konglomerata izdvojene su dvije geoelektrične sredine još nižeg specifičnog otpora i jedan diskontinuitet u geoelektričnim odnosima. Niže vrijednosti električnog otpora odgovaraju proslojcima lapora, a diskontinuitet najvjerojatnije tektonskom poremećenju. Za usporedbu prikazan je na Sl. 11 i prognozni geološki profil prema B. Raljeviću i L. Bojaniću (1963).

5.3. Primjena na naftno-geološkim zadacima

Kako je već spomenuto, geofizička ispitivanja kod istraživanja nafte u vanjskoj zoni Dinarida izvode se intenzivnije tek posljednjih nekoliko godina i imaju za sada uglavnom još superregionalni i regionalni karakter.

Obzirom na tektonsku složenost Dinarida i veoma nepovoljne i specifične uvjete za ispitivanja primjenom geofizičkih metoda bilo je nužno, da izvjestan vremenski period protekne u traženju adekvatne i svrsishodne metodike za njihovo izvođenje (T. Dračašević, 1961).

Danas se geofizičke metode uspješno kompleksno primjenjuju za rješavanje raznovrsnih naftno-geoloških problema. Napredak u tehnici i metodici izvođenja geofizičkih ispitivanja otvara široku perspektivu za još intenzivnije korištenje geofizičkih metoda u naftno-istraživačkoj djelatnosti (T. Dračašević, 1961).

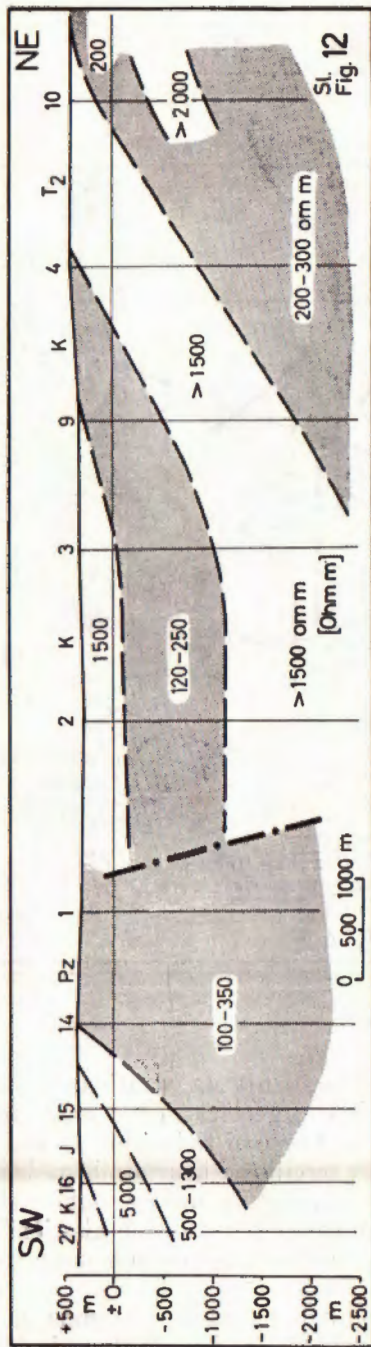


Sl. 11.

Većina dosadašnjih geoelektričnih ispitivanja na istraživanju nafte u Dinaridima izvršena je metodom dubokog geoelektričnog sondiranja u vidu kraćih, dugih i jako dugih profila. Osnovni zadaci bili su kod toga utvrđivanje dubine flišnih sinklinala i tercijarno-kvartarnih naslaga na krškim poljima, određivanje elemenata (položaja, nagiba, dubine skoka) velikih rasjeda, ispitivanje navlaka, praćenje paleozojskih klastičnih naslaga od i između njihovih izdanaka, ispitivanja pojedinih jasno izraženih struktura.

Radi velikih debljina naslaga geoloških formacija potrebna su vrlo duboka geoelektrična sondiranja. Najdublja sondiranja do sada bila su izvedena do dubine sondiranja $AB/2 = 12$ km, što dokazuje, da su vrlo

Sl. 12.



duboka geoelektrična sondiranja moguća i usprkos nepovoljnim topografskim prilikama u Dinaridima. Za lakše savladivanje tih ili još većih dubina spitivanja treba i dalje usavršavati organizaciono-tehničke probleme terenskog rada te razmotriti mogućnosti primjene dipolnog sondiranja. Već u bližoj budućnosti trebat će pak posvetiti posebnu pažnju osnovnim problemima kvantitativne interpretacije mjernih podataka dubokog geoelektričnog sondiranja. Korelacioni materijal dat će podaci dubokog istražnog bušenja, koje je već izvršeno, nalazi se u toku ili će još biti izvršeno. Kod toga trebat će dakako koristiti i rezultate drugih geofizičkih ispitivanja.

Sl. 12 prikazuje dio geoelektričnog dubinskog profila istočno od Slunja. Dubokim geoelektričnim sondiranjem trebalo je pratiti protezanje paleozojske serije, čiji izdanci javljaju se na maloj površini na terenu. Paleozojske naslage imaju ovdje specifični otpor 200-600 om. m, a izuzetno dobivaju se u dubinama, koje prema geološkoj situaciji mogu odgovarati dubinama paleozoika, specifični otpori 100 om. i više, što može označavati bilo lokalni karbonatni razvoj bilo lokalne pojave gustih kvarcnih pješčenjaka unutar paleozojske serije klastičnih sedimenata. Geoelektrične sonde 2 i 3 izgleda da nisu mjerene dovoljno duboko, da bi se na njima ispoljio niži specifični otpor paleozojske serije, koja je ovdje dosta duboko (S. Kovačević 1963b). Pojava paleozoika ograničena je sa NE-strane vrlo dubokim i strmim rasjedom, dok je za SW-stranu bolje govo-

riti o strmom kontaktu paleozoika s mlađim sedimentima. Između geoelektričnih sonda 4 i 10 nalazi se na površini trijaski dolomit, pa geoelektrična sredina specifičnog otpora preko 100 om. m s općim nagibom prema SW odgovara trijaskom dolomitu. Teško je, međutim, identificirati nisko-otpornu sredinu na sondama 9-3-2 na dubini ispod oko 300 m. Po veličini specifičnog otpora to bi mogli biti klastični sedimenti, ali njihova geološka identifikacija u dubljim dijelovima oostaje za sada otvoreno pitanje. Na površini terena između sonda 9 i 4 nalaze se klastične naslage kredne starosti. Opća karakteristika geoelektričnih odnosa na prikazanom dijelu profila su padovi geoelektričnih granica prema jugozapadu (S. K o v a č e v i ć, 1963b).

6. ZAKLJUČAK

Posljednjih nekoliko godina stalnog povećavanja obima geoelektričnih ispitivanja može se smatrati drugom fazom u razvoju praktične geoelektrike u Hrvatskoj. Na području Dinarskog krša rješavaju se sve raznovrsniji zadaci hidrogeološkog, inženjersko-geološkog i naftno-geološkog karaktera. Uvršćuje se već ranije zacrtana osnovna metodika rada, razjašnjava se mjesto i odnos geoelektrike prema drugim metodama u sklopu kompleksnih istraživanja u kršu, usavršava se tehnika izvođenja »klastičnih« postupaka geoelektrike, uvode se i uspješno u praksi primjenjuju novi mjerni postupci, unapređuju se metode interpretacije mjernih podataka, davajući kod toga težište na nužnu tijesnu povezanost geofizičke i geološke interpretacije geoelektričnih rezultata.

Opći uvjet za uspješnu primjenu geoelektričnih metoda ispitivanja tla – postojanje dovoljno velike razlike u specifičnom otporu stijena ili sredina – postoji u Dinarskom kršu. Na nekim područjima javljaju se stijene različitog petrografskog sastava, na drugim mijenjaju se djelovanjem geoloških sila fizikalna svojstva stijena ili uvjeti njihovog zalijeganja. Razlike u specifičnom otporu sredina su najveće, kada se radi o stijenama jako različitog petrografskog sastava ili o istovrsnoj stijeni u blizini mora, u kojoj su pukotine i šupljine jednim dijelom ispunjene slanom vodom, a drugim dijelom ispunjene slatkom vodom ili štaviše nezapunjene. Geoelektrički se mogu jasno registrirati one raspucane stijene, u kojima su pukotine ispunjene slanom (morskom) vodom. Zato se može geoelektrički vrlo lako i brzo ispitati i ograničiti po prostranstvu i približno i po dubini prodor morske vode u kopno (Sl. 2, 3, 6, 9).

Iz na sl. 1 prikazanih »srednjih krivulja« ovisnosti smjesa vapnenac + slatka voda, vapnenac + glina (ili crvenica) i vapnenac + slana (morska) voda o postotku pukotina (zapunjenja) vidi se, da je i teoretski uzeto nesigurno razlikovati zapunjenje pukotina u karbonatnoj stijeni sa slatkom vodom ili sa crvenicom. Specifični otpor vapnenih stijena može biti, međutim, ipak dragocjen orijentacioni hidrogeološki i inženjersko-geološki parametar. Promjene u utvrđenom specifičnom otporu istovrsnih stijena ukazivat će na promjene u kompaktnosti odnosno na izvjesna po-

remećenja u tim stijenama. Ponekad će te promjene električnog otpora označivati samo relativne odnose u fizikalnim svojstvima stijena, ali vezanjem geoelektričnih mjerenja na geološke bušotine i podatke ispitivanja vodopropusnosti bit će takvim tariranjem rezultata geoelektrike moguće utvrditi i neke kvantitativne odnose. U posljednje vrijeme utvrđene su npr. neke zakonitosti između veličine specifičnog otpora karbonatnih stijena i utvrđenog koeficijenta vodopropusnosti. Te zakonitosti bi trebalo bolje proučiti i obraditi statistički uz potrebna dopunska geoelektrična ispitivanja.

Za rješavanje svih vrsta zadataka u kršu najviše se primjenjuje *geoelektrično sondiranje*. Posebno se izdvajaju tzv. duboka geoelektrična sondiranja kod rješavanja naftno-geoloških zadataka s dubinom sondiranja do 12.000 m.

Kod općeg oblika dijagrama geoelektričnog sondiranja u kršu zapaža se često velika sličnost istih s dijagramima izmjerenim na nekrškim terenima (sl. 2, 3, 4). Različiti dijelovi dijagrama sondiranja odgovaraju različitim geoelektričnim sredinama. Približne granice tih različitih sredina mogu se radi sličnosti odnosno po analogiji sa slojevitim podzemljem na nekrškim terenima utvrditi Hurmelovom metodom pomoćnih tačaka (A. Ebert, 1942).

Kvantitativna interpretacija dijagrama geoelektričnog sondiranja na krškim poljima već je dobro »uhodana«. Izmjereni dijagrami imaju lijepe, »glatke« oblike. Promjene oblika dijagrama jasno i jednoznačno pokazuju promjene u litološkom sastavu pokrovnih naslaga. Krivulje prividnog specifičnog otpora imaju u svom najdonjem dijelu karakterističan oblik: stalan porast prividnog spec. otpora u vidu pravca, koji s vertikalom zatvara kut od 45° (sl. 5).

Smatra se, da je niskootporna sredina utvrđena kod ispitivanja prodora morske vode u podzemlje kopna (sl. 6, 9) identična s granicom slatke i slane vode u raspucanim stijenama. Dosadašnja istraživanja ukazuju na zadovoljavajuću tačnost određivanja dubine granice između slatke i slane vode u raspucanim karbonatnim stijenama geoelektričnim putem. F. Mosetti (1961) navodi za područje kod Trsta izvršno podudaranje dubina različitih horizonata utvrđenih geoelektrički s rezultatima direktnih istraga. Jasna granica između dvije sredine različitog specifičnog otpora, od kojih gornja odgovara pretežno impregnaciji sa slatkom vodom, a donja pretežno stijeni saturiranoj sa slanom vodom, podudara se s tokom jedne izohaline (F. Mosetti, 1961).

Kružnim sondiranjem dobiju se podaci o pravcu prevladavajuće raspucanosti karbonatnih stijena. Ovim se mjernim postupkom utvrđuje za pravo električna anizotropija podzemlja. Dosadašnja ispitivanja pokazuju podudaranje s geološki utvrđenim pravcima pukotina na istim područjima.

Za određivanje pravca daljnjeg podzemnog toka vode, koje se gube u ponorima, primjenjuje se u posljednje vrijeme *metoda električki nabijenog tijela*. Ova se geoelektrična metoda mnogo primijenjuje za određivanje pravca i brzine kretanja podzemne vode pomoću samo jedne bušotine ili bunara.

Kod rješavanja nekih hidrogeoloških i inženjersko-geoloških zadataka sve se više u svijetu primjenjuju rezistivimetrijska (površinska i u bušotinama) i neka elektrokarotazna ispitivanja u bušotinama. Kod nas ta se ispitivanja gotovo ništa ne primjenjuju, ali bi ih trebalo uvesti u normalni sklop istražnih radova u kršu.

Rezultati dosadašnjih kompleksnih vodoistražnih radova u kršu mogu se smatrati zadovoljavajućima. Kao bitan faktor uspjeha kompleksnih vodoistražnih radova javlja se sistematski i koordiniran rad te kompleksno povezivanje rezultata svih istražnih metoda. To je drugim riječima najuža suradnja geologa, hidrogeologa, geoelektričara i hidrologa. Kao posebno važan zadatak geoelektrike javlja se utvrđivanje utjecaja (prodora) morske vode u podzemlju od obale u unutrašnjost kopna ili otoka (sl. 6 i 9).

Zadaci primjene geoelektrike u inženjerskoj geologiji u kršu jako su raznovrsni. Posebno se izdvajaju ispitivanja odnosno ocjenjivanja vodopropusnosti stijena te utvrđivanja osnovnih elemenata geološko-tektonske građe podzemlja. Utvrđena je izvjesna funkcionalna veza između specifičnog otpora, raspucanosti i vodopropusnosti karbonatnih stijena i to posebno za stijene iznad odnosno ispod nivoa podzemne vode.

Osnovni zadaci geoelektrike na naftno-geološkim istragama bili su utvrđivanje dubine flišnih sinklinala i tercijarno-kvartarnih naslaga na krškim poljima, određivanje elemenata velikih rasjeda, ispitivanje navlaka, praćenje paleozojskih klastičnih naslaga i ispitivanje pojedinih jasno izraženih struktura. Izvršena su već duboka geoelektrična sondiranja do dubine $AB/2 = 12$ km. Postignuti su zadovoljavajući i ohrabrujući rezultati, napose kod utvrđivanja velikih rasjeda i praćenja paleozojskih klastičnih naslaga.

Zaključno treba naglasiti, da su mnoga istraživanja u Dinarskom kršu pokazala opravdanom primjenu geoelektričnih metoda ispitivanja. U pravilnom sklopu i odnosu s ostalim metodama istraživanja geoelektrična su ispitivanja neophodna, jer se postižu traženi podaci na najbrži način i uz ulaganje najmanjih sredstava. Geoelektrički mogu se za kratko vrijeme ispitati velika područja i dobiti dragocjeni podaci o osnovnim karakteristikama podzemne građe. Na osnovu rezultata geoelektrike nairacionalnije se planiraju mjesta za skuplje i sporije direktne istražne radove. Nakon usporedbe i kompleksne obrade podataka svih istražnih radova mogu se i sa manjim brojem bušotina dobiti traženi podaci za veliko područje ispitivanja.

Primljeno 28. 4. 1964.

»Geofizika«, Zagreb, Kupška 2

LITERATURA

- Arandelović, D. (1962): Primena geofizičkih metoda ispitivanja pri rešavanju nekih problema inženjerske geologije i hidrogeologije. Zavod za geološka i geofizička istraživanja, Posebna izdanja, 13. Beograd.
- Baturić, J. (1953): Diskusije po rezultatima geofizičkih ispitivanja na otoku Visu izvršenih 1952 god., usmena saopćenja.

- Baturić, J. (1955): Istraživanje kaverne u rudniku Raši u 1954. god. Predavanje u Društvu rud. inž. i tehn. u Zagrebu (neobjavljeno).
- Baturić, J. (1961): Neki rezultati ispitivanja cirkulacije vode u obalnom području. Drugi Jugoslavenski speleološki kongres (Split 1958), Zagreb.
- Baturić, J. (1962): Uloga geofizike u geološkim istraživanjima Hrvatske od 1951. do 1961. godine. Geološki vjesnik, 15/1, Zagreb.
- Celegin, A. (1958): Hidrografska jedinstvenost kraške oblasti. Zbornik društva inž. i tehn. u Splitu, Split.
- Dorofeev, B. V. (1957): Primenenie nomogramm ekstremalnih točeka dlja predvaritelnoi interpretacii krivyh VEZ. Sbornik statei po geofizičeskim metodam razvedki. Trudy Sverdlovskogo gorn. inst., 30, Moskva.
- Dorofeev, B. V. (1959): K voprosu interpretacii krivyh tipa H i A. Voprosy razvedočnoi geofiziki. Trudy Sverdlovskogo gorn. inst., 34, Moskva.
- Dragašević, T. (1961): Primena geofizičkih metoda pri istraživanju nafte u Dinaridima. Savetovanje o primenjenoj geofizici, Beograd.
- Ebert, A. (1942): Grundlagen zur Auswertung geoelektrischer Tiefenmessungen. Beiträge z. angewandten Geophysik, 10, Leipzig.
- Fritsch, V. (1960): Elektrische Messungen an räumlich ausgedehnten Leitern besonders in der angewandten Geoelektrik. Verl. G. Braun, Karlsruhe.
- Gorelik, A. M., Nesterenko, I. P. & Rjapolova, V. A. (1961): Ob opredelenii koeficienta filtracii vodonosnyh porod elektrometričeskimi metodami. Razvedka i ohrana nedr, 6, Moskva.
- Grund, A. (1903): Die Karsthydrographie. Studien aus Westbosnien. Geogr. Abh. v. Penck, 7/3, Leipzig.
- Grund, A. (1910): Zur Frage des Grundwassers im Karst. Mitt. Geogr. Ges., 53, H. 11/12, Wien.
- Herak, M. (1957): Geološka osnova nekih hidroloških pojava u dinarskom kršu. II kongres geologa Jugoslavije (Referati, predavanja, diskusije), Sarajevo.
- Jakubovskii, Ju. V. & Ljahov, L. L. (1959): Elektrorazvedka. Gosgeoltekhizdat, Moskva.
- Jenko, F. (1959): Hidrogeologija in vodno gospodarstvo krasa. Ljubljana.
- Jevremović, M. & Mladenović, M. (1959): Kratak prikaz kompleksnih hidrogeoloških ispitivanja u dolini Marina-Stupin kod Trogira. Zavod geol. geofiz. istr., Pos. izd., Beograd.
- Katzer, F. (1909): Karst und Karsthydrographie. Zur Kunde der Balkanhalbinsel. Sarajevo.
- Koefoed, O. (1960): A Generalized Cagniard Graph for the Interpretation of Geoelectrical Sounding Data. Geophysical Prospecting, 8/3, The Hague.
- Kovačević, S. (1962): Geoelektrična ispitivanja, Grebaštica kraj Šibenika. Fond struč. dokum. pod. »Geofizika«, Zagreb.
- Kovačević, S. (1963a): Poremećenje dijagrama geoelektričnog sondiranja zbog prelaženja strujnih i potencijalnih elektroda preko nekih izrazitih dubokih i plitkih nehomogenosti u horizontalnom pravcu. Geol. vjesn. 16, Zagreb.
- Kovačević, S. (1963b): Mogućnosti primjene geoelektrične metode u vanjskoj zoni Dinarida. Referat na Simpozijumu o spolnim Dinaridima. Hercegnovi. Fond str. dokum. pod. »Geofizika«, Zagreb (neobjavljeno).
- Kovačević, S. & Krulc, Z. (1963): Istraživanje vode geoelektričnim metodama. Referat na stručnom simpoziju rudara i geologa, Zagreb (neobjavljeno).
- Kovačević, S. & Fabič, L. (1964): Buško Blato, Geoelektrična ispitivanja, 1963. Fond str. dokum. pod. »Geofizika«, Zagreb.
- Kozyrin, A. K. (1959): Interpretacija krivyh VEZ pri pomošči kombiniravannyh paletok. Voprosy razvedočnoi geofiziki, Trudy Sverdlovskogo gorn. inst., 34, Moskva.
- Kreines, I. I. (1957): Grafičeskii sposob interpretacii krivyh VEZ. Razvedočnaja i promyslovaja geofizika, 17, Moskva.

- Krulc, Z. & Vidović, N. (1960): Primjena metode otpora kod istraživanja bok-sitnih ležišta pod pokrovom u Istri. Vesnik Zav. geol. geofiz. istraž., (C) 1, Beograd.
- Kukuruz, V. D. (1960): Toččnyj metod interpretacii krivyh VEZ. Razved. i promysl. geofizika, 36, Moskva.
- Kukuruz, V. D. (1962): Interpretacija trehsloinyh krivyh VEZ. Razved. i promysl. geofizika, 46, Moskva.
- Mosetti, F. (1961): Un'applicazione del sondaggio geoelettrico: evidenzione della zona di contatto tra acqua dolce e acqua salata in formazioni calcaree. Pubbl. n. 131 dell'Osservatorio Geofisico Sperimentale, Trieste.
- Ogilvi, A. A. (1962): Izučenie uslovii odvodnenija mestoroždenii v karstovyh raionah Urala s pomoščju geofizičeskih metodov. Razvedka i ohrana nedr, 11, Moskva.
- Ogilvi, A. A. & Nečeva, G. J. (1962): Rezistivimetričeskie nabljudenija kak sposob izučemija dinamičeskoj zonalnosti treščino-karstovyh podzemnyh vod. Razved. i promysl. geofizika, 43, Moskva.
- Pavlin, B., Mladineo, L., Stubičan, V. & Nonveiller, E. (1956): Akumulacioni basen Peruča u Dinarskom kršu. Saopćenja sa Trećeg savetovanja stručnjaka Jugoslavije o visokim branama (Bled 1954), Beograd.
- Raljević, B. & Bojanić, L. (1963): Geološka situacija uzduž trase tunela Lipa-Donja Korita. Fond str. dokum. Inst. geol. istraž., Zagreb.
- Roglić, J. (1961): Odnos morske razine i cirkulacije vode u kršu. Drugi Jugoslav. speleološki kongres (Split 1958), Zagreb.
- Sarnavka, R. (1958): Otok Lastovo, Vodoistražni radovi 1953-1957, I, Fond pod. »Geoistraživanja«, Zagreb.
- Schouppé, A. (1952): Elektrische Widerstandsmessungen zur Feststellung der Verbindungswege in Höhlengewässern. Mitt. naturwiss. Vereins für Steiermark, 81-82, Graz.
- Sviben, D. & Krulc, Z. (1964): Geoelektrična ispitivanja, Orlovac i Gornja Korita-Staje, 1963. god. Fond struč. dokum. pod. »Geofizika«, Zagreb.

Z. KRULC

GEOELEKTRISCHE UNTERSUCHUNGEN IM DINARISCHEN KARST

In den letzten Jahren haben sowohl Anwendung als auch Umfang der geoelektrischen Untersuchungen in Kroatien, insbesondere aber im Karstgebiet zugenommen. Der Einsatz der praktischen Geoelektrik wird in vielen und verschiedenartigen Aufgaben der Hydrogeologie, Ingenieur-Geologie und Erdöl-Geologie gesucht. In der letzten Zeit wurden weitere Fortschritte gemacht: die schon früher gekennzeichnete Arbeitsmethodik wurde überprüft, die Durchführungstechnik der »klassischen« Messverfahren der Geoelektrik weiter vollendet, neue Messverfahren wurden eingeführt und erfolgreich durchgeführt, die Auswertungsverfahren wurden weiter entwickelt und die Stellung sowie auch die Beziehung der Geoelektrik zu den anderen Untersuchungsmethoden im Rahmen der komplexen Untersuchungen im Karst wurden diskutiert und klargestellt.

In der vorliegenden Arbeit werden der heutige Stand, die Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen sowie auch einige Perspektiven der Geoelektrik im Karst geschildert. Übersichtlich werden auch Geologie und Hydrographie des Dinarischen Karstes beschrieben.

Für das Gebiet des Dinarischen Karstes ist das Abwechseln von mehr oder weniger wasserdurchlässigen klastischen Ablagerungen (Paläozoikum, teilweise Trias, Tertiär) mit mächtigen kalkigen Gesteinen (Obertrias, Jura, Kreide) charakteristisch. Die Ablagerungen des Jura und der Kreide als dominante stratigraphische Einheiten sind nur aus Kalksteinen und Dolomiten zusammengesetzt; eben deswegen ist der Dinarische Karst vollkommen und charakteristisch entwickelt. Die Karsterscheinungen sind hauptsächlich an mesozoische Kalke und Dolomite gebunden: sie wurden am reichlichsten in tektonisch stark gestörten Gebieten und Zonen entwickelt.

Die Karsthydrographie ist durch ein gut entwickeltes unterirdisches Wassernetz gekennzeichnet. Über die Wasserbewegung im Karstuntergrund sind schon längst zwei entgegengesetzte Theorien bekannt: die von Grund (1903, 1910) und die von Katz er (1910). Es scheint, dass das kontinuierliche Karstwasser nach der Grundschen und die unterirdischen Karstwasserläufe der Katzerschen Theorie wohl die hydrologischen Extreme des Karstes sind (F. Jenko, 1959). Die Wasserzirkulation in den Gesteinsklüften im Karst ist nicht vom Seespiegel abhängig und sie geht bis zur Sohle der löslichen Kalkmasse vor (J. Roglić, 1961). Viele Beispiele zeigen, dass das Meerwasser in das Festland weit und an einigen Stellen auch tief eingedrungen ist (J. Baturić, 1961). Als Ganzes betrachtet, werden die Kalksteine im Dinarischen Karst als mehr oder weniger wasserundurchlässige und die Dolomite als mehr oder weniger wasserstauende Gesteine angesehen. Örtliche Abweichungen von dieser »Regel« sind durch die tektonische Lage dieser Gesteine bedingt.

Die allgemeine Bedingung für eine erfolgreiche Anwendung der Geoelektrik – der Unterschied im elektrischen spezifischen Widerstand einzelner Gesteine oder Milieus – ist im Dinarischen Karst vorhanden. In einigen Gebieten gibt es Schichten von verschiedener petrographischer Zusammensetzung, an anderen werden wieder durch die geologischen Wirkungen die physikalischen Eigenschaften der Gesteine oder ihre Lagerungsverhältnisse geändert. Die Widerstandsunterschiede sind am grössten, wenn das Untersuchungsgebiet aus petrographisch stark verschiedenen Schichten besteht oder im Falle eines und desselben Gesteins in der Nähe des Meeres, in dem die Klüfte und Hohlräume teilweise mit Seewasser und teilweise mit Süswasser oder vielmehr mit Luft ausgefüllt sind. Geoelektrisch kann man deutlich die zerklüfteten Gesteine erkennen, in denen die Klüfte mit Seewasser ausgefüllt sind. So kann man geoelektrisch sehr rasch und leicht sowohl die horizontale als auch ungefähr die vertikale Erstreckung des Eindringens von Seewasser in das Festland untersuchen und begrenzen (Fig. 2, 3, 6, 9).

Nach den bekanntesten Mischtheorien (V. Fritsch, 1960) wurden die spezifischen Widerstände für die Mischkörper Kalkstein (5000 Ohm. m) + Süswasser (40 Ohm. m), Kalkstein + Ton oder Terra Rossa (20 Ohm. m) und Kalkstein + Seewasser (0.3 Ohm. m) berechnet. Fig. 1 zeigt die »mittleren Kurven«, die den verschiedenen Verhältnissen in der Natur am besten entsprechen dürften.

Aus der Fig. 1 ist ersichtlich, dass man auch theoretisch nur unsicher das zerklüftete kalkige Gestein mit Süswasser in den Klüften von dem mit Ton in den Klüften unterscheiden kann. Der spezifische Widerstand der kalkigen Gesteine kann jedoch als wertvolle erkundungsfähige hydrogeologische und ingenieur-geologische Charakteristik oder als Indikator betrachtet werden. Die gemessenen Widerstandsunterschiede von gleichartigen Gesteinen werden auf die Änderungen in der Festigkeit oder auf gewisse Störungen in diesen Gesteinen hinweisen. Diese Widerstandsunterschiede werden manchmal nur qualitative Eigenschaftsänderungen der Gesteine kennzeichnen. Wenn man aber die geoelektrischen Messungen an Bohrlöcher anschliessen und die gemessenen Widerstände mit den Bohrbefunden (geologisches Profil und Wasserabpressung) vergleichen kann, dann können mittels der Geoelektrik auch gewisse quantitative Zusammenhänge festgestellt werden. In der letzten Zeit wurde z. B. ein gewisser funktioneller Zusammenhang zwischen dem spezifischen Widerstand der kalkigen Gesteine und dem Wasserverlust bei der Wasserabpressung festgestellt. Diese Zusammenhänge sollten näher untersucht und auch statistisch bearbeitet werden.

Unter den geoelektrischen Verfahren nimmt in den geophysikalischen Untersuchungen im Dinarischen Karst die *geoelektrische Sondierung* (das Vierpunktverfahren) eine beherrschende Stellung ein. Weiter treten in der letzten Zeit die sog. tiefen geoelektrischen Sondierungen hervor, die bei der Erdölsuche in den Dinariden eingesetzt werden; zur Zeit werden Sondiertiefen bis zu 12 000 m erreicht.

In den geoelektrischen Sondierungen im Karst lässt sich öfters grosse Ähnlichkeit der Sondierkurven mit denjenigen, die in anderen Gebieten gemessen werden (Fig. 2, 3, 4), bemerken. Einzelne unterschiedliche Teile der Sondierkurven entsprechen elektrisch verschiedenen Schichten oder Teilen des Untergrundes. Für die ungefähre Tiefenbestimmung dieser »Schichten« kann nach der Analogie mit dem geschichteten Untergrund das Hummelsche Hilfspunktverfahren (A. F. E. r. t. 1942) verwendet werden.

Für die quantitative Auswertung von Sondierkurven, die auf den Karstpoljen gemessen wurden, besteht schon eine gute vieljährige Erfahrung. Die gemessenen Kurven des scheinbaren spezifischen Widerstandes zeigen einen »glatten« Verlauf und können leicht und genau ausgewertet werden. Die Formänderungen der Sondierkurven weisen

klar und eindeutig auf die Änderungen in der lithologischen Zusammensetzung der Überdeckungsschichten hin. Die Messkurven haben folgende charakteristische Form: der untere Teil der Kurve geht in eine Gerade über, die mit der Ordinate einen Winkel von 45° einschliesst (Fig. 5).

Die nieder-ohmige geoelektrische »Schichte«, die in der Untersuchung des Seewassereindringens in den Untergrund des Festlandes festgestellt wurde (Fig. 6, 9), kann als Grenze zwischen Süss- und Salzwasser in dem zerklüfteten kalkigen Gestein betrachtet werden. Bisherige Untersuchungen zeigen eine befriedigende Genauigkeit in der geoelektrischen Bestimmung dieser Grenze. F. Mosetti (1961) schildert für die Umgebung von Triest eine ausgezeichnete Teufenübereinstimmung der geoelektrisch bestimmten Horizontengrenze mit den Bohrbefunden. Die klar ausgeprägte Grenze zwischen zwei verschiedenen Widerstandszonen, von denen die obere vorwiegend der Imprägnation mit Süsswasser und die untere vorwiegend mit Salzwasser saturiertem Gestein entspricht, mit dem Verlauf einer Isohaline überein (F. Mosetti, 1961).

Die *Kreissondierung* (Drehsondierung) liefert Aufschlüsse über die vorherrschende Klüftigkeit im dem kalkigen Gestein. Mit diesem Verfahren wird allgemein die elektrische Anisotropie des Untergrundes untersucht. Fig. 7 zeigt zwei Diagramme der Kreissondierung im Dinarischen Karst. Die bisherigen Untersuchungen stimmen gut mit den geologischen Aufschlüssen auf demselben Messgebiet überein.

Die *Methode des elektrisch geladenen Körpers* wird für die Bestimmung der unterirdischen Wasserlaufbewegung verwendet. Für diese Messungen braucht man nur eine Bohrung oder einen Schluckschlund; elektrisch wird dann die Salzlösung, die sich als eine Salzwolke in der wasserführenden Schicht oder Zone ausbreitet abgetastet und flächenmässig verfolgt. Fig. 8 zeigt ein praktisches Beispiel aus dem Karst.

In den hydrogeologischen und ingenieur-geologischen Untersuchungen im Karst haben in dem letzten Jahrzehnt *elektrische Bohrlochmessungen* weite Anwendung gefunden (Ogilvi, 1962; Ogilvi & Nečeva, 1962). Deshalb wurde eine kurze Übersicht über die betreffende Materie gegeben.

Die bisherige komplexe *Wassersuche* im Dinarischen Karst hat befriedigende Ergebnisse gezeigt. Es bedarf bei diesen Untersuchungen einer recht intensiven Zusammenarbeit von Geologen, Hydrogeologen, Geophysikern und Hydrologen. Die Ergebnisse verschiedener Untersuchungsmethoden sollen sorgfältig und gegenseitig ausgewertet werden. Als eine der besonders wichtigen Aufgaben der Geoelektrik kann man die Bestimmung des Seewassereinflusses im Untergrund des Festlandes betrachten (Fig. 6, 9).

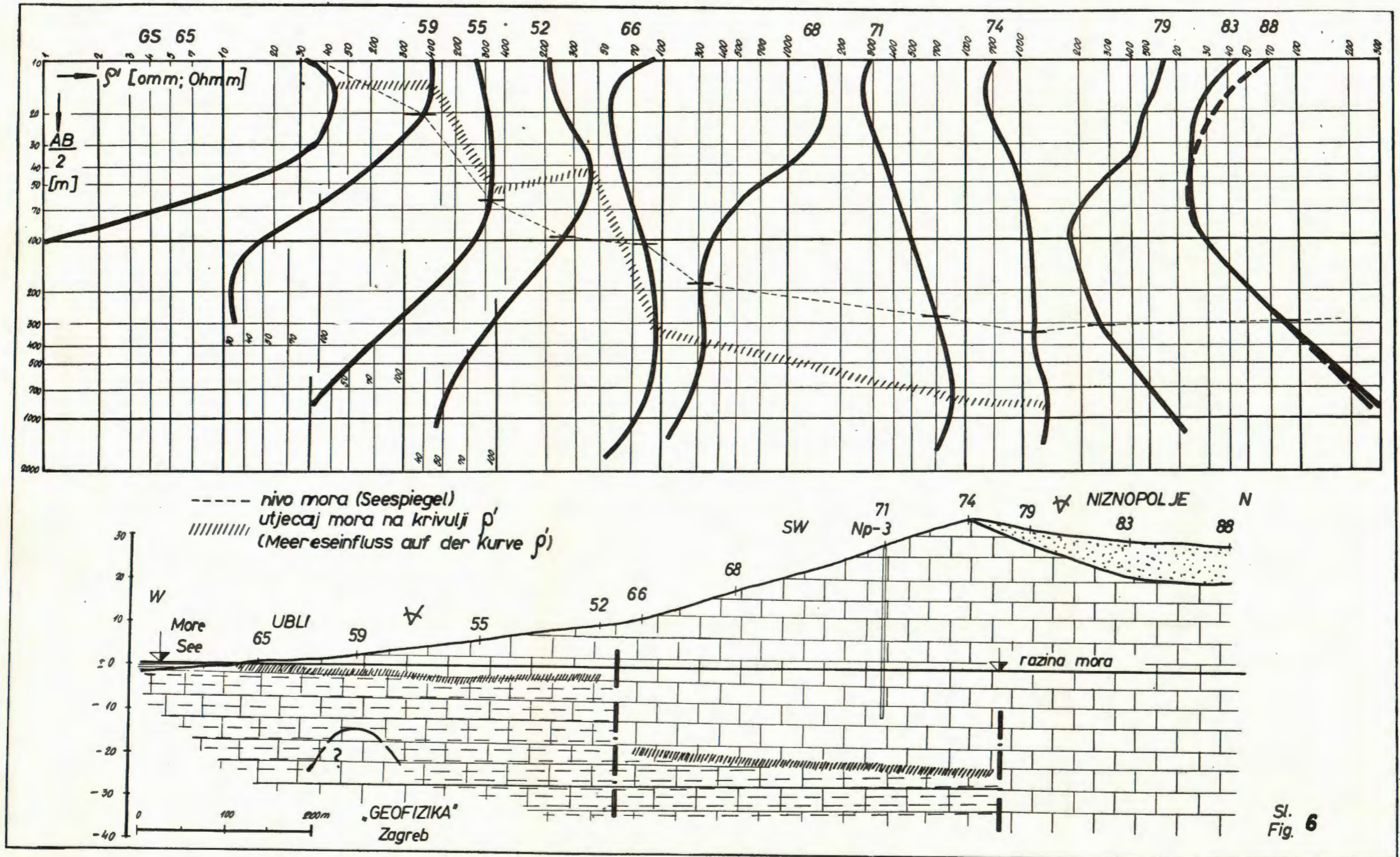
In der *Ingenieur-Geologie* im Karst hat die Geoelektrik sehr viele und verschiedene Aufgaben zu lösen. Als Sonderaufgaben kann man die geoelektrische Untersuchung und Abschätzung der Wasserdurchlässigkeit von kalkigen Gesteinen sowie auch die Bestimmung des geologisch-tektonischen Aufbaus des Untergrundes aufzählen. Zwischen dem spezifischen Widerstand, der Klüftigkeit und der Wasserabpressung von Widerstand, der Klüftigkeit und der Wasserabpressung von kalkigen Gesteinen wurde ein funktioneller Zusammenhang, und zwar absondert für die Zone über, beziehungsweise unter dem Grundwasserspiegel festgestellt. Fig. 10 zeigt einen Teil des geologisch-geoelektrischen Profils auf einem Karstpolje. Geoelektrisch liessen sich qualitativ klar und quantitativ ziemlich genau der Kalktuff von Ton und Mergel und diese Überdeckungsablagerungen wieder von der Felsunterlage (Kalkstein) unterscheiden. Fig. 11 zeigt weiter die Teufenbestimmung einer umgekippten Eozänsynklinale in den Kalksteinen. Innerhalb von Konglomeraten wurden zwei verschiedene niederohmige geoelektrische »Schichten« (Mergelablagerungen) und eine tektonische Störung festgestellt.

Die Grundaufgaben der Geoelektrik in der *Erdöl-Geologie* waren bisher die Teufenbestimmung von Flyschsynklinalen und jüngeren Ablagerungen in Karstpoljen, die Untersuchung grosser Verwerfungen und Falten, die Verfolgung paläozoischer klastischer Sedimente und die Untersuchung einzelner gut ausgeprägter Strukturen. Bisher wurden die geoelektrischen Tiefensondierungen bis zu $AB/2 = 12\ 000$ m durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse können als gut und ermutigend betrachtet werden. Fig. 12 zeigt einen Teil des geoelektrischen Teufenprofils. Mit der geoelektrischen Sondierung auf diesem Profil sollte man die vertikale Erstreckung der paläozoischen Schichten, die an der Oberfläche erscheinen (GS 14-1), feststellen. Die Serie ist im NE-Teil durch eine tiefe und steile Verwerfung begrenzt. Die allgemeine geoelektrische Charakteristik ist durch die Neigung der geoelektrischen Grenzen nach SW gekennzeichnet.

Zum Abschlusse soll betont werden, dass viele Untersuchungen im Dinarischen Karst die Anwendung der Geoelektrik gerechtfertigt haben. In richtiger Beziehung und Mitarbeit mit den anderen Untersuchungsmethoden sind die geoelektrischen Untersuchungen unentbehrlich. Geoelektrisch kann man rasch auch grössere Gebiete untersuchen und viele wertvolle Angaben über den allgemeinen und charakteristischen Bau des Untergrundes erzielen. Nach den geoelektrischen Ergebnissen können dann rationell und zweckmässig die teuren und langsameren direkten Bohrarbeiten geplant werden. Nach Vergleich und Bearbeitung der Ergebnisse aller Untersuchungen können die verlangten Daten für ein grosses Gebiet mit einer kleineren Anzahl von Bohrungen erzielt werden.

Angenommen am 28. April 1964.

»Geofizika«, Zagreb, Kupaska 2.



Sl. Fig. 6

