

ZVONIMIR KRULC

PRIMJENA GEOELEKTRIČNE METODE GEOFIZIČKOG ISPITIVANJA U GRAĐEVINARSTVU

(Sa 33 slike u tekstu)

Sadržaj:

Uvod

Zadaci geoelektričnog ispitivanja u građevinarstvu
Izvođenje mjerenja

I. Mjerenja na površini tla

II. Mjerenja u bušotinama

III. Mjerenje kod injektiranja

IV. Ostala geoelektrična mjerenja

Interpretacija mjernih podataka

Primjena geoelektričnih mjerenja u građevinarstvu

a) Geoelektrični profili (presjeci) građevnog tla

b) Geoelektrika i rješavanje hidroloških problema

Zaključak

UVOD

Praktična ili primijenjena geofizika jedna je od najmlađih prirodnih nauka. Prošlo je zapravo tek nekoliko desetaka godina, otkako se u većoj mjeri koristi za rješavanje mnogobrojnih privrednih problema.

Poticaj za primjenu geofizike u praktične privredne svrhe došao je iz osnovne privredne grane – rudarstva. Sve veća potražnja sirovina uvjetovala je usavršavanje starijih i pronalaženje novih načina istraživanja rudnih ležišta. Uporedo s time razvijale su se metode istraživanja podzemlja i za druge svrhe. Pomoć je pružila geofizika, nauka koja proučava fizička svojstva Zemlje. Većina prirodnih fizičkih svojstava već je odavna poznata. Metode mjerenja i proučavanja tih svojstava nazivaju se *geofizičkim metodama*.

Geofizika prelazi brzo okvir uspješne praktične primjene samo u rudarstvu. Opći nagli razvoj geofizike treba pripisati u prvom redu velikom napretku fizike – osobito tehnike mjerenja – nakon Prvoga svjetskog rata. Značajni rezultati geofizičkih ispitivanja naftonosnih struk-

tura potiču geologe i druge stručnjake, da primijene geofizičke metode i za rješavanje drugih geološko-tektonskih i geološko-hidroloških problema i za određivanje mnogih podataka potrebnih kod projektiranja građevinskih objekata. Kao naročito povoljne za ispitivanje podzemlja za potrebe građevinarstva izdvajaju se metoda refrakcijske seizmike i od geoelektričnih – metoda prividnog specifičnog otpora.

Za brza i detaljna istraživanja podzemlja općenito, a naročito u građevinarstvu, danas je najviše u upotrebi druga od navedenih geofizičkih metoda. Ona se osniva u današnje vrijeme na točnim mjerenjima i na naučnoj obradi mjernih podataka. Za razvitak i usavršavanje te metode u praktički upotrebljiv postupak ispitivanja tla imaju osnovne zasluge F. W e n n e r, braća C. i M. S c h l u m b e r g e r, S. S. S t e f a n e s c u i J. N. H u m m e l.

Kod nas se počelo sa opsežnijim i sistematskim geofizičkim ispitivanjem tek poslije Drugoga svjetskog rata. U posljednjih nekoliko godina izvršen je veći broj geoelektričnih ispitivanja i za potrebe građevinarstva, pa je stoga potrebno i opravdano, da se ta metoda ispitivanja građevnog tla učini pristupačnom širem krugu zainteresiranih stručnjaka. Ta se metoda ispitivanja tla može danas označiti i na području primjene u građevinarstvu kao ekonomska potreba. Teškoće, koje se često javljaju kod nekih građevinskih problema, ukazuju na neophodnost temeljitih i detaljnih geotehničkih istraživanja. Ona se mogu izvesti i kod ograničenih sredstava, ako se uobičajeni postupci prikladno kombiniraju s geoelektričnim ispitivanjem. Posljednja pružaju ove prednosti: brzina, jeftinoća i široke mogućnosti primjene.

ZADACI GEOELEKTRIČNOG ISPITIVANJA U GRAĐEVINARSTVU

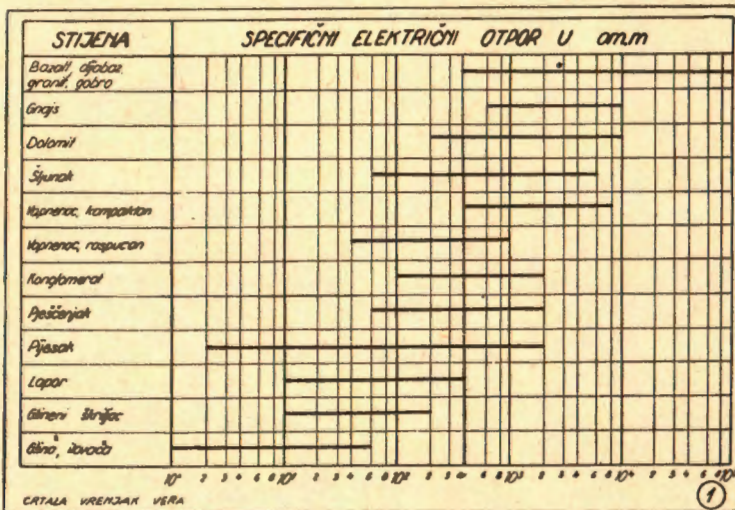
Osnova svih geofizičkih metoda ispitivanja tla je određivanje fizikalnih svojstava elemenata građe podzemlja. Prema izvjesnom fizikalnom svojstvu određuju se zatim geološki odnosi. Kod geoelektričnih metoda proučavaju se zakoni raspodjele i kretanja u tlu električne struje, koja se dovodi u podzemlje umjetno ili postoji u podzemlju. Praktična primjena geoelektričnih metoda osniva se općenito na različitim otporima stijena – geoloških vodiča – kod prolaza struje kroz njih. Sasviru je razumljivo, što je za uspješnu primjenu geoelektričnih metoda potrebno, da se predmet ispitivanja razlikuje po svom otporu od svoje okoline. Kao kvantitativno mjerilo otpora geoloških vodiča služi fizikalna veličina nazvana *specifičnim otporom*.

Specifičnim otporom neke tvari naziva se u fizici otpor 1 cm^3 te tvari, i to u obliku kocke baze 1 cm^2 i visine 1 cm . Specifični otpor izražava se onda u om. cm . U geoelektričnoj praksi uzima se, međutim, kao jedinica om. m (om-metar), dakle 100 puta veća mjera, da se izbjegnu preveliki brojevi.

Specifični otpor stijena (ili njegova recipročna veličina – *vodljivost*, koja se također često spominje u literaturi) mijenja se u prilično širokim granicama. Na veličinu specifičnog otpora stijena mnogo utječe količina vode u porama stijene i količina soli otopljenih u vodi. Stijene

vode električnu struju tme, što struju vode otopine (elektroliti), koje se nalaze u porama stijene. Stoga imaju rastresite, mekane sedimentne stijene kao glina, ilovača, lapor dosta stalne i niske vrijednosti specifičnog otpora. Kompaktni vapnenci i dolomiti, a pogotovu kompaktne i svježje magmatske stijene, imaju naprotiv slabe vodljivosti i prema tome visoke specifične otpore. Specifični otpor stijene zavisi i o njezinoj strukturi: raspucana ili rastrošena stijena ima uvijek niži otpor od kompaktne ili svježje. Sl. 1 prikazuje grafički približne granične vrijednosti specifičnih otpora najvažnijih stijena, na koje se nailazi pri ispitivanju građevnog tla.

Cilj geoelektričnih ispitivanja ne sastoji se uvijek u tome, da se potpuno riješi neki problem, već da se brzo, jeftino i dosta točno dobiju



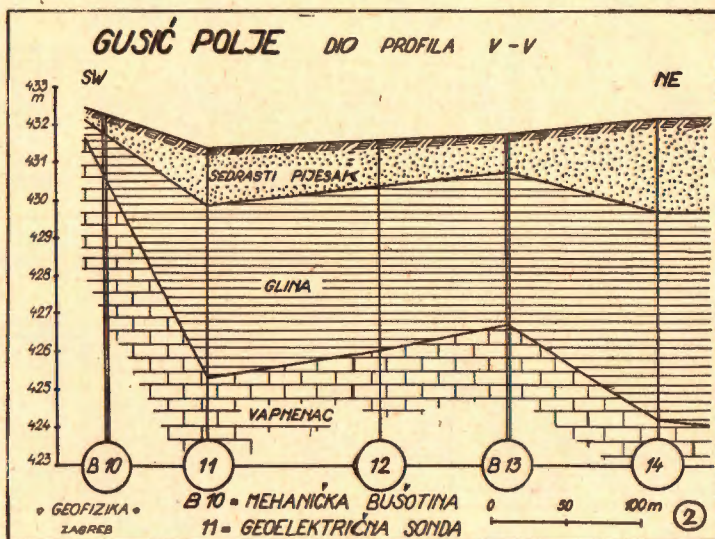
Sl. 1. Specifični otpor važnijih stijena
Abb. 1. Wahre spezifische Widerstände wichtiger Gesteine

podaci za dalja istraživanja. Često je veoma povoljno, da se uz geoelektričnu primijeni i ispitivanje nekom drugom geofizičkom metodom; pri ispitivanju građevnog tla to je gotovo isključivo refrakcijska seizmika. Na geoelektrična nadovezuju se redovno mehanička istraživanja. Geoelektrično ispitivanje ne čini mehaničko bušenje suvišnim odnosno nepotrebnim. Između ta dva postupka ispitivanja postoji načelna veza, jer oba imaju isti cilj – razjašnjenje prilika u podzemlju, premda su njihove biti i fizikalni osnovi različiti. Ekonomski je svakako ne samo povoljno već i potrebno, da se ta dva postupka udruže i među sobom dopune. Praktički se to radi tako, da se područje, koje treba ispitati, ispita najprije geoelektrički, a na najzanimljivijim se mjestima prema geoelektričnim indikacijama izvrše mehanička bušenja. Istražne bušotine, razmjeste se po mogućnosti ravnomjerno po odnosnom području, tako da sačinjavaju rijetku mrežu. A geoelektrična mjerna stajališta

predstavljaju gustu detaljnu mrežu; pritom se na jednu mehaničku bušotinu veže veći broj geoelektričnih sonda. Sl. 2 prikazuje jedan primjer takvog sistematskog rada.

U zajednici s mehaničkim istražnim bušenjem i koristeći rezultate prethodnih geoloških istraživanja daje geoelektrično ispitivanje građevnog tla potpuno i točno rješenje određenog problema. Takvim sistematskim radom zadovoljeni su i ekonomski uvjeti: jeftinoća, brzina i točnost.

U praksi se često ne vodi dovoljno računa o jednoj važnoj okolnosti. Geoelektrična ispitivanja treba uključiti u istražne radove, koji imaju za cilj određivanje svih elemenata potrebnih za izvođenje projekta za



Sl. 2. Veza geoelektričnih sonda na mehaničke istražne bušotine
 Abb. 2. Kombination von geoelektrischen Sondierungen und Bohrungen

izvjesni građevni objekt. Ispitivanja će se u tom slučaju lakše i točnije izvoditi, jer teren još ne će biti izmijenjen zbog građevnih radova. Kad se geoelektrična ispitivanja radi proučavanja geoloških prilika podzemlja izvode za vrijeme građevinskih radova, često smetaju iskopi materijala i eventualno već i podignuti objekti, pa to smanjuje mogućnosti primjene ili uspjeha ispitivanja. Za vrijeme gradnje mogu se, međutim, izvoditi kontrolna geofizička ispitivanja u bušotinama i ona ispitivanja, koja utvrđuju promjene u podzemlju, što ih izaziva građevna djelatnost.

Kod sistematskog i solidnog istraživanja građevnog tla uobičajen je danas ovaj redoslijed radova:

1. Geološka istraživanja,
2. Geoelektrična mjerenja sa preliminarnom interpretacijom mjernih podataka.
3. Hidrološka ispitivanja (ako su potrebna),

4. Mehaničko istražno bušenje na najzanimljivijim i kritičnim mjestima,
5. Geoelektrična i geomehanička ispitivanja u bušotinama,
6. Eventualno potrebna dopunska geoelektrična mjerenja i završna interpretacija geoelektričnih mjernih podataka.

Kad se na građevnom objektu vrše injektiranja, na naprijed navedeno se nastavlja:

7. Injektiranje bušotina,
8. Geoelektrična kontrola injektiranja.

Geoelektričnim ispitivanjem rješavaju se pod razmotrenim uvjetima najčešće ovi zadaci:

1. Određivanje debljina i dubina pojedinih naslaga u podzemlju (na pr. vodonosne naslage, pokrovne naslage, naslage gline ili ilovine),
2. Utvrđivanje površine odnosno reljefa čvrste stijene ili nepropusne podloge,
3. Određivanje svojstava nekih naslaga ili podloge (čvrste stijene),
4. Određivanje pada kosih slojeva u podzemlju,
5. Utvrđivanje tektonskih poremećenja (rasjeda i prelomnica),
6. Praćenje vodonosnih naslaga i utvrđivanje leća gline ili ilovine.

Kao posebna vrsta zadataka dolazi mjerenje otpora uzemljenja radi projektiranja gromobranskih instalacija i zaštitnih uzemljenja pa ispitivanje korozivnih svojstava tla radi projektiranja zaštitnih uređaja cjevovoda od korozije.

IZVOĐENJE MJERENJA

Geoelektrična mjerenja mogu se vršiti na dva načina: na površini tla odnosno u podzemlju u rovovima, tunelima i sl. ili u bušotinama.

Prema vrsti upotrebljene struje razlikuju se dvije skupine geoelektričnih metoda:

- I. Geoelektrična ispitivanja s istosmjernom strujom,
- II. Geoelektrična ispitivanja s izmjeničnom strujom.

U prvu skupinu pripadaju kao najvažnije:

- a) Metoda prirodnih električnih struja (metoda vlastitog potencijala),
- b) Metoda prividnog specifičnog otpora sa dva mjerna postupka – geoelektričnim sondiranjem i geoelektričnim profiliranjem.

Drugu skupinu sačinjavaju induktivne i elektromagnetske metode.

Pri rješavanju različnih problema u građevinarstvu primjenjuju se danas gotovo isključivo metode istosmjerne struje i od istih metoda *prividnog specifičnog otpora* za mjerenja kako na površini tla ili u rovovima, tunelima i sl. tako i za mjerenja u bušotinama.

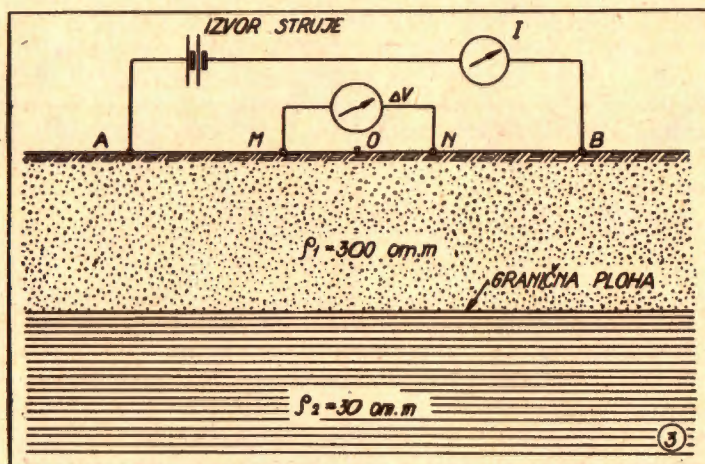
Bit ove metode sastoji se u određivanju specifičnih otpora pojedinih elemenata građe podzemlja s površine tla. Geološkom interpretacijom dobivenih podataka stvara se zatim predodžba o građi podzemlja.

Praktično određivanje specifičnog otpora na terenu vrši se na ovaj način (Sl. 3): Kroz dvije elektrode A i B uvodi se u tlo istosmjerna električna struja, koje se jakost I mjeri; ove se elektrode nazivaju strujnim elektrodama. Između druge dvije elektrode M i N (smještene na

spojnici AB simetrično s obzirom na A i B odnosno središte O rasporeda) – nazvane mjernim elektrodama, mjeri se razlika potencijala ΔV izazvana električnom strujom. Prema formuli

$$\rho' = \frac{\Delta V}{I} \cdot k$$

dobije se pravi specifični otpor tla, ako je ono na odnosnom području električki homogeno i izotropno. U stvarnosti, međutim, nije gotovo nikad ispunjen uvjet homogenosti i izotropnosti; razni geološki materijali su rijetko kada posve jednoličnog sastava (najljepši primjer su šljunci, koji su sastavljeni od različitih veličina zrna i redovno su pomiješani s pijeskom i glinom). Zato se kod mjerenja dobije prema pred-



Sl. 3. Mjerenje električnog otpora tla
Abb. 3. Messung des elektrischen Bodenwiderstandes

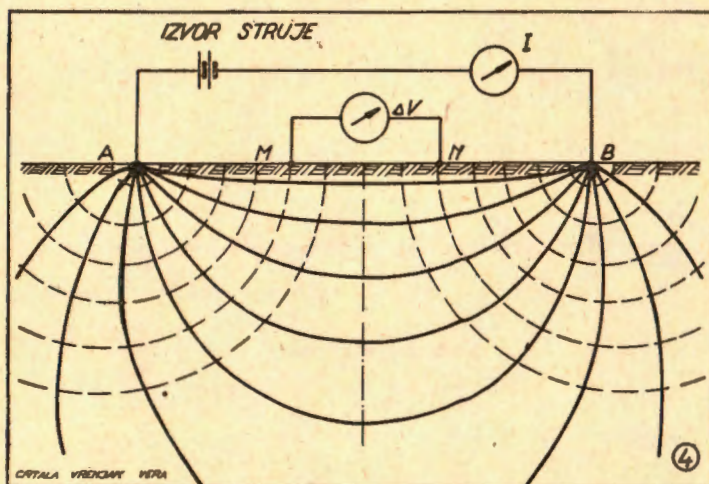
njoj formuli neka srednja, prosječna vrijednost specifičnog otpora tla na odnosnom području. Ta vrijednost zavisi o pravim specifičnim otporima pojedinih geoloških vodiča (maslaga), o njihovim debljinama kao i o položaju u prostoru. Prema H u m m e l u (1929) naziva se ta vrijednost *prividnim specifičnim otporom* i označuje se ρ' . Praktično upotrebljiva formula izgleda dakle ovako:

$$\rho' = \frac{\Delta V}{I} \cdot k \text{ [om. m]}$$

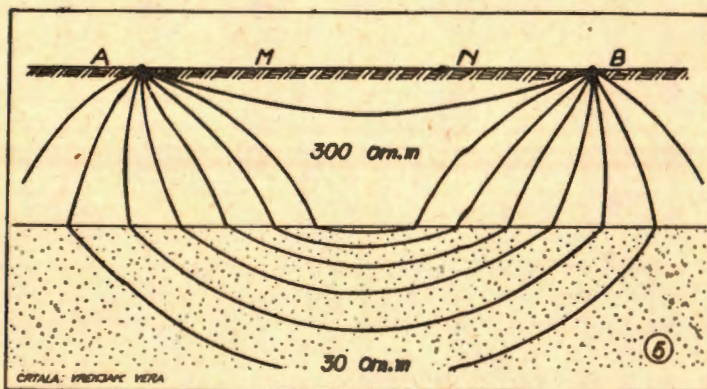
U ovoj formuli je veličina k koeficijent, koji zavisi o položaju i međusobnom rasporedu strujnih i mjernih elektroda.

I. Mjerenja na površini tla

Shema mjerenja na površini tla prikazana je već na Sl. 3. Dok je tlo homogeno i dok se ne mijenjaju njegova svojstva, širi se struja, koja se šalje u tlo, jednolično i nesmetano; strujne silnice su pravilne linije (Sl. 4). Okomito na strujne silnice stoje linije istog potencijala (ekvipotencijalne linije). Ako podzemlje nije jednoličnog sastava, mijenja se raspodjela struje u njemu. Slika 5 prikazuje shematski oblik strujnih silnica, kad se u određenoj dubini h nalazi ispod pokrovnog sloja specifičnog otpora $\rho_1 = 300$ om.m sloj bolje vodljivosti odnosno specifičnog otpora $\rho_2 = 30$ om.m.



Sl. 4. Raspodjela struje u podzemlju
Abb. 4. Die Stromverteilung im Untergrund

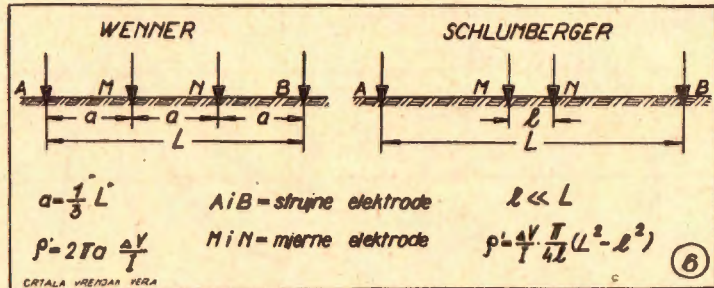


Sl. 5. Pomećena raspodjela struje u podzemlju sa dvije različite naslage (sloja)
Abb. 5. Gestörte Stromverteilung im zweischichtigen Untergrund

Poremećenja raspodjele struje zavise o geološkim uvjetima građe podzemlja. Za metodu prividnog specifičnog otpora osnovni je činilac kod toga položaj granične plohe dvaju različitih geoloških vodiča. Prema pretpostavljenom ili poznatom položaju graničnih ploha i drugim uvjetima odabere se jedan od dva bitno različita mjerna postupka.

Kod *geoelektričnog sondiranja* proučava se raspodjela specifičnog otpora u određenoj točki odnosno njezinoj neposrednoj okolini na taj način, da se postepeno povećava razmak između elektroda. Time se također povećava dubina ispitivanja i konačno se dobije slika o promjeni električnog otpora s dubinom odnosno po vertikali. Stoga je ovaj postupak naročito povoljan za ispitivanje horizontalno ili slabo nagnutih slojeva odnosno graničnih ploha.

Taj se način *geoelektričnog ispitivanja* podzemlja danas najviše upotrebljava pri rješavanju mnogobrojnih zadataka i u građevinarstvu i u rudarstvu, geologiji i hidrologiji.



Sl. 6. Wennerov i Schlumbergerov raspored elektroda
 Abb. 6. Wenner- und Schlumberger-Anordnung von Elektroden

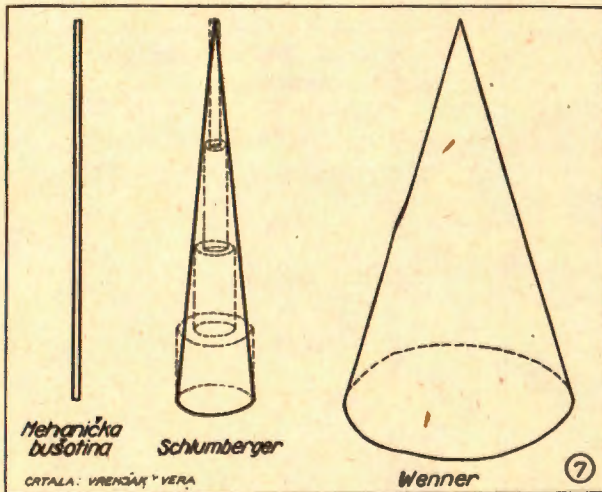
U praktičnoj upotrebi ima nekoliko načina *geoelektričnog sondiranja*, koji se među sobom razlikuju po broju i rasporedu elektroda. Izbor se vrši s jedne strane prema uvjetima postavljenog zadatka, a sa druge strane prema sasvim tehničkim okolnostima (premještanje elektroda, obračun mjernih podataka, interpretacija i dr.). Najčešće se upotrebljavaju *Wennerov* i *Schlumbergerov* raspored elektroda (Sl. 6). Kod *Wennerova* rasporeda je dubina ispitivanja približno jednaka razmaku elektroda a i iznosi $1/3$ mjernog rasporeda AB . Zbog veće dužine mjerne linije AB zahvaća se kod *Wennerova* rasporeda veći volumen materijala u podzemlju i dobije se bolja prosječna vrijednost električnog otpora. To daje prednost ovom načinu mjerenja pri rješavanju hidroloških problema na velikim područjima. Nedostatak *Wennerova* načina sondiranja leži u tome, što se moraju premještavati sve četiri elektrode.

Kod *Schlumbergerova* rasporeda elektroda dubina ispitivanja je približno jednaka polovici razmaka strujnih elektroda A i B , t. j. polovici mjerne linije AB . Zbog osnovnog uvjeta, da je naime razmak mjernih elektroda mnogo manji od razmaka strujnih elektroda, zahvaća

se pri mjerenju manji volumen materijala u podzemlju. Iz tog je razloga Schlumbergerova metoda sondiranja pogodnija za određivanje horizontalnih granica slojeva. Mjerne se elektrode premještavaju tek nakon izvršenog niza mjerenja kod izvjesnog razmaka mjernih elektroda, strujne elektrode premještavaju se nakon svakog izvršenog mjerenja.

Razmotrene razlike područja djelovanja između opisane dvije osnovne vrste geoelektričnog sondiranja i njihov odnos prema mehaničkom bušenju prikazuje shematski Sl. 7.

Kod geoelektričnog profiliranja ispituje se promjena prividnog specifičnog otpora podzemlja s rasporedom elektroda uz stalne dimenzije. Radi se tako, da se nakon svakog izvršenog mjerenja premjeste sve elektrode (mjerne i strujne u isto vrijeme) za određeni razmak uzduž postavljene pravca. Zbog stalnog razmaka elektroda ispituje se podzemlje u istoj stalnoj dubini, pa je geoelektrično profiliranje u izvjesnoj mjeri



Sl. 7. Shematski prikaz područja djelovanja geoelektričnog sondiranja i mehaničkog bušenja

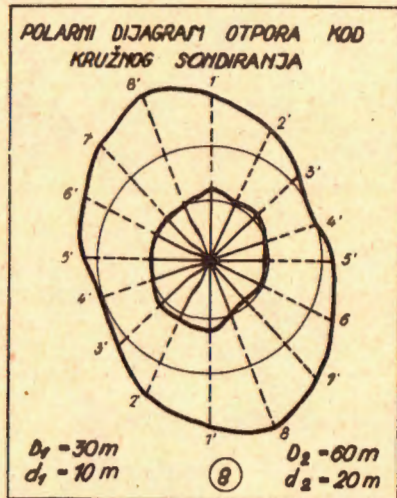
Abb. 7. Schematische Darstellung des Wirkungsbereichs geoelektrischer Sondierung im Vergleich mit der Bohrung

istovetno s geološkim kartiranjem. U literaturi se može naći i naziv geoelektrično kartiranje. Kao jedan od grafičkih rezultata mjerenja dobije se ekvivalent geološkoj karti, samo što su na karti otpora različite naslage u podzemlju identificirane po svojoj geoelektričnoj značajci. Velika je prednost ovog načina geoelektričnog ispitivanja u tome, što se mogu lako i jasno istraživati naslage ispod pokrivača. Osim toga se s malim utroškom vremena izvrše mjerenja na velikom broju točaka određenog terena.

Zbog ispitivanja promjena prividnog specifičnog otpora u horizontalnom smjeru taj je postupak osobito prikladan za određivanje vertikalnih ili veoma strmih graničnih ploha u podzemlju.

Sl. 6 prikazuje, jednostavnu shemu za izvođenje mjerenja po metodi geoelektričnog profiliranja (u dvije varijante prema međusobnom rasporedu i razmaku elektroda).

Ponekad se primjenjuje i *kružno sondiranje*. To je poseban način geoelektričnog sondiranja sa značajkama geoelektričnog profiliranja. Pri mjerenju ostaju razmaci između elektroda isti (stalni) kod određenog dubinskog zahvata, a čitav se mjerni raspored okreće oko osi simetrije (oko središta elektrodnog rasporeda). Izmjereni prividni specifični otpor predočuje se u obliku polarnog dijagrama kao funkcija kuta okretanja; sl. 8 prikazuje jedan primjer. U dijagramu su predočene krivulje otpora za dvije različite udaljenosti elektroda i zato također za dvije dubine ispitivanja. Ova je vrsta geoelektričnog ispitivanja u primjeni kod rješavanja nekih geološko-tektonskih problema kao što je na primjer položaj i pad kosih slojeva, zone dobre vodljivosti, određivanje prelomnica.



Sl. 8. Polarni dijagram otpora kod kružnog sondiranja (po Schenk)

Abb. 8. Polardiagramm bei der Drehsondierung (nach Schenk, 1934)

Kako je već spomenuto, najviše se, upotrebljava istosmjerna struja. Sl. 9 prikazuje izgled, a sl. 10 shemu mjernog instrumenta za geoelektrična mjerenja s istosmjernom strujom. Jakost struje I , što se šalje u tlo, mjeri se pomoću ampermetra mA; ona se može regulirati u izyjesnoj mjeri pomoću potenciometra P_s . Mjerenje razlike potencijala ΔV , koju proizvodi na mjernim elektrodama M i N struja, što se šalje u tlo kroz strujne elektrode A i B, vrši se metodom kompenzacije. Traženi prirodni pad napona između mjernih elektroda kompenzira se odnosno izjednačuje pomoću poznatog napona iz malog izvora struje u samom instrumentu (strujni krug s baterijom B_2). Kad galvanometar G ne pokazuje nikakav otklon, odnosno ni naponi jednaki; veličina napona pročitava se

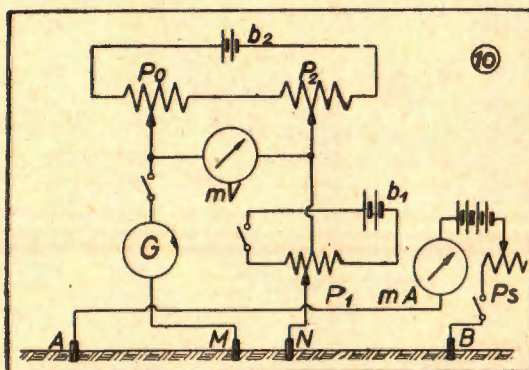
na voltmetru mV –to je vrijednost ΔV . Prije toga mora se još eliminirati utjecaj polarizacije, koja nastane pri dodiru metalnih elektroda s elektrolitima u tlu (humusne kiseline i dr.). Ovaj se polarizacijski napon poništava odnosno kompenzira s poznatim naponom iz malog strujnog kruga s baterijom B_1 . Izmjerene vrijednosti I i ΔV stavljaju se sada u poznatu formulu:

$$\rho' = \frac{\Delta V}{I} \cdot k$$

i dobije se prividni specifični otpor.



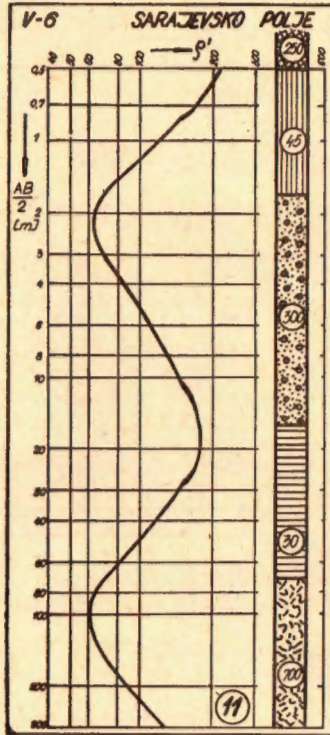
Sl. 9. Izgled instrumenta za mjerenje otpora tla
Abb. 9. Apparatur zur Ausführung der Widerstandsmessungen



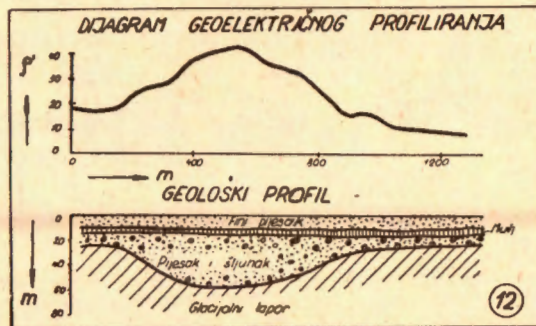
Sl. 10. Shema mjernog instrumenta na istosmjernu struju
Abb. 10. Schema eines geoelektrischen Gleichstrommessgerätes

Izračunane vrijednosti prividnog specifičnog otpora ρ' prikazuju se kod geoelektričnog sondiranja grafički u zavisnosti o razmaku elektroda. Kod Schlumbergerova rasporeda elektroda to je polovica raz-

maka strujnih elektroda A i B, a kod mjerenja po Wennerovu načinu razmak a između strujnih i mjernih elektroda. Koordinatni sistem ima logaritamsku podjelu. Na apscisi se nanosi vrijednost $\log \rho^2$,



Sl. 11. Krivulja prividnog specifičnog otpora ili dijagram geoelektričnog sondiranja
 Abb. 11. Kurve des scheinbaren spezifischen Widerstandes oder geoelektrische Sondierkurve

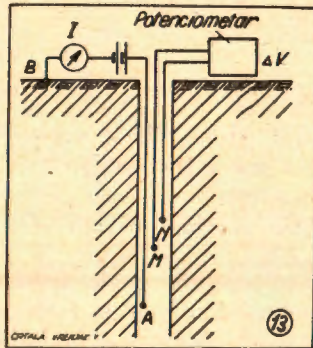


Sl. 12. Dijagram geoelektričnog profiliranja (po Schenk, 1942)
 Abb. 12. Diagramm geoelektrischer Profilierung (Widerstandsprofil)
 (nach Schenk, 1942)

a na ordinati (prema dolje) vrijednost $\log \overline{AB}/2$ ili $\log a$. Kad se spoje tako nanese točke, dobije se dijagram geoelektričnog sondiranja ili krivulja prividnog specifičnog otpora. Te krivulje služe kao osnovni materijal za geofizičku interpretaciju mjernih podataka po metodi geoelektričnog sondiranja. Sl. 11 prikazuje jednu takvu krivulju. Kod geoelektričnog profiliranja predočuje se izračunana vrijednost prividnog specifičnog otpora u zavisnosti o položaju središta mjernog rasporeda, i to redovno u linearnom koordinatnom sistemu. Na apscisi se nanosi položaj središta mjernog rasporeda, a na ordinati vrijednost ρ' (prema gore). Sl. 12 prikazuje jedan dijagram geoelektričnog profiliranja, izmjeren iznad prekrivene i pijeskom i šljunkom ispunjene potoline u glacijalnom laporu (S c h e n k, 1942).

II. Mjerenja u bušotinama

Već opisani postupci geoelektričnog mjerenja na površini tla mogu se načelno primijeniti i za ispitivanja u bušotinama. Za tu je svrhu izrađen i veoma potanko teoretski i eksperimentalno obrađen niz električnih mjernih postupaka, koji se obuhvaća zajedničkim imenom *elektrokartaza*. Kako su uvjeti ispitivanja bitno drugačiji od mjerenja na površini tla, potreban je poseban način mjerenja. Ovdje se mjeri prividni specifični otpor, koji se predočuje kao funkcija dubine elektroda. Sl. 13 prikazuje shematski mjerenje otpora u bušotini. Birati se mogu različiti rasporedi elektroda, a kod jednog istog rasporeda opet njegove dimenzije. Sl. 14 prikazuje, kako se u mjernom dijagramu ispoljava isti sloj

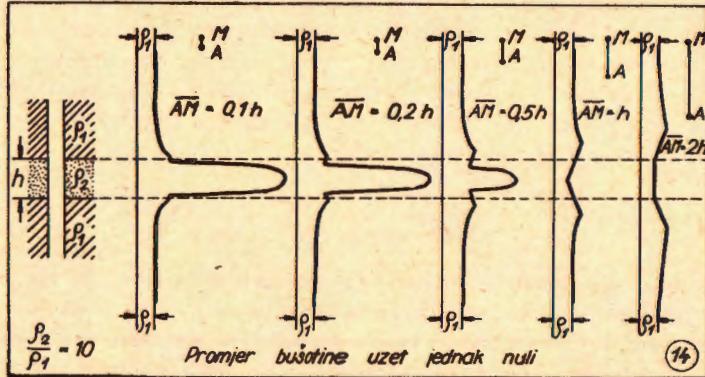


Sl. 13. Shema mjerenja električnog otpora u bušotini

Abb. 13. Schema der elektrischen Widerstandsmessung im Bohrloch

kod različitih dimenzija jednog istog dvoelektrodnog rasporeda. Izbor najpovoljnijeg rasporeda mjerenja traži dakako izvjesno iskustvo. Interpretacija mjernih dijagrama vrši se danas uglavnom pomoću unaprijed izračunanih tabela i teoretskih krivulja.

Iz slike 14 može se razabrati, da se mogu na taj način vrlo dobro utvrđivati šupljine i pukotine i pratiti izvjesne naslage na području ispitivanja, a to sve može biti vrlo značajno i korisno pri projektiranju i izvođenju građevinskih objekata. Elektrokarotaža već se nekoliko desetljeća veoma uspješno primjenjuje kod istraživanja nafte i plina. U inostranstvu se ona primjenjuje i u građevinarstvu; bilo bi poželjno,



Sl. 14. Krivulje prividnog specifičnog otpora kod prijelaza potencijalne sonde kroz sloj višeg otpora: $\rho_2/\rho_1 = 10$ (Litvinov - Arharov, 1946)
 Abb. 14. Widerstandskurven beim Durchqueren einer schlecht leitenden Schicht mit der Potentialsonde; $\rho_2/\rho_1 = 10$ (nach Litvinov - Arharov, 1946)

da se elektrokarotaža kao značajan postupak ispitivanja podzemlja primijeni i u našoj zemlji pri rješavanju problema kod ispitivanja tla u građevne svrhe.

III. Mjerenja kod injektiranja

Kod gradnje mnogih velikih objekata, napose brana za hidrocentrale, otpada veliki dio radova na injektiranja. Stoga je poželjna fizikalna kontrola postignutih rezultata.

Za kontrolu injektiranja podloge raznih velikih građevina veoma je prikladno geoelektrično istraživanje. Mjerenja se izvode na površini tla, u bušotinama i kombinacijom tih dvaju načina ispitivanja. Primjena metode otpora opravdana je zbog velikih razlika specifičnih otpora materijala i njihovih smjesa, koje se ovdje javljaju. To se može razabrati iz iduće tabele specifičnih otpora u našim predjelima krša.

Suhi čvrsti vapnenac	5.000 om.m
Površinski rastrošeni vapnenac	3.000.-5.000 om.m
Raspucani vapnenac s glinom u pukotinama	300 om.m
Voda u pukotinama stijene	30-120 om.m
Ulošci gline (ilovine)	15-60 om.m
Injekciona masa	1-5 om.m

Geoelektrična mjerenja treba izvesti prije injektiranja, za vrijeme injektiranja i nakon završenog injektiranja. Interpretacija rezultata mjerenja ima višemanje kvalitativni značaj, ali može dati veoma dobru sliku o uspjehu injektiranja.

Za kvantitativno prosuđivanje uspjeha injektiranja brana za hidrocentrale razradio je F r i t s c h (1949, 1951, 1954) poseban postupak geoelektrične kontrole, koji se sastoji načelno u ovom: U bušotinama, koje služe za injektiranje, izvrši se najprije elektrokarotaža. Uobičajenim se mehaničkim postupkom ispita vodopropusnost, t. j. utvrdi se gubitak vode. Zatim se izvrši injektiranje; sve se injekcije kontroliraju geoelektrički (mjerenjem otpora prije, za vrijeme i poslije injektiranja svake etaže). Nakon injektiranja izvrši se opet mehanička kontrola ispitivanjem vodopropusnosti. Svi na te načine dobiveni rezultati predočuju se pregledno, tako da se mogu jasno utvrditi one zone, koje nisu bile dobro injektirane. To se onda uredi svrsishodnom raspodjelom bušotina sekundarne injektione zavjese. Ta se kod injektiranja opet geoelektrički kontrolira.

Injekcionoj se bušotini podijeli izvjesni injekcioni cilindar, obično promjera 5 m. Zadatak kontrole injektiranja je sada, da se utvrdi, koliko se dio utisnute injektione mase raspodijelio unutar uzetog injekcionog cilindra. U tu se svrhu mjeri specifični otpor injekcionog cilindra prije, za vrijeme i nakon injekcije. Omjer: volumen utisnute injektione mase prema volumenu injekcionog cilindra – označen u % ili ‰ – označuje se kao vrijednost »mora biti«. Iz mjerenja električnog otpora izračuna se sada volumen injektione mase raspodijeljen u injekcionom cilindru. Omjer: volumen raspodijeljene injektione mase prema volumenu injekcionog cilindra – izražen u % ili ‰ – daje vrijednost »jest«. Moguća su tri slučaja:

Vrijednost »mora biti« = vrijednost »jest«
 Vrijednost »mora biti« > vrijednost »jest«
 Vrijednost »mora biti« < vrijednost »jest«.

U prvom je slučaju utisnuta injekciona masa ostala u injekcionom cilindru. U drugom je slučaju dio injektione mase otišao kroz pukotine stijena odnosno materijala iz tog injekcionog cilindra u okolinu. Treći je slučaj fizikalno teže protumačiti; utvrđeno je, da je dan onda, kad u podzemlju prevladavaju fine, s ilovinom ili vezanom vodom ispunjene pukotine. Dok dakle, u drugom slučaju izvjestan dio utisnute injektione mase nije ispunio postavljenu svrhu, može se u trećem slučaju pretpostaviti, da je podzemlje zapunjeno toliko, koliko to dopušta svojstvo injektione mase. U trećem slučaju većinom poraste mogućnost primanja injektione mase, ako se povisi injekcioni pritisak (F r i t s c h, 1951).

Da bi se dobila pregledna predodžba dobivenih rezultata, ocijeni se svako opažanje određenim brojem bodova. To se bodovanje prikaže sada grafički (F r i t s c h, 1954). Prema F r i t s c h u se sistem bodovanja još ne može smatrati konačnim; od budućih iskustava zavisit će izvjesni ispravci.

Ovaj je postupak geoelektrične kontrole F r i t s c h uspješno primijenio kod gradnje velikih brana u dolini Kaprun (Austrija). Kod nas je primijenjen dosad djelomično na branama hidrocentrala Lokvarka, Jajce II i Peruča.

IV. Ostala geoelektrična mjerenja

Među posebne vrste geoelektričnih mjerenja mogu su ubrojiti ovi postupci:

1. Ispitivanje cesta, avionskih pista i sl. električnim visokofrekventnim mjernim uređajem. Ovaj se način ispitivanja primjenjuje tada, kad je podzemlje, koje treba istražiti, prekriveno izolirajućom naslagom (asfalt) ili armiranim betonom. U oba spomenuta slučaja ne mogu se primijeniti obične metode istosmjerne struje. Ovim načinom mjerenja mogu se utvrditi šupljine odnosno općenito zone, u kojima je podloga odnosnih građevina (cesta, pista i sl.) poremećena. Mjerenja se izvode brzo, ne smetaju mnogo prometu i ne oštećuju objekte ispitivanja.

2. Mjerenja vibracija i potresa u zgradama zbog jakog prometa ili izvođenja radova, koji izazivaju takve potrese. Mjerenja se izvode pomoću električnog geofona (infrazvučnog mikrofona) i preciznog voltmetra. Ispitivanja se vrše brzo i moguća su na svakom mjestu, jer je čitav uređaj vrlo malen. Interpretacija se vrši na osnovu izmjerenih veličina napona na različitim mjestima.

3. Ovamo se može ubrojiti i mjerenje rastezanja betona pomoću naročitih traka za mjerenje. Mjerenja su vrlo jednostavna, jer treba samo trake za mjerenje (dakako na poseban dosta osjetljiv i točno utvrđen način uz određene uvjete pripremanja samih traka) spojiti na specijalni instrument. I princip ispitivanja je vrlo jednostavan. Zbog povećanja dužine trake za mjerenje mijenja se električni otpor. Instrument je baždaren tako, da mjeri nastalu promjenu napona. Iz promjene napona izračuna se u betonu izazvano rastezanje. Na taj se način određuje rastezanje položenih velikih betonskih ploča kao i savijanje stropnih betonskih ploča.

INTERPRETACIJA MJERNIH PODATAKA

Interpretacija podataka dobivenih kod mjerenja u bušotinama, kod injektiranja kao i kod ostalih geoelektričnih mjerenja razmotrena je već pri opisu tih mjernih postupaka – barem u osnovnim crtama. Poblježe treba, međutim, razmotriti interpretaciju podataka dobivenih kod mjerenja po metodi otpora, t. j. kod geoelektričnog sondiranja i geoelektričnog profiliranja.

Osnovna svrha *geoelektričnog sondiranja* sastoji se u određivanju dubine i debljine određene naslage, koja se po svom specifičnom otporu dovoljno razlikuje od naslaga, koje se nalaze iznad nje, a ponekad i od naslage, koja je ispod one naslage, što se određuje. To se vrši obradom,

analizom izmjerene krivulje prividnog specifičnog otpora; postupak obrade ili analize mjernih podataka naziva se interpretacijom krivulja geoelektričnog sondiranja.

Ovaj pojam ima kod današnjeg stanja geoelektrike veoma široko, kompleksno značenje. Pod interpretacijom krivulja geoelektričnog sondiranja razumijevaju se sve operacije, koje dovode do najboljeg geološkog tumačenja mjernih podataka na izvjesnom području (S o r o k i n i dr., 1954). Premda geoelektrična ispitivanja dovedu ponekad do ispravaka (a u svakom slučaju do dopuna) prethodnih geoloških istraživanja, ona su usko vezana za geološke prilike odnosno za proučavanje geoloških odnosa u podzemlju. Tumačenje rezultata geoelektričnog ispitivanja zapravo je geološka interpretacija instrumentalno utvrđenih fizikalnih svojstava podzemlja i njihovih promjena. Stoga je poznavanje geologije općenito, a naročito geološkog sastava istražnog područja, jedan od osnovnih uvjeta za dobro tumačenje geoelektričnih mjernih rezultata. U zavisnosti o različitim prilikama, što ih uvjetuje pretežno geološki sastav, pristupa se interpretaciji krivulja geoelektričnog sondiranja na svakom terenu na drugi način.

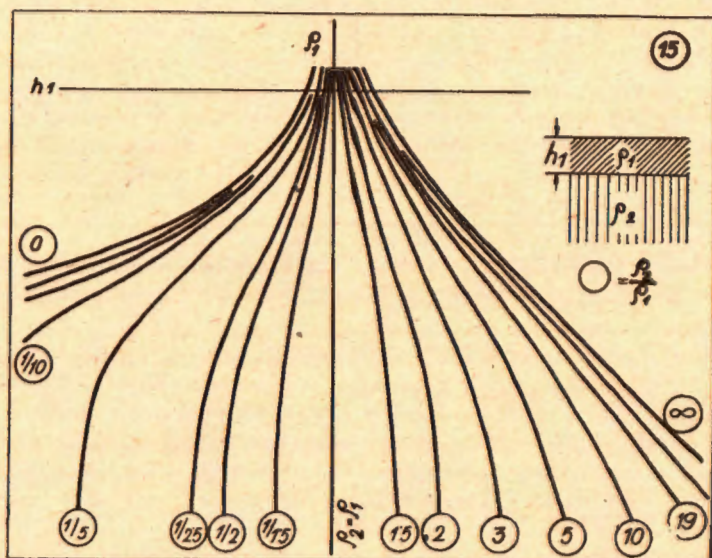
Najprije se vrši analiza svih mjernih rezultata geoelektričnih mjerenja zajedno s proučavanjem rezultata geoloških istraživanja, elektrokarotaže bušotina i podataka istražnog bušenja i geomehaničkih ispitivanja.

U idućoj fazi dolazi analiza svih krivulja otpora na odnosnom području; ona se obično naziva kvalitativnom interpretacijom. Njezin je rezultat opća slika o građi podzemlja. Prate se promjene oblika krivulja otpora, određuje se veza s promjenama geološkog sastava podzemlja i utvrđuju razlozi, koji mijenjaju i kompliciraju oblik dijagrama geoelektričnog sondiranja. Kao rezultat kvalitativne interpretacije javlja se karta bitnih karakteristika podzemlja na istraženom području (karta tipova krivulja otpora) kao i određivanje najvjerojatnijih vrijednosti specifičnih otpora naslaga. To služi kao osnova za kvantitativnu interpretaciju krivulja otpora. Kad su izmjerene krivulje otpora tako složene, da nije moguća njihova kvantitativna interpretacija ili kad nema za nju dosta podataka (geoloških profila, podataka elektrokarotaže i mehaničkog bušenja) sastavljaju se karte, koje daju samo kvalitativnu sliku o građi podzemlja nekog područja.

Kvantitativna interpretacija dijagrama geoelektričnog sondiranja, koja daje dubine i debljine traženih naslaga, u stvari je zapravo svršetak svih naprijed navedenih operacija. Ona se sastoji u načelu uglavnom na ispořádvanju izmjerenih krivulja otpora s teoretski izračunanim krivuljama. U tu su svrhu izračunani sistemi ili skupovi teoretskih krivulja otpora za dva, tri i četiri sloja za mnogo određenih omjera debljina i pravih specifičnih otpora pojedinih slojeva (S o r o k i n i dr., 1954).

Najjednostavnija je interpretacija krivulje dvoslojne građe podzemlja. Traženi podaci – debljina h_1 gornjeg sloja, koja je jednaka dubini donjeg sloja, i njihovi pravi specifični otpori – određuju se na taj način, da se izmjerena krivulja prividnog specifičnog otpora dovede do podudaranja sa jednom od teoretskih krivulja (Sl. 15 i 16). Ako se izmjerena krivulja

ne podudara ni sa jednom od teoretskih krivulja, primijeni se postupak interpolacije. Na sl. 16 prikazana je interpretacija krivulje dvoslojne građe podzemlja s odnosima predočenim na sl. 5. Kod računanja skupa teoretskih krivulja uzeti su debljina h_1 i specifički otpor ρ_1 gornjeg sloja jednaki jedinici, a donji sloj beskonačne debljine i specifičkog otpora ρ_2 manjeg i većeg od ρ_1 . Linija h_1 pokazuje direktno debljinu prvog sloja u koordinatnom sistemu izmjerene krivulje; vrijednost ρ_1 pročita se, a vrijednost ρ_2 izračuna iz određenog odnosno nađenog omjera otpora.



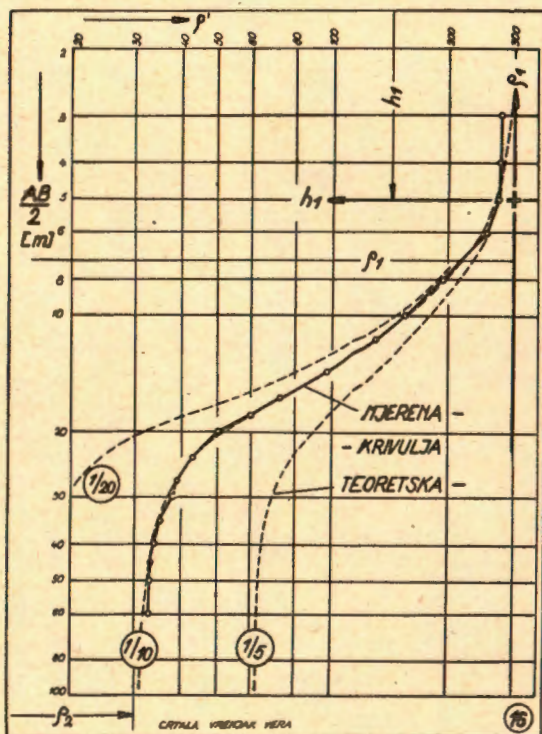
Sl. 15. Skup teoretskih krivulja za dvoslojni slučaj

Abb. 15. Kurvenschar für den Zweischichtenfall

Na sličan način interpretiraju se uz pomoć skupova teoretskih krivulja izmjereni dijagrami geoelektričnog sondiranja na terenu s troslojnom građom podzemlja. Teoretske krivulje izračunane su za seriju vrijednosti debljina m_2 srednjeg sloja i otpora ρ_2 i ρ_3 srednjeg i donjeg sloja. Debljina $m_1 = h_1$ i otpor ρ_1 gornjeg sloja uzeti su kod računanja jednaki jedinici, a debljina trećeg sloja uzeta je beskonačno velikom. Na sl. 17 prikazan je kao primjer jedan skup troslojnih teoretskih krivulja; linija h_1 pokazuje dubinu granične plohe prvog i drugog sloja (ili debljinu prvog sloja), a linija h_2 dubinu gornje plohe trećeg sloja. Da se može izvršiti interpretacija, treba poznavati specifični otpor ρ_2 međusloja (srednjeg sloja).

Četvoroslojne krivulje mogu se također interpretirati uz pomoć teoretskih krivulja. Za jednoznačnu interpretaciju potrebno je poznati otpore

ρ_2 i ρ_3 drugog i trećeg sloja. Za ovaj posao potreban je veoma velik broj skupova izračunanih teoretskih krivulja ili se one moraju sastavljati za svaki teren po metodi grafičkog sastavljanja krivulja otpora. Sastavljanje krivulja može se vršiti za različite veličine otpora i debljine slojeva; sastaviti se mogu čitave serije krivulja, koje će odgovarati konkretnim geološkim i geoelektričnim uvjetima istraživanog podzemlja (F l a t h e, 1955). Te se krivulje mogu primjenjivati zajedno s izračunanim krivuljama.

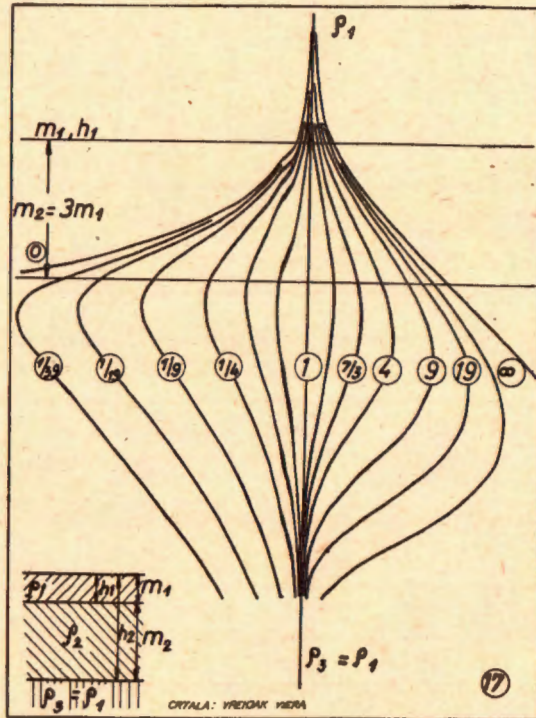


Sl. 16. Interpretacija izmjerene dvoslojne krivulje prividnog specifičnog otpora
 Abb. 16. Auswertung einer gemessenen Zweischichtenkurve des scheinbaren spezifischen Widerstandes

Za interpretaciju troslojnih, četvoroslojnih i višeslojnih krivulja veoma se mnogo danas primjenjuje postupak pomoćnih točaka po Hummelu (Ebert, 1942). Mjerne krivulje interpretiraju se uz pomoć skupa dvoslojnih teoretskih krivulja i posebnih (t. zv. pomoćnih) teoretskih krivulja za četiri osnovna tipa troslojnih krivulja otpora (Sl. 19). Princip interpretacije sastoji se u ovom: Najprije se interpretiraju gornja dva sloja pomoću skupa dvoslojnih teoretskih krivulja, kako je to već prikazano na sl. 15 i 16. Sad se oba gornja sloja zamijene jednim fiktivnim slojem, i taj se sada sa trećim najdonjim slojem interpretira

opet kao dvoslojni problem. Dvostruka primjena dvoslojnog teoretskog skupa krivulja (Sl. 15) vezana je za upotrebu specijalne teoretske krivulje odnosno skupa krivulja. Na sl. 20 prikazana je interpretacija jedne troslojne krivulje po postupku pomoćnih točaka.

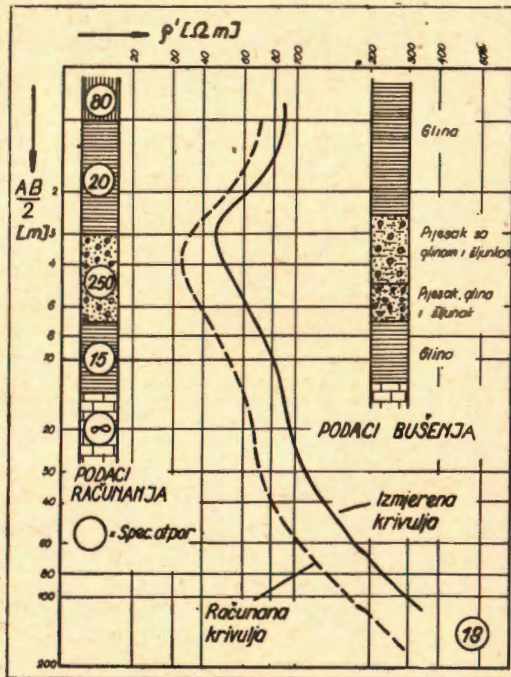
Postepenom primjenom ovog postupka mogu se rješavati svi višeslojni problemi. Interpretacija je dakako sve teža i kompliciranija, što je broj slojeva veći.



Sl. 17. Skup troslojnih teoretskih krivulja otpora
 Abb. 17. Eine Kurvenschar für den Dreischichtenfall

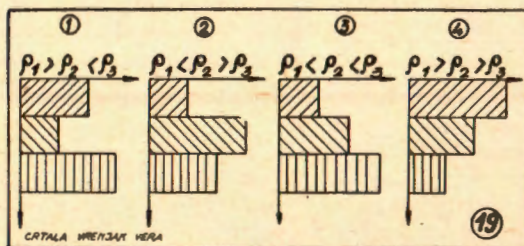
Točnost interpretacije dijagrama geoelektričnog sondiranja odnosno određivanja dubine i debljine neke naslage zavisi o dubini ispitivanja, o geološko-geoelektričnoj građi podzemlja i o točnosti mjerenja. Točnost je to veća, što je podzemlje homogenije. Iskustvo pokazuje, da pogreška određivanja dubina doseže i u povoljnim uvjetima do 10% stvarne dubine. Pri uspoređivanju rezultata geoelektričnog sondiranja i mehaničkog bušenja treba uzeti u obzir to, da su neke razlike uvjetovane sasvim fizikalno. Ako se na homogenoj podlozi nalaze naslage gline ili pijeska, većinom se dobro podudara geoelektrični podatak dubine sa mehaničkim. Ako je pak površina stijene u podlozi rastrošena, bit će granična ploha neravna, nepravilna pa će doći do izvjesne razlike u podatku du-

bine. To je redovna pojava kod geoelektričnog sondiranja na području našeg krša. Kod geoelektričnog sondiranja je naime zahvaćena kako različita površina granične plohe dvaju različitih materijala, tako i razli-



Sl. 18. Primjer po Flatheovoj metodi izračunane i slične na terenu izmjerene petoslojne krivulje otpora

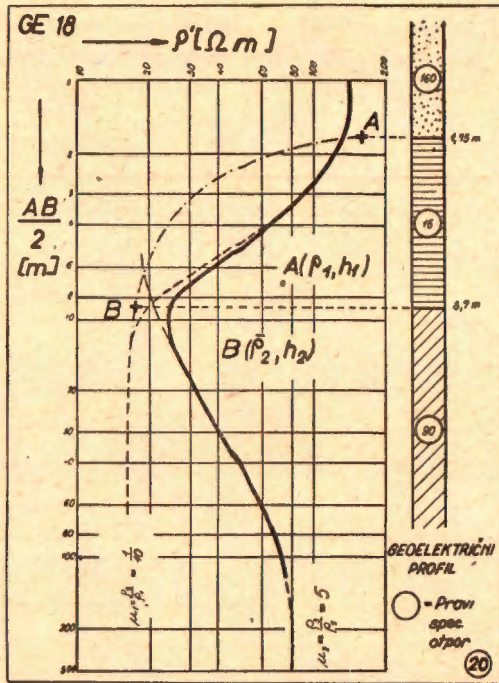
Abb. 18. Vergleich einer nach der Flathe-Methode berechneten Fünfschichtenkurve mit einer im Feld gemessenen Kurve



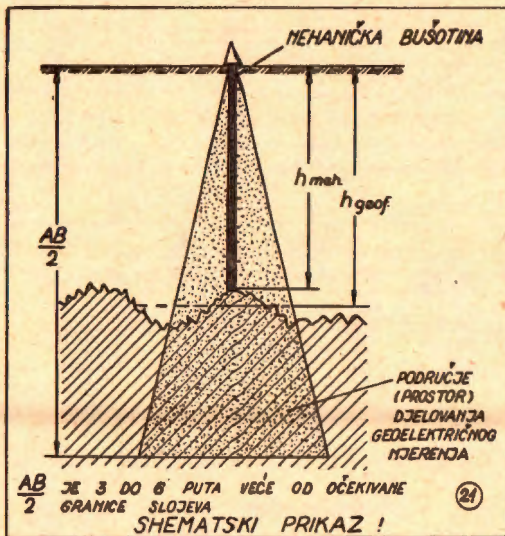
Sl. 19. Tipovi troslojne građe podzemlja

Abb. 19. Typen der dreischichtigen geoelektrischen Struktur des Untergrundes

čiti njihovi volumeni, što nije kod mehaničke bušotine. Stoga daje geoelektrično sondiranje na određenom mjestu prosječnu dubinu granične

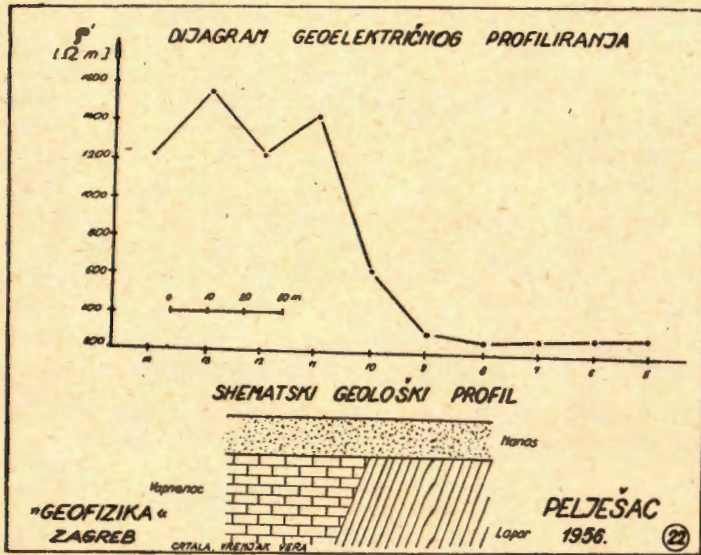


Sl. 20. Interpretacija troslojne krivulje otpora po postupku pomoćnih točaka
 Abb. 20. Auswertung einer Dreischichtenkurve nach der Hilfspunktmethode



Sl. 21. Shematski prikaz geoelektričnog sondiranja i mehaničkog bušenja u kršu
 Abb. 21. Schematische Darstellung geoelektrischer Sondierung im Vergleich mit der Bohrung im Karstgebiet

plohe između karstificirane podloge (vapnenac, dolomit) i nanosa (glina, crljenica), dok mehanička bušotina daje podatak, koji se odnosi na izvanredno malen dio te granične plohe, pa može pokazati mehanička bušotina postavljena samo nekoliko metara dalje znatnu razliku u podatku dubine (Sl. 21; isporedi i Sl. 7). Kad je i materijal, koji prekriva karstificiranu podlogu, a mahom je nanosnog, taložnog porijekla, jako heterogenog sastava, povećava se mogućnost razlike između geoelek-



Sl. 22. Dijagram geoelektričnog profiliranja iznad prekrivene strme granične plohe između vapnenca i lapora

Abb. 22. Widerstandsprofil über einen bedeckten Trennfläche zwischen Kalkstein und Mergel

tričnog i mehaničkog podatka o dubini karstificirane podloge. Geoelektrički se dobivaju redovno veće dubine od mehanički utvrđenih. U takvim je uvjetima svakako potrebno uspoređivanje geoelektričnih mjerenja s rezultatima mehaničkog istražnog bušenja i geomehaničkog ispitivanja.

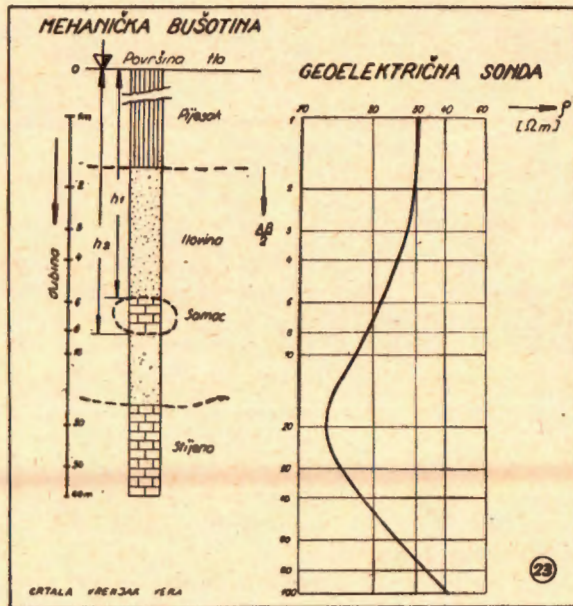
Kod geoelektričnog profiliranja mijenja se mjereni prividni specifični otpor prema udjelu kod mjerenja zahvaćenog materijala i približuje se kod mjerenja iznad jedne vrste materijala vrijednosti specifičnog otpora tog materijala. Kod mjerenja iznad drugog geološkog vodiča približava se izmjerena vrijednost prividnog specifičnog otpora veličini specifičnog otpora tog materijala. Što je veća razlika specifičnih otpora geoloških vodiča, to je veća i razlika u dobivenom geoelektričnom dijagramu. To se lijepo vidi na praktičnom primjeru na sl. 22. Iznad vapnenca dobije se vrijednost prividnog specifičnog otpora oko 1400 om.m, a iznad lapora oko 200 om.m. Omjer otpora je razmjerno velik - 7 : 1 --

i omogućava dosta točno određivanje strme geološke granice između vapnenca i lapora, premda je posljednja prekrivena. Tražena granica je približno ispod središta prelaznog dijela geoelektričnog dijagrama.

Kod geoelektričnog profiliranja ne vrši se interpretacija mjernih podataka samo na upravo opisani način, t. j. tumačenjem dijagrama prividnog specifičnog otpora u zavisnosti o razmaku pojedinih mjernih stajališta, već se sastavlja i karta otpora. To se vrši tako, da se istraživani teren pokrije ravnomjerno smještenim mjernim stajalištima (u obliku mreže). U središtima rasporeda elektroda, nacrtanim na karti, prikazu se izmjerene veličine specifičnog otpora. Spajanjem točaka s istim vrijednostima ρ' dobije se sistem linija istih vrijednosti prividnog specifičnog otpora – karta otpora. Prema raspodjeli prividnog specifičnog otpora na karti otpora vidi se promjena tog fizikalnog parametra podzemlja, a prema toj promjeni prosuđuje se geološka građa podzemlja. Dok se geoelektrično profiliranje vrši s malim dubinskim zahvatom, karta otpora jednaka je geološkoj karti. Interpretacija karte otpora istovetna je u tom slučaju interpretaciji geološke karte. Kad se zatim uzme veliki razmak strujnih elektroda i time poveća dubinski zahvat, dobije se karta otpora, koja pokazuje tektonske elemente podzemlja.

PRIMJENA GEOELEKTRIČNIH MJERENJA U GRAĐEVINARSTVU

Prikazujem samo nekoliko osnovnih i tipičnih mogućnosti primjene geoelektrike pri rješavanju raznih problema u građevinarstvu.

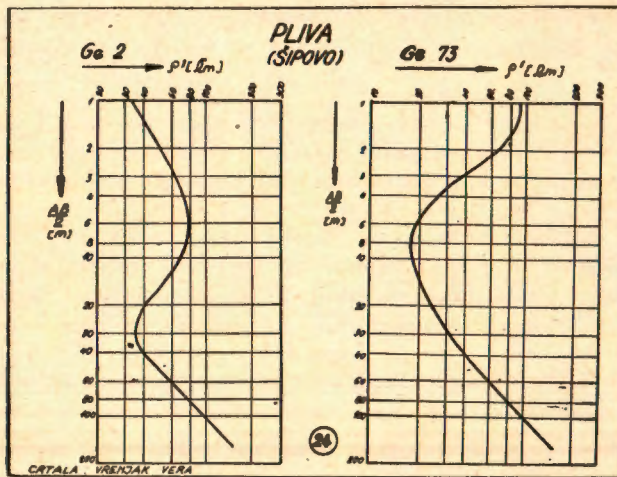


Sl. 23. Utvrđivanje pojave samca stijene
 Abb. 23. Nachweis eines Findlings

a) Geoelektrični profili (presjeci) građevnog tla

Prije projektiranja i podizanja velikih građevnih objekata veoma je korisno primijeniti i geoelektrično ispitivanje odnosnog terena. To se može izvesti brzo i jeftino i daje dragocjenije podatke o građi podzemlja. Većinom se radi o određivanju dubine čvrste stijene (podloge) ispod nanosa. Jedan je primjer takvog ispitivanja već prikazan na sl. 2. Kako se vidi na slici, podzemlje se sastoji od tri naslage: sedrastog pijeska s humusom na površini tla, glinenog međusloja i vapnenačke podloge. Ispitivanje je izvršeno za potrebe projekta jedne brane za hidrocentralu u Hrvatskoj. Svršishodna kombinacija geoelektričnih sondâ i mehaničkih istražnih bušotina uvjetuje najekonomičnije rješenje postavljenog zadatka.

Sl. 23 pokazuje zanimljiv primjer iz prakse. Lijevo je predôčen profil mehaničke istražne bušotine, koja je u dubini h_1 naišla na stijenu. Dijagram geoelektričnog sondiranja, predôčen na sl. 23 desno, ne pokazuje na tom mjestu nikakvu promjenu. Zbog toga je pretpostavljeno prisustvo većeg samca stijene. Stvarno se na izvjesnoj dubini h_2 opet naišlo na isti materijal kao i prije nailaska na samac, a stijena je dosegnuta dosta dublje. Bez geoelektričnog sondiranja bi se u takvim slučajevima prerano prekinulo istražno bušenje.



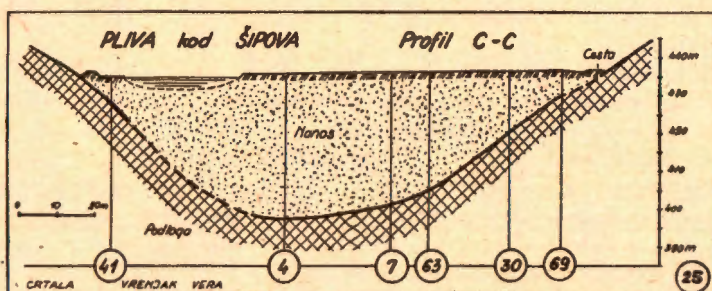
Sl. 24. Dvije karakteristične krivulje otpora s područja rijeke Plive kod Šipova
 Abb. 24. Zwei charakteristische Widerstandskurven aus dem Pliva-Tal bei Šipovo

1. Zanimljiv je primjer određivanja dubine podloge na predviđenim pregradnim mjestima u dolini rijeke Plive kod mjesta Šipovo (NRBiH).

Na profilima dviju varijanata pregradnih mjesta za hidrocentralu izvršena su najprije mehanička istražna bušenja, da se dobiju podaci o vrsti i svojstvima nanosa pa o dubini, vrsti i kakvoći čvrste stijene (podloge). Da bi se dobili podaci o dubini čvrste stijene na širem pod-

ručju pregradnih mjesta, izvršena su i geofizička ispitivanja metodom geoelektričnog sondiranja. Ovdje su razmotrena samo geoelektrična mjerenja na varijanti B.

Ispitivani je teren razmjerno uska rječna dolina s dosta debelim nanosom od šljunka, pijeska, gline i nešto sedre i lapora. Podloga je dolomit trijasko starosti. Geoelektrično sondiranje bilo je vezano na mehaničke bušotine, i to je olakšalo interpretaciju dobivenih podataka. Sl. 24 prikazuje dvije karakteristične krivulje otpora, a sl. 25 jedan geoelektrični profil (presjek) građe podzemlja s odnosnog područja.



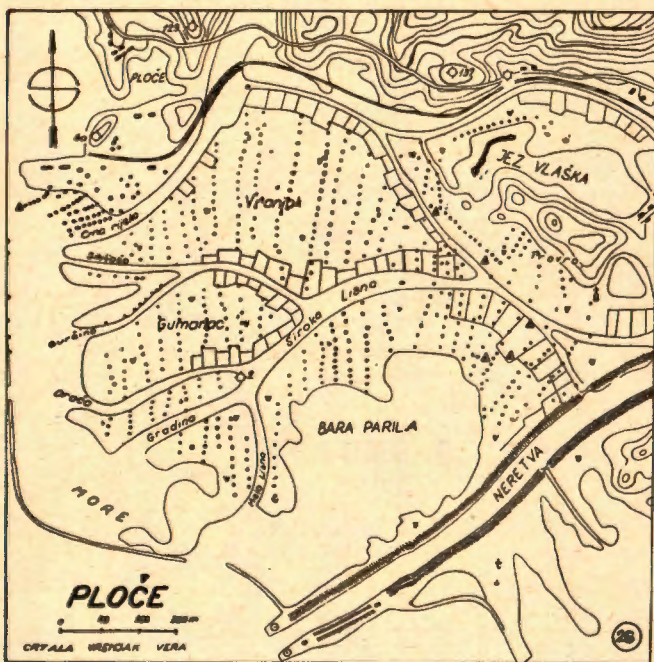
Sl. 25. Geoelektrični profil podzemlja poprečno na rijeku Plivu kod Šipova
Abb. 25. Geoelektrisches Querprofil im Pliva-Tal bei Šipovo

Kako pokazuju krivulje prividnog specifičnog otpora 2 i 73 (Sl. 24), nanosni materijal nema jednoliki sastav i istu dubinu, već se oboje mijenja u razmjerno širokim granicama. Jednolično i jedinstveno geoelektrički je izražena samo čvrsta stijena (podloga). Specifični otpor nanosa kreće se od 10 do 900 om.m, što je i razumljivo s obzirom na petrografski sastav tog materijala (glina, lapor, sedra, pijesak, šljunak). Specifični otpor trijaskog dolomita podloge izmjeren je na izdanku, i to u iznosu oko 2500 om.m. Odnos specifičnih otpora podloge i nanosa (neposrednog dijela iznad same podloge) bio je kod teoretske kvantitativne interpretacije beskonačno velik, i to je omogućilo točno određivanje dubine podloge.

2. Geoelektrika može se vrlo uspješno primijeniti na močvarnim područjima, gdje nije moguće izvršiti ni geološka istraživanja ni mehanička istražna bušenja odnosno posljednja samo na veoma ograničenoj površini. Takva su geoelektrična ispitivanja bila izvršena na području delte rijeke Neretve kod Ploča radi određivanja dubine čvrste stijene ispod debelog nanosa. Položaj čvrste stijene (podloge) bio je potreban projektantima velikih postrojenja nove velike luke Ploče.

Na površini od oko 6 km² bilo je izmjereno ukupno 600 geoelektričnih sondâ (Sl. 26). Mjerenja su bila izvedena pod veoma nepovoljnim uvjetima, jer je pretežni dio ispitivanog područja močvaran i pun kanala pa zato teško prolazan.

Mjerenja su izvršena metodom geoelektričnog sondiranja. Primijenjen je **Wennerov** raspored elektroda. Zbog izvanredno niskog specifičnog otpora nanosa, koji se sastoji od mulja, gline i pijeska, prožetih morskom vodom, trebalo je u podzemlje slati vrlo jaku struju, da se moglo uopće vršiti geoelektrično mjerenje do potrebne dubine. Namjesto uobičajenih anodnih baterija uzeti su kao izvor struje akumulatori, koji su davali istosmjernu struju jakosti i preko 5 A. Kod prvih mjerenja u toku 1953. godine radilo se s anodnim baterijama kao izvorom struje, ali su se one vrlo brzo praznile, pa se nisu mogla izvoditi točna mjerenja. Iz čitavog niza akumulatora dobivao se osim velike jakosti struje i dovoljno visoki stalni napon za sigurno očitavanje razlike potencijala na mjernim elektrodama. Takvi uvjeti tražili su izgradnju naročitog instru-



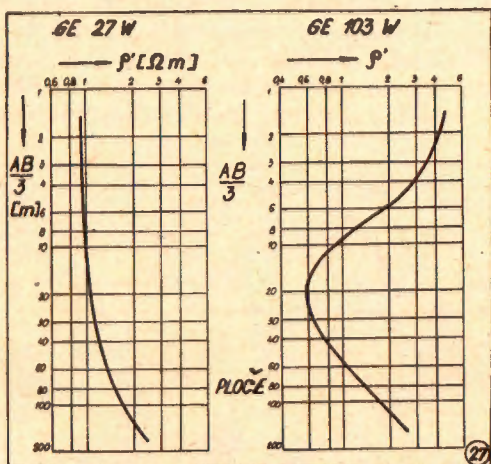
Sl. 26. Ploče. Područje ispitivanja i raspored geoelektričnih mjernih stajališta
 Abb. 26. Untersuchungsgebiet mit den geoelektrischen Messpunkten

menta za mjerenje, budući da kod standardnih instrumenata za obična mjerenja jakost upotrebene struje ne prelazi 1 A. Takav je instrument izgrađen za vrijeme zimskog prekida rada 1953./1954. godine.

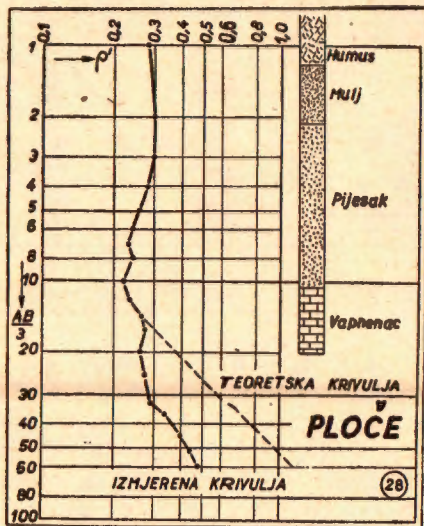
Nesmetano mjerenje kočile su jake prirodne struje u podzemlju. Te je struje izazivala najvjerojatnije naizmjenična cirkulacija slane i brackične vode u delti rijeke Neretve, zavisno o plimi i osjeci. To je bilo moguće zbog toga, što se područje ispitivanja nalazi u razini mora, pa je bilo za vrijeme plime dobrim dijelom pod morem, a za vrijeme osjeke nekoliko desetaka centimetara iznad mora.

Osim geofizičkih izvršena su i geomehanička ispitivanja i mehanička istražna bušenja. Rezultati ovih radova korišteni su kod interpretacije geofizičkih mjernih podataka.

Veoma heterogeni sastav nanosa zadavao je izvjesne teškoće kod interpretacije mjernih krivulja otpora. Kako je bio čitav nanos jako prožet slanom vodom – prema geomehaničkim analizama čak do 35% – ispoljavao se on u mnogim slučajevima kao jedna jedinstvena naslaga u geo-

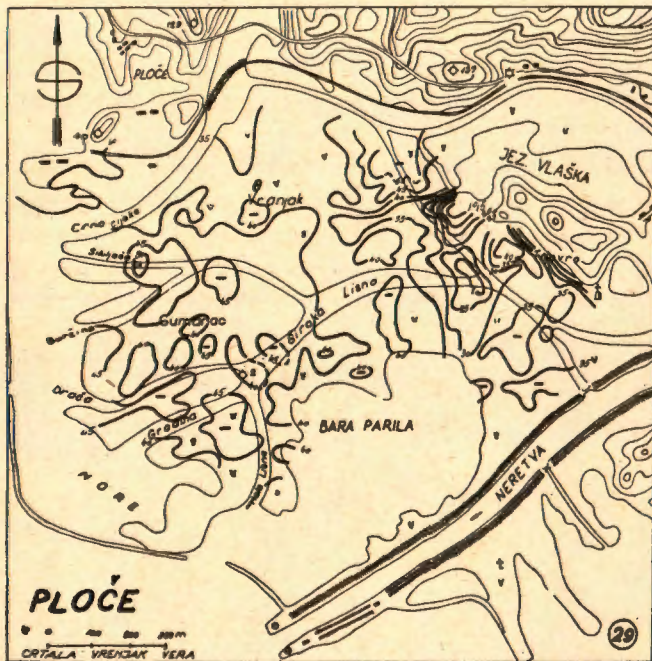


Sl. 27. Ploče. Dvije karakteristične krivulje otpora
Abb. 27. Zwei charakteristische Widerstandskurven



Sl. 28. Ploče. Utjecaj površinske nehomogenosti
Abb. 28. Einfluss der Oberflächenunstättigkeit

električnom smislu, pa su pri mjerenju dobivene dvoslojne krivulje otpora. Tamo, gdje su bile razlike u sastavu nanosa veće ili je gornji dio nanosa bio manje prožet slanom vodom, dobivene su troslojne krivulje otpora (Sl. 27). Granica nanos-podloga bila je razmjerno slabo izražena zbog anizotropije nanosa, jako karstificirane površine vapnenca i veoma niskog specifičnog otpora nanosa, koji je potiskivao ispoljavanje visokog otpora podloge u krivuljama otpora. Te su teškoće uklonjene primjenom korekcionog faktora, koji je bio određen uz pomoć podataka geomehaničkih ispitivanja i mehaničkog istražnog bušenja.



Sl. 29. Ploče. Karta izobataz podloge
 Abb. 29. Karte der Höhenlinien des festen Felsens

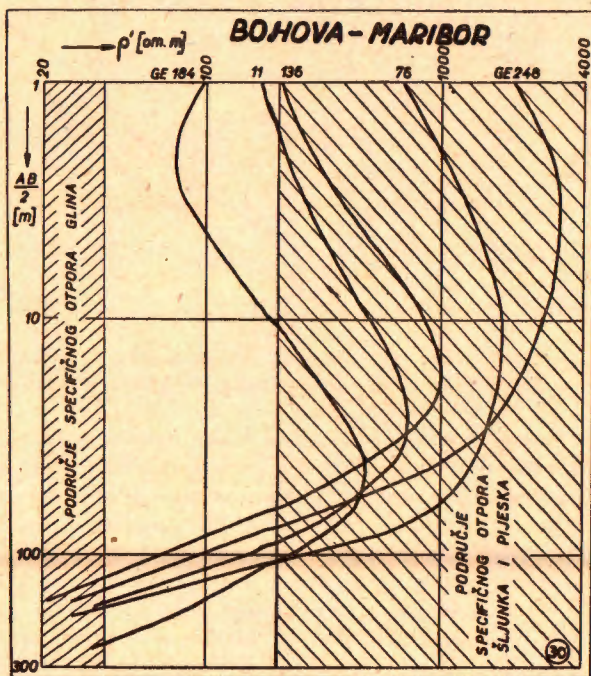
Izvjese teškoće zadavale su i površinske nehomogenosti. Taj se utjecaj mogao eksperimentalno utvrditi i provjeriti. To je bilo među ostalim na jednom mjestu uz mehaničku bušotinu, gdje je na izvjesnoj udaljenosti od središta elektrodnog rasporeda bilo područje močvare. Druga strana mjerne linije bila je suha. Tako su na jednoj strani bile nakon izvjesne udaljenosti prvo strujna, a zatim i mjerna elektroda u vodi. Elektrode na drugoj strani mjerne linije bile su sasvim na suhom. Na sl. 28 prikazan je ovaj slučaj. Ne poznavajući stvarno stanje moglo bi se zaključiti, da se radi o višeslojnoj krivulji otpora. Profil mehaničke istražne bušotine pokazuje, da je nepravilni tok krivulje otpora od $AB/3 \approx 15$ m dalje odraz utjecaja površinske nehomogenosti područja ispitivanja (M a t a s o v i ć, 1955).

Interpretacija mjernih krivulja otpora bila je izvršena uz pomoć teoretskih krivulja i primjenom spomenutog korekcionog faktora. Kao rezultat ispitivanja izrađena je karta izohipsa stjenovite podloge (karta izobata), koja pokazuje, da je podloga razmjerno ravna i bez većih uzdignuća, kako se to očekivalo (Sl. 29). Prosječna debljina nanosa iznosi 40 m.

b) Geoelektrika i rješavanje hidroloških problema

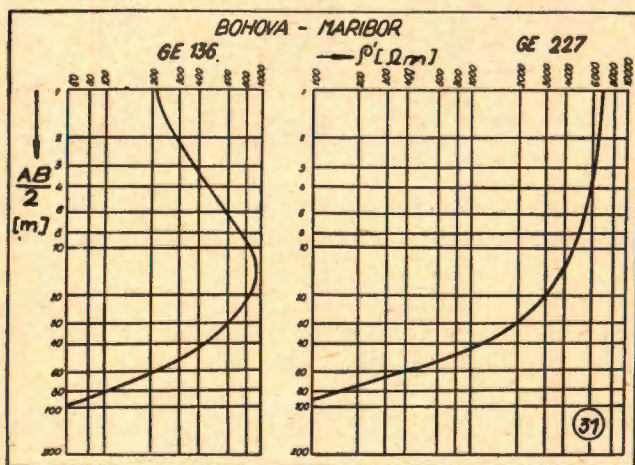
Geoelektrično ili općenito geofizičko ispitivanje vode vrši se gotovo uvijek samo posredno, jer se ispituje građa podzemlja i traži geološka formacija (naslaga), povoljna za skupljanje vode; rijetko se traži neposredno sama voda. Stoga su osnovni zadaci geoelektričnog ispitivanja kod istraživanja vode:

1. određivanje dubine i debljine pojedinih naslaga u podzemlju,
2. određivanje dubine i reljefa vodonepropusne naslage (podloge),
3. ispitivanje propusnosti i drugih svojstava vodonosne naslage,
4. određivanje granice slatka – slana voda odnosno određivanje utjecaja morske vode u podzemlju u priobalnim područjima.



Sl. 30 Bohova-Maribor. Krivulje otpora
 Abb. 30. Bohova-Maribor, Widerstandskurven

U posljednjih nekoliko godina vršili su neki autori opsežne pokuse sa ciljem, da utvrde mogućnosti određivanja faktora propusnosti k (m/s) geoelektričnim putem (Fritsch, 1956). Utvrđeno je, da postoje između srednjih vrijednosti nekih hidroloških parametara i specifičnog otpora kod povoljnih uvjeta zakonomjerni odnosi. Stoga je specifični otpor vodonosne naslage nekog područja značajan hidrološki parametar, pa se mogu geoelektrički prosuđivati hidrološka svojstva tog područja. Veličinu i specifičnog otpora i faktora propusnosti vodonosne naslage uvjetuju njezina fizikalna i elektrokemijska svojstva, pa je razumljiva izvjesna međusobna povezanost ovih dvaju parametara. Geoelektrika primijenjena uz manji broj mehaničkih bušotina može dati značajan prilog istraživanju vode. Kod takvog je sistematskog rada svrsishodno učiniti na određenom području rijetku mrežu mehaničkih bušotina. U tim se bušotinama izvrše mehanička određivanja faktora k kao i geoelektrična sondiranja (veoma je uputna i primjena elektrokarotaže). Između mehaničkih bušotina izvedu se zatim geoelektrična mjerenja s malim razmakom mjernih stajališta. Na osnovu malobrojnih mjerenja u bušotinama dobije se pomoću geoelektričnih mjerenja brzo i jeftino predodžba o veličini faktora k na čitavom području ispitivanja (Fritsch, 1956).



Sl. 31. Bohova-Maribor. Dvije karakteristične krivulje prividnog specifičnog otpora
 Abb. 31. Bohova-Maribor. Charakteristische Widerstandskurven

1. Veoma značajan primjer uspješnog sistematskog istraživanja vode predstavljaju geoelektrična i hidrološka ispitivanja na području Bohove kod Maribora. Osnovni zadatak geoelektričnih mjerenja bilo je određivanje dubine i reljefa vodonepropusne podloge. Na području površine oko 3,5 km² izmjereno je 413 geoelektričnih sonda. U prve dvije faze rada izmjereno je 259 krivulja otpora i nakon prethodne (preliminarne) teoretske interpretacije predloženo je 5 mehaničkih bušotina. Prosječno

odstupanje između mehanički i geoelektrički određene dubine podloge iznosilo je 10,7%. Prema podacima mehaničkih bušotina određen je faktor korekcije zbog anizotropije odnosno heterogenog sastava materijala u podzemlju (šljunak s primjesama pijeska i gline). U trećoj fazi



Sl. 32. Bohova-Maribor. Karta izobata nepropusne glinovite podloge

Abb. 32. Bohova-Maribor. Karte der Höfienlinien der wasserstauenden Tonschichten

izmjerene su 154 geoelektrične sonde. Pet novo lociranih mehaničkih bušotina dalo je ovaj rezultat: Razlika između mehanički i geoelektrički određene dubine podloge iznosila je sada samo 3,8%.

Interpretacijom su odvojena tri sloja odnosno tri paketa slojeva:

1. površinski sloj humusa,
2. šljunkovito-pjeskovita naslaga (vodonosni sloj),
3. glina i glinoviti pijesak (vodonepropusna podloga).

Kako imaju šljunak i pijesak mnogo viši specifični otpor od gline, koje se nalaze ispod naslage šljunka i pijeska kao nepropusna podloga, nije bilo teško odvojiti vodonosnu i propusnu naslagu od vodonepropusne glinovite podloge. To zorno pokazuje sl. 30.

Odnos veličina specifičnog otpora drugog i trećeg sloja bio je povoljan; šljunci i pijesci imaju specifični otpor i do 6.000 om.m, dok je podloga specifičnog otpora uvijek ispod 30 om.m. Usprkos ovom povoljnom omjeru otpora kvantitativna interpretacija nije bila uvijek laka. Ta je

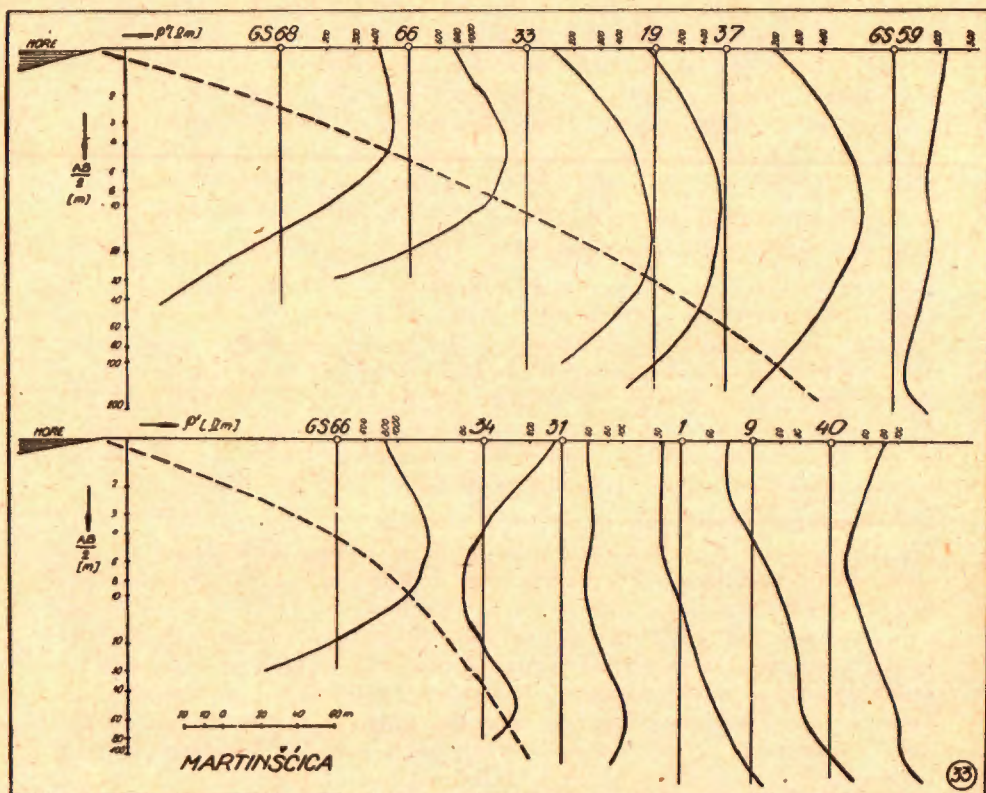
interpretacija razmjerno laka u slučaju krivulja tipa GE 136 (Sl. 31). Drugi tip krivulja predstavlja dijagram GE 227 (Sl. 31). Ovdje se javljaju šljunci i pijesci skoro na površini, a prijelaz iz vodonosne naslage u vodonepropusnu glinovitu podlogu nije oštar, već postepen. Postepeni prijelaz sačinjavaju naizmjenični tanki slojevi i proslojci gline i glinovitog pijeska, gliniziranog šljunka i pjeskovite gline. Ovaj se prijelaz očituje u nenormalnoj kosini padajućeg dijela krivulje otpora.

Rezultati geoelektričnog ispitivanja predloženi su u obliku karte izobata nepropusne glinovite podloge (Sl. 32).

Karta izobata pokazuje, da je gornja površina nepropusne podloge razmjerno ravna, bez većih udubljenja određenog pravca prostiranja. Podloga je najdublja istočno od sela Bohova i oko željezničke stanice Hoće. Prva mehanička bušotina za hidrološka opažanja postavljena je unutar zatvorene izobate 245 istočno od Bohove (GE 145). Hidrološka ispitivanja dala su vrlo dobre rezultate. Dalji istražni radovi usmjereni su prema NNE u pravcu preko GE 76; povoljna područja oko željezničke postaje Hoće isturena su predaleko na jug.

2. Geoelektrična ispitivanja mogu biti dragocjeno pomoćno sredstvo pri istraživanju nalazišta vode u priobalnim područjima. Rezultati geoelektričnog sondiranja veoma korisno dopunjuju geološke i hidrološke radove i pružaju obilje materijala za detaljnije upoznavanje hidrološke problematike na odnosnim područjima, i usprkos činjenici, što je čitava jugoslavenska obala na području najjače izraženog krša, gdje je samo izvođenje, a napose obrada rezultata geoelektričnih mjerenja veoma otežana. Iako još nema dovoljno iskustva, mogu se rezultati smatrati kao zadovoljavajući. Vrijedno je spomenuti jedan primjer, i to geoelektrično ispitivanje u uvali *Martinšćici* kod Rijeke.

Geoelektričnim mjerenjima trebalo je utvrditi geološke prilike u podzemlju, da se mogu prosuditi mogućnosti korištenja većih količina podzemne vode iz već određenog akumulacionog područja. Izvršena su detaljna geoelektrična ispitivanja po metodi mjerenja prividnog specifičnog otpora. Dobiveni su veoma zanimljivi rezultati. Utvrđena je velika heterogenost sedimentnih naslaga i velika dubina stjenovite podloge. Uzduž uvale prolazi jedna geoelektrički jako izražena zona poremećenja; uz bokove uvale ima još nekoliko sporednih poremećenja. Približno uz autocestu Rijeka-Bakar popreko na pružanje uvale nalazi se vododrživa barijera od glinovitog materijala, koja sprečava slobodno prodiranje morske vode u unutrašnjost uvale. Time je znatno smanjena opasnost, da kod jačeg crpljenja slatke vode prodre morska voda u slatkovodno područje uvale *Martinšćice*. Osim toga zaustavlja se i podzemna voda u samoj uvali i jače odvodi samo za vrijeme jakog dotoka vode nakon oborina. Neke od navedenih geoelektrično-geoloških karakteristika mogu se vidjeti već iz samog oblika krivulja otpora (Sl. 33). Niski otpori ukazuju na glinovit materijal, a visoki na šljunak, kršje i stjenovitu podlogu (u većoj dubini). Jako izraženi pad prividnog specifičnog otpora u donjim dijelovima izmjerenih krivulja ukazuje na utjecaj slane vode u podzemlju. Posebnom linijom označena je granica tog utjecaja u podzemlju.



Sl. 33. Martinšćica. Krivulje prividnog specifičkog otpora u dva profila višemanje uzduž uvala

Abb. 33. Martinšćica. Kurven des scheinbaren spezifischen Widerstandes in zwei Längsprofilen

ZAKLJUČAK

Geoelektrične metode geofizičkog ispitivanja tla danas se sve više primjenjuju osim kod istraživanja ležišta korisnih iskopina i kod ispitivanja tla u građevne svrhe.

Među geoelektričnim metodama zauzima kod primjene u građevinarstvu istaknuto mjesto metoda mjerenja prividnog specifičnog otpora. Primjenjuju se oba njezina mjerna postupka: geoelektrično sondiranje i geoelektrično profiliranje.

Primjena geoelektričnog ispitivanja tla u građevinarstvu omogućava uštedu mehaničkih istražnih bušotina i uvjetuje time pojednostinjenje i ubrzanje istražnih radova. Prednosti geoelektričnog ispitivanja mogu doći do punog izražaja samo onda, ako se ono pravilno poveže s drugim načinima ispitivanja tla.

LITERATURA

- Ebert, A., 1942: Grundlagen zur Auswertung geoelektrischer Tiefenmessungen. Beiträge zur angewandten Geophysik, 10, Leipzig.
- Flathe, H., 1955: A Practical Method of Calculating Geoelectrical Model Graphs for Horizontally Stratified Media. Geophysical Prospecting, III, Number 3, 268-294, The Hague.
- Fritsch, V., 1949: Einige geoelektrische Untersuchungen mit Gleichstrom. Geofisica pura e applicata, XIV, Milano.
- Fritsch, V., 1951: Die geoelektrische Kontrolle der Zementinjektionen. Allgemeine Bau-Zeitung, Nr. 255, Wien.
- Fritsch, V., 1954: Geoelektrische Baugrunduntersuchung. Die Bautechnik, 31, Heft 10.
- Fritsch, V., 1956: Die geoelektrische Bestimmung der Wasserdurchlässigkeitsziffer, des K-Wertes. Die Wasserwirtschaft, 46, No. 12, 305-310, Münster/Westf.
- Hummel, J. N., 1929: Der scheinbare spezifische Widerstand. Zeitschrift für Geophysik, V, 89-104, Braunschweig.
- Litvinov, S. Ja., Arharov, L. V., 1946: Promyslovaja geofizika. Gostoptehizdat, Moskva.
- Matasović, M., 1955: Primjena geoelektričnih metoda istraživanja i obračun mjernih podataka. Tehnički pregled, 5-6, Zagreb.
- Sorokin, L. V., Kalenov, E. N., Komarov, S. G., i dr., 1954: Obščii kurs geofizičeskikh metodov razvedki neftjanyh i gazovyh mestoroždenii. Izdanie vtoroe, Gostoptehizdat, Moskva.
- Schenk, E., 1942: Über Lagebestimmungen steiler geologischer Grenzflächen im Untergrund durch Gleichstrommessungen. Zeitschrift für praktische Geologie, 50, Heft 8, Berlin-Halle.
- Schenk, E., 1943: Untersuchung geologischer Strukturelemente durch Kreissondierungen mit Gleichstrom (Vier-Pol-Methode). Zeitschrift für praktische Geologie, 51, Heft 8, Berlin-Halle.

Zusammenfassung

ZVONIMIR KRULC

Die ANWENDUNG DER GEOELEKTRISCHEN AUFSCHLUSSMETHODE
IM BAUWESEN

Die erste praktische Anwendung fanden die geophysikalischen Methoden im Bergbau. Der Mangel an mineralischen Rohstoffen nach dem ersten Weltkrieg verursachte die Notwendigkeit, nach rascheren und billigeren Methoden zur Aufsuchung der Bodenschätze zu suchen. Bedeutende Erfolge der praktischen Geophysik - besonders in der Erdölsuche - gaben aber den Anlass, die geophysikalischen Aufschlussmethoden auch für die Lösung anderer geologisch-tektonischen und geologisch-hydrologischen Aufgaben wie auch für die Baugrunduntersuchungen anzuwenden. Auf dem Gebiet der Baugrunduntersuchungen hat heute besonders die Geoelektrik an Bedeutung gewonnen. In Jugoslawien wurde in den letzten Jahren eine grössere Zahl solcher Untersuchungen ausgeführt und es scheint daher gerechtfertigt, eine kurze Übersicht über die Geoelektrik zu geben.

AUFGABEN DER GEOELEKTRISCHEN BAUGRUNDFORSCHUNG

Die Geophysik hat die Aufgabe, die geophysikalischen Eigenschaften geologischer Leiter im Untergrund zu untersuchen. Die Geoelektrik beruht auf der Feststellung und Beobachtung elektrischer Felder, die entweder von spontan wirkenden Ursachen

hervorgehoben oder künstlich erzeugt werden. Entscheidend für die Anwendbarkeit der Geoelektrik ist der Unterschied des elektrischen Leitvermögens der Schichten oder Gesteine des Untergrundes. Zur quantitativen Beurteilung der elektrischen Eigenschaften des Bodens dient der physikalische Parameter – der *spezifische Widerstand*.

Der spezifische Widerstand wird in Ohm-Metern (om.m) gemessen. Der reziproke Wert des spezifischen Widerstandes ist die elektrische Leitfähigkeit.

Der spezifische Widerstand der verschiedenen Gesteine, auch innerhalb ein und derselben Gesteinsart, schwankt in gewissen Grenzen. In der Fig. 1 sind die Grenzwerte der spezifischen Widerstände wichtiger Gesteinsarten dargestellt.

Oft werden die günstigsten Erfolge erzielt, wenn mehrere geophysikalische Verfahren zusammenarbeiten. Die Geoelektrik macht andere Verfahren und besonders die Aufschlussbohrungen nicht überflüssig. Es ist wirtschaftlich nicht nur günstig, sondern auch notwendig, diese zwei Verfahren miteinander zu kombinieren. Das zu untersuchende Gelände ist zunächst geoelektrisch zu untersuchen, dann müssen die Bohrpunkte nach dem Ergebniss der geoelektrischen Untersuchung festgelegt und gebohrt werden. Man kann nun die geoelektrischen Sondierungen an die Bohrungen anschliessen, wie das Fig. 2 zeigt, und die entsprechenden Korrekturen durchführen. So erhält man ein dichtmaschiges Sondiernetz, das aber doch billiger und rascher zu vollenden ist, als ein wesentlich weitmaschigeres, das nur aus Bohrungen besteht.

Die Geoelektrik wird für folgende Zwecke angewandt:

1. Ermittlung der Mächtigkeit und Tiefenlage der einzelnen Schichten im Untergrund.
2. Bestimmung der Oberflächenform des Grundgebirges oder der wasserstauenden Schicht.
3. Bestimmung der Beschaffenheiten einzelner Schichten oder des Felsens.
4. Bestimmung des Einfallens geneigter Schichten.
5. Feststellung von Verwerfungen.
6. Bestimmung der Erstreckung der wasserführenden und der stauenden Schichten und die Feststellung der Tonlinsen.

Die AUSFÜHRUNG DER MESSUNGEN

Die geoelektrischen Messungen können entweder von der Erdoberfläche oder von einem Bohrloch aus durchgeführt werden.

Nach der Stromart unterscheidet man Gleichstrom- und Wechselstromverfahren. In den geoelektrischen Baugrunduntersuchungen werden in mindestens 80% aller Fälle die klassischen Gleichstromverfahren eingesetzt und von denen in erster Linie die Methode des scheinbaren spezifischen Widerstandes.

1. Messungen an der Erdoberfläche

Der spezifische Widerstand des Bodens wird nach dem Schema in Fig. 3 gemessen. Durch zwei Aussenelektroden A und B sendet man den Gleichstrom einer bestimmten Stromstärke I in den Untergrund. Am den Innenelektroden M und N greift man die entsprechende Spannungsdifferenz ΔV ab und berechnet nach der Formel:

$$\rho' = \frac{\Delta V}{I} \cdot k \text{ (om.m)}$$

den sogenannten scheinbaren spezifischen Widerstand des Untergrundes im Bereich der Elektrodenanordnung.

Solange sich die Gesteinsbeschaffenheit nicht ändert, breitet sich der elektrische Strom im Untergrund gleichmässig aus, Senkrecht auf den sich im Boden bildenden Stromlinien stehen Linien gleichen Spannungsabfalls (Fig. 4).

Bei gleichmässiger Ausbildung des Untergrundes ändert sich der spezifische Widerstand nicht. Steht jedoch in einer gewissen Tiefe h unter der Deckschicht mit dem spezifischen Widerstand $\rho_1 = 300$ om.m eine Schicht geringeren spezifischen Wider-

standes $\rho_s = 30 \text{ om.m}$ (Fig. 5), dann werden die Stromlinien gewissermassen in diese besser leitende Schicht hineingezogen.

Bei der *geoelektrischen Sondierung* (Tiefenmessung) wird die vertikale Verteilung des spezifischen Widerstandes in einem bestimmten Punkt untersucht. Wird nun der Elektrodenabstand vergrössert, so dringen die Stromlinien tiefer in den Untergrund ein. Damit wird die Aufschlusstiefe vergrössert und man bekommt ein Bild über die von der Tiefe abhängige Änderung des spezifischen Widerstandes.

In der Praxis werden einige Elektrodenanordnungen verwendet. Am meisten werden die folgenden Messverfahren verwendet. Bei der *Wenner-Anordnung* ist der einfache Sondenabstand $a = 1/3$ des Aussen Elektrodenabstandes AB, er entspricht der jeweiligen Tiefenwirkung. Das *Wenner-Verfahren* ist besonders geeignet, Mittelwerte grösserer Bereiche zu erfassen. Es wird besonders bei der Bestimmung hydrologischer Mittelwerte angewandt. Beim *Schlumberger-Verfahren* wird der Abstand der Innenelektroden M und N vom Zentrum der Messanordnung und hiermit der durch die Messung erfasste Bereich möglich klein gehalten. Das *Schlumberger-Verfahren* mit seinem kleineren Wirkungsbereich wird zu einer möglichst punktförmigen Erfassung der Schichtgrenzen im Untergrund angewandt. Je nach dem angewandten Verfahren erfasst eine geoelektrische Messung einen mehr oder weniger grossen Raum (Fig. 7).

Bei der *geoelektrischen Profilierung* (Kartierung) wird die Messanordnung bei gleichbleibenden Elektrodenabständen, also bei gleichbleibendem Wirkungsbereich, gewissermassen starr verschoben. Man erhält so eine Reihe von Widerstandswerten für jeweils dieselbe erfasste Messtiefe. Trägt man diese Widerstandswerte in eine Karte ein, so lassen sich Kurven gleichen Widerstandes zeichnen. Eine solche Widerstandskarte vermittelt ein besonders anschauliches Bild von der Lage von Verwerfungen, Einlagerungen usw. Diese Methode ist besonders für die Untersuchung vertikal oder sehr steil gelegener Schichtgrenzen im Untergrund geeignet.

Manchmal wird die *Drehsondierung* verwendet. Bei dieser wird sowohl der Mittelpunkt der Messanordnung als auch der Elektrodenabstand festgehalten und lediglich die Richtung der Messanordnung geändert. Der gemessene scheinbare spezifische Widerstand wird in einem Polardiagramm dargestellt (Fig. 8). Die Drehsondierung wird insbesondere für die Lagebestimmung steiler geologischer Grenzflächen, für die Entdeckung von Zonen guter Leitfähigkeit, für die Feststellung der Verwerfungen u. dgl. verwendet.

Fig. 9 zeigt die Apparatur für die Durchführung geoelektrischer Gleichstrommessungen, während in Fig. 10 das Schema dieser Apparatur dargestellt ist.

Der gemessene scheinbare spezifische Widerstand wird nun bei der geoelektrischen Tiefenmessung als eine Funktion des Elektrodenabstandes dargestellt, und man erhält so eine Widerstandskurve (Fig. 11). Solche Kurven bilden das Grundmaterial für die geophysikalische Auswertung (Deutung) der Messergebnisse.

Bei der geoelektrischen Profilierung werden die gemessenen scheinbaren spezifischen Widerstände als eine Funktion des Messortes dargestellt, und man erhält ein Widerstandsprofil (Fig. 12).

2. Bohrlochmessungen

Die oben beschriebenen geoelektrischen Messverfahren kann man prinzipiell auch für die Bohrlochuntersuchungen anwenden. Ihr Prinzip ist in Fig. 13 dargestellt. Man kann verschiedene Elektrodenkonfigurationen wählen. Fig. 14 zeigt, wie die gleiche Schicht zum Ausdruck kommt, wenn man verschiedene Dimensionen einer Konfiguration verwendet. Die Wahl der richtigen Konfiguration erfordert allerdings eine gewisse Erfahrung. Die Auswertung der Messergebnisse geschieht heute mittels vorberechneter Kurven und Tabellen. Die geoelektrischen Bohrlochmessungen werden immer mehr auch für die Baugrunduntersuchungen verwendet.

3. Messungen bei Injektionen

Bei dem Bau von Sperrmauern und anderen grossen Objekten werden immer mehr Zementeinpressungen für die Verdichtung klüftigen Felsens verwendet. Zur Kontrolle des Injektionserfolges sind die geoelektrischen Untersuchungen besonders geeignet,

weil die auftretenden geologischen Leiter sehr grosse Widerstandsunterschiede aufweisen (im Karstgebiet):

Trockener, fester Kalkstein	über 5.000 om.m
Verwitterter Kalkstein	3.000-5.000 om.m
Klüftiger Kalkstein mit Ton in den Klüften	300 om.m
Kluftwasser	30-120 om.m
Toneinlagerungen	15-60 om.m
Injektionsgut	1-5 om.m

Die geoelektrischen Messungen sind vor der Injektion, zur Zeit der Zementeinpressung und nach beendiger Injektion durchzuführen. Die Auswertung gibt ein gutes qualitatives Bild vom Erfolg der Verdichtung.

Für die quantitative Beurteilung des Injektionserfolges verfasste Fritsch die Methode der geoelektrischen Injektionskontrolle (Fritsch, 1949, 1951, 1954), die hier nicht näher besprochen werden soll.

AUSWERTUNG DER MESSERGEBNISSE

In diesem Abschnitt wird nun die Auswertung der gemessenen Widerstandskurven und Widerstandsprofile näher beschrieben.

Das Endresultat einer Auswertung ist ein Profil, das den Untergrund in einzelne Schichten oder Schichtpakete unterteilt und deren Mächtigkeiten und spezifische Widerstände angibt.

Die Auswertung der *Widerstandskurven* erfolgt durch Vergleich mit den theoretischen, für bestimmte Widerstandsverhältnisse berechneten Kurvenscharen.

Die Auswertung ist sehr einfach im Zweischichtenfall: die gemessene Kurve wird mit der bereits vorberechneten zur Deckung gebracht (Fig. 15 und 16). Fig. 16 zeigt die Auswertung einer Zweischichtkurve (die Widerstandsverhältnisse sind in der Fig. 5 dargestellt).

Die Dreischichtenkurven werden nach demselben Prinzip ausgewertet; Fig. 17 zeigt eine entsprechende Kurvenschar.

Fig. 18 zeigt eine nach der Methode von Flathe berechnete Fünfschichtenkurve im Vergleich mit einer gemessenen Kurve. Für die Ermittlung theoretischer Kurven gibt es neben rechnerischen auch graphische Methoden.

Die Auswertung der Drei-, Vier- und Mehrschichtenkurven erfolgt auch nach der Hilfspunktmethode von Hummel (Fig. 20). Die gemessenen Widerstandskurven werden mit Hilfe der Kurvenschar für zwei Schichten (Fig. 15) und mittels theoretischer Hilfskurven für vier verschiedene Typen von Dreischichtenkurven (Fig. 19) ausgewertet.

Die Genauigkeit der Auswertung ist von der Aufschlusstiefe, von der geologisch-geoelektrischen Struktur des Untergrundes und von der Messgenauigkeit abhängig. Sie ist umso höher, je homogener der Untergrund ist. Auch unter günstigen Voraussetzungen kann der Tiefenfehler auf ungefähr 10% der Aufschlusstiefe steigen. Beim Vergleich geoelektrischer und Bohraufschlüsse ist zu berücksichtigen, dass gewisse Differenzen physikalisch bedingt sind. Das kommt immer bei geoelektrischen Sondierungen im jugoslawischen Karstgebiet vor. Die Felsoberfläche ist stark verwittert, und die geoelektrische Messung bestimmt die Grenzfläche: fester Fels - verwitterter Fels. Die geoelektrische Messung erfasst einen viel grösseren Raum, als das in einem Bohrloch geschieht. Die geoelektrische Tiefensondierung gibt also eine mittlere Tiefe der gesuchten Trennfläche (Fig. 21) (vergleiche auch Fig. 7).

Bei der *geoelektrischen Profilierung* wird man bei gleichbleibender Untergrundbeschaffenheit (für dieselbe Tiefe) stets die gleichen scheinbaren spezifischen Widerstände messen. Sobald jedoch ein Wechsel im Untergrund auftritt, werden sie sich ändern (Fig. 22).

Für die Auswertung werden auch Widerstandskarten benutzt. Diese Karten werden bei kleineren Aufschlusstiefen wie die geologischen Karten ausgewertet. Bei grösseren Aufschlusstiefen vermitteln die Widerstandskarten oft ein anschauliches Bild von der Tektonik des Untergrundes.

ANWENDUNG GEOELEKTRISCHER MESSUNGEN IM BAUWESEN

a) Geoelektrische Profile von Baugründen

Vor der Planung grosser Bauwerke empfiehlt sich auch eine geoelektrische Untersuchung. Diese kann rasch und billig durchgeführt werden. Es handelt sich meistens um die Bestimmung der Felsoberfläche. Fig. 2 zeigt einen Fall aus der Praxis – die Kombination von geoelektrischen und Bobrlochaufschlüssen.

Fig. 23 zeigt einen interessanten Fall aus der Praxis. Links ist die Bohrung dargestellt; in der Tiefe h_1 wurde Fels angefahren. Das geoelektrische Diagramm, das rechts dargestellt ist, zeigt aber an dieser Stelle keine Änderung. Es wurde daher die Existenz eines Findlings vermutet. Tatsächlich wurde in der Tiefe h_2 wieder dasselbe Material wie vor dem Findling gefunden; der Fels wurde erst viel tiefer erreicht. Ohne geoelektrische Sondierung wird in solchen Fällen die Bohrung vorzeitig abgebrochen.

1. Bestimmung der Felsoberfläche an vorgesehenen Sperrmauern im *Pliva*-Tal bei *Sipovo*.

In zwei Querprofilen wurden zuerst einige Bohrungen ausgeführt. Auf einer grösseren Fläche wurden aber auch die geoelektrischen Sondierungen durchgeführt. Das untersuchte Gelände ist als enges Flusstal mit einer ziemlich mächtigen Überdeckungsschicht charakterisiert. Die Überdeckung besteht aus Schotter, Sand, Ton, Kalktuff und Mergel; das Grundgebirge besteht aber aus Dolomit. Die geoelektrische Sondierung wurde an die Bohrungen angeschlossen. Fig. 24 zeigt zwei charakteristische Widerstandskurven, Fig. 25 stellt aber ein geoelektrisches Profil des Untergrundes dar.

Der Widerstandswert der Überdeckung schwankt von 10 bis 900 $\text{ohm}\cdot\text{m}$. Die Messung an einem Aushiss des Felsens ergab den Widerstandswert von 2500 $\text{ohm}\cdot\text{m}$. Damit konnte der feste Felsen in der Widerstandskurve gut ausgeprägt werden.

2. Die Geoelektrik kann erfolgreich in sumpfigen, unwegsamen Gebieten angewandt werden, wo die anderen Untersuchungsmethoden nicht durchgeführt werden können. Solche Untersuchungen wurden im Mündungsgebiet des Flusses *Neretva* bei *Ploče* durchgeführt, wo ein neuer grosser Hafen gebaut wird. Aufgabe der Untersuchung war die Feststellung der Felsoberfläche. Auf einer Fläche von 6 km^2 wurden im wesentlichen während einer Saison 600 Sondierungen ausgeführt. Fig. 26 stellt das untersuchte Gebiet und die Lage der Messpunkte dar.

Die geoelektrische Sondierung wurde nach der *Wenner*-Anordnung durchgeführt. Die Überdeckung (Schlamm, Ton, Sand – stark mit Meerwasser durchtränkt) hat sehr kleinen spezifischen Widerstand; sie verhinderte weitgehend das Eindringen des Stroms in grössere Tiefen. Aus diesem Grunde wurden anstatt der Anodenbatterien Akkumulatoren als Stromquelle genommen. Die Stromstärke war bis über 5 A. Für die Messungen wurde auch eine spezielle Apparatur gebaut.

Die Auswertung der Widerstandskurven war nicht immer leicht und einfach. In vielen Fällen zeigten die Kurven den typischen Charakter einer Zweischicht. Im Bereiche grösserer Änderungen in der Zusammenstellung der Überdeckung wurden Dreischichten gemessen (Fig. 27). Die genaue Bestimmung der gesuchten Trennfläche war wegen der Anisotropie der Deckschichten und der Verwitterungszone des Felsens nicht immer eindeutig. Durch Vergleichsmessungen im aufgeschlossenen Gelände wurden Korrekturfaktoren ermittelt.

Stellenweise war der Einfluss der Oberflächenunstättigkeiten sehr bedeutend. Dies konnte auf einer Stelle experimentell festgestellt und nachgeprüft werden. Ein Teil der Messlinie wurde ins Wasser gelegt, der andere Teil war in der ganzen Messstrecke trocken. Fig. 28 zeigt die gemessene Widerstandskurve. Das Bohrprofil weist darauf hin, dass der unregelmässige Ast der Kurve von $AB/2 \approx 15 \text{ m}$ weiter den Einfluss der Oberflächenunstättigkeit darstellt.

Fig. 29 zeigt das Endergebnis der geoelektrischen Vermessung bei *Ploče*, eine Karte der Höhenlinien des festen Felsens. Die mittlere Tiefe des Felsens, beziehungsweise die Mächtigkeit der Ablagerungen beträgt 40 m.

b) Geoelektrik in der Grundwasserforschung

Geoelektrische Untersuchung von Grundwasservorkommen geschieht fast nie unmittelbar. Die Geoelektrik muss in der Grundwassererschließung folgende Grundaufgaben lösen:

- Ermittlung der Tiefe und Mächtigkeit einzelner Schichten im Untergrund.
- Ermittlung der Tiefe und Oberflächenform grundwasserstauender Schichten.
- Untersuchung der Durchlässigkeit und anderer Eigenschaften grundwasserführender Schichten.
- Bestimmung der Tiefenlage der Grenze Süsswasser-Salzwasser in Küstengebieten.

Geoelektrisch kann man auch die Wasserdurchlässigkeitsziffer, den sogenannten K-Wert, bestimmen. Was theoretische Voraussetzungen und Messmethodik anbelangt, soll hier auf die Literatur verwiesen werden (Fritsch, 1956).

1. Wie man erfolgreich eine Wasserlagerstätte untersuchen kann, zeigen die Ergebnisse einer systematischen geoelektrischen und hydrologischen Erforschung im Gebiet von Bohova bei Maribor.

Die Aufgabe der geoelektrischen Vermessung war die Feststellung der Tiefe und der Oberflächenform der wasserstauenden Schichten. Auf einer Fläche von 3,5 km² wurden 413 Widerstandskurven gemessen.

Nach der Auswertung von Widerstandskurven kann man den Untergrund in drei Schichten, beziehungsweise Schichtpakete unterteilen:

1. Humusschicht an der Oberfläche.
2. Sand-Schottererschicht (wasserführende Schicht).
3. Ton und toniger Sand (wasserstauende Schicht).

Schotter und Sand haben einen viel grösseren spezifischen Widerstand als Tone, und man kann leicht die Grenzfläche bestimmen (Fig. 30). Fig. 31 zeigt zwei charakteristische Widerstandskurven.

Das Endergebnis wird in der Fig. 32 dargestellt. Die Karte der Tiefenschichtlinien zeigt eine verhältnismässig ebene Oberfläche der wasserstauenden Schichten. Das erste Bohrloch für hydrologische Messungen wurde östlich von der Ortschaft Bohova (GE 145) angebracht. Der aus der Versuchsbohrung resultierende Befund bestätigte das Ergebnis und hiermit die Exaktheit der Auswertung der geoelektrischen Vermessung sowohl in Hinblick auf die Schichtenfolge als auch auf ihren hydrologischen Charakter.

2. Die Geoelektrik kann auch bei der Wasservorkommenforschung in Küstengebieten gute Dienste leisten. Die Aufgabe der geoelektrischen Untersuchung in der Bucht *Martinšćica* bei Rijeka war die Bestimmung geoelektrischer Verhältnisse im Untergrund. Die Auswertung der geoelektrischen Messergebnisse gab sehr interessante und wichtige Anhaltspunkte für die Beurteilung der geohydrologischen Verhältnisse des Tals. Die Ablagerungen zeigen eine sehr grosse Verschiedenheit. Die Tiefe des festen Felsens ist stellenweise ausserordentlich gross. Ungefähr in der Mitte des Tals verläuft eine geoelektrisch gut ausgeprägte Störungszone. Am Talausgang liegt offenbar ein Sperr-Riegel aus wasserundurchlässigen Material. Dieser verhindert das freie Eindringen von Meerwasser. Ausserdem wird das vom Gebirge her zuströmende Grundwasser etwas zurückgestaut. Einige der geschilderten geoelektrisch-geologischen Charakteristiken sind schon aus dem Verlauf der Widerstandskurven zu erkennen.

Fig. 33 zeigt Widerstandskurven in zwei Längs-Profilen. Kleine Widerstandswerte weisen auf Ton und die grossen auf Schotter, Kies und Felsen (in grösserer Tiefe) hin. Der gut ausgeprägte Abfall des scheinbaren spezifischen Widerstandes in den unteren Teilen der gemessenen Kurven kann nur dem Einfluss vom Meerwasser im Untergrunde zugeschrieben werden. Die eingezeichnete Linie stellt die Grenze des Meereinflusses im Untergrund des Festlandes dar.

SCHLUSSWORT

Die geoelektrischen Untersuchungen gewinnen heute ständig an Bedeutung besonders auf dem Sektor der Baugrunduntersuchung. Die wichtigste Stelle nimmt die Widerstandsmethode ein; man verwendet beide Messverfahren: Geoelektrische Sondierung und geoelektrische Profilierung.

Die Geoelektrik macht andere Verfahren und Aufschlussbohrungen nicht überflüssig. Mit der Anwendung der geoelektrischen Messverfahren können die Erschließungsarbeiten schneller und billiger durchgeführt werden. Die Geoelektrik muss richtig und rechtzeitig mit anderen Untersuchungsmethoden kombiniert werden, weil sie dann viele wirtschaftliche Vorteile bietet.

Primljeno (angenommen) 13. X. 1958.

»Geofizika«, Zagreb