

## NEKA ISKUSTVA I PRAKTIČNI REZULTATI GEOELEKTRIKE KOD PRONALAZENJA I ISPITIVANJA NALAZIŠTA ARTEŠKIH, SUBARTEŠKIH I TERMALNIH VODA<sup>1</sup>

*S 8 slika u tekstu*

Vodoistražni radovi pomoću geoelektričnih metoda ispitivanja tla iz vode se na područjima kvartarnih i tercijarnih sedimenata ili u predjelu razvoja krša. Odnosi između geoelektričnih i hidrogeoloških svojstava vodoravnih stijena već su dosta dobro poznati kod rastresitih kvartarnih sedimenata kao i kod čvrstih vapnenih stijena. U tercijarnim naslagama javlja se voda redovito u većoj dubini i većinom pod tlakom; to je jedan od razloga, da se geoelektrika do sada malo primjenjivala kod odnosnih istraživanja. U posljednje vrijeme izvršen je niz geoelektričnih ispitivanja na područjima tercijarnih sedimenata, pa se uz veoma lijepe rezultate prema stečenom iskustvu mogu izvesti neke principiijelne postavke i praktični zaključci na tom području primjene geoelektrike.

Geoelektrična ispitivanja vode mogu se prema hidrogeološkom karakteru područja ispitivanja podijeliti na radove u:

1. Području kvartarnih sedimenata
2. području tercijarnih sedimenata
3. području krša (otoci, priobalna zona i unutrašnjost u prostoru Mediterana).

Kvartarni sedimenti u užim ili širim rječnim dolinama predstavljaju najpovoljniju sredinu za akumuliranje velikih količina podzemne vode. Međusobni odnosi geoelektričnih i hidroloških svojstava već su prilično dobro ispitani za kvartarne rastresite sedimente, koje sačinjavaju šljunak, kršje, pijesci i glina kao smjesa (Thiele H., 1952; Fritsch V., 1956). Zato se na problemima hidrogeologije primjenjuju gotovo isključivo geoelektrične metode i od ovih opet najviše metoda otpora. Električni specifični otpor kvartarnih rastresitih sedimenata u biti je funkcija količine gline, što se u njima nalazi. Kako je vodopropusnost sama funkcija količine gline, slijedi, da može specifični otpor predstavljati neposredno mjerilo određivanja vodopropusnosti tih naslaga (Thiele H., 1949). Najviše praktičnih primjera, koji su bili također najuspješniji u pogledu pronalazjenja potrebnih količina podzemne vode, nalazimo na području ispitivanja kvartarnih sedimenata.

<sup>1</sup> Održano kao predavanje u »Hrvatskom geološkom društvu« dne 28. IV 1961. god.

Na području krša vezane su pojave podzemne vode u vapnovitim stijenama na raspucane i razlomljene dijelove ovih čvrstih stijena. Radi specifičnih (posebnih) uvjeta razrađena je posebna metodika geoelektričnog ispitivanja i primijenjuju se neki specijalni geoelektrični mjerni postupci, kao što su kružno sondiranje, kružno profiliranje, metoda električki nabijenog tijela. Električni specifični otpor ima ovdje u određenim uvjetima karakter hidrogeološkog parametra kao što ima kod kvartarnih rastresitih sedimenata karakter hidrološkog parametra. U Jugoslaviji je izvršen već čitav niz veoma uspješnih geoelektričnih vodoistraga na otocima i u priobalnom području. U ovim se predjelima javlja kao poseban problem utjecaj slane (morske) vode u određenom području, pa treba određivati položaj granice slatke i slane vode u podzemlju.

Najmanje podataka i primjera o detaljnijim geoelektričnim vodoistragama i hidrogeološko-geoelektričnim odnosima ima sa područja ispitivanja terciarnih sedimenata. Razloga za to ima više. S jedne strane pokrivaju se potrebe naselja, industrije i drugih potrošača iz površinskih većih ili manjih izvora – to je najčešće slučaj u bržuljkastim i brdovitim predjelima. Na područjima jako velikih ravnica koriste se s druge strane vode iz otvorenih vodotoka, jer plitkih podzemnih voda nema. Ukoliko se u takvim predjelima traži podzemna voda, ispitivanja treba usmjeriti na ispitivanja vodonosnosti terciarnih sedimenata. Voda u tim sedimentima javlja se redovito u većoj dubini i većinom se nalazi pod većim ili manjim tlakom kao arteška ili subarteška voda.

Hidrogeološki uvjeti pojavljivanja arteških i subarteških voda dobro su poznati (Herak M., 1960). Ovdje se treba osvrnuti samo na osnovne elemente tog prirodnog fenomena. Do specifičnog rasporeda podzemne vode dolazi u podzemlju, u kojem se izmjenjuju propusne i nepropusne (ili manje propusne) naslage sinklinalno ili monoklinalno savijene i u vezi s površinom. Voda koja prodire u propusne slojeve nema mogućnosti daljeg otjecanja, nakuplja se u propusnoj naslagi i nalazi se pod hidrostatskim tlakom. Kada je tlak dovoljan, da voda kroz neku pukotinu ili bušotinu izlazi na površinu, onda takvu vodu nazivamo arteškom. Ako tlak nije dovoljno velik, voda se digne u pukotini ili bušotini, ali ne istječe na površinu – subarteška voda.

Kod utvrđivanja hidrogeoloških uvjeta potrebnih za pojavljivanje arteških i subarteških podzemnih voda pruža dragocjenu pomoć geoelektrika. Ona u prvom redu dopunjava i proširuje rezultate prethodnih geoloških istraživanja. Pošto treba utvrditi vertikalnu raspodjelu slojeva različitog specifičnog otpora, primijenjuje se gotovo isključivo geoelektrično sondiranje. Ono se izvodi i u velike dubine (i preko 1000 m) brzo, sigurno i sa razmjerno malim utroškom novčanih sredstava. Kao rezultat geoelektričnog ispitivanja dobiju se dragocjeni podaci za planiranje i izvođenje direktnih vodoistražnih i vodopskrbnih radova.

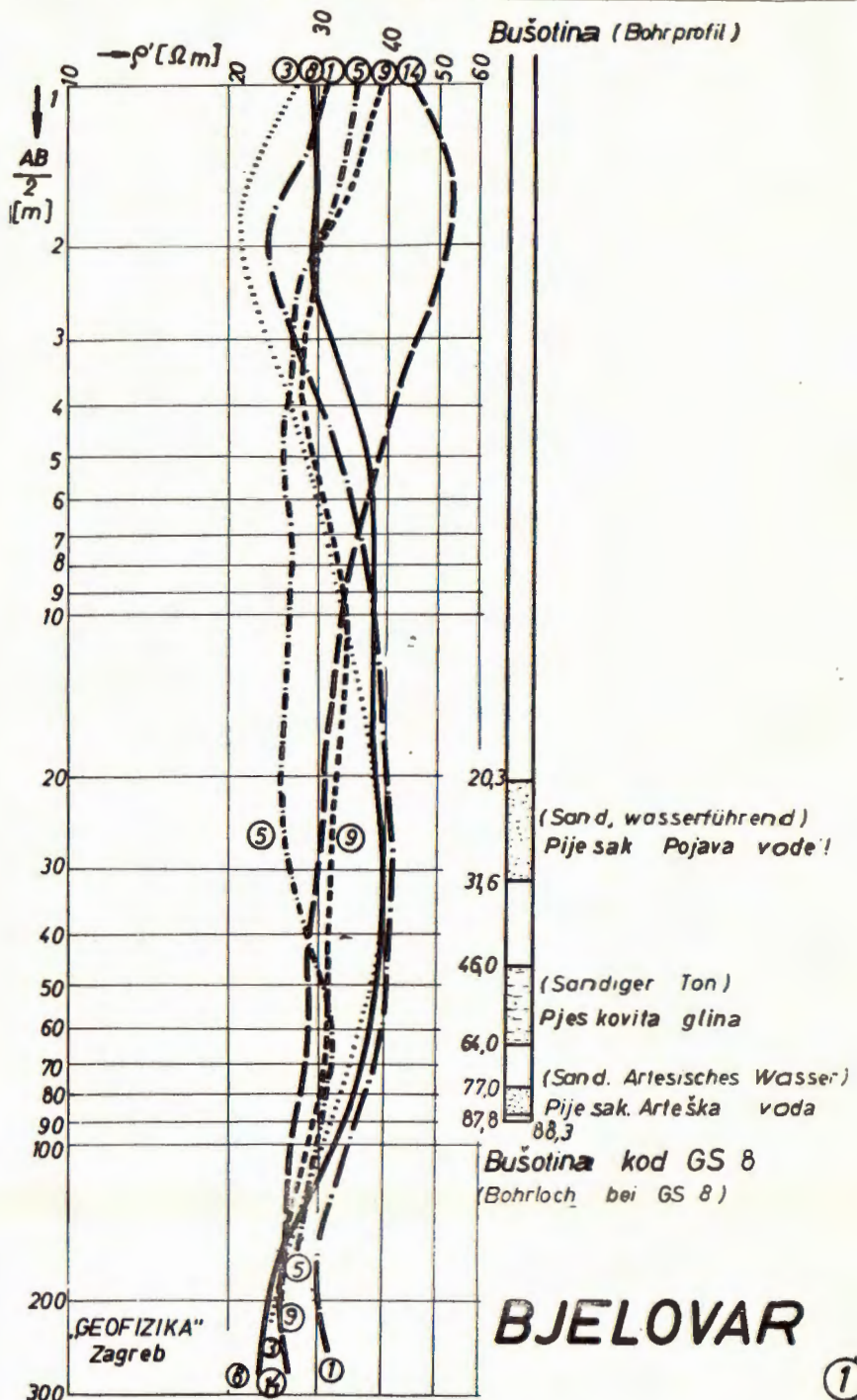
Električni specifični otpor može i kod ispitivanja terciarnih sedimenata poslužiti kao hidrogeološki indikator mogućnosti prisustva podzemne vode. Kao osnovni zadatak kod ispitivanja tih naslaga postavlja se

geoelektrici od vajanje područja podzemlja višeg specifičnog otpora od područja nižeg specifičnog otpora. Na mnogim područjima širom Panonskog bazena sačinjavaju gornji dio pliocena, koji većinom dolazi u obzir kod ispitivanja praktično eksploatabilnih arteških ili subarteških voda: pijesci, šljunci, gline, pjeskovite gline, lapori i pjeskoviti lapori u naizmjeničnom položaju. O međusobnom položaju, dubini i debljini ovih propusnih i nepropusnih slojeva ovise mogućnosti i uvjeti postojanja podzemne vode pod tlakom. Prema utvrđenim specifičnim otporima može se učiniti podjela podzemlja ispitivanog područja na povoljnije i nepovoljnije za daljnje direktne istrage. Geoelektričnim sondiranjem dobiju se u nekim primjerima i važni podaci o dubini značajnijih naslaga. Kako je pokazalo iskustvo, osnovano na mnogobrojnim mjerenjima, treba kod ispitivanja tercijarnih sedimenata voditi računa o tome, da se nizovi slojeva različitog petrografskog sastava mogu ispoljavati kao jedna deblja geoelektrična sredina. Ova se sredina razlikuje od više i niže geoelektrične sredine, koje opet mogu biti sastavljene od niza tanjih slojeva različitog litološkog sastava. Za hidrogeološku interpretaciju geoelektričnih podataka važna je sada veličina tog rezultantnog specifičnog otpora sredine sama po sebi i u odnosu na druge sredine. U tercijarnim sedimentima je također vodopropusnost funkcija sadržaja gline odnosno broja i debljine glinenih slojeva i proslojaka u pojedinim paketima slojeva. Nižemu rezultantnome specifičnom otporu odgovara veći broj i veća debljina glinenih slojeva, dok viši rezultatni spec. otpor ukazuje na veći broj i veću debljinu pjeskovitih slojeva i proslojaka. Praktični primjeri sa različitih područja tercijarnih naslaga jasno ilustriraju iznijete postavke.

**B J E L O V A R.** Šira okolina grada Bjelovara nalazi se u brežuljkastom području između dolina rijeka Save i Drave. Uže područje grada leži u središtu tercijarne sinklinale pružanja NW-SE. Površinski izvori i tokovi malih su izdašnosti odnosno količina. Kvarterni rastresiti sedimenti male su debljine; pošto se sastoje od jako sitnih pijesaka sa puno gline, njihova je vodopropusnost i vodonosnost veoma mala. Veće količine vode (već od 1 l/sek pa na više) treba zato tražiti u većim dubinama.

Sinklinalna grada tercijarnih naslaga uvjetuje pojavu arteških voda. U gradu ima više arteških bušotina, od kojih neke služe za opskrbu vodom već preko 20 godina.

Geoelektrična ispitivanja izvršena su za potrebe manjeg industrijskog pogona na maloj površini. Iz ranijih istraživanja bila je poznata velika izmjena facijelnih odnosa unutar gornjopliocenskih naslaga, u kojima se javlja voda pod tlakom. Radi toga bili su geoelektrično mjerenje kao i interpretacija miernih podataka usmjereni na određivanje lokacije, gdje će biti najviši rezultantni specifični otpori dubljih geoelektričnih sredina i gdje će biti serija slojeva nižeg specifičnog otpora u podini propusnije sredine najdublja. Takvo stanovište uvjetovala je analiza krivulja električnog otpora izmjerenih uz arteške bunare u blizini područja ispitivanja; jedna od tih korelacionih krivulja (GS 3) prikazana je na sl. 1. Kao najpovoljnija mjesta za daljnje direktne vodoistrage pomoću



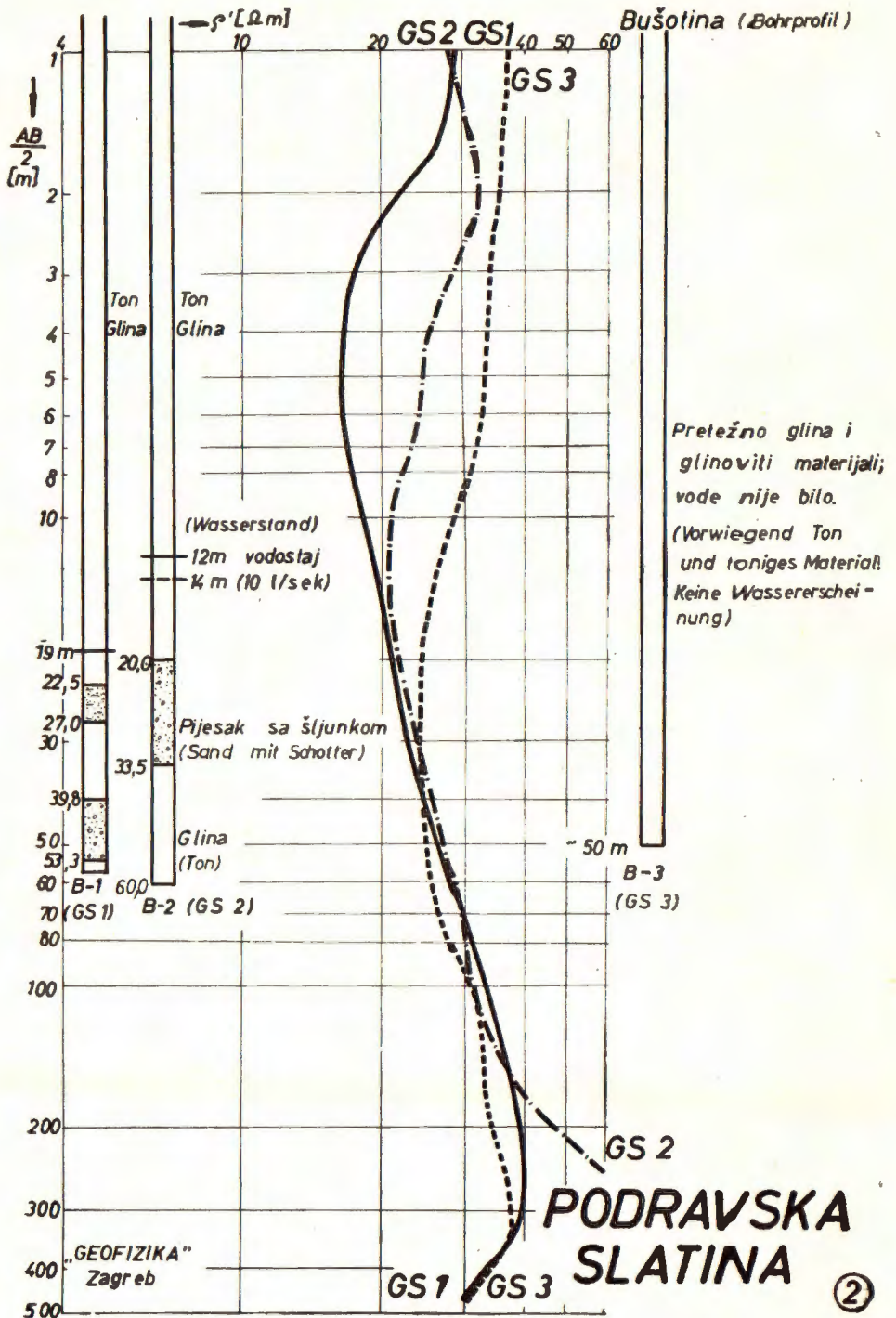
bušenja izabrane su prema navedenim kriterijima geoelektrične sonde 1 i 8. Bušenje je izvršeno na mjestu geoelektrične sonde GS 8; rezultati bušenja potvrdili su opravdanost navedene postavke. Od 20,3 do 31,6 m nabušen je sloj pijeska s pojavom podzemne vode; od 40,0 do 77,0 m bušilo se je kroz slabo propusne slojeve (pjeskovite gline i pjeskovite lapore), a od 77,0 do 87,7 m bušeno je kroz pijesak jednolične granulacije. U posljednjem sloju pojavila se je arteška voda. Bušotina daje stalnu količinu vode od oko 2 l/sek.

Na sl. 1 prikazane su karakteristične krivulje prividnog specifičnog otpora dobivene geoelektričnim sondiranjem. Najviše prividne spec. otpore pokazuje krivulja otpora GS 1, pa se zato i smatrala najpovoljnijom za lociranje bušotine. Uslijed određenog rasporeda zgrada tvornice bolje je odgovaralo mjesto kod blize također povoljne geoelektrične sonde GS 8, gdje je izvršeno bušenje. Veća zaglinjenost i prema tome manja vodopropusnost može se prema krivuljama otpora GS 1, GS 8 i GS 3 (korelaciona krivulja otpora) očekivati tek na dubini preko 100 m. Bušenje je tu konstataciju potvrdilo.

**PODRAVSKA SLATINA.** Sl. 2 prikazuje tri krivulje prividnog specifičnog otpora sa tog područja, koje se nalaze približno u istoj liniji ukupne dužine oko 1.300 m. Na mjestima geoelektričnih sonda izbušene su bušotine, od kojih prve dvije (kod GS 1 i GS 2) imaju podzemnu vodu pod tlakom, a treća (kod GS 3) nije nabušila do dubine od 50 m vodonosne slojeve. Krivulje pokazuju porast prividnog specifičnog otpora sa dubinom, što ukazuje na veći broj ili veću debljinu propusnijih slojeva u dubljem podzemlju. Rezultantni specifični otpor dublje vodonosne geoelektrične sredine (paketa slojeva) kreće se u granicama od 50 do 70 om.m. To je relativno niska vrijednost, koja ukazuje na znatan udio fino-zrnatih sastojaka. Vodonosni slojevi imaju dakle srazmjerno malu propusnost.

U bušotini kod geoelektrične sonde GS 1 utvrđena su dva vodonosna sloja pijeska do dna bušotine kod 55 m; gornji je glinovit, a donji sa malo šljunka. Nivo vode nalazi se u dubini 19 m ispod površine, što se može tumačiti time, da je voda iz tih dubljih slojeva te pod tlakom. Kod crpljenja 80 l/min vodostaj pada za 0,7 m. U bušotini kod GS 2 nabušen je deblji vodopropusni sloj od 20,0 do 33,5 m; bušotina seže samo do 60 m. U većoj dubini mogu se, sudeći po specifičnom otporu krivulje, očekivati daljniji vodopropusni slojevi. Krivulja prividnog spec. otpora, GS 3 pokazuje sredinu višeg spec. otpora (oko 70 om.m) tek u većoj dubini (preko 60 m), dublje no što je to kod GS 1 i GS 2. Na tom je mjestu bušeno samo do dubine od oko 50 m i to pretežno u glini i jako zaglinjenim materijalima – vode nije bilo. Geoelektrično sondiranje jasno pokazuje, da je trebalo bušiti u dubinu preko 60 m, da se nađe na propusnije slojeve. Do preplitkog bušenja ne bi došlo, da je prije toga bila primijenjena geoelektrika.

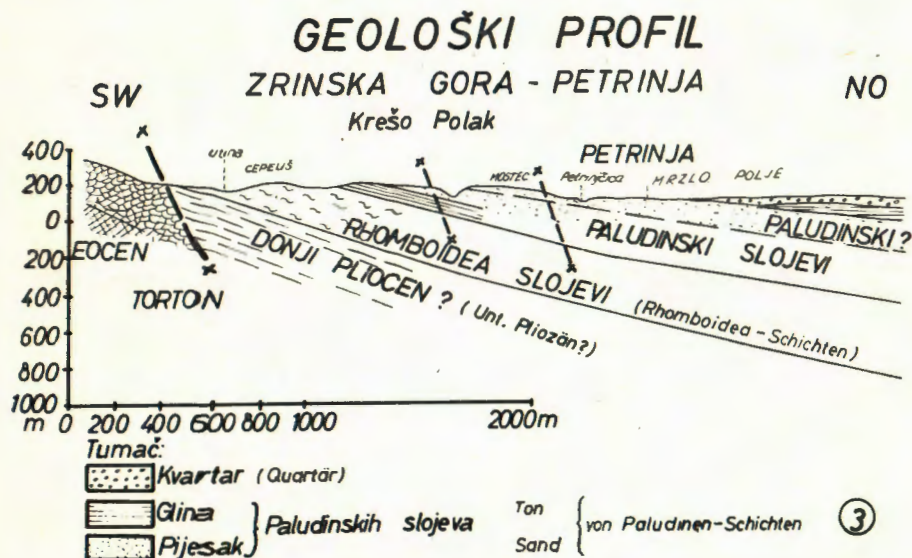
Područje ispitivanja nalazi se na prelazu obronaka starog planinskog masiva u ravnici rijeke Drave. Kvartarni rastresiti sedimenti imaju malu debljinu i sastavljeni su pretežno od pjeskovitih i muljevitih gli-



na; u njima nema većih količina podzemne vode. Obronke sačinjavaju pliocenski slojevi pružanja NW-SO; tercijarne naslage dravske potoline imaju jasnu sinklinalnu građu, što uvjetuje pojavu podzemne vode pod tlakom.

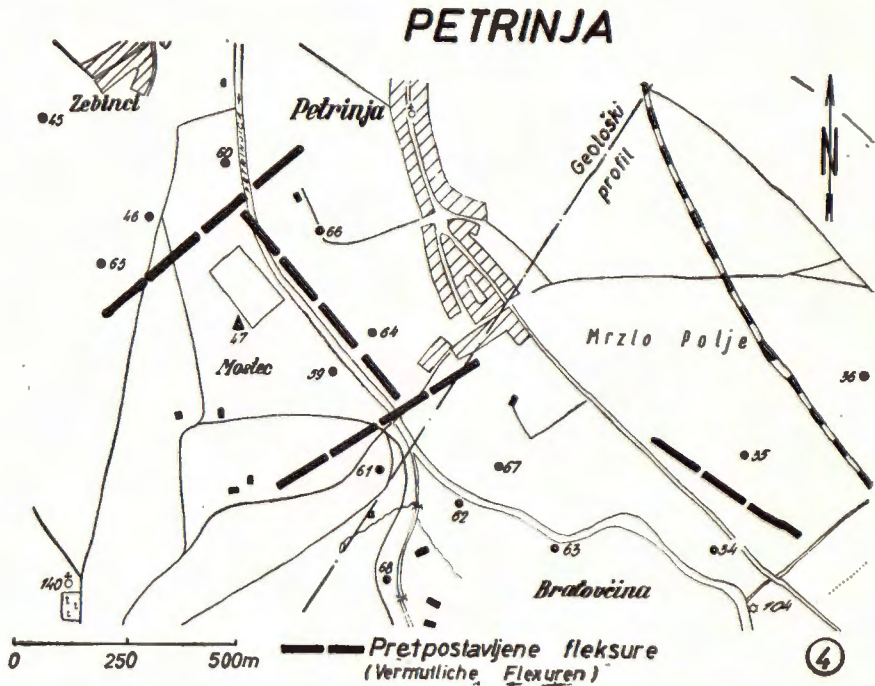
Diskutirana geoelektrična mjerenja lijep su primjer nesistematskog rada kod istraživanja vode. To vrijedi napose za bušotinu kod GS 3, koja je preplitko izbušena, jer prije bušenja nisu bila izvršena geoelektrična ispitivanja, pa čak ni geološka istraživanja.

PETRINJA. Veoma lijep primjer uspješnog sistematskog rada na istraživanju vode predstavljaju radovi kod Petrinje. Izvršeno je geološko kartiranje okoline Petrinje i geoelektrično sondiranje u užoj okolini grada. U prvoj fazi izvršeni su glavni radovi na području kvartarnih nanosa uz rijeku Kupu; utvrđeni su povoljni uvjeti za nalaz podzemne vode i dokazane izvjesne količine vode. U južnom dijelu okoline grada, prema obroncima Zrinske Gore, izmjerena su samo dva informativna profila geoelektričnih sonda. Geoelektričnim mjerenjem zahvaćeni su dublji slojevi povišenog specifičnog otpora, koji leže ispod deblje naslage pretežno nepropusnih glina niskog specifičnog otpora. Ti slojevi leže u profilu GS 45 - 46 - 47 u dubini oko 120 m, a na geoelektričnim sondama dalje prema sjeveroistoku zapažaju se postepeno sve dublje. To se podudara s rezultatima geološkog istraživanja, koji pokazuju jasnu sinklinalnu građu tercijarnih naslaga (sl. 3). Radi toga se podržala pretpostavka, da bi se iz tih slojeva povišenog spec. otpora mogla dobiti arteška voda. Bušenje je predloženo na mjestu geoelektrične sonde GS 47. Bušenjem se je u dubini od 130 m naišlo na pjesko-



vito-šljunkoviti sloj, iz kojeg je izbila arteška voda u količini od 17 l/sek. Kasnije se je izdašnost bušotine ustalila na 14 l/sek.

Radi određivanja najpovoljnije lokacije za drugu bušotinu izvršena su kasnije nova geoelektrična sondiranja na širem području oko prve bušotine (kod GS 47), uglavnom prema staroj geoelektričnoj sondi GS



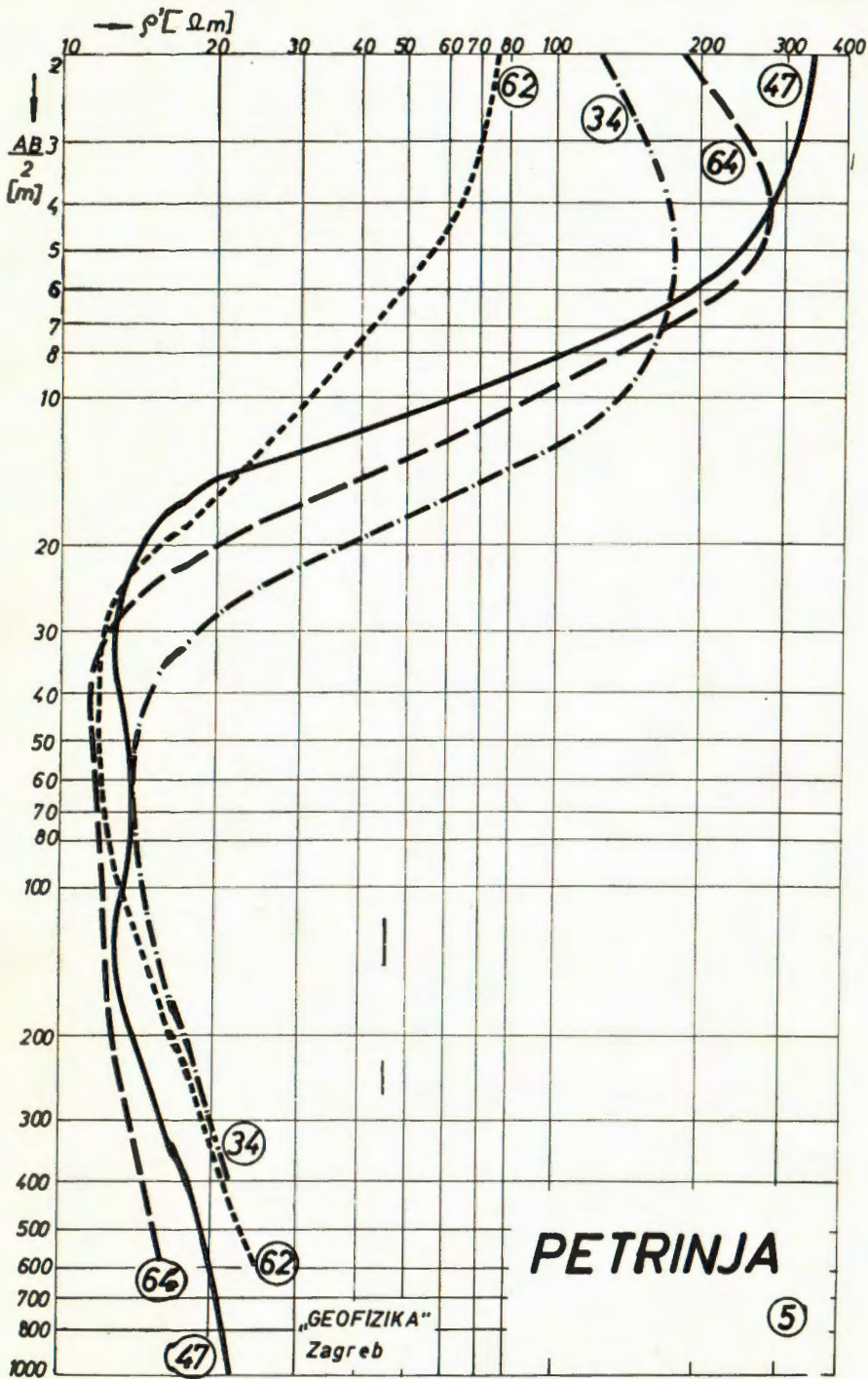
34, koja je istog tipa kao GS 47 (sl. 4 i 5). Kao najpovoljnija određena je lokacija kod sonde GS 62. Bušenjem se je u dubini od 98 m naišlo na vodonosni sloj pijeska; ovdje je također dobivena arteška voda i to izdašnosti 3 l/sek.

Upada u oči, da se dubine vodonosnog sloja u bušotinama razlikuju. Ista je situacija i na nekim drugim mjestima ispitivanog područja. To se može zapaziti i na krivuljama prividnog specifičnog otpora (sl. 5). Razlike u dubini geoelektrične sredine povišenog spec. otpora na malim razmacima veće su, no što bi se to očekivalo prema padu slojeva i izražene su i u pravcu NW-SO. Radi toga može se pretpostaviti nekoliko lokalnih fleksura ili rasjeda (sl. 4).

SAMOBOR. Na području Sv. Helene kod Samobora (oko 22 km W od Zagreba) već se duže vremena koriste za kupanje termalna vrela. Vrela su pored povišene temperature i sadržaja sumporovodika još i



Krulc: Geoelektrika kod pronalaženja i ispitivanja voda



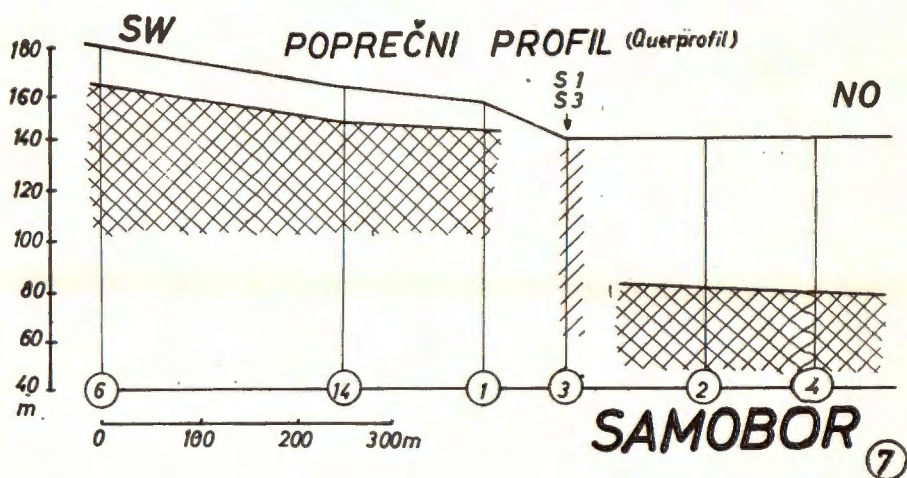
jako radioaktivna. Na osnovu raspucanosti stijena, u kojima se javlja termalna voda, zaključuje se na dislokaciju u obliku široke zone poremećaja. U cilju povećanja postojeće količine vode pristupilo se kompleksnom načinu istraživanja radi utvrđivanja hidrogeoloških prilika podzemlja i određivanja najpovoljnijih mjesta za daljnje direktne vođostrage s naročitim osvrtom na tektonske odnose.

Za određivanje položaja pretpostavljene prelomne zone ili rasjeda primijenilo se je geoelektrično profiliranje. Dijagrami prividnog spec. otpora pokazuju jasne razlike: u SW dijelu svi dijagrami pokazuju viši, a u NO dijelu niži specifični otpor (sl. 6). Područje promjene veličine prividnog specifičnog otpora ukazuje na promjenu u geološko-tektonskoj građi podzemlja. Dubinski odnosi rasjednute sredine povišenog spec. otpora utvrđeni su geoelektričnim sondiranjem (sl. 7).

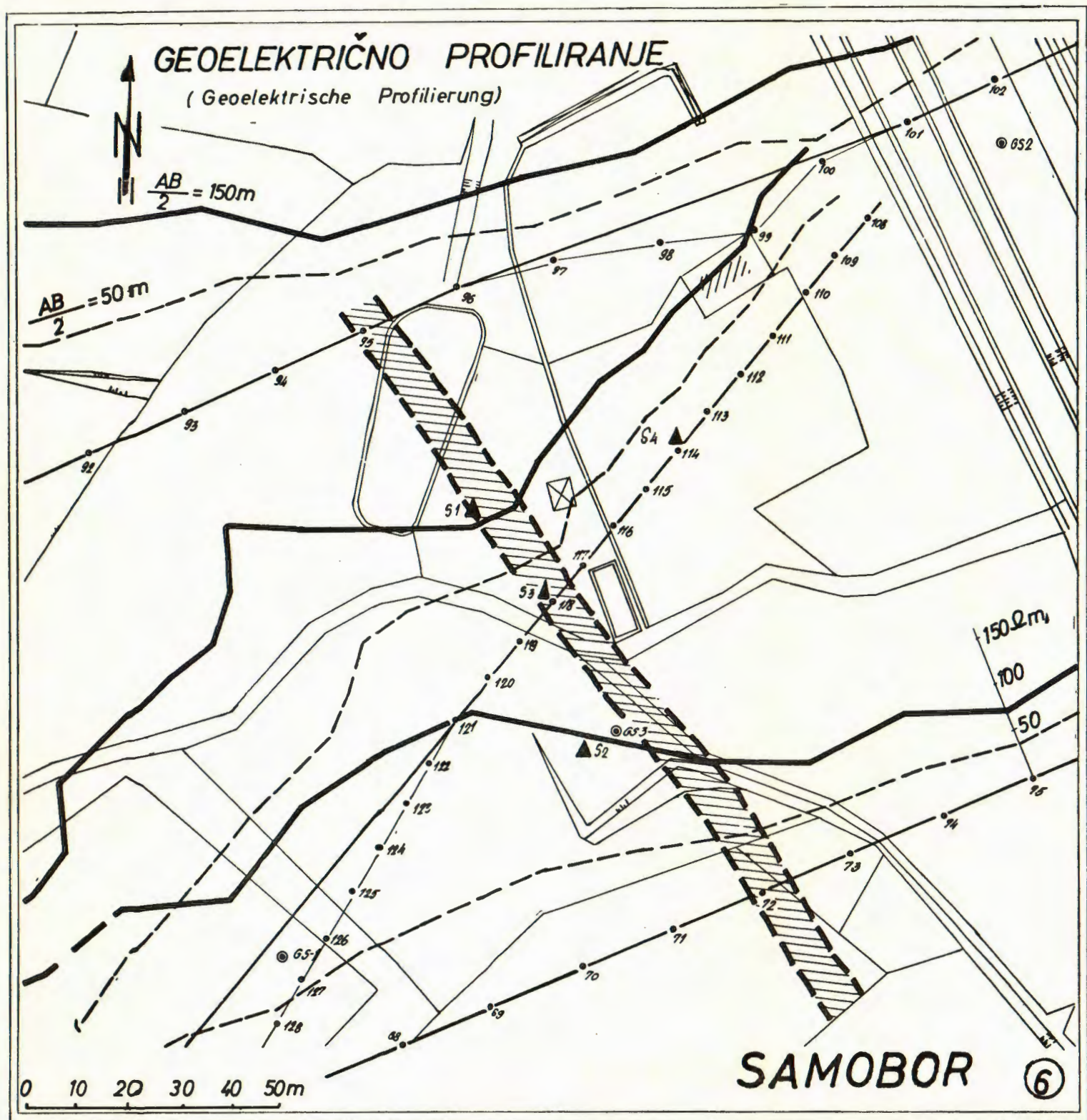
Unutar utvrđene rasjedne zone locirana je bušotina S-3, koja je dala pozitivan rezultat, jer su utvrđene dvije pojave tople vode. Voda je arteškog karaktera; temperatura vode je oko 26° C, a količina oko 4,5 l/sek. Unutar ove zone nalazi se u bušotina S-1, izbušena ranije. U ovoj bušotini utvrđena je također topla voda.

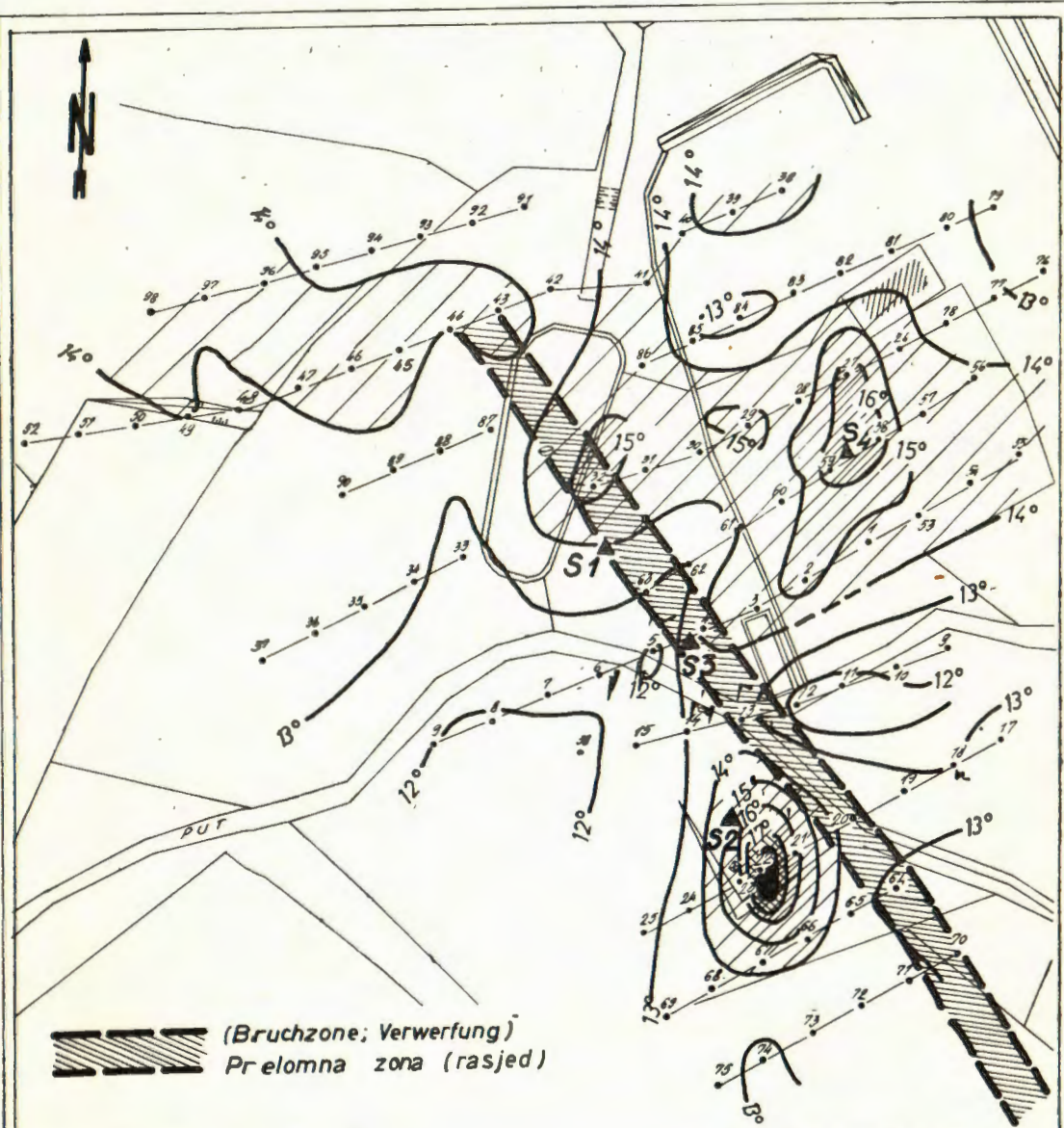
Pojava termalne vode dala je povoda, da se kao dopuna geoelektričnim ispitivanjima izvrše i geotermička mjerenja. Položaj mjernih tačaka u profilima te tok izoterma (linija iste temperature tla u dubini 1 m) prikazuje sl. 8. Karta izoterma pokazuje dva izrazita termička maksimuma. Uz centar prvoga, koji pokazuje najveću toplinu tla u dubini od 1 m, nalazi se glavno termalno vrelo toplica Sv. Helene. Unutar izoterme 16° C drugog maksimuma locirana je bušotina S-4, koja je dala pozitivan rezultat, jer se je naišlo na artešku termalnu vodu (oko 3 l/sek; 23° C).


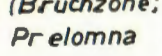
Zaključno se može naglasiti slijedeće. Prikazani praktični primjeri geoelektričnih ispitivanja tercijarnih sedimenata pokazuju, da se može rezultatnom (kompleksnom) prividnom specifičnom otporu terci-



Krulc: Geoelek trika kod pronalaženja i ispitivanja voda.





 (Bruchzone; Verwerfung)  
 Prelomna zona (rasjed)

0 10 20 30 40 50m

„GEOFIZIKA  
Zagreb

# SAMOBOR

Toplice Sv. Helena

jarnih sedimenata pripisati karakter hidrogeološkog indikatora mogućnosti prisustva podzemne vode pod tlakom. Viši rezultatni (kompleksni) prividni specifični otpor ukazuje na veći broj i veću debljinu pjeskovitih slojeva i proslojaka u paketu tercijarnih naslaga.

Kod ispitivanja termalnih voda, koje su mahom vezane na rasjede i druga tektonska poremećenja, veoma je korisna primjena geoelektrike za proučavanje geološko-tektonskih odnosa.

»Geofizika«, Zagreb  
Kupska ul. 2

Primljeno 15. 12. 1962.

#### LITERATURA

- Herak, M. (1960): Geologija (Struktura, dinamika i historija Zemlje). Zagreb.  
 Fritsch, V. (1956): Die geoelektrische Bestimmung der Wasserdurchlässigkeitsziffer, des K-Wertes. »Die Wasserwirtschaft«, 46. Jg. Nr. 12, Münster/Westf.  
 Thiele, H. (1949): Der elektrische spezifische Widerstand, eine hydrologische Kennzahl. »GWf, Das Gas- und Wasserfach«, 90. Jg. Heft 17/18, München.  
 Thiele, H. (1952): Die Geoelektrik in der Wassererschliessung. Dio II knjige: Die Wassererschliessung, Essen.

Z. KRULC

#### EINIGE ERFAHRUNGEN UND PRAKTISCHE ERGEBNISSE DER GEOELEKTRIK IN AUFFINDUNG UND ERSCHLIESSUNG VON ARTESISCHEN, SUBARTESISCHEN UND TERMALWÄSSERN

Geoelektrische Wassererschliessungen werden in Quartärsedimenten, Tertiärsedimenten oder im Karstgebiet (im Mittelmeerraum) durchgeführt. Die Zusammenhänge zwischen den geoelektrischen und hydrogeologischen Eigenschaften von wasserführenden Gesteinen sind sowohl in quartären Lockersedimenten als auch in Kalksteinen schon gut erforscht. Die entsprechenden geoelektrischen Messverfahren und Auswertungsmethoden, sowie die Möglichkeiten und die praktischen Ergebnisse sind wohl gut bekannt. Für die geoelektrische Wassererschliessung in tertiären Sedimenten sind aber die praktischen Beispiele ziemlich mangelhaft. Das Wasser erscheint in diesen Ablagerungen vorwiegend in grösseren Tiefen und steht meist unter Druck.

Zur Feststellung und Erforschung der hydrogeologischen Erscheinungsverhältnisse von artesischen und subartesischen Grundwasservorkommen leistet die Geoelektrik gute Dienste. Von den verschiedenen geoelektrischen Messverfahren wird fast ausschliesslich die Tiefensondierung angewendet, weil es ja um die Feststellung der Schichtgrenzen geht.

Bei der Untersuchung von tertiären Ablagerungen ist die Grundaufgabe der Geoelektrik, den Untergrund in Zonen, beziehungsweise Schichtpakete mit höherem und niedrigerem spezifischen Widerstand aufzuteilen. Der scheinbare spezifische Widerstand als der komplexe (resultierende) Wert kann dann als hydrogeologischer Indikator benützt werden, da die Wasserdurchlässigkeit auch in den Tertiärsedimenten eine Funktion des Tongehaltes, beziehungsweise der Zahl und der Mächtigkeit von Tonschichten und -einlagerungen in einzelnen Schichtpaketen ist.

Es werden einige praktische Beispiele erfolgreicher geoelektrischer Wassererschliessungen in tertiären Sedimenten in Kroatien geschildert. In einem Beispiel wird gezeigt, wie die Geoelektrik einen wesentlichen Beitrag zur Erforschung und Erschliessung von Termalwasservorkommen leisten kann. Es geht um eine an eine tektonische Störung des Grundgebirges gebundene Therme. Zur Ergänzung von geoelektrischen wurden in diesem Falle auch geothermische Messungen erfolgreich angewandt.

»Geofizika«, Zagreb  
Kupska ul. 2

Angenommen am 15. 12. 1962.