

## ISTRAŽIVANJE VODE GEOELEKTRIČNIM METODAMA

(Skrraćeno prema referatu na Stručnom simpoziju rudara i geologa u Zagrebu, aprila 1963. god.)

(S 8 slika u tekstu)

Prikazane su osnovne hidrogeološke i geofizikalne postavke geoelektričnog istraživanja vode. S praktičnim primjerima iz područja kvartarnih nanosa (Tukovi, Virovitica), tercijarnih sedimenata (Petrinja) i krša (Primošten, Orebić, Kotor) prikazane su mogućnosti primjene geoelektričnih metoda u okviru kompleksnih vodoistražnih radova.

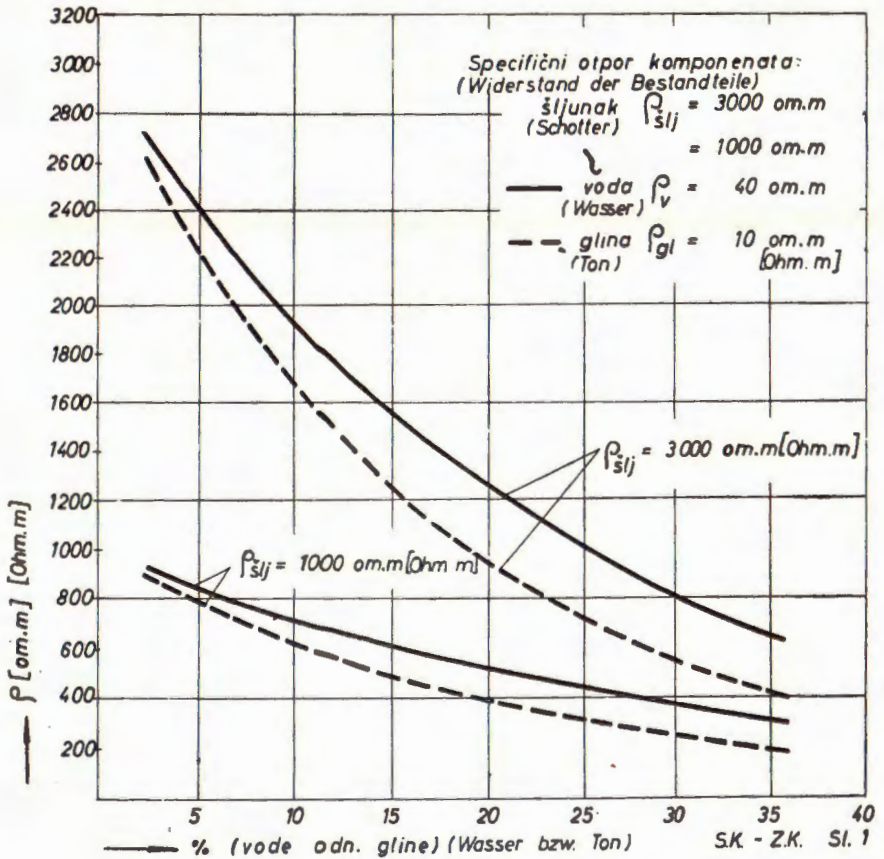
### UVOD

Paralelno s razvojem gradova, turizma i industrije javlja se u sve većoj mjeri problem opskrbe vodom, a samim tim i potreba za pronalaženjem novih i dovoljnih količina vode. U vodoistražnim radovima se posljednjih godina i kod nas u sve većoj mjeri koriste i geofizičke metode. Svrha ovog referata je prikazati neke mogućnosti rješavanja hidrogeoloških problema uz primjenu tih metoda, a sa željom da se one koriste u još većoj mjeri u vodoistražnim radovima.

Od geofizičkih metoda primjenjuju se u rješavanju općih i detaljnih hidrogeoloških problema najviše geoelektrične metode. Tome je razlog u tome, što osnovni fizikalni parametar, na kojem se zasniva primjena geoelektričnih metoda – specifičan električni otpor – stoji u uskoj vezi sa faktorima, koji su odlučni u stvaranju hidrogeoloških odnosa u podzemlju, kao: pojava vodopropusnih i vodonepropusnih stijena, promjene poroziteta i granulacije vodonosnih stijena, promjene karaktera zapunjenja pukotina i šupljina (na primjer slana voda, slatka voda, zrak) i sl. Svaka od tih promjena odražava se u promjeni specifičnog otpora odnosno dubine podzemlja, što se lako registrira mjerenjem po površini tla.

Geoelektrična ispitivanja su naročito uspješna, ako se na promatranom području nalaze stijene, koje se po specifičnom otporu jako razlikuju, kao npr. glina i šljunka, lapor i vapnenac, karstificirani i kompaktni vapnenac i sl.

U sl. 1 su radi ilustracije prikazane računate krivulje za ovisnost specifičnog otpora smjese šljunka i vode odnosno šljunka i gline o postotku vode odnosno gline. Za glinu je uzet specifičan otpor 10 om.m, a za vodu 40 om.m kod specifičnog otpora šljunka 1000 om.m (donji par) i 3000 om.m (gornji par krivulja). Slične krivulje važe i za karbonatne ili eruptivne stijene, ako im se mijenja postotak sadržaja vode u pukotinama. Za istu promatranu vodonosnu stijenu prema tome važi pravilo, da niži specifičan otpor označuje veći sadržaj vode (također i gline ili crljenice) odnosno rnanju kompaktnost. Prikazane krivulje su izračunate po jednoj od poznatih teorija smjese (V. Fritsch, 1949, 1960).



Sl. 1. Ovisnost specifičnog otpora šljunka kao smjese o volumskom udjelu vode odnosno gline

Abb. 1. Spezifischer Widerstand des Gemenges Schotter-Wasser bzw. Schotter-Ton

### HIDROGEOLOŠKE I GEOELEKTRIČNE POSTAVKE ISTRAŽIVANJA VODE

U hidrogeološkom smislu treba razlikovati dvije osnovne vrste stijena: vodonepropusne te vodopropusne; potonje mogu biti nosioci odnosno kolektori podzemne vode.

Tipična vodonepropusna stijena je glina. Ona ima nizak specifičan otpor, a to zbog velikog volumena pora i znatnog sadržaja vode, koja je sva adsorbirana na površini čestica. Nizak specifičan otpor ima i lapor, koji je također vodonepropustan. Drugu vrstu nepropusnih stijena predstavljaju kompaktne stijene, ali se one za razliku od gline odlikuju visokim specifičnim otporom.

Tipične vodopropusne i vodonosne stijene odnosno sredine predstavljaju šljunak i krupniji pijesak. Njihov specifičan otpor je mnogo viši nego otpor gline, jer se ove stijene sastoje od odlomaka čvrste stijene visokog specifičnog otpora. Voda je u njima za razliku od gline slobodna i može se iz njih crpsti. Sličnu povoljnu vodonosnu sredinu predstavljaju izlomljene i karstificirane stijene. Ako su pukotine u njima jače razvijene i ako je pukotinska mreža povezana, vodena masa u njima predstavlja zbijeno vodno tijelo.

Prema tome, glina i lapor kao vodonepropusne stijene imaju niži specifičan otpor nego šljunak i pijesak kao vodonosne stijene. S druge strane kompaktne, vodonepropusne, čvrste stijene imaju viši specifičan otpor nego iste stijene, ako nisu kompaktne i ako sadrže više ili manje vode. Ako se na promatranom području radi o jednoj od ovih dviju kombinacija stijena, geoelektrična ispitivanja će biti jako uspješna. Ako su geološke prilike kompliciranije, ako na primjer na promatranom području dolazi više vrsta stijena, opet će studioznim geoelektričnim ispitivanjima biti u većini slučajeva moguće razjasniti hidrogeološke prilike podzemlja.

Zbog navedenih hidrogeoloških karakteristika stijena istraživanje vode geoelektričnim metodama usmjereno je na određivanje vrsta stijena, debljine i dubine vodopropusnih i vododrživih stijena ili slojeva, njihovog međusobnog položaja i protezanja, dakle na indirektno rješavanje pitanja prisustva vode u podzemlju.

Geoelektrična ispitivanja na području kvartarnih i tercijskih vodonosnih sedimentata razlikuju se uglavnom samo po metodi izvođenja mjerenja. U posljednjima javlja se voda redovito u većoj dubini i većinom pod tlakom kao arteška voda (ponekad kao subarteška), pa su potrebna mjerenja s većim dubinskim zahvatima.

Kod većine vodoistražnih radova u kršu pomoću geoelektričnih metoda ispitivanja rješavaju se istovremeno različiti zadaci, jer oni sačinjavaju skup osnovnih elemenata potrebnih za formiranje jasnog i određenog stava kod izrade konačnog rezultata geoelektričnog ispitivanja. Taj se rezultat sastoji u određivanju najpovoljnijih mjesta za daljnje direktne istražne i eksploatacione zahvate.

Kod istraživanja vode koriste se slijedeći geoelektrični mjerne postupci: geoelektrično profiliranje, geoelektrično sondiranje, geoelektrično kružno sondiranje, metoda elektrode u masi (metoda električni nabijenog tijela), metoda vlastitog potencijala, elektrokarotaža i elektromagnetske metode.

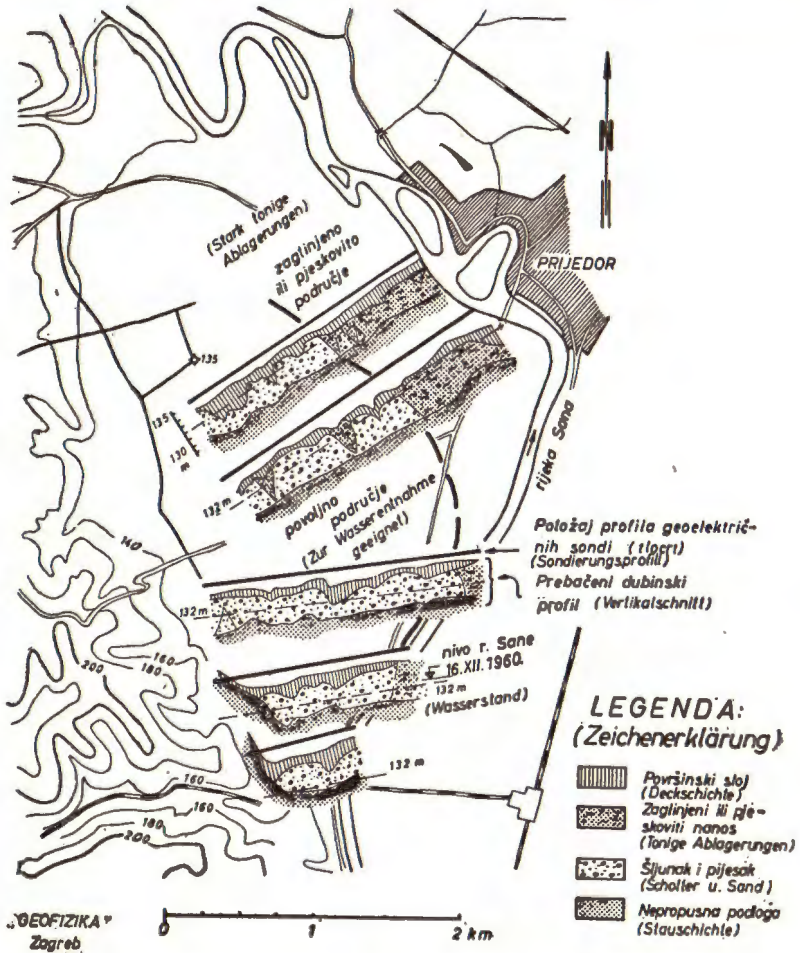
U posljednje vrijeme razvija se metoda pobuđene (inducirane) polarizacije kako za istraživanje rudišta tako i za istraživanje vode. Tu se šalje kroz stanovito vrijeme u tlo istosmjerna električna struja i nakon njenog isključenja mjeri se time pobuđena polarizacija stijena, koja se zapaža kratko vrijeme nakon isključenja struje, ako je zahvaćeno pogodno orudnjenje ili određene stijene. Ova nova geoelektrična metoda već je prošla fazu teoretske i eksperimentalne razrade u primjeni na istraživanju rudnih ležišta, a ti su radovi u toku što se tiče primjene kod istraživanja podzemne vode (V. A. Komarov i dr., 1958; F. Šumi, 1959; H. Seigel, 1962; V. Vacquier i dr., 1957).

Primjenljivost pojedine geoelektrične metode ovisi o specifičnim uvjetima promatranog terena. Općenito se može reći, da će biti pogodno koristiti dvije ili više metoda, jer se time dobiju potpuniji podaci. Mogućnost kombinacije više metoda daje posebnu draž ovoj vrsti istraživačke djelatnosti.

#### PRIMJERI PRIMJENE GEOELEKTRIČNIH METODA U ISTRAŽIVANJU VODE

Geoelektrične ekipe »Geofizike« izvođe vodoistražne radove već preko deset godina. Od izvedenih radova odabrano je za ilustraciju nekoliko primjera.

U sl. 2 pregledno su prikazani rezultati geoelektričnih ispitivanja na području aluvijalnog nanosa rijeke Sane kraj Prijedora. Na istu sliku je ucrtan položaj geoelektričnog profila na površini kao i njegov dubinski hidrogeološki izgled. Na profilima se jasno izdvaja glinovito-laporovita vodonepropusna podloga, na kojoj leži aluvijalni nanos. Kako se vidi, podloga ne pokazuje nekih većih udubljenja, gdje bi izgledi za veću količinu vode bili najbolji. Aluvijalni nanos je u sjeveroistočnom dijelu nepovoljan u hidrološkom pogledu, jer se tu sudeći



Sl. 2. Tukovi-Prijedor. Geoelektrični dubinski presjeci  
 Abb. 2. Tukovi-Prijedor. Geoelektrische Vertikalschnitte

po veličini specifičnog otpora (do 100 om.m) radi ili o pretežno sitno pjeskovitim naslagama ili o znatnijem sadržaju gline u šljunčano-pješčanoj naslazi. Zapadno područje je povoljno. Vjerojatno je, da se podzemna cirkulacija vode odvija pretežno kroz ovo povoljno područje i u tom području treba vršiti zahvate podzemne vode.

U sl. 3 prikazan je primjer sa područja Virovitice, gdje su se ispitivanja protegla na dubinu do 200 m. Geoelektričnim profilom od brežuljaka, koji ograničuju Dravsku potolinu s juga, pa do rijeke Drave na sjeveru utvrđeno je, da su izgledi za dobivanje podzemne vode najbolji u području geoelektričnih sondi 7-16-14-8, jer su tu specifični otpori preko 200 om. m, što treba povezati sa šljunčano-pješčanim sastavom u odnosnom dijelu podzemlja. Iznad i ispod toga leže sredine sa specifičnim otporom ispod 100 om.m, što odgovara pjeskovitom a djelomično i glinovitom sastavu, što je nepovoljno u hidrološkom pogledu. Na sondama 14 i 15 šljunčano-pješčana zona leži na najmanjoj dubini (cca 25 m), pa bi tu trebalo izvoditi bušenja. Povoljne vodonosne naslage prema tome pokazuju oblik izdužene leće. Za konačnu ocjenu vodonosnosti potrebno je utvrditi, da li se i na koji način ova velika šljunčano-pješčana leća hrani vodom, bilo iz rijeke Drave bilo preko nekih dobro propusnih sedimenata na površini.

Geoelektrični rezultati su posve u skladu sa rezultatima ranijih bušenja. Samo bušotine B-4 i B-15 locirane su u povoljnom području, no bušotina B-4 nije bušena dovoljno duboko.

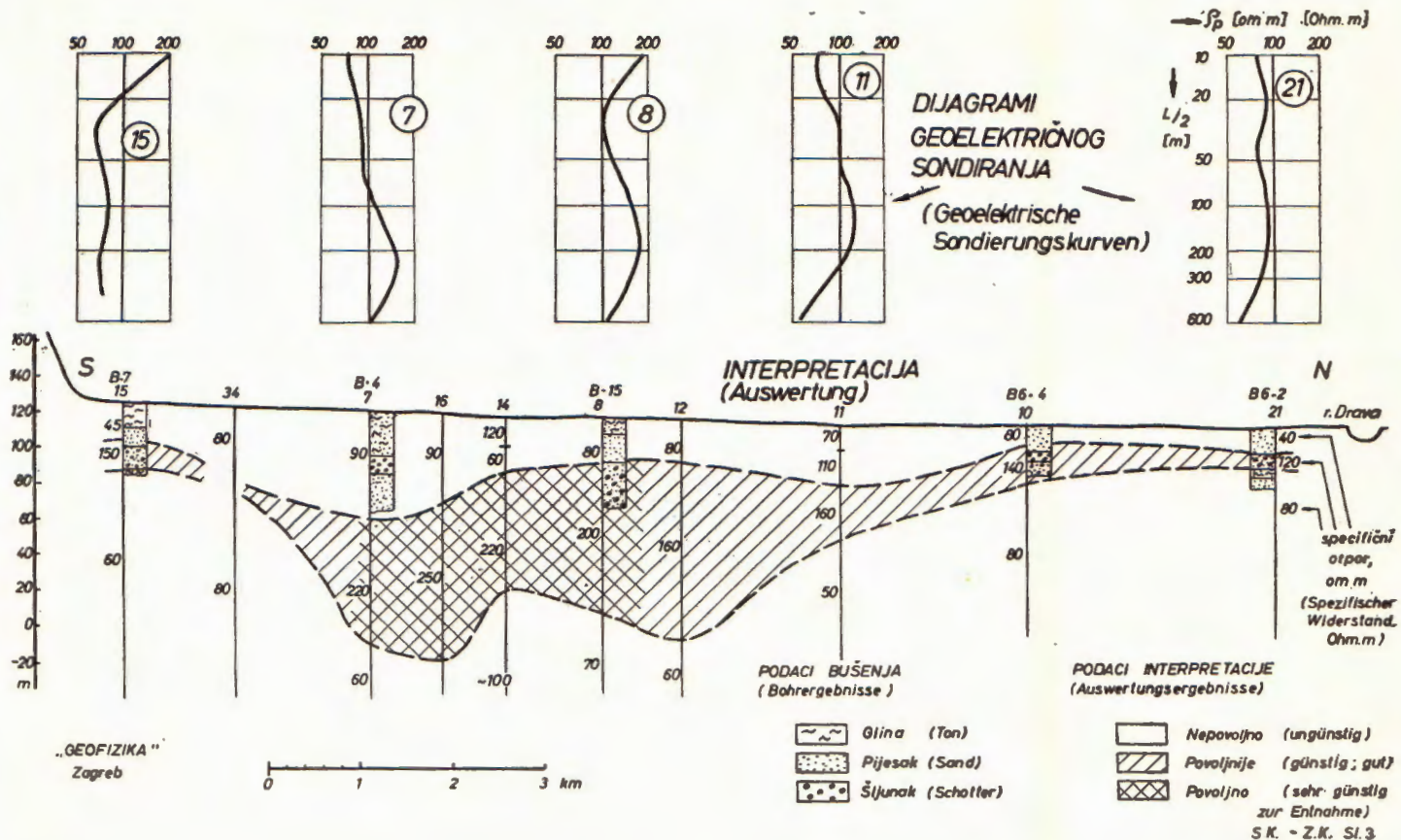
Iznad geoelektričnog profila prikazani su dijagrami geoelektričnog sondiranja, u kojima se jasno vidi izrazito povećanje prividnog specifičnog otpora preko 100 om.m na dijagramima 7 i 8, dok je ono na ostalim dijagramima slabo ili nikako izraženo.

U sl. 4 prikazana je karta dubina vodonosnog horizonta prema rezultatima geoelektričnih ispitivanja na području Petrinje. Vodonosni šljunčano-pješčani horizont pokriven je niže otpornim vodonepropusnim sedimentima. Utvrđeni pad tog horizonta prema sjeveroistoku u skladu je sa geološki utvrđenim padom slojeva prema sjeveroistoku; radi se naime o SW-rubu Savske potoline. Stoga je razumljiva geološko-geofizički pretpostavljena i bušenjem utvrđena pojava arteške vode.

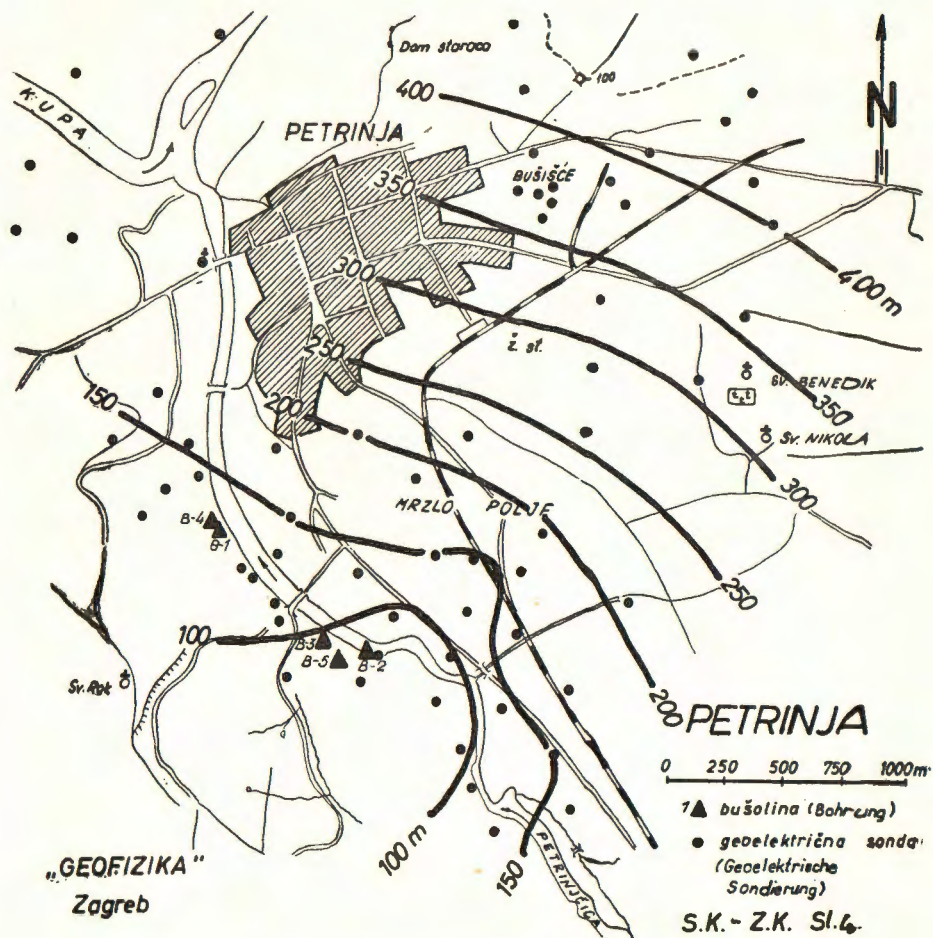
Prikazani primjeri uzeti su sa područja istraživanja vode u kvartarnim nanosima i terciarnim sedimentima. Istraživanje vode ima još veću važnost na području krša, odakle su također uzeta tri praktična primjera.

Geoelektrična ispitivanja na području Primoštena omogućila su, da se dobije uvid u hidrogeološke prilike podzemlja ovog područja. Geoelektrički je gotovo na svim geoelektričnim sondama praćena u dubini granica, ispod koje leži niskootporna geoelektrična sredina, koju treba povezati sa prodorom morske vode u kopno. U sl. 5 prikazane linije jednakih dubina granice slatka-slana voda pokazuju, da je more

Sl. 3. Virovitica. Poprečni geoelektrični profil  
 Abb. 3. Virovitica. Geoelektrisches Längsprofil



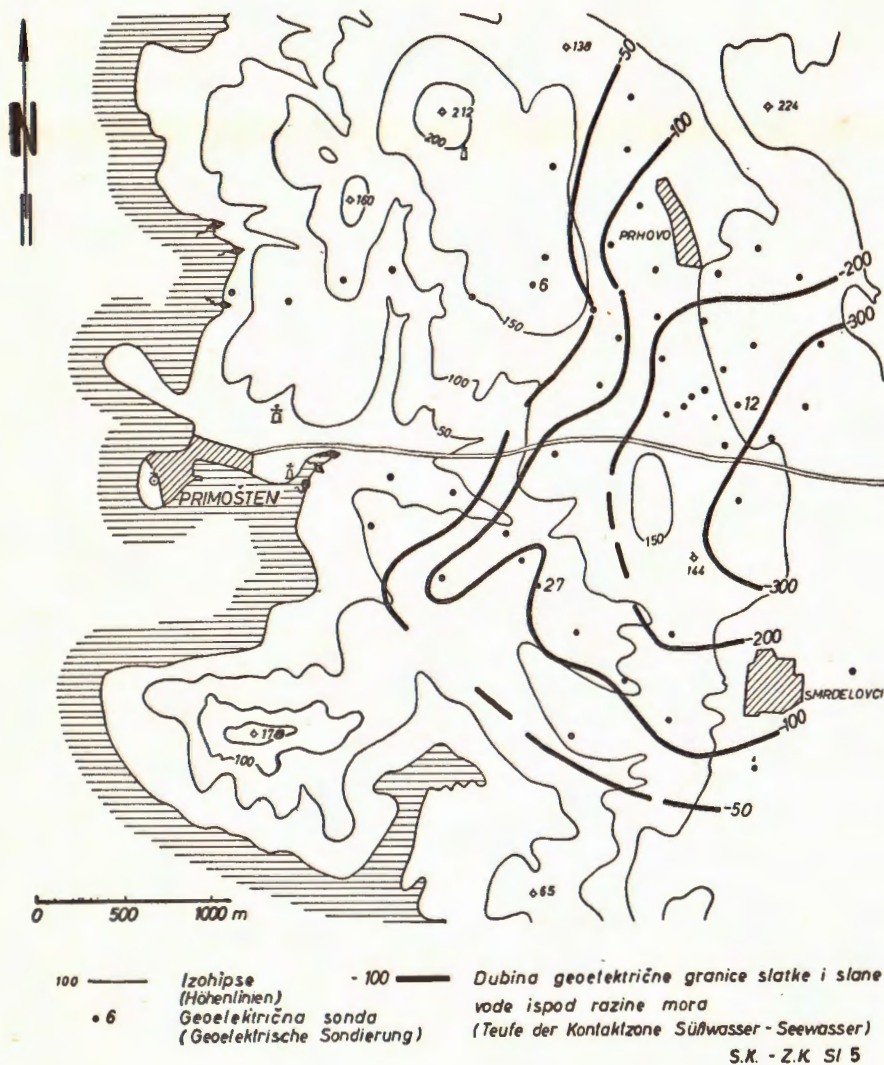
prodrlo vrlo duboko u kopno. U sjevernom dijelu spušta se ta granica dublje od 50 m ispod razine mora tek na daljini od cca 2 km od obale. U južnom dijelu područja upliv mora je manji.



Sl. 4. Petrinja. Karta dubine arteškog vodonosnog horizonta

Abb. 4. Petrinja. Schichtenplan für den artesischen Grundwasserträger

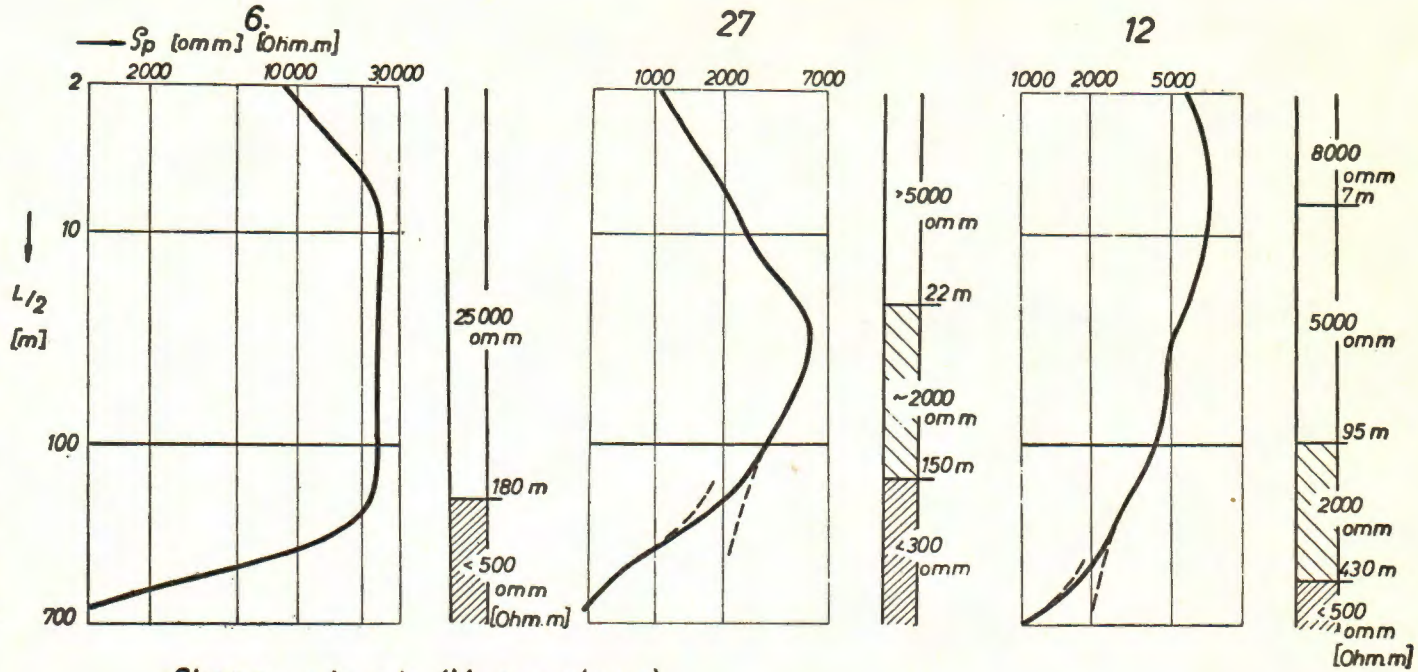
Tipični dijagrami geoelektričnog sondiranja s tog područja prikazani su u sl. 6. Na dijagramu 6 jasno se vidi izraziti pad prividnog specifičnog otpora na dubini 180 m, a što treba povezati sa zaslanjenom zonom



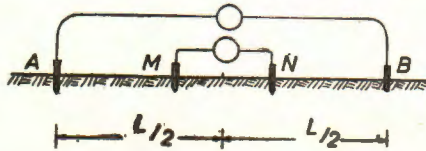
Sl. 5. Primošten. Prodor mora u kopno  
 Abb. 5. Eindringen des Seewassers in den Untergrund des Festlandes



Sl. 6. Primošten. Tipični dijagrami geoelektričnog sondiranja  
 Abb. 6. Primošten. Charakteristische Diagramme der geoelektrischen Sondierung



Shema mjerenja (Messanordnung)

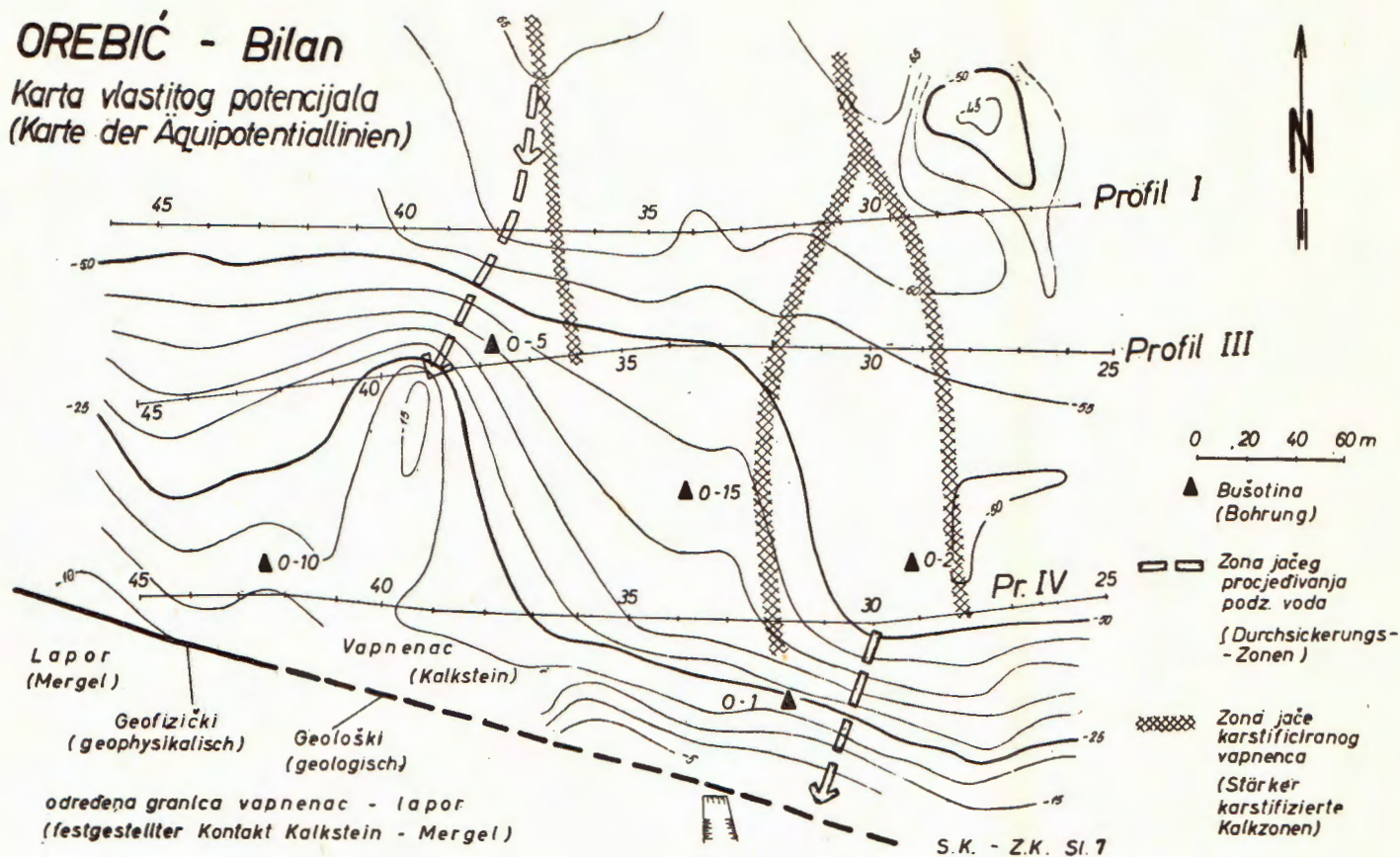


Vapnenac bez vode ili slabo karstificiran vapnenac  
 (Kalkstein, trocken oder wenig karstifiziert)  
 Jače karstificiran vapnenac, sa slatkom vodom  
 (Stärker karstifizierter Kalkstein, mit Süßwasser)  
 Jače karstificiran vapnenac, sa zaslanjenom vodom  
 (Stärker karstifizierter Kalkstein, mit Seewasser)

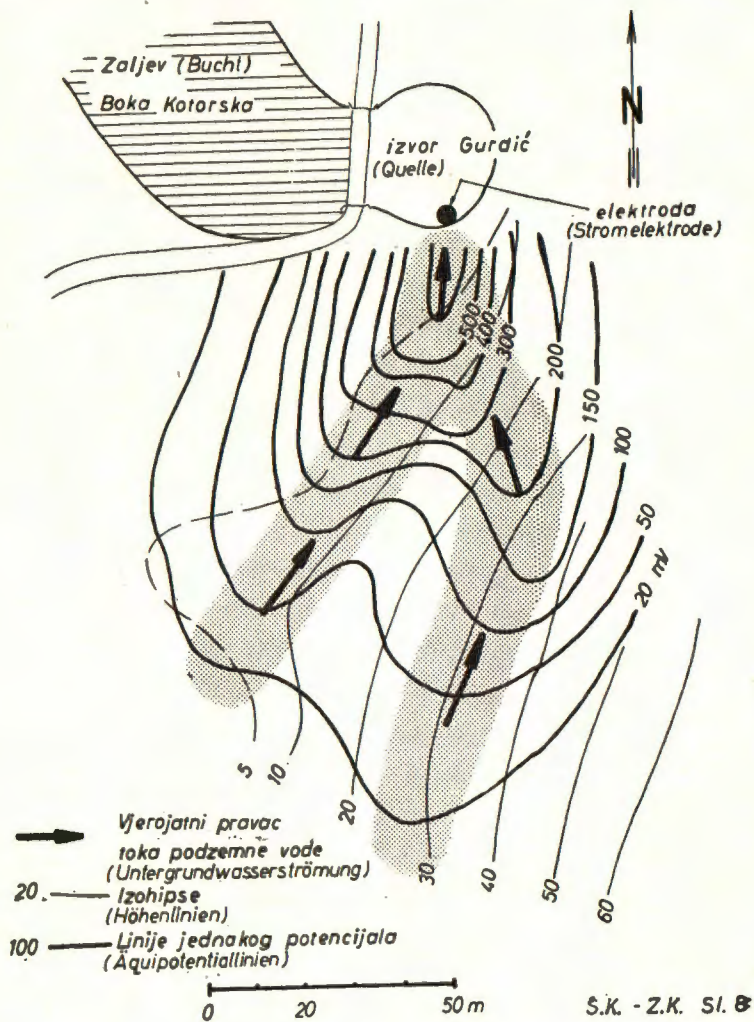
Sl. 7. Orebič-Bilan. Rezultati geoelektričnih ispitivanja  
 Abb. 7. Orebič-Bilan. Ergebnisse der geoelektrischen Untersuchungen

# OREBIČ - Bilan

## Karta vlastitog potencijala (Karte der Äquipotentiallinien)



u raspucanim vapnencima. Na dijagramu 27 se uočavaju dva sniženja otpora: prvo odgovara zahvaćanju zone sa slatkom vodom, a drugo – zone sa zaslanenom vodom u pukotinama stijena, ispod dubine 150 m. Na dijagramu 12 se također uočavaju slična dva sniženja prividnog specifičnog otpora. Zona sa slatkom vodom seže do dubine cca 430 m,



Sl. 8. Kotor. Praćenje podzemnog toka vode metodom električki nabijenog tijela  
 Abb. 8. Richtungsbestimmung eines Karstwasserstroms nach der Methode des elektrisch geladenen Körpers

a ispod toga leži niskootporna sredina, vjerojatno zona zaslanjenja sa morskom vodom, koja dopire čak do ove sonde. Prema tome, u geoelektričnim dijagramima se jasno uočavaju suhe i kompaktne zone te karstificirane zone vapnenaca sa slatkom i zaslanjenom vodom.

Oko 2 km istočno od **O r e b i ć a**, na samoj morskoj obali, nalazi se više izvora, koji imaju vodu bilo stalno bilo samo periodički. Najveći od tih izvora je Bilan, koji ima vodu kroz cijelu godinu, samo je voda neupotrebljiva za piće zbog previsokog saliniteta. U širem zaleđu izvora izvršena su dosta opsežna hidrogeološka i geofizička ispitivanja u cilju utvrđivanja bilo podzemnog toka Bilana bilo hidrološki najpovoljnije lokacije za bušenje, a prije miješanja slatke podzemne vode sa slanom. Ranijim geofizičkim ispitivanjima utvrđen je prekriveni kontakt vapnenaca i flišnog lapora (sl. 7) kao i neki elementi hidrogeološke građe podzemlja. Potom izvršena istražna bušenja nisu dala u cjelini pozitivnih rezultata. Novim geoelektričnim ispitivanjima dalje od morske obale i zone sa slanom vodom u pukotinama karbonatnih stijena trebalo je utvrditi jače karstificirane zone i zone jačeg procjeđivanja podzemne vode u tim stijenama. Prvi je zadatak riješen pomoću geoelektričnog profiliranja, a drugi sa mjerenjem vlastitog potencijala. Interesantni su rezultati mjerenja vlastitog potencijala, jer utvrđena gustoća i raspored ekvipotencijalnih linija daju mogućnost zaključivanja o intenzitetu i smjeru filtracije podzemnih tokova vode. Zbijene ekvipotencijalne linije ukazuju na filtracioni tok podzemne vode. Na karti (sl. 7) vlastitog potencijala povezuju se zone jačeg procjeđivanja podzemne vode s utvrđenim zonama jače karstificiranih vapnenih stijena. Prema rezultatima geoelektričnih mjerenja može se zaključiti, da se izvor Bilan hrani vodom iz šireg zaleđa. Voda se procjeđuje kroz vapnene stijene u manjim tokovima duž čitavog ispitivanog područja do flišne barijere. Jači, koncentriraniji, tokovi mogu se očekivati u zonama jače karstificirane vapnene stijene.

Veoma interesantni i vrijedni podaci dobiju se primjenom metode električki nabijenog tijela. Ova se metoda u osnovi koristi tako, da se jedna strujna elektroda stavi u bolje vodljivo tijelo, kojeg protezanje u podzemlju treba utvrditi (rudno tijelo, tok podzemne vode) i mjeri raspored linija jednakog potencijala. U sl. 8 prikazani su rezultati jednog takvog mjerenja sa strujnom elektrodom u priobalnom izvoru **Gurdić u K o t o r u**. Deformacije toka linija jednakog potencijala pokazuju dvije bolje vodljive zone, koje se sastaju pred izvorom. Može se pretpostaviti, da uzduž tih zona dotječe podzemna voda u priobalni izvor. Glavni podzemni tokovi vode utvrđeni su i bojenjem.

## ZAKLJUČAK

Prikazani primjeri pokazuju, da se geoelektričnim metodama dobiva jasnija slika o hidrološkim prilikama u podzemlju na istraživanim područjima. Na osnovu toga znatno je olakšano postavljanje bušotina i bunara. Za uspješan rad važno je, da je područje za ispitivanje prethodno geološki i hidrogeološki istraženo, da se mogu geoelektrična ispitivanja najsvrsishodnije planirati i izvesti.

Zbog svoje ekonomičnosti, tačnosti i brzine utvrđivanja slike o hidrogeološkim prilikama u podzemlju trebaju geoelektrične metode zauzeti definitivno mjesto u slijedu vodoistražnih radova. Geoelektrična ispitivanja trebaju prethoditi svakom direktnom zahvatu u podzemne vode.

Primljeno 24. 10. 1966.

»Geofizika«  
Zagreb, Kupška 2.

## LITERATURA

- Fritsch, V., (1949): Einige geoelektrische Untersuchungen mit Gleichstrom. *Geofisica pura e applicata*. XIV, Fasc. 3-4, Milano.
- Fritsch, V., (1960): Elektrische Messungen an räumlich ausgedehnten Leitern. Verl. G. Braun, Karlsruhe.
- Komarov, V. A. i dr., (1958): Vyzvanaja poljarizacija gornyh porod i rud i ispolzovanie ee v elektrorazvedke. Trudy VITR (Novoe v metodike i tehnikе geologorazv. rabot). Sb. 1, »Gostoptehizdat«, Moskva.
- Seigel, H., (1962): Induced polarization and its role in mineral exploration. *Canad. Mining and Metallurg. Bull.*, Vol. LXV, Toronto.
- Sumi, F., (1959): Geophysical exploration in mining by induced polarization. *Geophysical Prospecting*, Vol. VII, No. 3, The Hague.
- Vacquier, V. i dr., (1957): Prospecting for ground water by induced polarization. *Geophysics*, Vol. XXII, No. 3, Tulsa.

S. KOVAČEVIĆ, Z. KRULC

## WASSERERSCHLISSUNG MIT GEOELEKTRISCHEN METHODEN

In den letzten Jahren steigt der Einsatz von geoelektrischen Methoden in der Wassererschliessung ständig. Durch die oft komplizierte hydrogeologische Problematik (besonders im Karstgebiet) als auch durch die notwendige Wirtschaftlichkeit dieser Arbeiten wird die Anwendung einer komplexen Wassererschliessungsmethodik bedingt. Nebst geologischen und hydrogeologischen Voruntersuchungen werden vor den direkten mechanischen Erschliessungsarbeiten immer mehr geoelektrische Verfahren angewendet. Durch eine richtige und zweckmässige Kombination verschiedener Verfahren werden die Nachteile einzelner einseitiger Untersuchungsmethoden beseitigt und die Sicherheit des Resultats wesentlich erhöht.

Die geoelektrische Arbeitsmethodik in der Wassererschliessung kann man nach dem hydrogeologischen Charakter der Untersuchungsgebiete in die Arbeiten im Gebiet von Quartärablagerungen, im Gebiet von Tertiärsedimenten und im Karstgebiet einteilen. Die betreffenden hydrogeologischen und geophysikalischen Grundlagen werden in der vorliegenden Arbeit kurz dargestellt. Für die Lösung verschiedenerartiger Aufgaben werden folgende geoelektrische Verfahren angewendet: geoelektrische Profilierung, geoelektrische Sondierung, geoelektrische Kreis Sondierung, Methode des elektrisch geladenen Körpers, Eigenpotentialmethode, elektrische Bohrlochmessungen, elektromagnetische Messungen, Methode der induzierten Polarisation. Die praktischen Beispiele von Tukovi-Prijedor und Virovitica zeigen die Ergebnisse der Wassererschliessung in Quartärablagerungen. Die geoelektrische Untersuchung in Petrinja befasste sich mit der Wassererschliessung in tiefer liegenden Tertiärsedimenten. Die letzten drei Beispiele (Primošten, Orebić und Kotor) erörtern einige Probleme und praktische Ergebnisse der geoelektrischen Wassererschliessung im dinarischen Karstgebiet.

*Angenommen am 24. Oktober 1966.*

*»Geofizika«  
Zagreb, Kupska 2*