

# Geophysikalische Untersuchungen unterirdischer Wasserwege im jugoslawischen Karst

Von Z. KRULC (Zagreb)

## Einleitung

Das allgemeine Merkmal der Karsthydrographie besteht bekanntlich darin, daß das unterirdische Netz der Wasserläufe viel größer ist als das oberflächliche. Das ist besonders stark im Gebiet des Dinarischen Karstes ausgeprägt, da der Dinarische Karst (und der Karst am Peloponnes) die ausgeprägteste Form des vollkommenen Karstes oder Holokarstes (nach J. CVIJIĆ, 1918, 1926) darstellen.

Die allgemeine Filtration von Karstwässern in Karbonatgesteinen im Karst, besonders aber die Untergrundwasserbewegung in Form von feinen Wasserläufen, ist nur durch die Hohlräume, Spalten und Kluftsysteme möglich. Der Charakter, das Streichen und die Raumanordnung der Spalten und Kluftsysteme und die ganze geologisch-tektonische Struktur der betreffenden Gebiete spielen dabei eine wichtige Rolle. Wegen der besonders komplizierten geologischen, hydrogeologischen und hydraulischen Verhältnisse im Karstgelände sowie wegen des Mangels an Untersuchungsmethoden, die eindeutige Ergebnisse geben könnten, wird zur Lösung jedes hydrogeologischen Problems, das in einem Karstgelände vorkommt, ein Komplex von verschiedenen Untersuchungsmethoden angewendet. Unter diesen nehmen in Jugoslawien in letzter Zeit die geophysikalischen, besonders aber die geoelektrischen Verfahren eine wichtige Stellung ein.

Die komplexe Untersuchungsmethodik hat sich als erfolgreich gezeigt. Die Anwendung geoelektrischer Verfahren hat sich unter den im Dinarischen Karst gegebenen Bedingungen vollkommen gerechtfertigt gezeigt, und zwar in Kombination mit anderen Untersuchungsmethoden. In diesem Rahmen sind die geoelektrischen Untersuchungen unentbehrlich und nötig, weil sie gute Resultate unter einem Mindest-

einsatz an Mitteln und auf schnellste Weise ermöglichen (S. MIKULEC & K. TORBAROV, 1960).

Bei den geoelektrischen Erforschungen der Untergrundwasserdynamik werden meist sowohl Oberflächen- als auch Bohrlochmessungen angewendet. Die Oberflächenmessungen werden für die Erforschung der allgemeinen hydrogeologischen Verhältnisse und Bedingungen der unterirdischen Wasserströmung angewendet. Mit den geoelektrischen Bohrlochmessungen werden aber die unmittelbaren Elemente der Untergrundwasserdynamik festgestellt und untersucht. Unter diesen Messungen nimmt in den letzten Jahren im Dinarischen Karst die Methode des elektrisch geladenen Körpers eine Sonderstellung ein, besonders für die Bestimmung der Richtung der unterirdischen Wasserströmung von einem Bohrloch aus.

## Die Methode des elektrisch geladenen Körpers

Diese geoelektrische Methode ist wohl auf dem Gebiet der Erzgeophysik (Erzgeoelektrik) schon gut bekannt (franz.: *Méthode de la „mise à la masse“*, E. POLDINI 1947; engl.: *Charged potential survey*, H. BRAEKKEN 1961; weiters A. S. SEMENOV 1947, A. I. ZABOROVSKII 1963 u. a.). In der Hydrogeologie wurde diese Methode zum ersten Male schon im Jahre 1932 verwendet (E. POLDINI 1947), die volle praktische Anwendung unter gleichzeitiger wissenschaftlicher und experimenteller Bearbeitung findet sie aber erst in den letzten 10 bis 15 Jahren, insbesondere in der UdSSR (A. M. GORELIK & M. P. SACHAROWA 1952; B. K. MATVEEV 1957, 1958, 1963; A. A. OGILVI 1957 u. a.).

Bei den verschiedenen Untersuchungen nach der Methode des geladenen Körpers wird nur ein Bohrloch, Brunnen oder Erschließungsschacht benötigt. Im Dinarischen Karst wird diese Methode besonders oft für die Bestimmung der Richtung des unterirdischen Fließens jener Wässer angewendet, die in den Ponoren verschwinden.

In das Bohrloch, das einen unterirdischen Wasserstrom angefahren hat, beziehungsweise in das Wasser, das durch den Ponor in den Untergrund abfließt, gießt man eine gewisse Menge eines Elektrolyts (meist Salzlösung) von hoher Konzentration. Der Elektrolyt wird vom Wasserstrom in der Richtung der Strömung mitgeschwemmt, wodurch im Untergrund eine gutleitende Zone gebildet wird. In den Ponor oder in das Bohrloch setzt man eine Elektrode des stromzuführenden Kreises und ordnet möglichst weit entfernt eine zweite Elektrode an. Um den Ponor wird so ein elektrisches Strömungsfeld ausgebildet, dessen Struktur vom geologischen Aufbau des Untergrundes, vom Einfluß des Elektrolyts im Ponor (oder im Bohrloch) und von der Bewegung des Elektrolyts im wasserführenden Horizont oder Kluftsystem abhängig ist. Die Ausdehnung der Elektrolytzone vergrößert sich durch ständiges Ein-

fließen des Elektrolyts in der Richtung der Strömung. Dementsprechend ändert sich auch das elektrische Feld um den Ponor herum. Man mißt nun an der Oberfläche in bestimmten Zeitabständen die Verschiebung der Äquipotentiallinien und berechnet daraus die Richtung und die Strömungsgeschwindigkeit des unterirdischen Wasserstromes.

Die Aufschlußteufe der Methode des elektrisch geladenen Körpers beträgt bei ihrem heutigen Zustand 100 m, unter der Bedingung, daß der wasserführende Horizont nicht mit isolierenden Schichten oder mit einem Paket von trockenen, stark zerrütteten, hochohmigen Gesteinen überdeckt ist (B. M. MATVEEV 1963). V. N. GOLOVCYN und B. M. SMOLNIKOV (1964) berichten über gute Ergebnisse der Bestimmung der Richtung der Untergrundwasserströmung in einer Teufe von ungefähr 117 m. Das positive Resultat der Anwendung der Methode des geladenen Körpers wurde durch den krassen Widerstandsunterschied zwischen dem Kalkstein und der Zone von wasserführenden porösen Gesteinen bedingt.

### Einige praktische Beispiele

Abb. 1 zeigt ein Beispiel der „klassischen“ Anwendung der Methode des geladenen Körpers, nämlich in einem Bohrloch.

Der NW-Teil eines Polje auf der Insel Krk wurde nach den geologischen Vor- und hydrogeologischen Detailuntersuchungen und geoelektrischen Oberflächenmessungen als am meisten versprechend für die direkte Wassererschließung betrachtet. In einigen Bohrlöchern wurden schließlich die geoelektrischen Messungen nach der Methode des geladenen Körpers durchgeführt. Abb. 1 zeigt die Ergebnisse dieser Messungen an einem Bohrloch. Das elektrische Feld wurde zuerst im „normalen“ (natürlichen) Zustand gemessen, d. h. vor dem Eingießen des Elektrolyts. Um lediglich die Richtung der Untergrundwasserströmung zu bestimmen, wurden die Äquipotentiallinien nur in drei Abständen vom Bohrloch gemessen.

Die geoelektrische Messung am Bohrloch B-3 (Abb. 1) zeigt eine deutliche Verformung (Verschiebung) der Äquipotentiallinien in der Richtung zwischen  $180^{\circ}$  und  $225^{\circ}$ , d. h. in die SW-Richtung. Diese Richtung stimmt sehr gut mit der geologisch festgestellten Verwerfungslinie überein, die auch durch die geoelektrische Profilierung nachgewiesen wurde. Diese Verwerfungszone dürfte eine von den wichtigsten Filtrationszonen im NW-Teil des Karstpolje sein.

Abb. 2 zeigt ein Beispiel, das bei einem Erschließungsschacht, durch welchen ein oberflächlicher Wasserlauf in den Untergrund verschwindet, im Gebiet von Gusić Polje gemessen wurde. Zur Korrelation und zur Kontrolle wurden zuerst die Äquipotentiallinien ohne Salzlösung gemessen. Sie haben die Form von mehr oder weniger konzentrischen Kreisen, wie es dem normalen elektrischen Feld entspricht. Nachdem

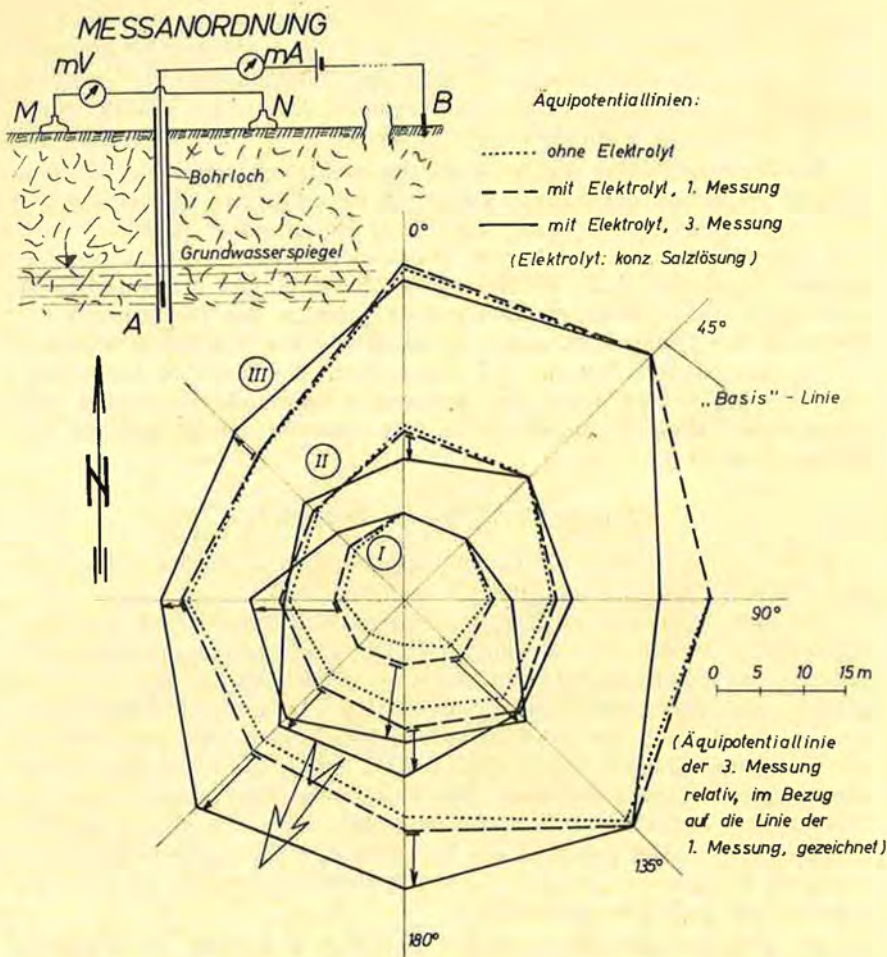


Abb. 1: Insel Krk, Bohrloch B-3.

die Salzlösung in den Untergrund eingeschwemmt worden war, verformten sich die aufgenommenen Äquipotentiallinien deutlich in Richtung Westen, d. h. in die Richtung der unterirdischen Wasserlaufströmung. Diese Richtung stimmt gut mit den geoelektrisch und hydrogeologisch ermittelten Richtungen der vorherrschenden Klüftigkeit der Felssohle des Polje in diesem Teil des Untersuchungsgebietes überein. An der Oberfläche liegen in dem untersuchten Bereich ein bis zwei Meter mächtige Kalktuffsandschichten, darunter sechs bis sieben Meter mächtige Lehmschichten, die Felssohle bilden aber Karbonatgesteine.

## MESSANORDNUNG

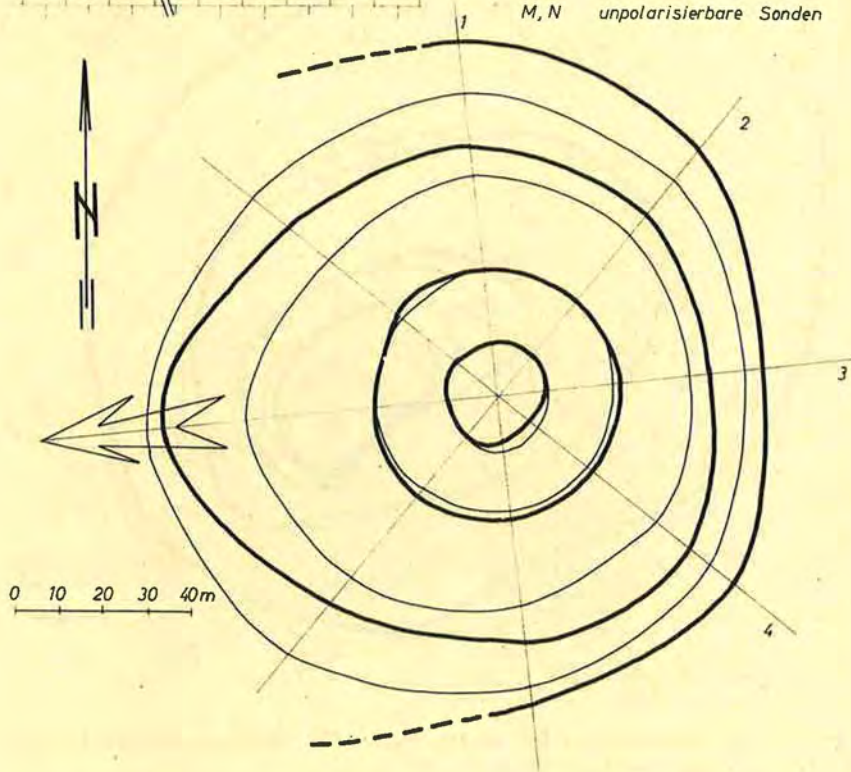
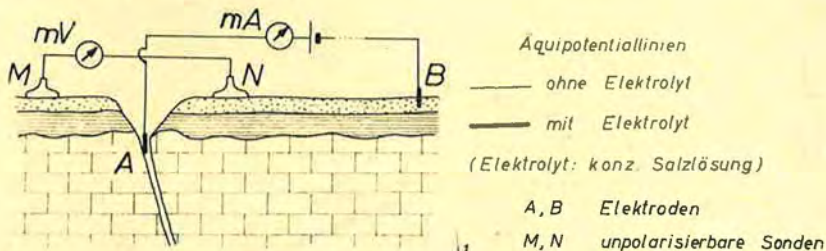


Abb. 2: Gusić Polje, Erschließungsschacht Š-2.

Sehr interessante Ergebnisse der Untersuchung von unterirdischen Wasserläufen durch die Anwendung der Methode des geladenen Körpers zeigt Abb. 3. Es handelt sich um die Bestimmung der Richtung des unterirdischen Fließens des Wassers, das in einem Ponor in der Ponorengruppe Proždrikoza am W-Rand von Buško Blato verschwindet.

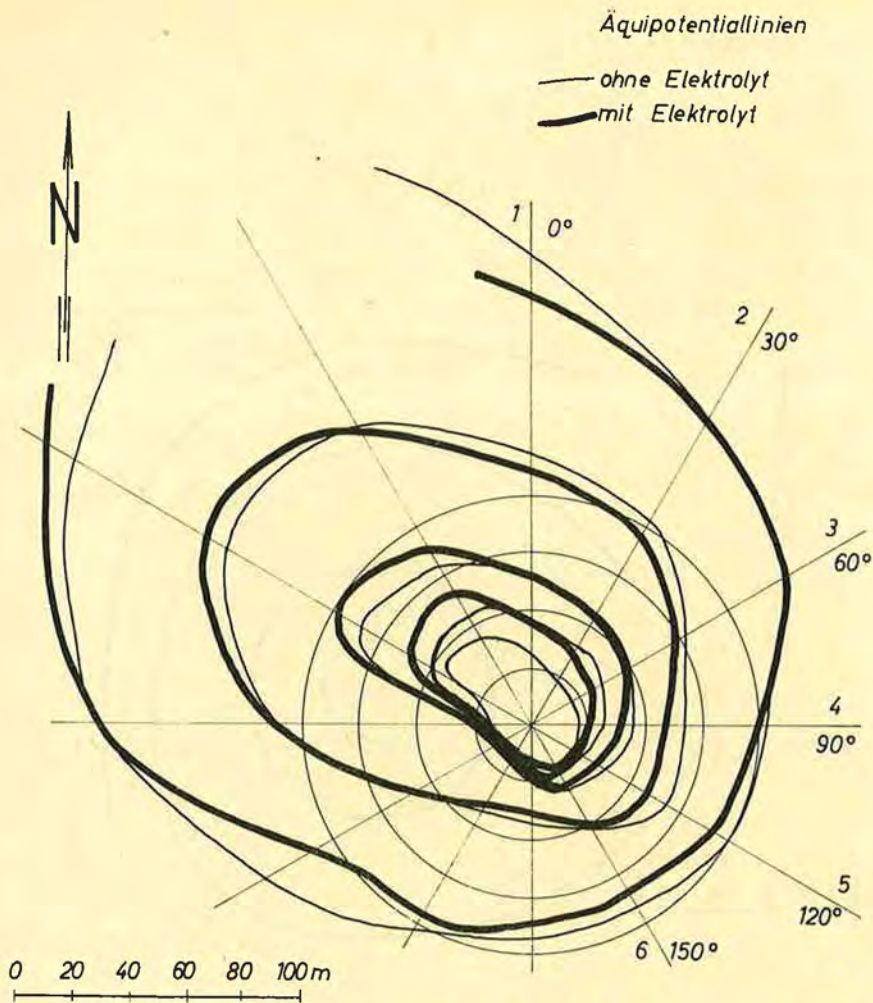


Abb. 3: Die Fließrichtung bei einem Ponor der Schwindengruppe Prozdrikoza am Westrand des Buško Blato.

Abb. 4 zeigt einen von den Ponoren dieser Ponorengruppe. Die Äquipotentiallinien zeigen eine deutliche Verformung (Ausbuchtung) gegen NW. Diese Richtung stimmt mit dem Streichen der Kalksteinschichten oberhalb des Ponors überein. Es wird behauptet, daß damit die hydrogeologische Voraussetzung, daß die versickerten Wässer aus dieser Ponorengruppe unterirdisch entlang dem Schichtenstreichen (und regional entlang den tektonischen Störungs- und Verwerfungslinien) nach

NW und W strömen, bestätigt und bewiesen wird. Die unterirdische Wasserströmung wurde bis in eine Entfernung von ungefähr 200 m vom Ponor verfolgt. Die anomale Form (annähernd elliptische Ausbuchtung) der Äquipotentiallinien vor der Einführung des Elektrolyts in den Ponor wird als die Folge des hydrogeologischen Aufbaues der durchlässigen Kalksteinmasse hinter dem Ponor betrachtet. In der



Abb. 4: Ponor der Gruppe Proždrikoza.

Streichrichtung der Kalke, die hier fast vertikal geschichtet anstehen, läßt sich auch das Kluftstreichen im Gestein erkennen. Andere geoelektrische Untersuchungen, die geologische Kernbeschreibung wie die Wasserabpressungen in den vorliegenden Bohrungen zeigen, daß die Klüfte im Kalk in diesem Untersuchungsgebiet größtenteils mit Lehm und Terra rossa verfüllt sind. Dadurch wird in dieser Richtung die elektrische Leitfähigkeit höher auch schon bei der Messung ohne Elektrolyt (L. FABIČ-S. KOVAČEVIĆ, 1964).

Die Methode des geladenen Körpers kann erfolgreich auch für die Bestimmung der Richtung, in welcher unterirdisch das Wasser in eine stärkere Karstquelle zufließt, angewendet werden. Ein interessantes Beispiel zeigt Abb. 5. Die Abbildung zeigt die Verformung von Äqui-

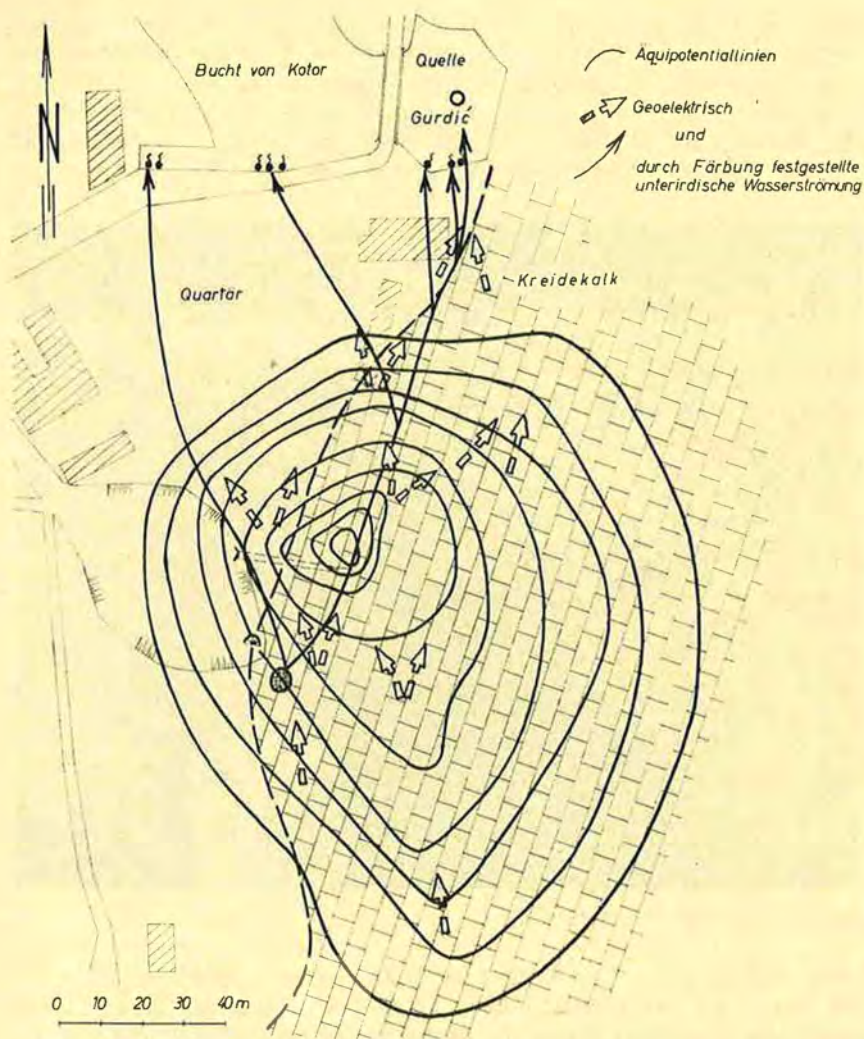


Abb. 5: Durch geoelektrische Verfahren und Färbung festgestellte Fließrichtung des unterirdischen Wassers bei Kotor (nach M. Lj. MLADENOVIC).

potentiallinien, die im Hinterland der Karstquelle Gurdić in Kotor, und zwar auf einem von drei Meßpunkten gemessen wurden. Auf der Abbildung wurden die Auswertungsergebnisse nach der Methode des geladenen Körpers auf allen drei Meßpunkten dargestellt. Die festgestellten Ausbuchtungen der Äquipotentiallinien entsprechen den



Richtungen von unterirdischen Hauptzuflußkanälen der Quelle Gurdić sowie auch der periodischen Quellen an der Küste. Am stärksten werden die Anomalien neben der Kontaktzone zwischen den Kreidekalken und undurchlässigen Flyschablagerungen sowie auch innerhalb der durchlässigen Kalksteine ausgeprägt; beide Anomalien zeigen die Streichrichtung zur Quelle Gurdić. Alle unterirdischen Hauptzuflußkanäle wurden auch durch Färbung festgestellt (M. Lj. MLADENOVIĆ, 1962).

### Zusammenfassung

Die Ergebnisse der bisherigen geoelektrischen Untersuchungen der unterirdischen Wasserverbindungswege im Dinarischen Karst mittels der Methode des geladenen Körpers stimmen sehr gut mit den Ergebnissen hydrogeologischer Erforschungen sowie auch geoelektrischer Oberflächenmessungen überein.

Diese Ausführungen stellen eigentlich den ersten Versuch einer umfangreicheren Beurteilung der Ergebnisse von komplexen Untersuchungen der Wasserverbindungswege im Dinarischen Karst dar. Diese komplexe Untersuchungsmethodik hat sich als erfolgreich erwiesen. Durch komplexe Untersuchungen können gleichzeitig auch andere Aufgaben gelöst werden, die vom Standpunkt der Untergrundwasserdynamik aus nicht weniger wichtig sind: Bestimmung der Mächtigkeit und der Teufe von undurchlässigen Lehmschichten, Feststellung des Grades und der Teufe der Verkarstung von Karbonatgesteinen und die Trennung von Zonen verschiedener Klüftigkeit, Bestimmung der vorherrschenden Kluftrichtung der Karbonatgesteine, Ermittlung und Untersuchung von Verwerfungen und steilen geologischen Kontakten u. a.

### Literatur

- BRAEKKEN, H.: Deep ore exploration by electrical methods. Geophysical Prospecting, **IX**, 1, The Hague 1961.
- CVIJIĆ, J.: Hydrographie souterraine et évolution morphologique du karst. Recueil des Travaux de l'Institut de geogr. alpine, Grenoble 1918.
- CVIJIĆ, J.: Geomorfologija. Knjiga druga (Geomorphologie. Zweites Buch). Drž. štamp. Kralj. SHS, Beograd 1926.
- FABIĆ, L. & S. KOVAČEVIĆ: Buško Blato, Geoelektrična ispitivanja, 1963, izvještaj (Geoelektrische Untersuchungen, 1963, Bericht). „Geofizika“, Zagreb 1964 (unveröffentlicht).
- GOLOVCYN, V. N. & B. M. SMOLNIKOV: Metod zarjažennogo tela pri issledovanii podzemnyh vod v Gornom Krymu (Die Methode des geladenen Körpers in der Erforschung von Untergrundwässern in Gor. Krime). Geofiz. sbornik; Inst-t geofiziki AN USSR, Vyp. 7 (9), Kiev 1964.
- GORELIK, A. M. & M. P. SACHAROWA: Die Elektroschürfung bei ingenieurgeologischen Untersuchungen. Verlag Technik, Berlin 1952.
- MATVEEV, B. K.: Električeskii sposob opredelenija napravlenija i skorosti podzemnyh vod po odinočnym skvazi nam (Das elektrische Verfahren der Bestimmung der Richtung und der Geschwindigkeit von Untergrundwässern mittels einzelner Bohrungen). Vestnik MGU, No. 4, Moskva 1957.

- MATVEEV, B. K.: K metodike opredelenija skorosti podzemnogo potoka po odnoi skvaziine (Zur Methodik der Bestimmung der Untergrundströmung in einem Bohrloch). Izvestija AN USSR, Serija geofiz., No. 9, Moskva 1958.
- MATVEEV, B. K.: Geofizičeskie metody izučenija dviženija podzemnyh vod (Geophysikalische Verfahren der Erforschung der Untergrundwasserströmung). Gosgeoltehzdat, Moskva 1963.
- MLADENOVIĆ, M. Lj.: Kotor; Izvještaj o geoelektričnim ispitivanjima (Bericht über die geoelektrischen Untersuchungen). „Geofizika“, Zagreb 1962 (unveröffentlicht).
- MIRULEC, S. & K. TORBAROV: Istraživanje sigurnosti krške akumulacije Miruše na Trebišnjici (Untersuchung der Sicherheit des Karstspeichers Miruša an Trebišnjica). Saopštenja sa V Kongresa jugosl. nacional. komiteta za visoke brane, Beograd 1960.
- OGILVI, A. A.: Geoelektričeskie metody izučenija karsta (Geoelektrische Methoden der Karstforschung). Izd-vo Moskov. univ-ta, Moskva 1957.
- POLDINI, E.: La prospection électrique du sous-sol. Lausanne 1947.
- SEMEŃOV, A. S.: Metod zarjaženogo tela pri razvedke i poiskah sulfidnyh mestoroždenii (Die Methode des geladenen Körpers bei Erschließung und Untersuchung von Sulfidlagerstätten). Materialy VSEGEI, Sb. 2, Moskva 1947.
- ZABOROVSKII, A. I.: Elektrorazvedka (Geoelektrik). Gostoptehizdat, Moskva 1963.

## Summary

The results of previous geoelectrical investigations of subterranean water connections in the Dinaric karst using the method of the charged body agree very well with the results of hydrogeological researches as well as of geoelectrical surface measurings. This lecture presents in fact the first attempt at a large-scale evaluation of the results of complex investigations of the water connections in the Dinaric karst. Such complex methods of investigation have been proved successfully. By complex investigations, other problems, no less important from the point of view of underground-water dynamics, can be solved: the determination of the thickness and depth of impermeable clay strata, the determination of the degree and depth of the karstification of carbonate rocks and the distinction of zones of different joint-pattern, the determination of the prevalent direction of the joints of the carbonate rocks, determination and investigation of dislocations and steep geological contacts etc.

## Résumé

Les résultats obtenus à la suite de recherches géoélectriques des voies de communication d'eaux souterraines dans le Karst dinarique, grâce à la méthode du corps chargé correspondent très bien aux résultats de recherches hydrogéologiques ainsi de mesurages géoélectriques des surfaces.

Ces exposés représentent, à vrai dire, le premier essai de juger de façon assez étendue les résultats obtenus à la suite de recherches complexes des voies de communication d'eau dans le Karst dinarique. Cette méthode de recherches complexe s'est avérée efficace. Par des recherches complexes, d'autres problèmes peuvent être résolus en même temps, qui, du point de vue de la dynamique des eaux souterraines, ne sont pas moins importants: déterminer la dimension et la profondeur de couches argileuses imperméables, constater le degré et la profondeur de la karstification de pierres de carbonate, et séparer les zones de roture variée, déterminer la direction principale de gouffres dans les roches de carbonate, trouver et examiner des failles et des contacts géologiques abrupts etc.