

A. BERKTOLD, K. KEMMERLE, P. NEURIEDER

Magnetotellurik und Erdmagnetische Tiefensondierung in der  
geothermischen Anomalie von Urach

Abb. 1 zeigt den zentralen Teil der geothermischen Anomalie von Urach in Linien konstanter geothermischer Tiefenstufe zusammen mit den wesentlichen tektonischen Lineamenten und Eruptionspunkten des Schwäbischen Vulkans nach CARLÉ (1974). Ausserdem sind die Meßstationen zusammen mit der jeweiligen Vorzugsrichtung (Strich) des elektrischen Feldes eingetragen. Die Länge der Striche ist ein Maß für die Polarisationsstärke des el. Feldes an der betreffenden Station. Auffallend ist die starke Polarisation im NE-Teil des Vulkangebietes. Dieses Gebiet, in dem Vulkan-schlote existieren, ist zu unterscheiden von der geothermischen Anomalie, die sehr viel großräumiger ist.

Die Stationen liegen im wesentlichen entlang von 2 Profilen. Profil P streicht parallel zum Streichen der Schwäbischen Alb (Kennzeichnung durch die Ziffern 1 - 10 und 11); Profil S streicht senkrecht dazu (Buchstaben a - k). Die Profile schneiden sich an der Station d = 4 = Gächingen.

Abb. 2 zeigt die  $g_s$ -Kurven der meisten Stationen der beiden Profile. Die Zahlen bzw. Buchstaben in den linken oberen Ecken der Teilbilder kennzeichnen die Station gemäß Abb. 1. Die  $g_s$ -Kurven von Profil S wurden durch Polynome 4. Grades angenähert.

Sehr ähnliche Morphologie zeigen die Kurven südwestlich (1 und 2), südlich (f - k) und weit nordöstlich des Vulkangebietes (9 und 10). Davon zeigen die Stationen südwestlich (1, 2) und am Südrand des Vulkangebietes (f, g) unterdurchschnittlich kleine  $g_s$ -Werte. Die Stationen 3 (Bernloch), c (St. Johann) und d (Gächingen) im Westteil des Vulkangebietes zeigen einen eigenen Kurventyp mit einem Maximum bei ca. 20 sec. Die Kurven der Stationen im Ostteil des Vulkangebietes ähneln in ihrer Morphologie denen außerhalb, sind jedoch stark polarisiert (hier repräsentiert durch 6 = Böhringen). Östlich des Vulkangebietes schließt sich ein Kurventyp mit einem Maximum bei 40 - 70 sec an (7 = Laichingen, 8 = Nellingen). Diese Stationen liegen im Gebiet starker magnetischer Anomalien, die durch Amphibolite erzeugt werden. Wir nehmen an, daß diese Amphibolite schlecht leitend sind und besagtes Maximum erzeugen, wobei sowohl die Änderungen des spez. Widerstandes mit der Tiefe als auch diejenigen in lateraler Richtung wirksam sind.

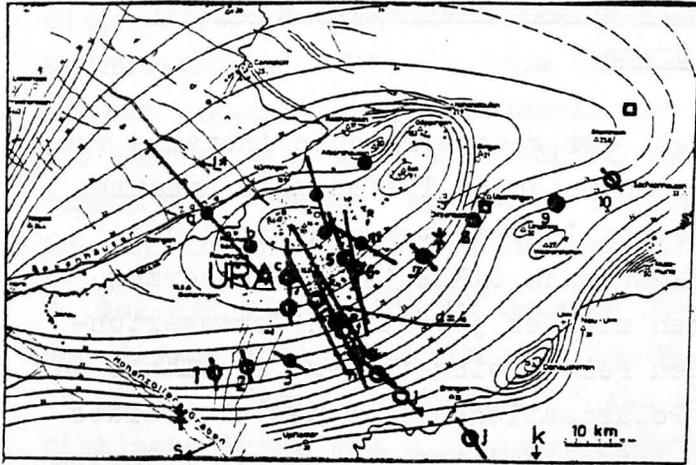


Abb. 1 Das Meßgebiet mit Linien konstanter geothermischer Tiefenstufe in  $m/1^{\circ}C$  nach CARLE (1974), mit wichtigen tektonischen Lineamenten und Eruptionspunkten des Schwäbischen Vulkans sowie den Meßstationen mit der jeweiligen Vorzugsrichtung des el. Feldes und der Polarisationsstärke.

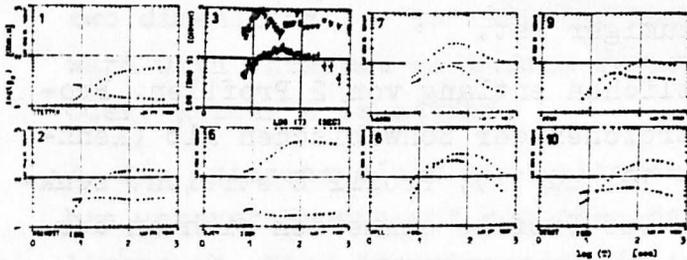


Abb. 2a  $\rho_s$ -Kurven von Profil  $P_s$  (parallel zum Streichen der Schwäbischen Alb).

$\rho_s$  = scheinbarer spez. Widerstand als Funktion der Periode T

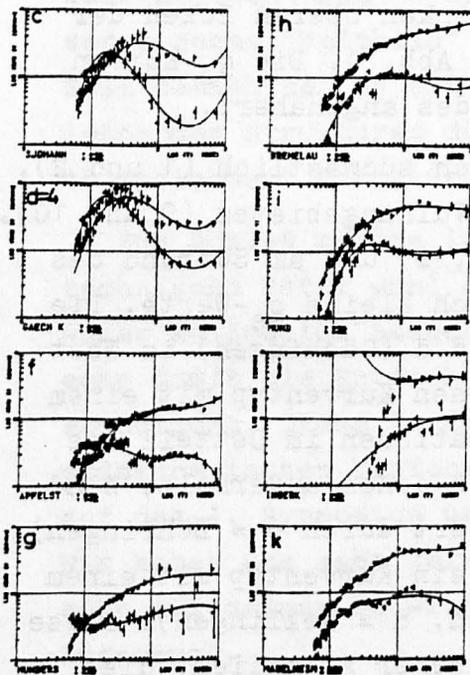
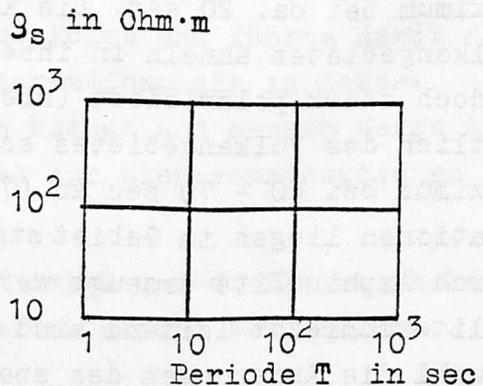


Abb. 2b  $\rho_s$ -Kurven von Profil  $S_s$  (senkrecht dazu). Die Kurven sind durch Polynome 4. Grades angenähert.



Skalierung zu Abb. 2a und 2b

Betrachten wir nun in Abb. 3 die Ergebnisse der Erdmagnetischen Tiefensondierung im Profilschnitt für die Perioden  $T = 10$  und  $100$  sec. Die beiden Abb. zeigen oben die Induktionspfeile nach Wiese (i.a.), darunter den Betrag  $Z/H''$  ( $Z =$  Vertikalkomp.;  $H'' =$  die zu  $Z$  maximal korrelierte Horizontalkomp. des magn. Feldes). In Teil b ist zusätzlich die Phasendifferenz  $\varphi$  zwischen  $Z$  und  $H''$  dargestellt. Bei beiden Profilen sehen wir für die Periode  $T = 100$  sec einen sehr glatten Verlauf der dargestellten Größen über das ganze Profil - es sind keine größeren Induktionsanomalien zu erkennen, deren Ausdehnung etwa dem Induktionsraum von  $100$  sec entsprechen würde. Bei  $10$  sec dagegen zeigen sich deutliche laterale Änderungen der dargestellten Größen innerhalb und am Rande des Vulkangebietes, dessen laterale Ausdehnung an der x-Achse durch einen Strich markiert ist. Außerhalb jedoch ist deren Verlauf glatt. Bei Profil S ist das Maximum bei  $x \approx -1$  km markant. Es ist also sehr homogene Leitfähigkeitsverteilung außerhalb des Vulkangebietes, inhomogene Verteilung dagegen darin und am Rande desselben anzunehmen.

In Abb. 4 sind die Ergebnisse der Magnetotellurik in analoger Weise dargestellt. Oben sind die Vorzugsrichtungen  $P$  und die Stärke der Polarisierung, gekennzeichnet durch die Länge  $l = E_y/E_x - 1$  ( $E_y$  = E-Feld Komponente parallel zur Vorzugsrichtung,  $E_x$  senkrecht dazu) dargestellt. Darunter folgt bei Profil P die Phasendifferenz zwischen E-Feld und Magnetfeld, darunter bei beiden Profilen die  $g_s$ -Werte ( $\parallel$  bedeutet Stromsystem parallel zum Streichen der Schwäb. Alb, d. h. Fall der E-Polarisation hinsichtlich der Oberflächengeologie;  $\perp$  bedeutet Stromsystem senkrecht dazu, d. h. Fall der H-Polarisation) jeweils für  $10$  und  $100$  sec.

Da in der Magnetotellurik nicht nur Induktionseffekte sondern auch periodenunabhängige H-Polarisations-Effekte der lokalen Anomalien sichtbar werden, ist bei den Ergebnissen der Magnetotellurik ein unruhigerer Verlauf zu erwarten als bei den Ergebnissen der Tiefensondierung. Als solche Anteile müssen diejenigen Änderungen angesehen werden, die für  $10$  und  $100$  sec parallel verlaufen. Insgesamt gilt aber auch hier: deutlich ruhigerer Verlauf außerhalb des Vulkangebietes als innerhalb. Es sei noch hingewiesen auf das deutliche relative Minimum der Komp.  $\parallel$  an den Stationen 5 und 6 bei Profil P, welches die Komponente  $\perp$

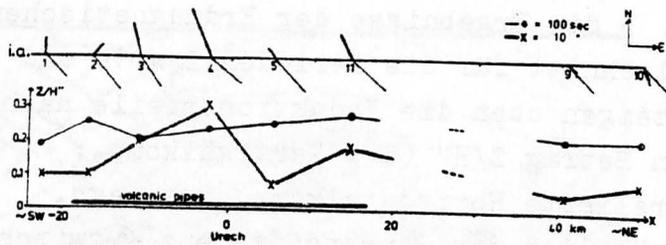


Abb. 3a

Erdmagnetische Tiefensondierung Profil P

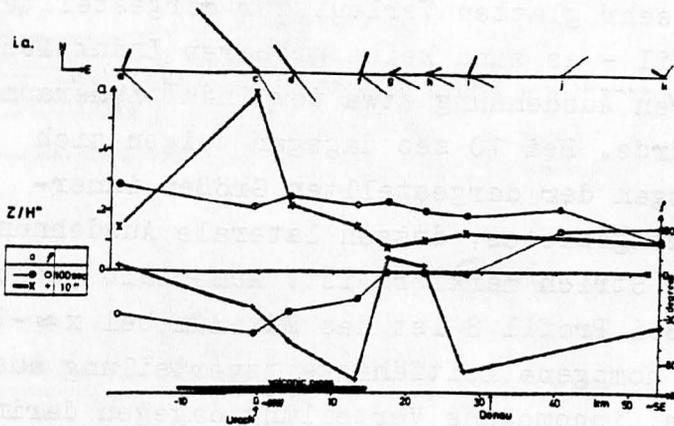


Abb. 3b

~ Profil S

a = Betrag,  $\varphi$  = Phase von  $Z/H''$

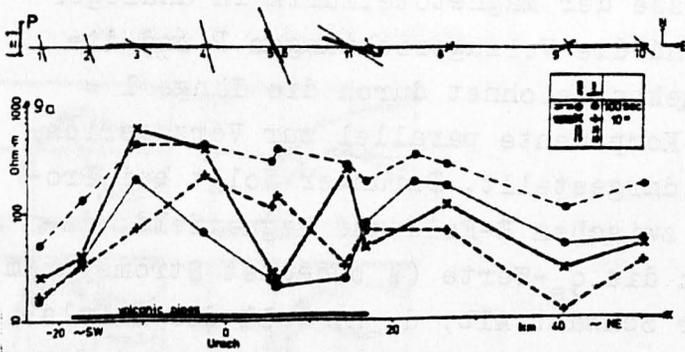


Abb. 4a

Vorzugsrichtung mit Polarisationsstärke;  $g_s^- (=g_a^-)$  Werte Profil P

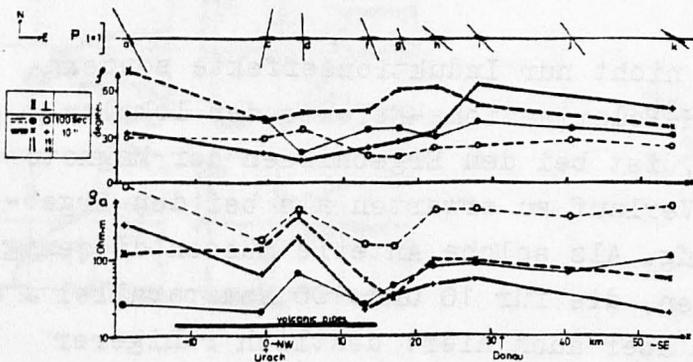


Abb. 4b

~ Profil S; zusätzlich Phasendifferenz  $\varphi$  zwischen el. Feld und magn. Feld

nicht mitmacht. Dies kann nur durch eine relativ schmale, gut leitende Zone erklärt werden, die 2-dimensionaler Natur ist und senkrecht zum Streichen des Jura streicht. Die Breite dieser Zone muß kleiner sein als der Abstand der Stationen 4 und 11. Bezüglich dieses gut leitenden Streifens steht also das Koord.-System der E- und H-Polarisation senkrecht zu dem durch die Oberflächengeologie definierten Koord.-System der E- und H-Polarisation. Dies wird noch Schwierigkeiten bereiten. Es sei noch vermerkt, daß dieser gut leitende Streifen in Einklang steht mit der Drehung und Vergrößerung der Induktionspfeile an den Stationen 3, 4, und c. Diese Beeinflussung der Induktionspfeile zeigt andererseits, daß die Ausdehnung dieser Anomalie in der Größenordnung des Induktionsraumes von 10 sec liegen muß, d. h. ca. 10 - 20 km breit sein muß, was in Einklang steht mit den  $g_s$ -Werten der Stationen 4, 5, 6 und 11.

Daß die Anomalie nicht innerhalb der Jura-Kalke liegen kann, zeigen die Schlumberger Sondierungen der Abb. 5. Hier sind an 2 Stationen Sondierungen mit orthogonalen Auslagen durchgeführt worden. Wäre innerhalb der Kalke des weißen und braunen Jura eine starke Anisotropie der Leitfähigkeit (z. B. durch Verkarstung mit bevorzugten Richtungen), so müßten die Kurven divergieren; wäre die Leitfähigkeit richtungsunabhängig stark erhöht, müßten sich niedrigere  $g_s$ -Werte ergeben. Die Anomalie muß also im unteren Teil der Sedimente oder im kristallinen Grundgebirge zu suchen sein.

Eine mögliche Erklärung für gute Leitfähigkeit im Kristallin mit starker Anisotropie ist das in Abb. 6 dargestellte Spaltenmodell. Hier sind aus rechentechnischen Gründen 6 je 0.5 km breite Spalten in das Kristallin eingefügt. Diese Spalten repräsentieren eine Vielzahl von schmalen, gut leitenden Klüften, die im vorliegenden Fall parallel streichen und in denen erwärmtes Wasser zirkulieren soll. Durch dieses Wasser kann mühelos die gute Leitfähigkeit in den Klüften erklärt werden. Zu diskutieren wäre, wie solche Klüfte über längere Zeit offen gehalten werden können. In Betracht kommt ein aktuelles Stressfeld senkrecht zu den Klüften oder ein durch das  $CO_2$  bedingtes aggressiveres Lösungsverhalten der zirkulierenden Wässer. Für beide Möglichkeiten gibt es Anhaltspunkte. Die berechneten  $g_s$ -Werte zeigen, daß das vorgestellte Modell die beobachtete starke Polarisation im Ostteil des Vulkangebietes erklären kann. Ver-



Induktionspfeile zeigt, daß kein für alle Periodengruppen gültiges Koord.-System für die Fälle der E- und H-Polarisation gefunden werden kann. Bei langen Perioden überwiegen die regionalen Strukturen mit einem Streichen parallel zum Streichen des Schwäb. Jura; bei kurzen Perioden überwiegen die örtlichen Induktionsanomalien mit vorwiegendem Streichen senkrecht dazu. Daher ist die Berechnung eines aussagefähigen 2-dimensionalen Modells nicht möglich. Es kann daher nur eine mehr qualitative Interpretation unter Zuhilfenahme des  $g^{\#}(z^{\#})$ -Verfahrens nach Schmucker erfolgen. Die  $g^{\#}(z^{\#})$ -Kurven, die die wahre Widerstands-Tiefen-Verteilung approximieren, sind in Abb. 8 dargestellt. Daran seien die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst. Wegen der obigen Erläuterungen sind in diesem speziellen Fall (im Gegensatz zum allgemeinen Fall) die Kurven der H-Polarisation (= B-Pol.) bezogen auf die Oberflächengeologie als die bessere Näherung zu betrachten. Ein Vergleich der  $g^{\#}(z^{\#})$ -Kurven zeigt die sehr gleichmäßige Widerstandsverteilung außerhalb des Vulkangebietes. Sehr ähnliche Morphologie, aber geringere  $g^{\#}$ -Werte zeigen die Stationen f und g am Südrand, sowie 1 und 2 südwestlich des Vulkangebietes. Wie Abb. 1 zeigt, liegen die Stationen 1 und 2 in unmittelbarer Nähe

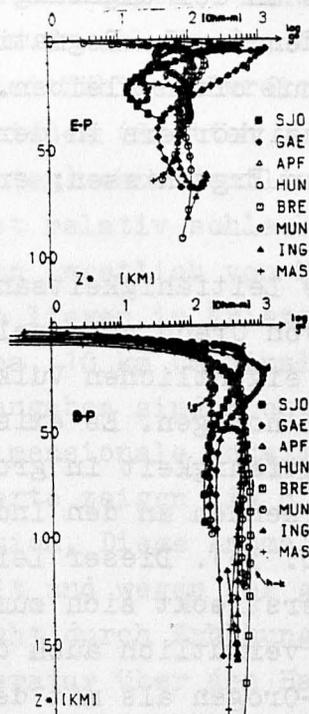


Abb. 8a

$g^{\#}(z^{\#})$ -Kurven Profil S  
(berechnet aus den Polynomen der Abb. 2b)

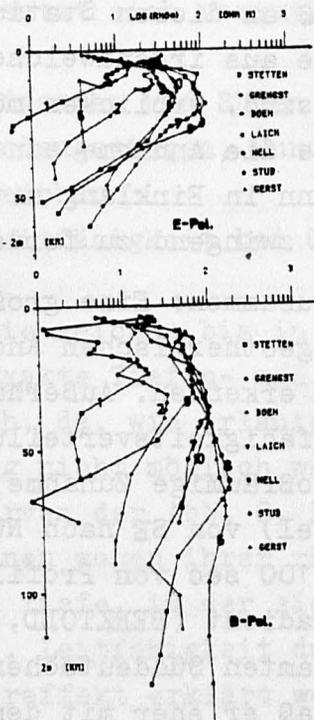


Abb. 8b

$g^{\#}(z^{\#})$ -Kurven Profil P

von tektonischen Lineamenten, die ungefähr NS streichen. Wir werten dies als Indiz dafür, daß die niedrigen  $g^{\#}$ -Werte (und damit die niedrigen spez. Widerstände) im Süden und Südwesten des Vulkangebietes auf nicht geschlossene Klüfte mit Wasserzirkulation zurückzuführen sind. Da an diesen Stationen das elektrische Feld nicht stark polarisiert ist, d. h. keine scheinbare Anisotropie der el. Leitfähigkeit vorliegt, scheint die Klüftung in diesem Gebiet kein bevorzugtes Streichen aufzuweisen (im Gegensatz zu dem gut leitenden Streifen bei Böhringen). Zum Begriff der Anisotropie sei noch vermerkt: lokale Inhomogenitäten, die zu klein sind, um noch einzeln aufgelöst werden zu können, jedoch bevorzugte Richtungen innehaben, erscheinen in unseren Ergebnissen als Anisotropie. Anisotropie ist hier also bereits als "integraler" Begriff, nicht als Materialeigenschaft im streng physikalischen Sinne zu verstehen.

Die Stationen c = St. Johann und d = Gächingen westlich von Urach, etwa im Zentrum des Vulkangebietes, dagegen zeigen eine von den übrigen Kurven abweichende Morphologie, indem sie ein  $g^{\#}$ -Maximum bei 10 bis 20 km Tiefe zeigen. Diese Tiefe ist eher als Maximalwert aufzufassen. Ob man darin einen Intrusivkörper schlechterer Leitfähigkeit oder lediglich die Tatsache, daß an diesen Stationen die in der Umgebung vorhandenen Klüfte aus irgendwelchen Gründen (evtl. Pegmatite) geschlossen sind, erblicken möchte, muß offen bleiben. Jedenfalls wäre die Annahme eines Intrusivkörpers in der Nähe von St. Johann in Einklang mit unseren Ergebnissen; er ist jedoch nicht zwingend zu fordern.

Fassen wir zusammen: Eine großräumige Leitfähigkeitsanomalie, die mit der geothermischen Anomalie von Urach gekoppelt ist, ist nicht zu erkennen. Außerhalb des eigentlichen Vulkangebietes ist die Leitfähigkeitsverteilung sehr homogen. Es existiert eine sehr großräumige Zunahme der Leitfähigkeit in großer Tiefe (oberer Mantel) von SE nach NW (zu erkennen an den Induktionspfeilen für 100 sec von Profil S; Abb. 3b). Dieser Leitfähigkeitsgradient (BERKTOLD, 1978) erstreckt sich zumindest über den gesamten Süddeutschen Raum, vermutlich auch darüber hinaus, so daß er eher mit dem Alpen-Orogen als mit der geothermischen Anomalie von Urach in Beziehung zu setzen ist.

Nehmen wir an, im Bereich der geothermischen Anomalie sei die Temperatur bis in große Tiefen (oberer Mantel) erhöht. Dann müßte in Tiefen größer ca. 15 km die el. Leitfähigkeit wegen der hier dominierenden Halbleiter-Leitung entsprechend erhöht sein. Würde eine solche Erhöhung den Faktor 10 betragen, so würden wir diese Erhöhung auf jeden Fall deutlich in unseren Ergebnissen sehen, auch wenn nicht der gesamte Bereich der Erhöhung sondern nur ein Teil erfasst wäre, da diese Erhöhung mit wachsender Entfernung vom Zentrum stetig abnehmen muß. Die Diagramme der Abhängigkeit der el. Leitfähigkeit von der Temperatur, bestimmt an basaltischen Gesteinsproben im Labor (Ergebnisse verschiedener Autoren wurden von HAAK 1978 zusammengestellt), zeigen, daß einer Erhöhung der Leitfähigkeit um den Faktor 10 eine Zunahme der Temperatur um 200 Grad entspricht. Da wir eine solche Erhöhung nicht feststellen konnten, kann die Temperaturanomalie unter Urach im Bereich der unteren Kruste und des oberen Mantels nur weniger als 200 Grad betragen.

Dagegen wurden kleinräumige Anomalien der el. Leitfähigkeit im Vulkangebiet selbst gefunden:

- eine deutlich NS streichende Zone erhöhter Leitfähigkeit im Gebiet Böhringen - Münsingen (setzt sich vermutlich über den Albtrauf nach Norden fort)
- ein gut leitfähiger Bereich im Südwesten und Süden des Vulkangebietes (Stetten u. H., Großengstingen, Hunderringen, Apfelstetten) ohne deutliches Streichen
- ein Gebiet relativ schlechterer Leitfähigkeit bei Gächingen, St. Johann (westlich von Urach).

Diese Zonen liegen im Kristallin. Sie reichen bis in eine Tiefe von ca. 10 km (maximal 20). Exakte Tiefen- und Leitfähigkeitsangaben sind nicht möglich, da, wie erläutert, eine exakte 2-dimensionale Modellrechnung nicht möglich war. Näherungswerte zeigen die  $\rho^{\#}(z^{\#})$ -Kurven der Abb. 8, Fall B-Polarisation. Diese Anomalien können wegen ihrer räumlichen Begrenztheit und wegen der geringen Tiefe, in der sie sich befinden, nicht durch Erhöhung der el. Leitfähigkeit durch erhöhte Temperatur über den Halbleitereffekt erklärt werden sondern nur durch erhöhte elektrolytische Leitung. Wir nehmen daher an, daß offene Kluftsysteme mit zirkulierenden Wässern

diese Erhöhung bewirken. Bereits eine geringe Anzahl schmaler Klüfte reicht aus, um die el. Leitfähigkeit merklich zu erhöhen. Im Gebiet von St. Johann scheinen keine offenen Klüfte zu existieren.

Die Kenntnis über Gebiete erhöhter Wasserpermeabilität kann sich unseres Erachtens sehr nützlich erweisen bei der Nutzung geothermischer Energie, da in solchen Gebieten ein evtl. erhöhter Wärmeaustausch erreicht werden kann.

#### Literatur

- BERKTOLD, A.: On the distribution of the electrical conductivity in the area between the Rhinegraben, the Bohemian massif and the central Alps. - Acta Geodaet., Geophys. et Montanist. 13, 437 - 440, 1978
- BOSUM, W., A. HAHN, E.G. KIND, R. PUCHER: Geomagnetic anomalies in geothermal areas - Rhine Graben and Urach area. - Seminar on Geothermal Energy, EUR 5920, Commission der Europäischen Gemeinschaften, 1, 277 - 295, Brüssel, 1977
- CARLE, W.: Die Wärmeanomalie der mittleren Schwäbischen Alb. - Approaches to Taphrogenesis, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, 207 - 212, 1974
- HAAK, V.: Neuere Ergebnisse und Modelle für die Korrelation zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Temperatur in Erdkruste und Erdmantel. - Protokoll Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Neustadt/Weinstraße, Institut für Geophysikalische Wissenschaften FU Berlin, 3 - 8, 1978

#### Dank

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik der LMU München durchgeführt. Dem Leiter des Institutes, Prof. Dr. G. Angenheister, möchten wir für seine Unterstützung danken. Zu Dank verpflichtet sind wir auch der Kommission der Europäischen Gemeinschaften für die finanzielle Förderung im Rahmen des Forschungsprogramms "Erkundung des Temperaturfeldes bis in größere Tiefen im Bereich von Urach sowie Erprobung geophysikalischer und geochemischer Methoden". Die nötigen Rechenarbeiten wurden am Leibniz Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften durchgeführt.