

Geoelektrische Messung der Grundwassergeschwindigkeiten

Von V. FRITSCH (Wien)

Allgemeines

Die Messung der Wasserbewegung im Untergrund war stets ein sehr wichtiges Problem der Hydrologie. In den letzten Jahren ist diese Frage aber auch vom geophysikalischen, insbesondere vom geoelektrischen Standpunkt aus sehr bedeutsam geworden. Der spezifische Widerstand des Untergrundes ist — von wenigen Ausnahmen abgesehen — praktisch nur von dem Volumengehalt und der Konzentration der in diesem enthaltenen wässrigen Lösungen abhängig. Ändern sich diese beiden Faktoren, dann ändert sich auch der spezifische Widerstand, dessen Messung eine der wichtigsten Aufgaben der Geoelektrik ist. Die Verhältnisse sind nun sehr verschieden, je nachdem es sich um Süß- oder um Salzwasserzonen handelt. Auch das normale Grundwasser zeigt gewisse Widerstandsschwankungen räumlicher und zeitlicher Natur. Diese sind aber gering und können nur mit genauen Meßgeräten verfolgt werden. Existieren aber in einer Zone Süßwasser- und Salzwasserströme und ändert sich deren Konzentration und Geschwindigkeit mit der Zeit, dann ändert sich auch laufend der spezifische Widerstand des Untergrundes besonders in jenen Zonen, in denen sich diese vermengen. In Süßwasserzonen ändern sich daher die Widerstandsverhältnisse meist nur in räumlicher Hinsicht und in bestimmten Zonen überdies oft noch in einem gewissen, z. B. jahreszeitlichen, Rhythmus. In Salzwasserzonen aber ist die zeitliche Änderung meist bedeutend und keineswegs immer rhythmisch ausgeprägt, da sie ja durch die verschiedensten und zeitlich oft sehr verschieden verlaufenden Komponenten bestimmt wird.

Es genügt daher nicht, in diesen Zonen die augenblicklich gegebenen Widerstandsverhältnisse darzustellen, sondern man muß auch die Bewegung der im Untergrund fließenden wässrigen Lösungen angeben, durch die die Widerstandsänderungen bedingt werden. Das zunächst statische Problem wird zu einem dynamischen. Es wäre daher verfehlt, in Salzwassergebieten nach den gleichen Gesichtspunkten zu arbeiten, die in Süßwasserzonen zulässig sind.

Die Versuchsanstalt des Verfassers hatte Gelegenheit, diese Probleme bei den umfangreichen geoelektrischen Messungen in dem fast 1000 km² großen Gebiet in der Umgebung des Neusiedler Sees näher kennenzulernen. Diese Messungen waren auch der Anstoß dazu, die Meßverfahren zur Messung der Grundwassergeschwindigkeit miteinander kritisch zu vergleichen und neue Verfahren zu entwickeln.

Die zahlreichen Verfahren, die teilweise sehr alt sind, kann man in zwei große Gruppen einteilen: in die indirekten und in die direkten. Die indirekten bestimmen die Wasserbewegung aus anderen Bestimmungsstücken, wie z. B. dem Grundwasserstand, dem k-Wert der durchströmten Schichten, dem Gefälle und anderen. Die direkten arbeiten durchwegs mit Markierung. Die Markierung kann physikalisch (optisch, thermisch, elektrisch, radiologisch), chemisch oder biologisch erfolgen. Sie kann natürlicher oder technischer Art sein. Der spezifische Widerstand des Grundwassers ist z. B. nie völlig homogen. Auch im natürlichen Grundwasserstrom existieren „Wolken“, deren spezifischer Widerstand sich von ihrer Umgebung etwas unterscheidet. Man kann unter Anwendung sehr empfindlicher Meßgeräte die Bewegung dieser Wolken verfolgen und sie so als eine natürliche Markierung verwenden. Meist aber arbeitet man mit technischer Markierung: in das Grundwasser werden Markierungsstoffe „eingimpft“ und ihre Bewegung gemessen.

Voraussetzungen für den Einsatz der Verfahren

Was die Anwendung aller dieser Verfahren anbelangt, so unterscheidet man solche, die mehrere Bohrlöcher (oder Brunnen) benötigen, von jenen, die nur ein einziges benötigen. Diese Frage ist nicht nur eine wirtschaftliche, obwohl bei allen diesen Messungen die Bohrkosten eine nicht unbedeutende Rolle spielen. Es geht vor allem auch darum, daß es stets am günstigsten ist, ein Feld „punktweise“ auszumessen. Wenn dies möglich ist, dann kann man für jedes Bohrloch Richtung und Geschwindigkeit des Grundwasserstromes angeben. Benötigt man aber für eine Messung mehrere, meist drei, Bohrungen, dann kann man nur für die von diesen bestimmte Fläche eine einzige solche Angabe machen. Das Strömungsfeld wird aber um so genauer beschrieben sein, je mehr einzelne Meßpunkte ausgewertet werden können. Daher sind grundsätzlich Verfahren anzustreben, die mit einem einzigen Bohrloch auskommen.

Eine weitere wichtige Bedingung, die an alle diese Verfahren gestellt werden sollte, lautet, daß man sowohl die horizontale als auch die vertikale Komponente des Strömungsfeldes messen soll. Durch die Vernachlässigung der Vertikalkomponente können oft schwere Fehler begangen werden. Im Seewinkel z. B. wurden sogenannte „Süßwasserpfähle“ nachgewiesen, die in Salzwasserzonen liegen. In diesen herrscht stets eine Vertikalströmung. In Salzwasserzonen bestehen oft sehr

komplizierte Aszendenz- und Deszendenzbewegungen, die A. F. TAUBER theoretisch zu erfassen sucht. Das Studium aller dieser Probleme erfordert die exakte Messung der Vertikalkomponente.

Schließlich soll das Verfahren in Bohrlöchern mit verschiedenen Durchmessern und verschiedenen Querschnitten, insbesondere auch in Brunnen (auch in Karstbrunnen, Spalten etc.), anwendbar sein. Die Meßergebnisse sollen schließlich nicht durch die Inhomogenitäten (z. B. in bezug auf den k -Wert) in jenen Zonen verfälscht werden, die das Bohrloch unmittelbar umgeben.

Bei der Untersuchung von Salzwasserzonen muß überdies beachtet werden, daß das sehr verbreitete Ansalzungsverfahren oft nicht mehr verwendet werden kann, da die Grundsalinität bereits sehr hoch ist.

Voraussetzungen für den Einsatz der Verfahren, die nur ein einziges Bohrloch benötigen

Wie Abb. 1 zeigt, verformt jedes Bohrloch das natürliche Strömungsfeld im Untergrund. Die Strömungslinien werden zum Bohrloch hin deformiert. Praktisch bedeutet dies, daß die unmittelbare Umgebung des Bohrloches nicht mehr die normale Struktur aufweist. Aber auch im Querschnitt des Bohrloches ist das Feld nicht homogen. Nur im zentralen Gebiet existiert eine einigermaßen homogene Zone, die in Abb. 1 strichliert eingezeichnet ist. Unsere Aufgabe besteht nun darin, aus Messungen in diesem Bereich (also beim Punkt B) auf die Strömungsverhältnisse im ungestörten Teil des äußeren Feldes (z. B. beim Punkt A) zu schließen. Aus diesem Grund müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: Zunächst soll das Bohrloch nicht zu groß sein, damit das äußere Feld in seiner Umgebung möglichst wenig verformt wird. Dann muß aber die Meßeinrichtung eine so kleine Querschnittsfläche haben, daß sie in der nur wenig gestörten Fläche im zentralen Teil des Bohrloches untergebracht werden kann. Diese beiden Forderungen widersprechen teilweise einander. Je kleiner der Bohrl Lochdurchmesser wird, desto kleiner wird auch die Meßfläche werden. Nur dann, wenn die Meßeinrichtung mit einer sehr kleinen Querschnittsfläche auskommt, wird man die Forderung nach einem kleinen Durchmesser des Bohrloches erfüllen können. Daher sind Verfahren zu empfehlen, die mit räumlich sehr gedrängten Elektroden auskommen.

Bei allen Verfahren wird natürlich immer nur die Wassergeschwindigkeit an einer Stelle des Bohrlochquerschnittes gemessen. Wir wollen die im zentralen Gebiet (bei B) gemessene Geschwindigkeit mit v_z bezeichnen. Aus dieser muß man dann die tatsächliche Grundwassergeschwindigkeit v_w im ungestörten Teil des Feldes ermitteln. Wie Abb. 2 zeigt, ändert sich die im Bohrloch gemessene Geschwindigkeit sowohl parallel als auch senkrecht zur Strömungsrichtung. Hat der Meßpunkt B' von der Bohrlochwand den Abstand d , so nimmt die

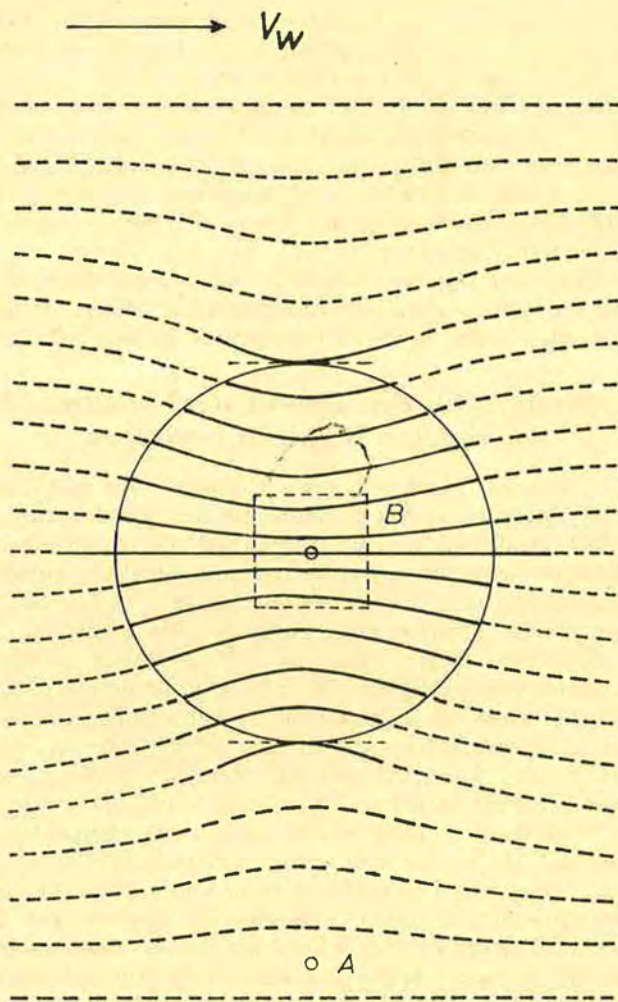


Abb. 1: Strömungsfeld in der Umgebung des Bohrloches.

gemessene Geschwindigkeit v_z zur Mitte des Bohrloches hin zu. Mit zunehmender Geschwindigkeit v_w nimmt das Verhältnis v_z/v_w zu. In Abb. 2 sind im oberen Diagramm drei Kurven für drei verschiedene Grundwassergeschwindigkeiten dargestellt. Aber auch der Punkt, an dem die maximale Geschwindigkeit zu beobachten ist, wird in der Strömungsrichtung aus dem Bohrlochzentrum B heraus nach B' verschoben. Die Verschiebung d' ist im unteren Diagramm der Abb. 2 dargestellt. Diese Diagramme wurden mit Hilfe der Schlierenmethode

und mit einem noch zu besprechenden Verfahren gemessen. Man sieht also, daß die Verhältnisse ziemlich kompliziert sind. Praktisch wird man jede Meßeinrichtung eichen müssen. Dies kann entweder im Strömungskasten oder durch Bewegung der Meßeinrichtung im völlig ruhenden Wasser erfolgen.

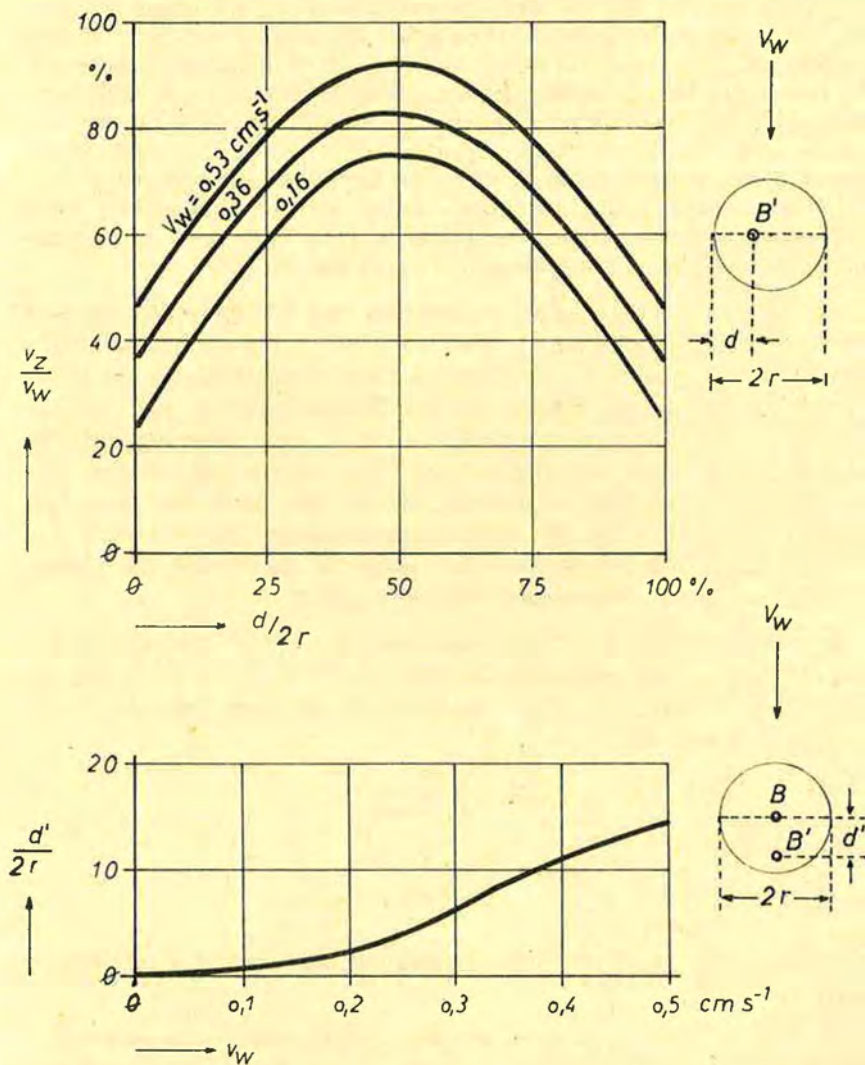


Abb. 2: Wassergeschwindigkeit im Bohrloch.

Grundlage der elektrothermischen Verfahren

Aus den angeführten Gründen ist es günstig, Verfahren anzuwenden, die die Geschwindigkeitsmessung über sehr kleine Strecken gestatten. Als solches hat sich das von A. F. TAUBER angegebene elektrothermische Verfahren brauchbar erwiesen, dessen Prinzip in Abb. 3 dargestellt ist. In das Wasser, dessen Bewegung gemessen werden soll, wird eine Heizspirale H eingesteckt. Diese wird von einer Batterie gespeist. Die Stromstärke wird durch den Widerstand R geregelt. Die Dauer der Erhitzung (des Heizimpulses) wird durch den elektronischen Schalter S bestimmt. In einem bestimmten Abstand werden nun ein oder zwei Wärmefühler F_1 und F_2 angeordnet. Dies sind Widerstände, deren Wert sich bei Erwärmung ändert. Da gerade die Widerstandsmeßtechnik heute sehr hoch entwickelt ist, kann man noch Widerstandsänderungen im Verhältnis von 10^{-5} bis 10^{-6} und damit auch ganz minimale Temperaturänderungen messen.

Erhitzen wir den Heizstab, so entsteht eine Wärmewolke, die sich mit einer Geschwindigkeit v_0 ziemlich gleichmäßig nach allen Richtungen hin ausbreitet. Es ist dies die Geschwindigkeit im ruhenden Wasser. Fließt nun das Wasser mit der Geschwindigkeit v_w , so überlagern sich die beiden Geschwindigkeiten. In der Strömungsrichtung erhalten wir die Geschwindigkeit $v_0 + v_w$ und in der Gegenstromrichtung ($v_0 - v_w$). Das Verfahren arbeitet also nach ähnlichen Gesichtspunkten wie z. B. das Ansalzungsverfahren. Zur Messung der Widerstandsänderungen werden die Geräte M verwendet. Zu diesem Zweck sind z. B. die Dehnungsmeßgeräte geeignet.

Praktisch werden die Zeiten gemessen, die vom Wärmeimpuls bis zu dem Augenblick vergehen, in dem die Widerstandsänderung zu beobachten ist. Bezeichnen wir den Abstand zwischen Heizspirale und Fühler mit s , dann wird

$$t_2 = \frac{S}{v_0 + v_w}$$
$$\text{und } t_1 = \frac{S}{v_0 - v_w}$$

je nachdem wir in der Strömungsrichtung oder in der Gegenstromrichtung messen.

In Abb. 3 sehen wir bei b die Markierung des Heizimpulses (I_h) und darunter den Widerstandsverlauf mit der Zeit. Aus diesen Angaben kann man dann $v_0 + v_w$ berechnen.

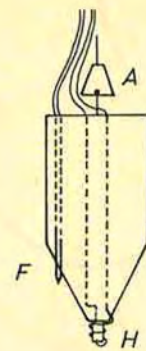
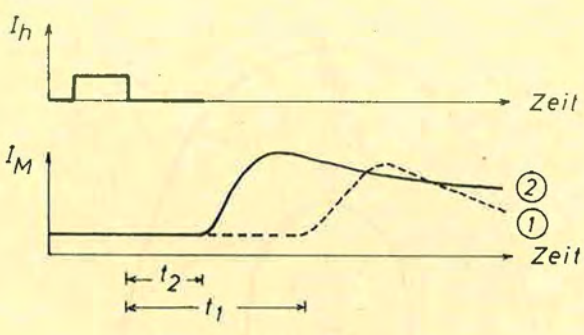
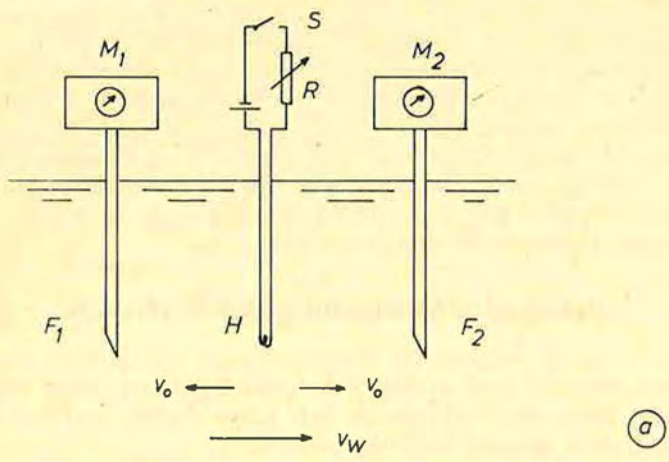


Abb. 3: Elektrothermisches Verfahren von A. F. TAUBER.

Bei c ist schematisch der Aufbau der Meßelektrode dargestellt. An einem Kardangelenk A hängt ein Isolierkörper, der so geformt ist, daß keine störenden Turbulenzen entstehen. Am tiefsten Punkt ist die Heizspirale H angeordnet, während der Thermofühler F etwas höher liegt. An Stelle eines einzigen Fühlers kann man auch deren mehrere anordnen. Die ganze Anordnung läßt sich so stark zusammendrängen, daß man mit einem Durchmesser von 1,5 bis 2 cm auskommt. Praktisch bedeutet dies, daß man die Anordnung noch in Bohrlöcher von sehr kleinem Durchmesser einhängen kann.

Praktische Anwendung des Verfahrens

Die in Abb. 3c dargestellte Elektrode wird am unteren Ende eines Gestänges befestigt und in das Bohrloch eingeführt. Man kann dann am oberen Ende das Gestänge in jede Lage drehen und dadurch die Geschwindigkeit in jeder Richtung messen.

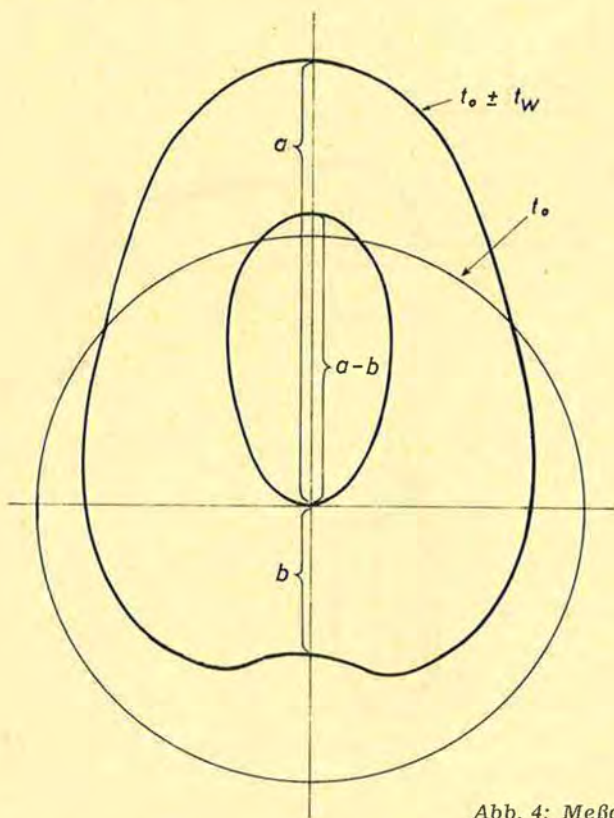


Abb. 4: Meßdiagramme.

Vor der Bohrlochmessung wird die Geschwindigkeit v_0 bzw. die dieser zugeordnete Zeit t_0 bestimmt. Zu diesem Zweck wird die Elektrode in ein Gefäß gebracht, in dem Wasser gleicher Beschaffenheit und Temperatur eingefüllt wird wie jenes, das im Bohrloch gemessen werden soll. Dann wird das Gestänge eingeführt und um 360° gedreht. Für möglichst viele Richtungen wird dann die Zeit $t_0 \pm t_w$ im strömenden Wasser gemessen. Man erhält dann, wie Abb. 4 zeigt, für t_0 ein Kreisdiagramm und für $t_0 \pm t_w$ eine Cardioide. Aus beiden erhält man dann die Differenzenkurve (a—b). Diese zeigt deutlich die Strömungsrichtung an, und aus den aufgetragenen Werten kann man mit Hilfe der Eichkurven die Geschwindigkeit des Grundwassers v_w berechnen.

Mit Hilfe dieses Verfahrens kann man Geschwindigkeitsmessungen in Bohrlöchern, Brunnen und Spalten durchführen. Das Verfahren ist relativ billig, und die Messung erfordert nur wenig Zeit. Es ist vor allem möglich, Diagramme für Horizonte zu bestimmen, deren vertikaler Abstand nur gering ist. Durch Drehung der Elektroden um 90° kann man schließlich die vertikale Komponente der Strömung messen.

Summary

Today we distinguish electrical measuring methods that work indirectly from those that work directly. The indirect methods determine the direction and the velocity of the ground-water flow on the basis of the permeability and the hydrographic structure of the substratum. The direct methods employ natural or technical tracers. The conductivity of the ground-water is never the same in all places. Its differences are indeed negligible and can only be determined by highly sensitive ohm-meters. Technical tracing is chiefly done by salting and, recently, by heating the ground-water. In either case conductivity differences are produced that extend at a certain velocity. We distinguish methods requiring several boreholes from those for which a single borehole suffices.

Résumé

De nos jours, on distingue des procédés électriques travaillant de façon indirecte, de ceux qui travaillent de façon directe. Les procédés indirects découvrent, grâce à la perméabilité et à la structure hydrographique du sous-sol, la direction et la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines. Les procédés directs travaillent en se basant sur le marquage naturel ou technique. La conductibilité des eaux souterraines n'est jamais la même à tous les endroits. Ces différences, bien sûr, sont minimes et seuls des appareils de mesure très sensibles permettent de les constater. Le marquage technique est fait, le plus souvent, par salage et récemment par chauffage de l'eau souterraine.

Dans les deux cas, on crée des différences de conductibilité qui se répandent à une certaine vitesse.

Il y a des procédés nécessitant plusieurs trous de forage et d'autres se contentant d'un seul trou de forage.

Diskussion

E. NEUMAIER: Ich danke Ihnen sehr, Herr Dr. FRITSCH, für Ihren ausgezeichneten Beitrag zum Thema Geoelektrik und Hydrologie. Sie haben uns gezeigt, wie sehr sich die Geoelektrik seit den Untersuchungen OBPACHERS entwickelt hat und welch wertvolle Aussagen sie geben kann. Darf ich fragen, ob zu dem Vortrag ein Diskussionsbeitrag vorliegt?

H. MOSER: Darf ich fragen, wie groß diese Sonde ist, die Sie in das Bohrloch einbringen?

V. FRITSCH: Der Durchmesser ist 20 mm oder 15 mm, je nach dem Bohrloch. Die Auswahl hängt davon ab, was gemessen werden soll. Wenn man nur auf die horizontale Komponente Wert legt, ist die Sonde ganz kurz, wenn wir die vertikale erfassen wollen, ist sie länger.

H. MOSER: Wie weit ist die Gefahr gegeben, daß durch diese Erhitzung der Sonde selbst Konvektionsströmungen verursacht werden, die zusätzliche Vertikalströmungen im Filterrohr ergeben?

V. FRITSCH: Wir haben eine Reihe von Messungen gemacht und sind heute dazu übergegangen, nur ganz kurzfristig zu erwärmen. Wo die Kurve gewissermaßen anläuft, da sind zweifellos Konvektionsströmungen, da entstehen Turbulenzen und alles mögliche, aber wenn man einen gewissen Abstand davon nimmt, ist der Anstieg der Kurve ein ziemlich gleichmäßiger. Aber Sie haben recht, wenn längere Zeit erhitzt wurde, dann müßte man mit ganz bedeutenden Turbulenzen rechnen.

H. MOSER: Wir haben bei Isotopenmessungen festgestellt, daß Änderungen der Dichte um 10^{-5} noch Vertikalströmungen verursachen können. Im übrigen dürften Sie ähnliche Probleme haben, wie ich sie in meinem Referat aufgeführt habe, da auch Ihre Methode auf der Beobachtung der Durchströmung eines Bohrlochs beruht.