

# Geophysikalische Untersuchung der Beschaffenheit der Deichanlagen und der geohydraulischen Eigenschaften des Untergrundes

GERHARD BRANDT & CHRISTIAN RICHTER

## 1. Anforderungen

Die baulichen Maßnahmen zum Hochwasserschutz bedürfen neben der gediegenen ingenieur-technischen Leistung vor allem des Wirkens des Hydrogeologen. Es sind neben der technischen Güte des Bauwerkes hydrogeologische Eigenschaften und Verhaltensweisen von Bauwerk und Untergrund, die die Funktionsfähigkeit der Gesamtanlage bestimmen. Die hydrogeologischen Vorarbeiten sind u. a. Untersuchungen des Untergrundes, wie Kartierungsarbeiten alter Flußläufe und ihrer lithologischen Beschaffenheit. Der ungebändigte Strom

war besonders im Flachland in viele teilweise nur einige Meter breite Teilströme aufgefächert, deren Verläufe zeitlich immer wieder wechselten. Einen ersten Aufschluß hierzu liefert die topographische Karte (Abb. 1). Die Anlage des Deichbauwerkes und die Gestaltung seiner Wurzeln müssen die Gegebenheiten des Untergrundes berücksichtigen.

Es sind weiter die geohydrologischen Eigenschaften des Bauwerkes selbst, die der Hydrogeologe bewerten muß. Materialinhomogenitäten und Inhomogenitäten in der Verdichtung verursachen Inhomogenitäten der hydraulischen Dichtigkeit des

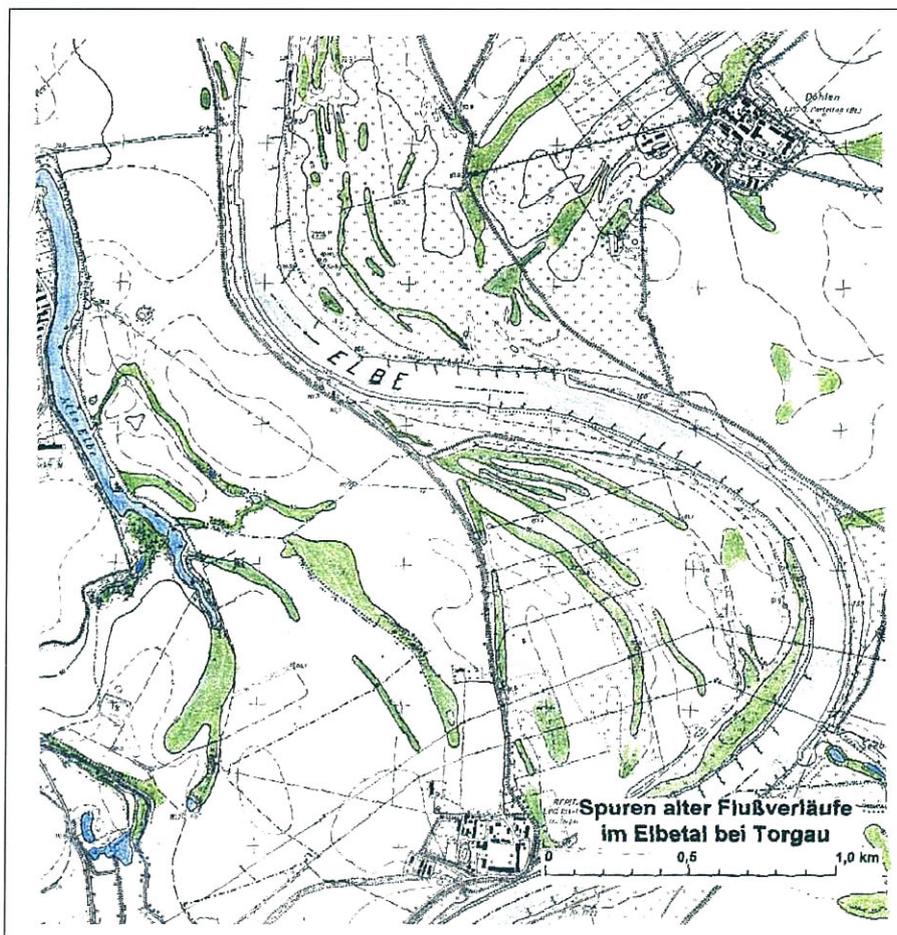


Abb. 1

Topographisch sichtbare Spuren alter Flußläufe der Elbe bei Torgau

Deiches. Noch mehr als bei der hydrogeologischen Beurteilung des Untergrundes kommt es hier auf kleine Details an. Es sind die strukturellen Details und ihre potentiellen geohydraulischen Eigenschaften zu untersuchen und tatsächliche Wasserbewegungen nachzuweisen.

Die Hydrogeologie bedient sich nicht nur in ihrem klassischen Wirkungsbereich geophysikalischer Verfahren. Bei Problemstellungen zu Fluidbewegungen im Umweltschutz und in der Ingenieurgeologie kommt sie ohne geophysikalische Hilfe nicht aus.

In der Zusammenarbeit zwischen Hydrogeologie und Geophysik haben sich einige geophysikalische Verfahren als besonders geeignet für die hydrogeologische Untersuchungspraxis herauskristallisiert.

$\rho_w$  = spezifischer elektrischer Wasserwiderstand

$d_{wi}$  = wirksamer Korndurchmesser;

$c_T$  = Tongehalt/Feinstkorngehalt

Bei natürlichen Ablagerungen fluviatiler Art bewirken die geometrischen und physikalischen Eigenschaften des Sedimentes, daß auch die Porosität  $n$  prinzipiell eine Funktion der wirksamen Korngröße  $d_{wi}$  darstellt. Überschlägig betrachtet reduziert sich für Sande und Kiese die Abhängigkeit des Schichtwiderstandes  $\rho_{Sch}$  auf die zwei Größen  $d_{wi}$  und  $\rho_w$ .

Die wichtige Einflußgröße  $d_{wi}$  ist schließlich für die prinzipielle Verwandtschaft des spezifischen elektrischen Schichtwiderstandes zum  $k_f$ -Wert verantwortlich, ohne daß es bisher gelungen ist, eine allgemein gültige Rechenregel hierfür zu entwickeln. Es werden aber Richtungen angezeigt.

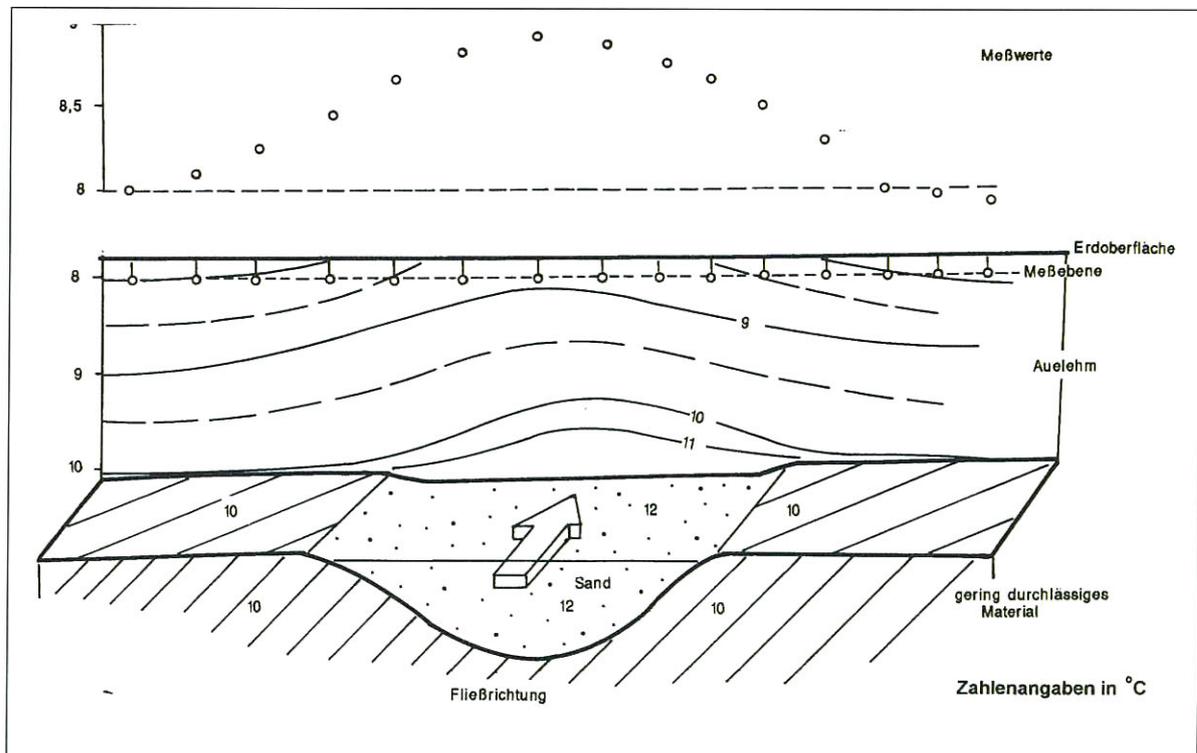


Abb. 2

Schematische Darstellung des thermischen Feldes fließender relativ wärmerer Fluide

## 2. Geoelektrik und Geothermie als Hilfsmittel der hydrogeologischen Untersuchung

Im Lockergestein hat sich zur Erkundung der strukturellen und lithologischen Gliederung des Bodens die Geoelektrik als sehr wirksam erwiesen. Das gilt besonders für Erkundungstiefen des Nahbereiches, wo die Schichtauflösung des Verfahrens entsprechend feingliedrig ist.

Die Vorzüge der Geoelektrik erklären sich aus den hydrorelevanten Einflußgrößen auf den spezifischen elektrischen Schichtwiderstand  $\rho_{Sch}$ , deren wichtigste die folgende Beziehung angibt:

$$\rho_{Sch} = f(n, r_{wi}, d_w, c_T, s_w)$$

$n$  = Porosität;

$s_w$  = Wassersättigung;

Bei wassergesättigten, natürlich abgelagerten Sanden und Kiesen gilt ungefähr

$$\rho_{Sch} = (3 \dots 8) \times \rho_w \text{ (je nach } d_{wi}\text{)}.$$

Ist nur Haftwasser im Gestein, steigt der Widerstand auf das 10fache oder höher.

Pelitische Schichten haben eine große innere Oberfläche und deshalb ein hohes Wasserhaltevermögen. Dies und die gute Leitfähigkeit der Feststoffmatrix selbst lassen bindige Schichten oder Schüttungsmaterialien als Bereiche mit niedrigem spezifischen elektrischen Widerstand auch dann erscheinen, wenn sie deutlich oberhalb des Wasserspiegels lagern:

$$\rho_{Sch} \approx \text{meist} < 2 \rho_w.$$

Bei künstlichen Schüttungen ist gut klassiertes Material als Baustoff die Ausnahme. Die Porosität  $n$ , die hier vom Verdichtungsgrad und der Korngrößenungleichförmigkeit  $U$  abhängt, bestimmt mit der Verteilung an rolligem und bindigem Material maßgeblich den Schichtwiderstand. Großporige Bereiche, z. T. als Folge einer geringen Verdichtung oder schlechten Durchmischung des Materials, machen sich durch deutlich erhöhte spezifische elektrische Widerstände bemerkbar.

Insgesamt läßt sich verallgemeinern:

- Durchlässige Bereiche lassen sich mittels Geoelektrik von stauenden Bereichen voneinander trennen.
- Im Lockergestein ist die Geoelektrik nicht nur ein Hilfsmittel zur Strukturerkundung, zur Abgrenzung der Schichten voneinander, sondern gleichzeitig ein Hilfsmittel für eine erste physikalische Klassifizierung des Materials.

Die Geoelektrik ist besonders geeignet, die potentiellen Fließwege anzuzeigen. Wenn es jedoch erforderlich ist, über die Fluidbewegung den Fließvorgang direkt nachzuweisen, bedarf es der Markierung des Fluids, die es gestattet, möglichst unkompliziert und dennoch sicher die Fließbahnen zu kartieren. In der Hydrogeologie und der mit ihr koope-

rierenden Geophysik sind eine Vielfalt von Markierungsverfahren entwickelt worden, die sich unterschiedlicher Markierungsstoffe bedienen, wie z. B. Salztracer, Farbtracer, radioaktive und verschiedenste biologische Tracer. Sie alle haben ihre spezifischen Anwendungsgebiete und Vorteile. Sie haben aber auch ihre Nachteile:

- Sie bedürfen der zugänglichen Aufschlüsse.
- Bei punktueller Eingabe (räumlich, zeitlich) sind die Erfolgsaussichten im übertragenen Sinne ebenfalls punktuell.
- Der Meßfühler muß sich meist im Fluidstrom befinden, oder es sind sogar körperliche Beprobungen nötig.

Eine besonders günstige Markierung liefert die Natur oft selbst. Es ist die Temperatur eines Fluids. Hydraulisch aktive Strukturen unterscheiden sich thermisch überraschend stark vom quasi stagnierendem hydraulischen Fluß ihrer Umgebung. Die Lokalisierung solcher auch kleindimensionierter Fließzonen im Bohraufschluß bedarf nicht des Filters, weil sich die Temperaturanomalie durch die Verrohrung hindurchpaust. Mit geeigneten Meßmitteln kann man sie auch oberhalb des Wasserspiegels z. B. als Schwebendwasser sicher feststellen. Bei einem lang anhaltenden Fließprozeß baut

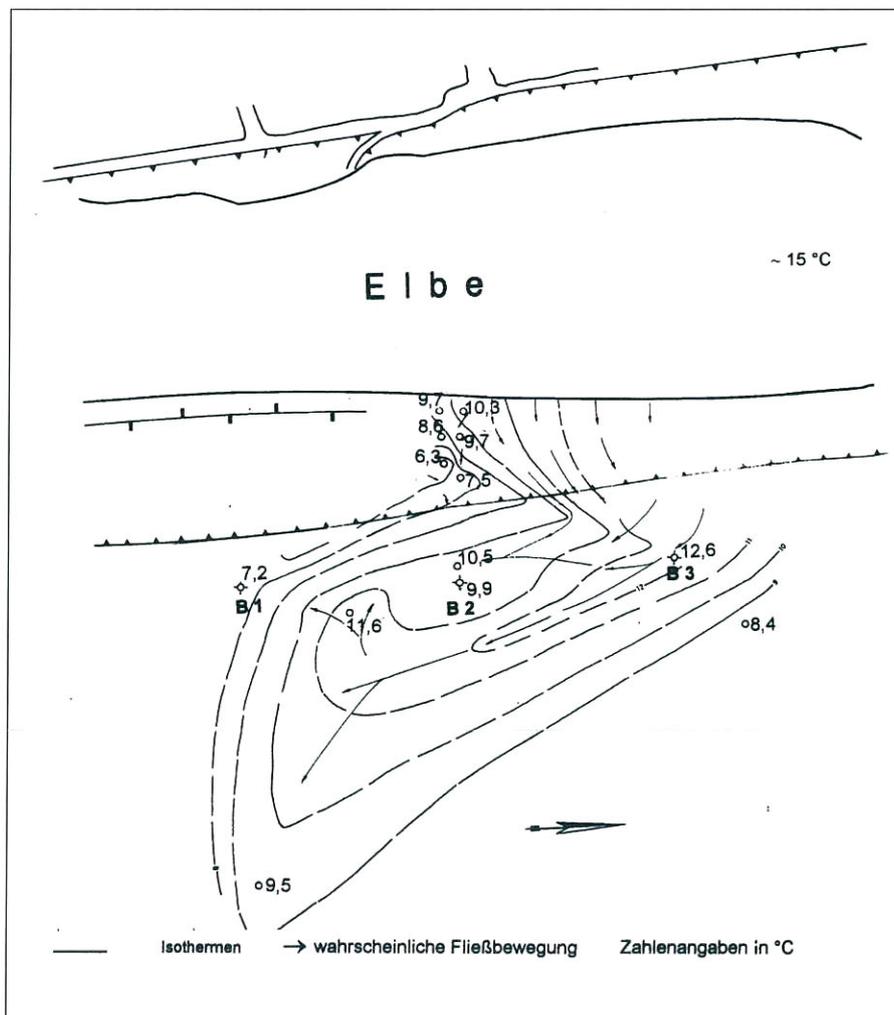


Abb. 3

Ergebnisse von Temperaturregistrierungen während eines Pumpversuches

sich um den Fließpfad ein thermisches Potentialfeld auf (Abb. 2), das mit hoch auflösenden, technologisch angepassten Meßmitteln im Bereich der Erdoberfläche noch wahrnehmbar ist. In Rammlöchern mit ca. 20 mm Durchmesser und ca. 1 m Tiefe werden unbeeinflusst vom thermischen Tagesgang an der Erdoberfläche und quasi zerstörungsfrei die thermischen Wirkungen von Fließvorgängen wahrgenommen.

Mit der geoelektrischen Widerstandsmessung und geothermischen Messungen wird ein sich ergänzendes System vorgestellt, mit dem die potentiellen Fließwege und der aktuelle Fließvorgang nachweisbar sind. Diese Verfahren eignen sich bevorzugt zur Untersuchung des Geländes, auf dem sich die Deiche befinden oder gebaut werden sollen und zur Untersuchung der Deiche selbst.

### 3. Praktische Anwendungen

#### 3.1. Übersichtsmessungen in der Flußbaue

Im Rahmen großräumiger hydrogeologischer Erkundungsmaßnahmen im Elbtal wurden sowohl ausgedehnte geoelektrische Tiefensondierungen als auch Pumpversuche durchgeführt. Die Ergebnisse der Tiefensondierungen nach SCHLUMBERGER liefern ein Abbild der komplexen Untergrundstrukturen mit verschiedenen Grundwasserleitern und -stauern.

Den Direktnachweis dafür, daß die Fließbewegungen auf den vorgezeichneten Bahnen alter Flußläufe weiter funktionieren, erbrachten zielgerichtet angesetzte Temperatur-

messungen im Zusammenhang mit einem im Monat Mai demonstrierten Pumpversuch. Die Verteilung der Temperaturen im Untersuchungsgebiet (Abb. 3) weist nach, daß höchstens in untergeordnetem Maße das wärmere Elbewasser auf quasi geradem Wege die Brunnen (B1, B2, B3) der Galerie anströmt. In der Zone zwischen Elbe und Galerie herrschen noch die Wintertemperaturen vor. Die Brunnen werden im Bogen im Prinzip von hinten angeströmt. Die nach den geothermischen Messungen gezeichneten Fließbahnen decken sich sehr gut mit dem topographischen Minimum, einer heute noch erkennbaren flachen Talung. Die Ergebnisse der Temperaturmessungen belegen eindeutig die hydraulische Wirksamkeit der alten Flußläufe.

#### 3.2. Untersuchungen an den Deichen mittels hochauflösender Geoelektrik

##### 3.2.1. Meßprinzip hochauflösender Geoelektrik

Analog zur „klassischen“ Geoelektrik beruhen die Untersuchungen auf der Unterscheidung der Materialien bezüglich ihrer elektrischen Eigenschaften. Der Unterschied besteht in der wesentlich erhöhten Meßdichte aufgrund automatisierter Messung von Multielektrodenaufstellungen und Aufzeichnung der Meßdaten. Außerdem kann sich durch spezielle Auswertalgorithmen vom Halbraumproblem der Geoelektrik gelöst werden. Prinzipiell sind beliebige Elektrodenanordnungen möglich (siehe Abb. 4)

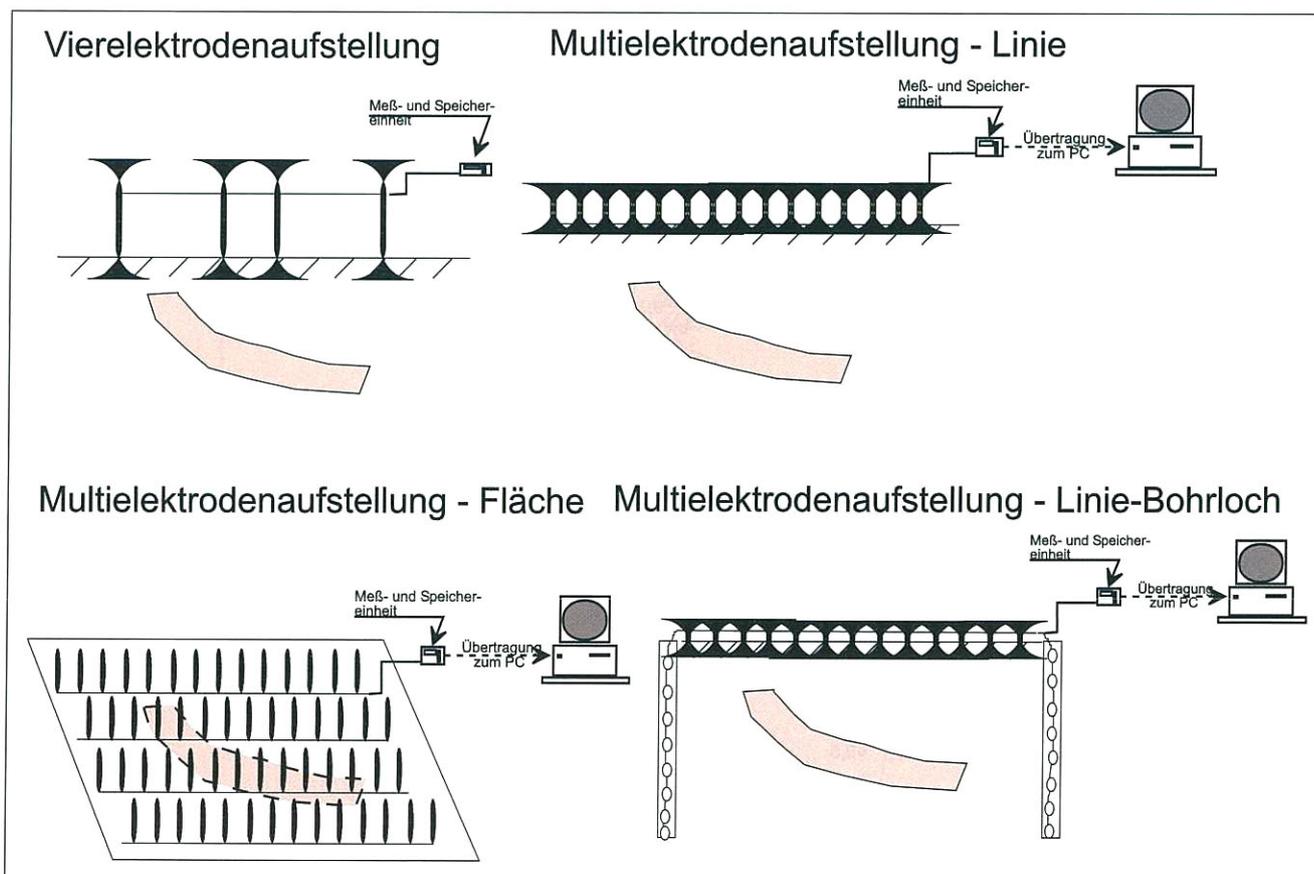


Abb. 4

Beispiele für geoelektrische Meßgeometrien

### 3. 2. 2. Realisierung der Feldmessungen

Die hochauflösenden geoelektrischen Messungen sollen der Suche kleinräumiger Widerstands- (Material-) Inhomogenitäten im Deichkörper dienen. Zu diesem Zwecke wird die Multielektrodenaufstellung quer zur Deichachse über den gesamten Deich und dessen Anbindung an den Untergrund am Fuße aufgebaut (siehe Abb. 5). Die Querprofilierung wird gewählt, um „geoelektrische Querschnitte“ des Deiches zu erhalten. Außerdem können damit unkontrollierbare Symmetrieeffekte der Ausbreitung des elektrischen Feldes vermieden werden.

Die Elektroden werden nur wenige Zentimeter in den Boden gespießt. Damit kann eine zerstörungsfreie Untersuchung gewährleistet werden.

Das Multicore-Spezialkabel mit 26 bzw. 52 Elektrodenanschlüssen wird über einen Rechner angesteuert. Sämtliche Elektroden werden in vorgegebenen Konfigurationen als Spannungs- bzw. Stromelektrode geschaltet. Auf diese Wei-

se ist auch die Kombination mehrerer Elektrodenkonfigurationen, wie Wenner- und Dipol-Dipol-Geometrien möglich. Die hohe Meßdichte garantiert eine hohe laterale und vertikale Widerandsauflösung. Für ein Meßkabel mit 52 Einzelelektroden ergeben sich beispielsweise für Wenner-Messungen 400 Einzelmeßwerte und für Dipol-Dipol-Messungen sogar 1.200 Einzelmeßwerte. Die Einzelmeßwerte der verschiedenen Meßgeometrien werden bei der Modellierung gemeinsam verarbeitet. Aus der beschriebenen Vorgehensweise ergibt sich ein Widerspruch zwischen dem Anspruch der Geophysik, flächendeckende Aussagen machen zu wollen und dem stichpunktartigen Messen einzelner „Querschnittsscheiben“.

Der Vorschlag zur Lösung dieses Widerspruches besteht in der Verbindung dieser Querprofilierungen mittels geoelektrischen Mehrniveauekartierungen längs der Dammachse. Zum Erreichen eines hohen Meßfortschritts werden 3 - 4 Tiefenniveaus, also Aufstellungsweiten innerhalb einer Meßgeometrie angesprochen.

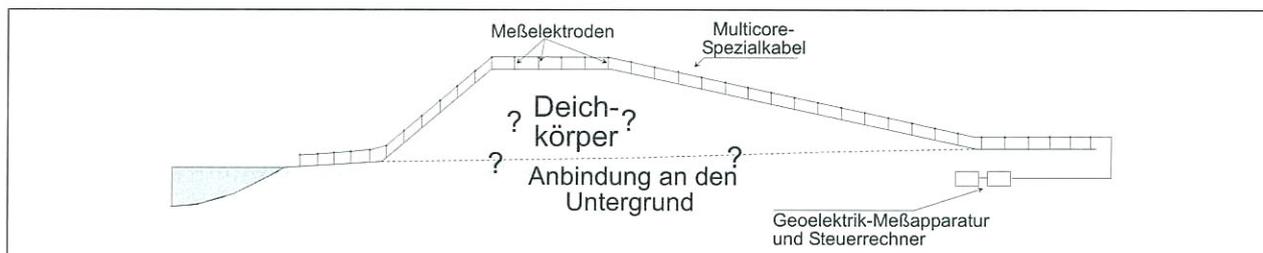


Abb. 5  
Konzeption der geoelektrischen Querprofilierung an Flußdeichen

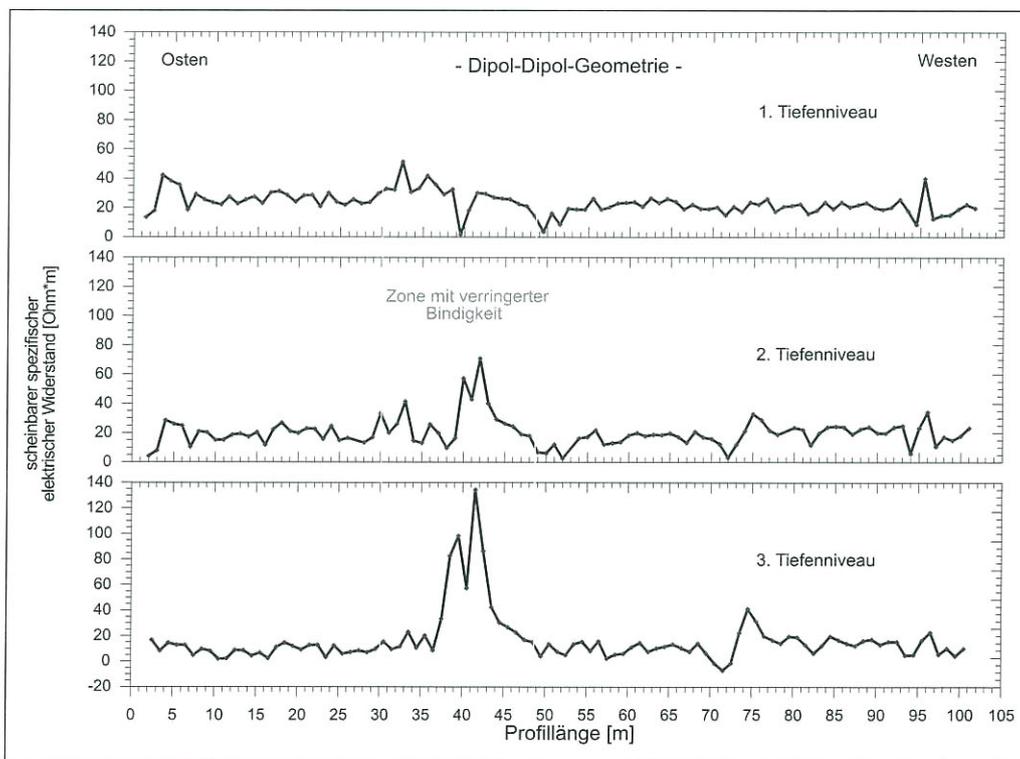


Abb. 6  
Geoelektrische Untersuchung eines Klärbeckendamms

Diese Messungen dienen ausschließlich dem Erkennen von Materialwechseln oder Inhomogenitäten entlang der Deichachse zwischen den geoelektrischen Profilschnitten. Daß diese Verfahrensweise funktioniert, zeigen Erfahrungen aus ähnlichen Aufgabenstellungen. Das Beispiel zeigt eine Dammuntersuchung eines Klärbeckens mit Wasserverlusten (Abb. 6). Die Messungen (Dipol-Dipol-Konfiguration) zeigen deutlich die Materialinhomogenität in Form weniger bindiger Bereiche und lassen damit auf die

Das zweite Temperaturminimum findet keine Bestätigung in den geoelektrischen Messungen. Es ist ein Indiz für die Unterströmung des Dammes.

### 3. 2. 3. Auswertung und Interpretation der Messungen

Bei der großen Menge anfallender Felddaten können nur automatische Auswertelgorithmen verwendet werden. Die Meßwerte werden entsprechend der Meßgeometrien in scheinbare elektrische Widerstände umgerechnet. Diese Wi-

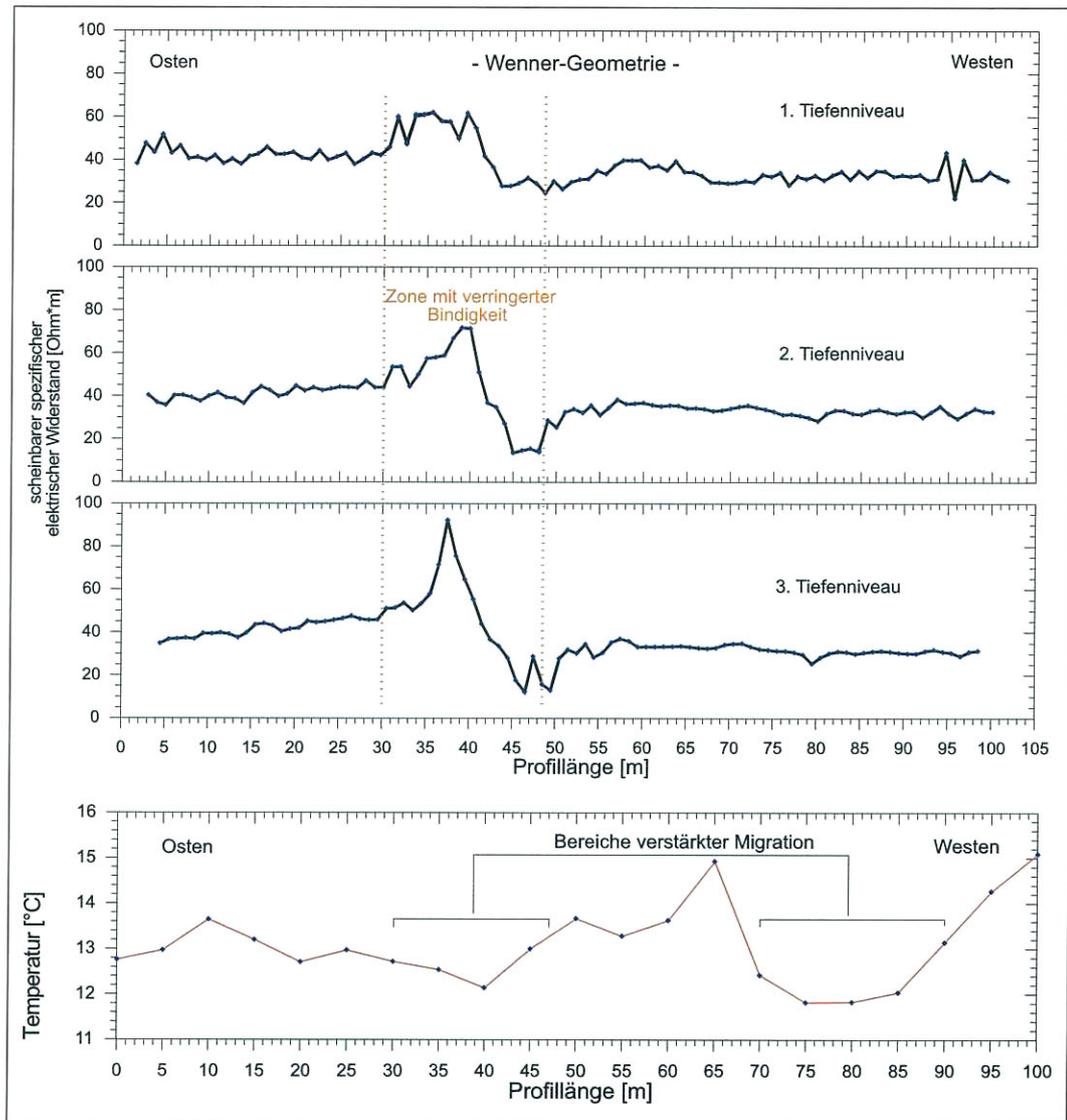


Abb. 7

*Nachweis von Durchflußbereichen eines Dammes mit geothermischen und geoelektrischen Messungen*

Verlustzone des Dammes schließen. Der Ergebnisse der geophysikalischen Untersuchungen wurden durch eine Beprobung verifiziert.

Zum direkten Nachweis von Durchflußbereichen können geoelektrische Untersuchungen mit geothermischen Messungen kombiniert werden, wie das zweite Beispiel zeigt (Abb. 7).

Die Temperatur zeigt deutlich zwei Minima. Die erste Anomalie korreliert mit einem Widerstandsmaximum der Wenner-Mehrniveaufkartierung und zeigt durchlässige Bereich an.

derstände können als qualitatives Ergebnis bei Zuordnung der Widerstandswerte zur Elektrodenposition und Meßniveaus als Pseudosektion dargestellt werden. Angestrebt wird natürlich eine quantitative Aussage, also wahre Gebirgswiderstände und Teufen. Dazu wird ein tomographisches Verfahren angewandt.

Unter Vorgabe eines plausiblen Modells wird ein synthetische Potentialverteilung errechnet. Dieser berechnete Datensatz wird mit den Meßwerten verglichen und iterativ an die-

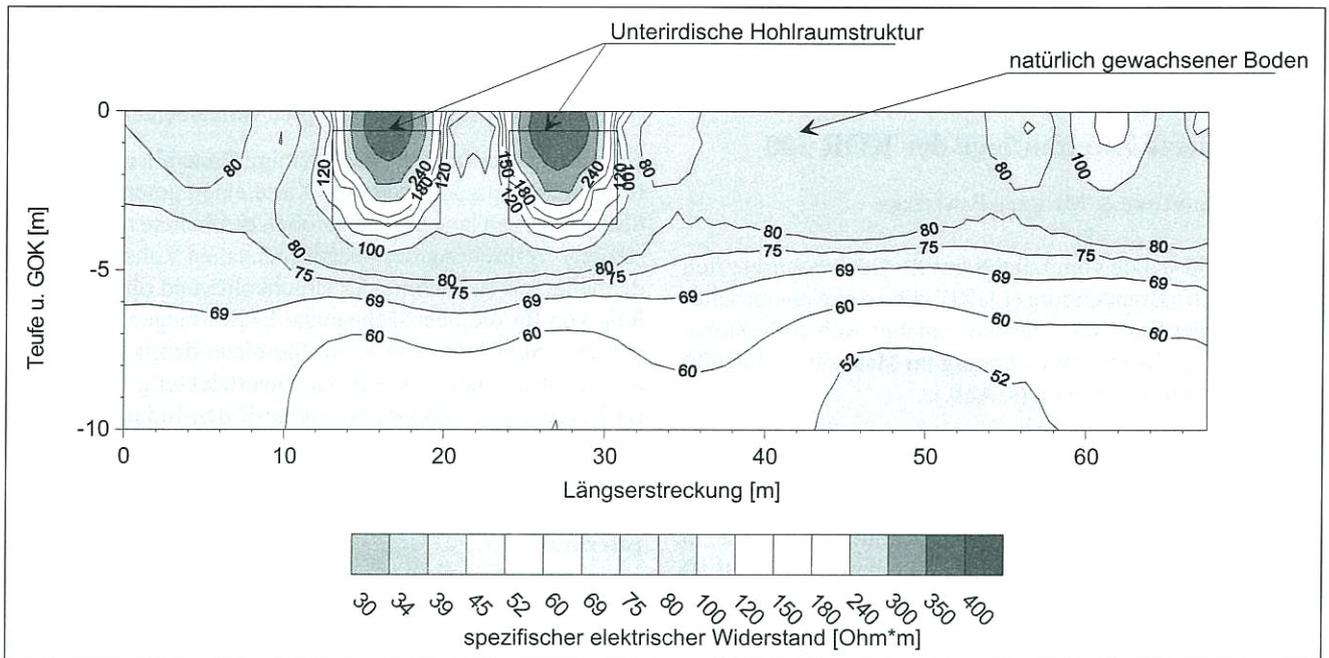


Abb. 8  
 Resultat einer Hohlraumerkundung mit einer Multielektrodenmethode

sen angepaßt. Im Ergebnis wird ein zweidimensionaler Schnitt, hier ein Beispiel aus der archäologischen Erkundung, erhalten (siehe Abb. 8).

Die Resultate müssen durch ergänzende Untersuchungen, wie direkte Aufschlußverfahren oder Bohrlochmessungen verifiziert werden. Hier ist in jedem Falle eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Geophysikern, Geologen, Geotechnikern und Baugrundingenieuren gefragt.

### Literatur

BEYER, W. (1961): Beitrag zur Ermittlung maßgebender Grundwasserfließgeschwindigkeiten Dissertation TU Dresden; Institut für Boden und Wasserwirtschaft.

BRANDT, G.: Pirna-Mühlberg II - Migrations-PV Ergebnisbericht HGN Hydrogeologie GmbH, Torgau, 1990.

BRANDT, G. (1994): Geophysikalische Untersuchungen Bitterfeld-Ost Ergebnisbericht HGN Hydrogeologie GmbH, Torgau.

BRANDT, G. & R. NICKEL (1994): Analyse und Weiterentwicklung geohydraulischer und geophysikalischer Bohrlochtests für die Untersuchung von Deponie- und Altlastenstandorten Verbundvorhaben „Deponieuntergrund und Altlasten“ Forschungsbericht HGN Hydrogeologie GmbH, Nordhausen.

CHARDABELLAS, P. & K. THIEMER (1996): Normung der kf-Wert-Feldbestimmung durch Standardisierung der Korngrößenverteilungsdiagramme grundwasserhöflicher Lockergesteine Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, 20, Berlin.

DUPRAT, A., SIMLER, L. & P. UNGEMACH (1970): Beitrag der geoelektrischen Erkundung zur Ermittlung der hydrodynamischen Kennwerte eines Grundwasserleiters aus: TERRES et EAUX.

ENGELHARDT, W. & H. PITTER (1951): Über Zusammenhänge zwischen Porosität, Permeabilität und Korngröße bei Sanden und Sandsteinen.

KNÖDEL, K., KRUMMEL, H. & G. LANGE (1997): Handbuch zur erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten Band 3 - Geophysikalische Beitrag: Geothermik s. 707-24 Springer Verlag Berlin, Heidelberg.

LUCKNER, L. & W. M. SCHESTAKO (1981): Migrationsprozesse im Boden- und Grundwasserbereich VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

STAJNIAK, J (1981): Possibilities of the Geothermal Method Vortrag: 26. Geophysikalisches Symposium, Leipzig.

Anschrift der Autoren:  
 Dipl.-Geophys. Gerhardt Brandt  
 Dipl.-Geophys. Christian Richter  
 HGN Hydrogeologie GmbH  
 Niederlassung Torgau  
 Süptitzer Weg  
 04860 Torgau