

## Die Widerstandsgeoelektrik

Seite 1 von 4

### Aufgabe

Einfache Abschätzung bis hin zur quantitativen Ermittlung der strukturellen Untergrundsituation aufgrund der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes bzw. der Leitfähigkeit.

### Verfahrensvarianten

- Kartierung/Profilierung** liefert flächenhafte oder linienhafte Aussagen in Form von integralen Werten (= Resistivity Mapping, Profiling)
- Sondierung** liefert an einer Stelle Aussagen über den etwaigen vertikalen Schichtaufbau (= VES Vertical Electrical Sounding, Resistivity Sounding)
- Sondierungskartierung** liefert entlang einer Linie Aussagen über den ungefähren Schichtaufbau (= Resistivity Imaging, 2D-Tomografie)

### Anwendungen

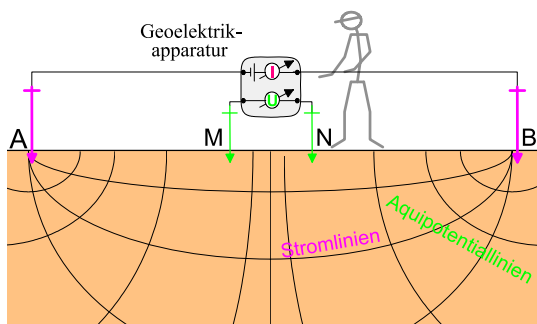
- Geologie, Hydrogeologie** Erkundung nach Grundwasserleitern und -stauern, geol. Störungen und Verwerfungen, Lagerstätten, Erosionsrinnen, Platzierung von Bohrungen, Verkarstung
- Baugrund, Altlasten** Abschätzung von Schichtmächtigkeiten, Suche nach Hohlräumen und größeren Bauwerksresten, Deponiegrenzen und -gliederung, Schadstofffahnen
- Weiteres** archäologische Vorerkundung, Feuchte-Salzverteilung in der Bauwerksdiagnostik

### Spezifischer Widerstand

Der spez. Widerstand  $\rho$  (spez. Leitfähigkeit  $\sigma = 1/\rho$ ) ist eine elektrische Materialeigenschaft. Alle Bestandteile eines Materials tragen zu diesem Kennwert bei. In erdfeuchten, mineralischen Materialien dominiert i.A. die Ionen- gegenüber der Elektronenleitfähigkeit. D.h., dass geringe Widerstände v.a. durch den Wassergehalt bzw. die darin gelösten Salze (Ionen) verursacht sind. Die Zustände trocken oder feucht prägen den Gesamtwiderstand eines Materials und führen zu einer großen Widerstandsbandbreite für ein und dasselbe Material. Ermittelte Werte lassen also keine direkten Aussagen zu (z.B. Gesteinssorte), sondern geben nur Hinweise. Unter Einbezug weiterer Informationsquellen können aber in der Regel konkrete Schlüsse gezogen werden. Anhaltswerte für spez. Widerstände, die u.U. in der Praxis deutlich davon abweichen können, sind wie folgt:

Oberboden 50 - 200 $\Omega\text{m}$	Ton (erdfeucht) 5 - 20 $\Omega\text{m}$	Schluff (erdfeucht) 20 - 100 $\Omega\text{m}$
Sand (erdfeucht) 100 - 1000 $\Omega\text{m}$	Kies (erdfeucht) über 1000 $\Omega\text{m}$	Sand, Kies (gesättigt) 50 - 200 $\Omega\text{m}$
verwittertes Gestein 100 - 1000 $\Omega\text{m}$	Tonstein 100 - 1000 $\Omega\text{m}$	Sandstein 200 - 5000 $\Omega\text{m}$
unverwitt. Tiefengestein über 5000 $\Omega\text{m}$	Süßwasser 20 $\Omega\text{m}$	Salzwasser unter 1 $\Omega\text{m}$

Abb. 1 Prinzip der Widerstandsgeoelektrik



### Verfahrensgrundlagen

Bei der Widerstandsgeoelektrik wird dem Untergrund bzw. Bauwerk über zwei Stromelektroden A und B ein Gleichstrom  $I$  zugeführt. Man betrachtet den stationären Fall, in dem das elektrische Feld  $E$  allein aus dem Potential  $U$  abgeleitet werden kann:  $E = -\text{grad}U$ . Entsprechend der räumlichen Verteilung des spez. Widerstandes stellt sich ein zeitunabhängiges elektr. Feld bzw. das damit verbundene Potential  $U$  ein. Zwischen zwei Sonden M und N kann die Potentialdifferenz an der Oberfläche gemessen werden:

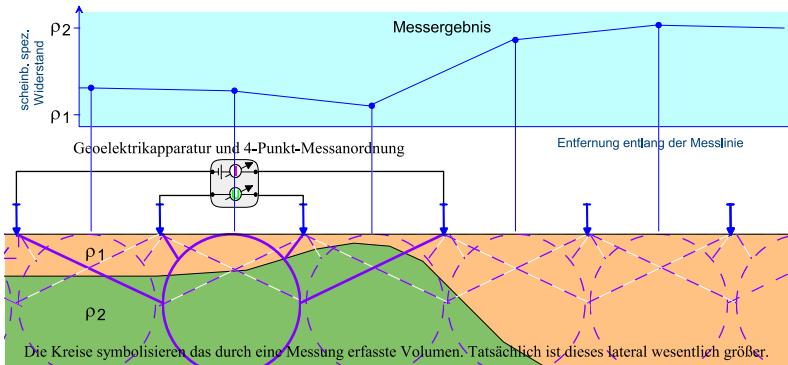
$$\Delta U = U_M - U_N = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \left[ \left( \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) - \left( \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) \right]$$

Der die Sonden- bzw. Elektroden-Abstände  $r$  enthaltende Ausdruck (in eckigen Klammern) wird als Konfigurationsfaktor  $K$  zusammengefasst. Er berücksichtigt die verwendete Anordnung der Sonden und Elektroden an der Oberfläche. Der spez. Widerstand ergibt sich damit zu  $\rho = K \cdot \Delta U / I$ .

Da bei geschichtetem oder inhomogenem Untergrund die Messgröße nicht nur durch den Kennwert einer einzelnen Schicht bestimmt wird, sondern in Abhängigkeit der Eindringtiefe durch integrale Werte beeinflusst wird, ergibt sich bei praktischen Untersuchungen der sog. scheinbare spez. Widerstand  $\rho_s = K \cdot \Delta U / I$ . Der Messwert beinhaltet Anteile aus einem großen Messvolumen. Dies ist in den Abb. 2, 5 und 8 stark vereinfacht durch Kreise symbolisiert.

## Die Widerstandsgoelektrik (Widerstandskartierung und -profilierung)

Abb. 2 Prinzip der Widerstandskartierung- und -profilierung



### Prinzip (s. Abb. 2 und 3)

Bei der Widerstandskartierung erfolgt die Messung, indem die Elektroden-Sonden-Anordnung im vorgesehenen Messraster von Messpunkt zu Messpunkt wandert und so flächig der scheinbare spez. Widerstand erkundet wird. Die Messanordnung bleibt dabei gleich, sodass auch die Eindringtiefe in etwa gleich bleibt. Die Ergebnisse werden als Karte des scheinbaren spez. Widerstandes dargestellt. In vielen Fällen ist es sinnvoll, Kartierungen mit mehreren Eindringtiefen vorzunehmen, um abschätzen zu können, aus welchen Tiefen die erkennbaren Widerstandsveränderungen stammen. Bei der Widerstandsprofilierung erfolgt die Untersuchung und Datendarstellung entlang von Messlinien.

können, aus welchen Tiefen die erkennbaren Widerstandsveränderungen stammen. Bei der Widerstandsprofilierung erfolgt die Untersuchung und Datendarstellung entlang von Messlinien.

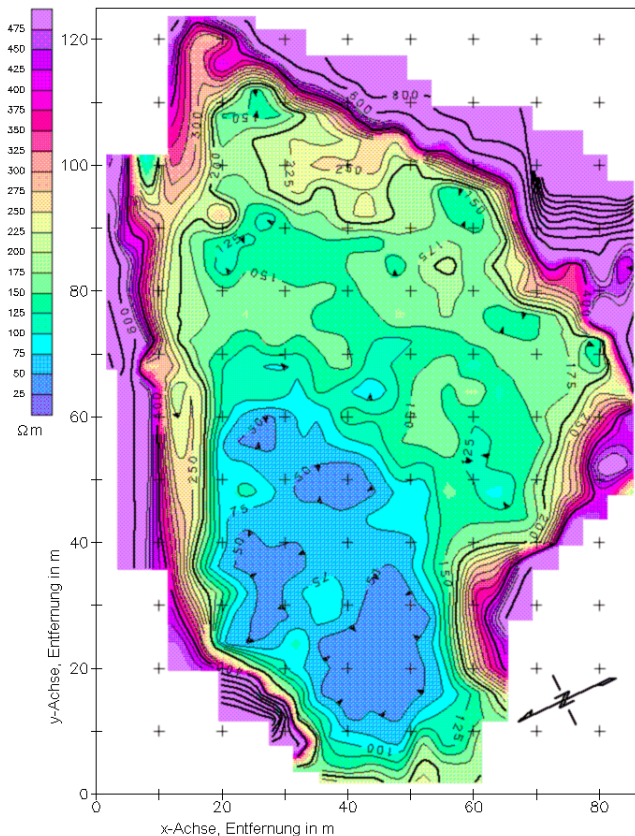


Abb. 3 Isolinienplan des scheinb. spez. Widerstandes, ermittelt durch eine Widerstandskartierung. Die Werteverteilung zeigt die Grenzen einer Deponie sowie ihre Gliederung.

der Strom in die niederohmige liegende Schicht geleitet, wodurch die Eindringtiefe steigt. Umgekehrt bewirkt eine niederohmige Deckschicht, dass der Strom nur bei stark vergrößerter Auslage in eine liegende hochohmige Schicht eindringt. Das laterale Auflösungsvermögen stimmt grob mit der Eindringtiefe überein. Inhomogenitäten nahe der

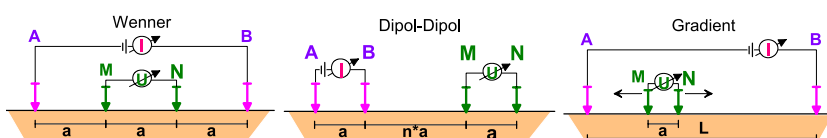


Abb. 4 Einige Messanordnungen der Kartierung und Profilierung

### Messanordnungen (s. Abb. 4)

Grundsätzlich besteht eine große Wahlfreiheit bei der Anordnung der Elektroden und Sonden in der Widerstandsgoelektrik. Aus messtechnischen und ökonomischen Erwägungen wird aber nur eine kleine Anzahl von Möglichkeiten verwendet. Überwiegend befinden sich die Elektroden bzw. Sonden in einer Linie, so dass die Widerstandsbestimmung stark richtungsabhängig ist. Es kann deshalb sinnvoll sein, mit mehreren Auslagerichtungen zu messen, um orientierte Strukturen besser erfassen zu können (z.B. Klüfte). Die am häufigsten verwendete Anordnung für die Kartierung bzw. Profilierung ist die nach Wenner. Bei ihr haben alle Elektroden und Sonden den gleichen Abstand  $a$ . Ihr Vorteil liegt in der geringen Empfindlichkeit auf laterale Inhomogenitäten. Die Dipol-Dipol-Anordnung liefert eine erhöhte laterale Auflösung. Die Gradientenanordnung erlaubt für geringe Untersuchungstiefen eine rasche Kartierung, weil A und B fix bleiben. Für sie werden i.a. keine spez. Widerstände berechnet.

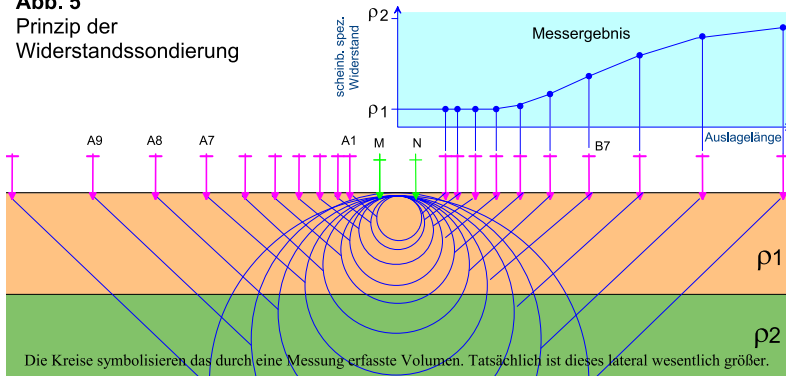
### Tiefenangaben/Genauigkeit

Mit der Festlegung der Anordnung bzw. der Länge ihrer Auslage wird eine grobe Eindringtiefe gewählt. Die Eindringtiefenangabe besagt, dass die Wirkung des Untergrundes bis etwa in diese Tiefe integral erfasst wird. Eine erste Näherung für die Eindringtiefe ist  $\frac{1}{4}$  der Gesamtlänge der Anordnung. Die tatsächliche Eindringtiefe hängt neben der Anordnung von den Schichtmächtigkeiten und den spez. Widerständen ab. Beispielsweise wird bei einer hochohmigen Deckschicht

die Elektroden können den Messwert verfälschen. Bei sehr hoher Anforderung ist deshalb eine Datenredundanz wünschenswert (Überlappung der Messungen).

## Die Widerstandsgeoelektrik (Widerstandssondierung)

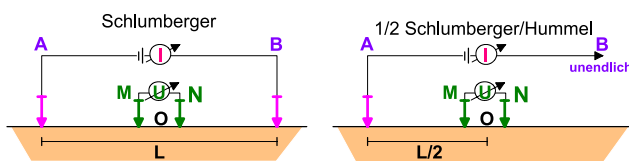
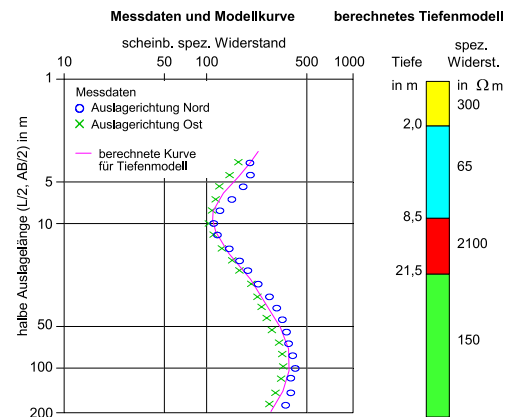
**Abb. 5**  
Prinzip der Widerstandssondierung



**Prinzip** (s. Abb. 5 und 6)

Die Messung bei der Widerstandssondierung erfolgt, indem i.d.R. die Sonden M und N am Bezugspunkt fix bleiben und die Stromelektroden A und B schrittweise mit größeren Abständen gesteckt werden, um die Eindringtiefe zu erhöhen. D.h., je größer die gewünschte Eindringtiefe, desto größer ist der Platzbedarf an der Oberfläche. Das Messergebnis ist ein Diagramm des scheinb. spez. Widerstandes in Abhängigkeit von der Auslagelänge. I.A. werden daraus durch eindimensionale rechnerische Inversion oder Vorwärtsmodellierung Tiefenmodelle für den ebenen Schichtenfall bestimmt. Dabei werden synthetische Daten eines Tiefenmodells an die Messdaten bestmöglich angepasst. Die Anzahl der möglichen Modelle wird durch Vorkenntnisse der geologischen Situation und durch Plausibilitätsbetrachtungen reduziert.

**Abb. 6**  
Inversion einer Widerstandssondierung



**Abb. 7** Zwei Messanordnungen für die Sondierung

**Messanordnungen** (s. Abb. 7)

Für die Widerstandssondierung werden häufig die Schlumberger- und teilweise die halbe Schlumbergeranordnung (Hummel) verwendet, da sie eine hohe Schichtauflösung besitzen. Bei ihnen haben die Sonden einen fixen, geringen Abstand. Der Elektrodenabstand wird variiert. Es können mehrere Auslagerichtungen für einen Sondierungspunkt gewählt werden.

Bei einer Drehsondierung wird in mehreren Richtungen ausgelegt, z.B. 8 Auslagerichtungen im Vollkreis mit jeweils 45° Winkelabstand. Dies dient z.B. der Erkennung von Schichtneigungen.

### Parameter einer Sondierung

Die Auslagelänge L oder AB gibt die Gesamtlänge einer Messanordnung bzw. den Abstand der Elektroden an. Es wird auch oft die halbe Auslagelänge AB/2, L/2 oder OB angegeben. Mit S oder MN wird der Abstand der Potentialsonden benannt. Die minimale und maximale Auslagelänge, z.B.  $L/2_{min}$ ,  $L/2_{max}$ , geben den ersten und letzten Elektrodenpunkt an und sind deshalb eine Information über den Tiefenmessbereich, Anhaltspunkt: Erkundungstiefe  $\sim L/8$  bis  $L/5$ . Die Anzahl der Messpunkte pro Sondierung wird in Punkten/Dekade angegeben. Der Abstand der Messpunkte (Tiefenabtastrintervall) ist im logarithmischen Maßstab gleichabständig, d.h. je größer die Eindringtiefe, desto größer der Messpunktabstand bei linearer Skala. Damit wird dem mit der Tiefe abnehmenden Auflösungsvermögen der Sondierung Rechnung getragen. Üblich sind minimal 6 bis maximal 12 Punkte/Dekade. Die in Abb. 6 dargestellte Messung wurde mit dichtem Tiefenabtastrintervall von 12 Punkten/Dekade gemessen.

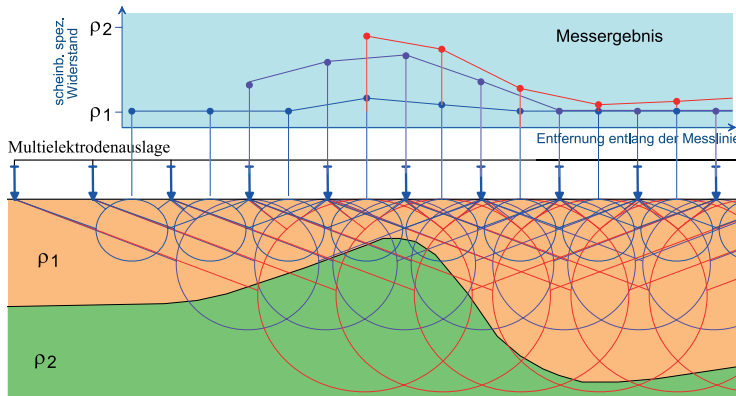
### Genauigkeit

Die üblichen Auswerterechnungen gelten für den ebenen (homogenen und isotropen) Schichtenfall. Diese Voraussetzung ist bei Schichtneigungen  $< 10\%$  ausreichend erfüllt. Auch für ebene Schichtung gibt es mehrere Tiefenmodelle, die den Messdaten entsprechen. Die Inversion ist also nicht eindeutig. Z.B. werden Pakete vieler dünner Schichten zu wenigen dicken Schichten zusammengefasst. Bei geringen Widerstandscontrasten können Schichten übersehen werden. Durch plausible Vorgaben oder Kenntnisse (z.B. aus Bohrungen) können jedoch die Anzahl der möglichen Tiefenmodelle weitgehend eingeschränkt werden. Die Tiefenangaben sind in der Regel mit  $\pm 10\%$  bis  $\pm 15\%$  Fehler der Tiefe behaftet. Bei ungestörter, ebener Geologie sind genauere Angaben zu erwarten. Umgekehrt kann bei starker Schichtneigung oder Inhomogenität die Genauigkeit vermindert sein. Die Tiefenangaben sind ein Mittelwert für den durch die Messung lateral erfassten Bereich.

## Die Widerstandsgoelektrik (Widerstandstomografie: 2D und 3D)

Seite 4 von 4

**Abb. 8** Messprinzip der 2D-Widerstandstomografie



stark (in Abb. 8 durch Kreise symbolisiert). Dadurch wird eine gute laterale Auflösung erzielt. Die Messdaten werden rechnerisch invertiert, wobei das Inversionsmodell durch Iterationen verbessert wird.

### Prinzip (s. Abb. 8 und 9)

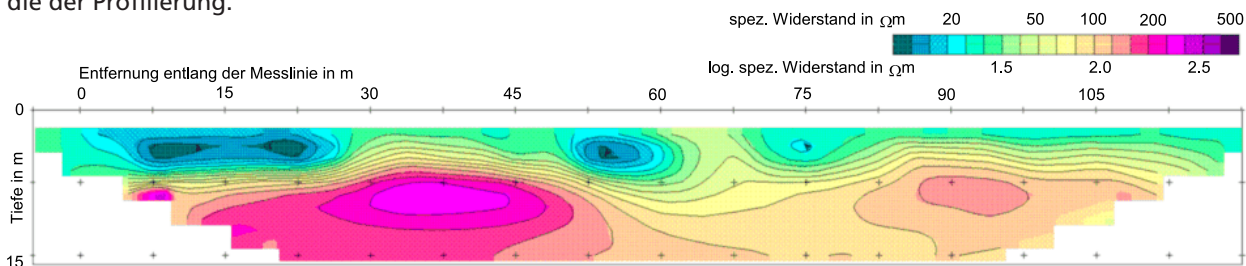
Die Messwertaufnahme bei der 2D-Widerstandstomografie (Sondierungskartierung) erfolgt, indem entlang einer Messlinie eine Vielzahl von Sonden-Elektroden gesteckt und mit einem speziellen Kabel verbunden werden (Multielektrodenauslage). Eine Schaltapparatur erlaubt die Ansteuerung aller sinnvollen Sonden-Elektroden-Kombinationen und damit eine große Anzahl von Tiefenstufen. Wegen des geringen Abstandes der Sonden und Elektroden wird der Untergrund lateral, d.h. fortlaufend entlang der Messlinie, dicht abgetastet. Die Messungen überlappen insbesondere für größere Eindringtiefen

### Messanordnungen

Die gebräuchlichsten Anordnungen sind: Wenner, Wenner-Schlumberger und Dipol-Dipol.

### Genauigkeit

Die Tiefenangaben haben in etwa die Genauigkeit wie bei der Sondierung. Die laterale Auflösung ist eher besser als die der Profilierung.



**Abb. 9** Vertikaler Schnitt des spezifischen Widerstandes aus einer 2D-Widerstandstomografie. Die Verteilung des spez. Widerstandes zeigt die Schichtung Boden/Verwitterungszone/Fels.

### 3D-Widerstandstomografie

Um den Untergrund möglichst dreidimensional zu erfassen, können flächige Messungen von parallelen 2D-Messlinien ausgeführt werden. Bei ausreichend engem Messlinienabstand ist es möglich, rechnerisch die benachbarten Messlinien zu berücksichtigen. Das Inversionsresultat nennt man Quasi-3D-Widerstandstomografie (Dahlin und Loke, 1997). Neben den tomografischen Vertikal- (s. Abb. 9) können dann auch Horizontalschnitte für gewünschte Tiefenstufen berechnet werden. Eine weitergehende 3D-Tomografie beruht im Unterschied dazu auf der Inversion von 2 orthogonalen Messrichtungen. Die Begründung für zwei Richtungen liegt darin, dass sich die Messströme von Sendeelektrode in Richtung Empfangselektrode ausbreiten. Bei orthogonaler Anordnung können sich andere Stromstärken und damit andere Widerstände ergeben. Dies kann bei besonderen Untergrundsituationen (z.B. geologische Störung, Anisotropie) relevant sein.

### Typische Ausstattung

#### Signalgeber

Stromquelle mit (gepulstem) Gleich- oder niederfrequentem Wechselstrom bei Leistungen von einigen W bis kW, je nach Erkundungstiefe (1 m bis über 100 m) und spez. Widerstand.

#### Signalmessung

meist integrierende Volt- und Amperemeter mit Störsignalunterdrückung, bei höherwertigen Geräten auch einstellbare Messzyklen.

#### galvanische Ankopplung

mittels Elektroden/Sonden (meist Edelstahlspieße), welche ca. 10 bis 30 cm in den Untergrund gesteckt werden. Bei harten Oberflächen ist in der Regel ein Durchbohren notwendig. Hohe Übergangswiderstände werden durch Wässern vermindert.

#### Personal

Messtrupp und Auswertepersonal (besonders qualifizierte Fachkräfte).