

Die Widerstandsgeoelektrik

(Gleichstromgeoelektrik)

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, Plazierung von Bohrungen, Verkarstung

Baugrund, Altlasten

Abschätzung von Schichtmächtigkeiten, Suche nach Hohlräumen und größeren Bauwerksresten, Deponiegrenzen und -gliederung, Schadstofffahren

Weiteres

archäologische Vorerkundung, Feuchte-Salzverteilung in der Bauwerksdiagnostik

Spezifischer Widerstand

Der spez. Widerstand ρ (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. Gesteinsorte), 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 Ωm	Ton (erdfeucht) 5 - 20 Ωm	Schluff (erdfeucht) 20 - 100 Ωm
Sand (erdfeucht) 100 - 1000 Ωm	Kies (erdfeucht) über 1000 Ωm	Sand, Kies (gesättigt) 50 - 200 Ωm
verwittertes Gestein 100 - 1000 Ωm	Tonstein 100 - 1000 Ωm	Sandstein 200 - 5000 Ωm
unverwitt. Tiefengestein über 5000 Ωm	Süßwasser 20 Ωm	Salzwasser unter 1 Ωm

Verfahrensgrundlagen

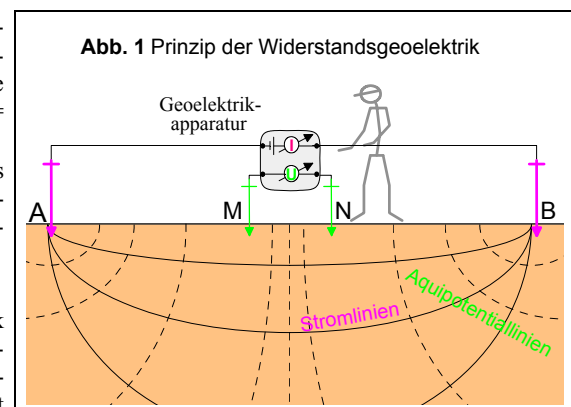
Bei der Widerstandsgeoelektrik wird dem Untergrund bzw. Bauwerk über zwei Stromelektroden A und B ein Gleichstrom I zugeführt. Man betrachtet den stationären Fall, in dem das elektrische Feld \mathbf{E} allein aus dem Potential U abgeleitet werden kann: $\mathbf{E} = -\text{grad}U$.

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



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, so daß 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.

Meßanordnungen (s. Abb. 4)

Grundsätzlich besteht eine große Wahlfreiheit bei der Anordnung der Elektroden und Sonden in der Widerstandsgeoelektrik. Aus meßtechnischen und ökonomischen Erwägungen wird aber nur eine kleine Anzahl von Möglichkeiten verwendet. Überwiegend befinden sich die Elektroden bzw. Sonden in eine 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 $1/4$ 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 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 Elektroden können den Meßwert verfälschen. Bei sehr hoher Anforderung ist deshalb eine Datenredundanz wünschenswert (Überlappung der Messungen).

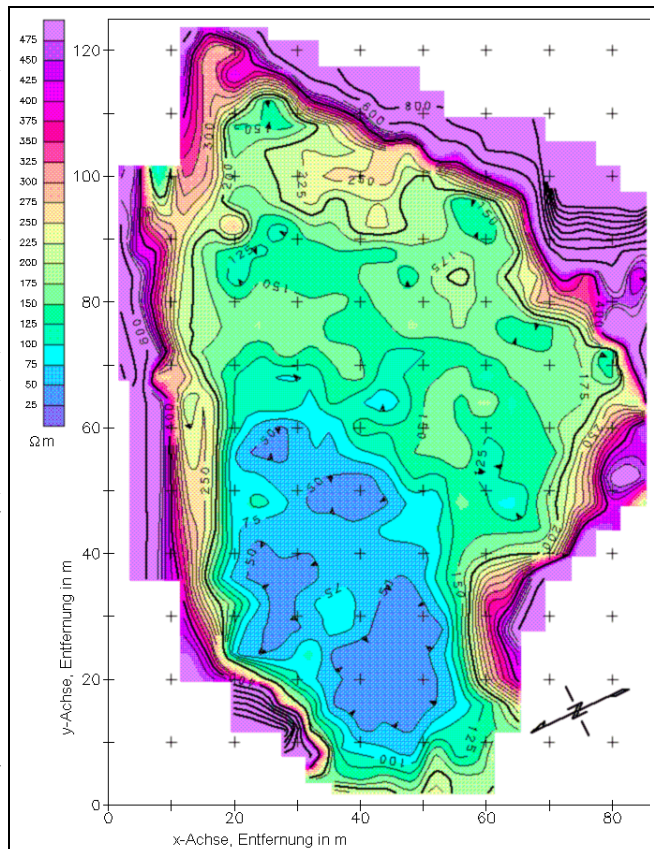
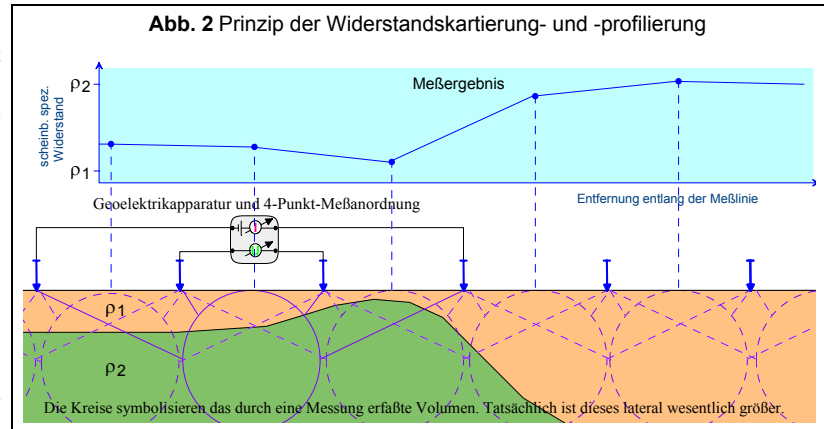


Abb. 3 Isolinenplan des scheinb. spez. Widerstandes, ermittelt durch eine Widerstandskartierung. Die Werteverteilung zeigt die Grenzen einer Deponie sowie ihre Gliederung.

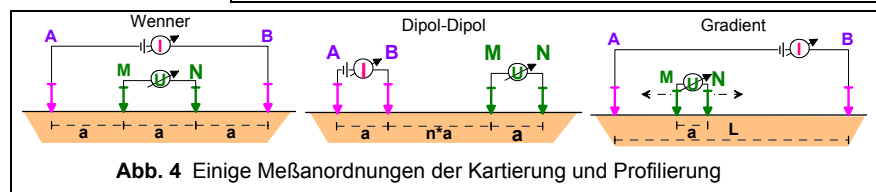


Abb. 4 Einige Meßanordnungen der Kartierung und Profilierung

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.

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 Auslagerrichtungen für einen Sondierungspunkt gewählt werden. Bei einer Drehsondierung wird in mehreren Richtungen ausgelegt, z.B. 8 Auslagerrichtungen im Vollkreis mit jeweils 45° Winkelabstand. Dies dient z.B. der Erkennung von Schichtneigungen.

Parameter einer Sondierung

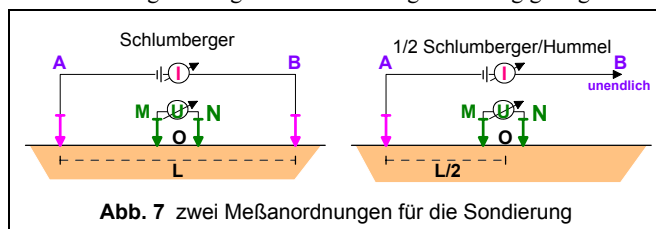
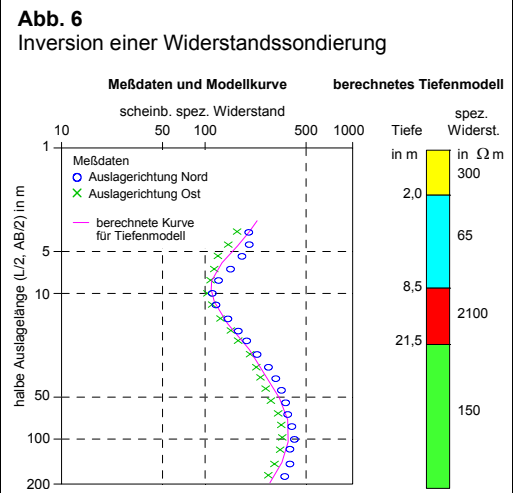
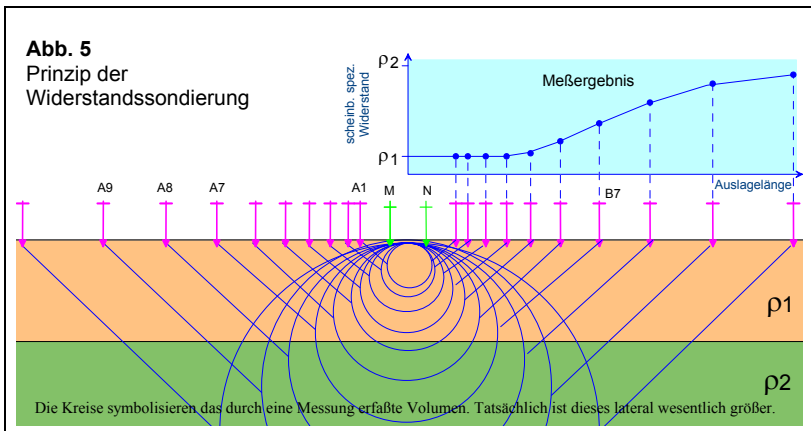
Die Auslagelänge L oder AB gibt die Gesamtlänge einer Meßanordnung bzw. den Abstand der Elektroden an. Es wird auch oft die halbe Auslagelänge $AB/2$, $L/2$ oder OB angegeben. Mit S oder MN wird der Abstand der Potentialsonden benannt.

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 (Tiefenabstastintervall) 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 Tiefenabstastintervall von 12 Punkten/Dekade gemessen.

Genauigkeit

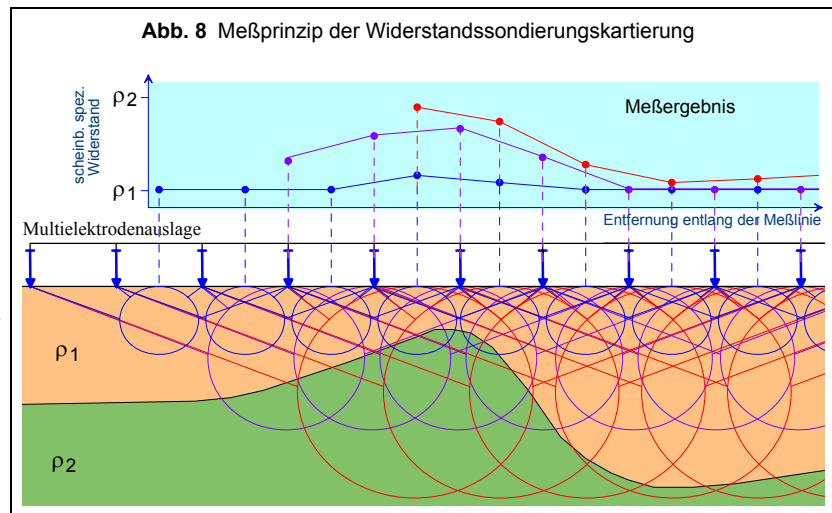
Die üblichen Auswerterechnungen gelten für den ebenen (homogenen und isotropen) Schichtenfall. Diese Voraussetzung ist bei Schichtneigungen $< 10\%$ ausreichend erfüllt. Auch für ebene Schichtung gibt es mehrere Tiefenmodelle, die den Meßdaten entsprechen. Die Inversion ist also nicht eindeutig. Z.B. 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.



Widerstandssondierungskartierung (2D-Tomografie)

Prinzip (s. Abb. 8 und 9)

Die Meßwertaufnahme bei der Sondierungskartierung erfolgt, indem 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 einer großen 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 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.



Meßanordnungen

Wie bei der Kartierung sind bei der Sondierungskartierung u.a. Wenner- und Dipol-Dipol-Anordnungen gebräuchlich.

Genauigkeit

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

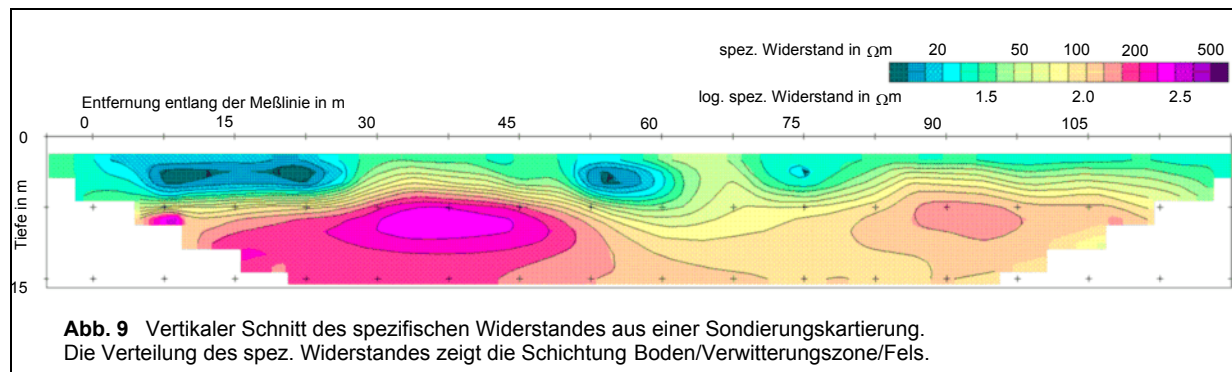


Abb. 9 Vertikaler Schnitt des spezifischen Widerstandes aus einer Sondierungskartierung. Die Verteilung des spez. Widerstandes zeigt die Schichtung Boden/Verwitterungszone/Fels.

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)

Spezialverfahren Geoelektrik im Bohrloch (z.B. zur Hohlräumerkundung), Unterwassergeoelektrik

kombinierbare Verfahren Induzierte Polarisation IP, mise-à-la-masse, Refraktionsseismik, Georadar