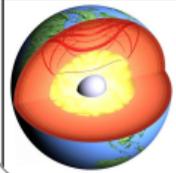


Einführung in die Geophysik I

Geoelektrik

Thomas Bohlen, Geophysikalisches Institut, Fakultät für Physik

Seismologie



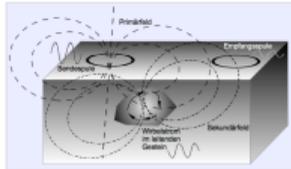
Seismik



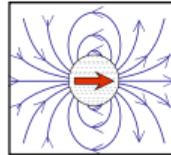
Georadar



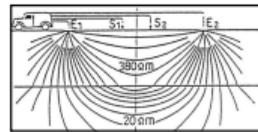
Elektromagnetik



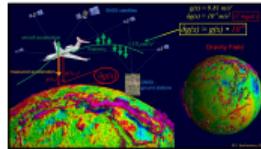
Magnetik



Geoelektrik



Gravimetrie



Inhalte der Vorlesung

Einführung in die Geophysik I, WS 2023/24, Kl. HS B

#	Datum	Vorlesung (09:45-11:15h)	Übungen (11:30-12:30h)
1	25.10.23	Einführung, Wellenausbreitung	
	01.11.23	Feiertag	
2	08.11.23	Wellenausbreitung	
3	15.11.23	Refraktionsseismik	Ü1: Moduln
	22.11.23	Studieninformationstag, Keine Vorlesung	
4	29.11.23	Reflexionsseismik I	
	06.12.23	Reflexionsseismik II	Ü2: Refraktionsseismik
5	13.12.23	Elektromagnetische Felder	Ü3: Reflexionsseismik
6	20.12.23	Georadar	
7	10.01.24	Goelektrik	Ü4: Georadar
8	17.01.24	Gravimetrie	Ü5: Goelektrik
9	24.01.24	Gravimetrie	
10	31.01.24	Magnetik	Ü6: Gravimetrie
11	07.02.24	Magnetik	Ü7: Magnetik
	14.02.24	Klausur	

Vorlesungsinhalte heute

- Prinzip der Methode
- Relevante Untergrundparameter: der spezifische elektrische Widerstand
- Einführung der physikalischen Grundbegriffe: Potential, Strom, elektrisches Feld, Widerstand
- Beschreibung der Ausbreitung des Stromflusses im Erdinneren
- Meßkonfigurationen und deren Auswertung: Sondierung und Kartierung
- Beispiel einer Widerstandstomographie

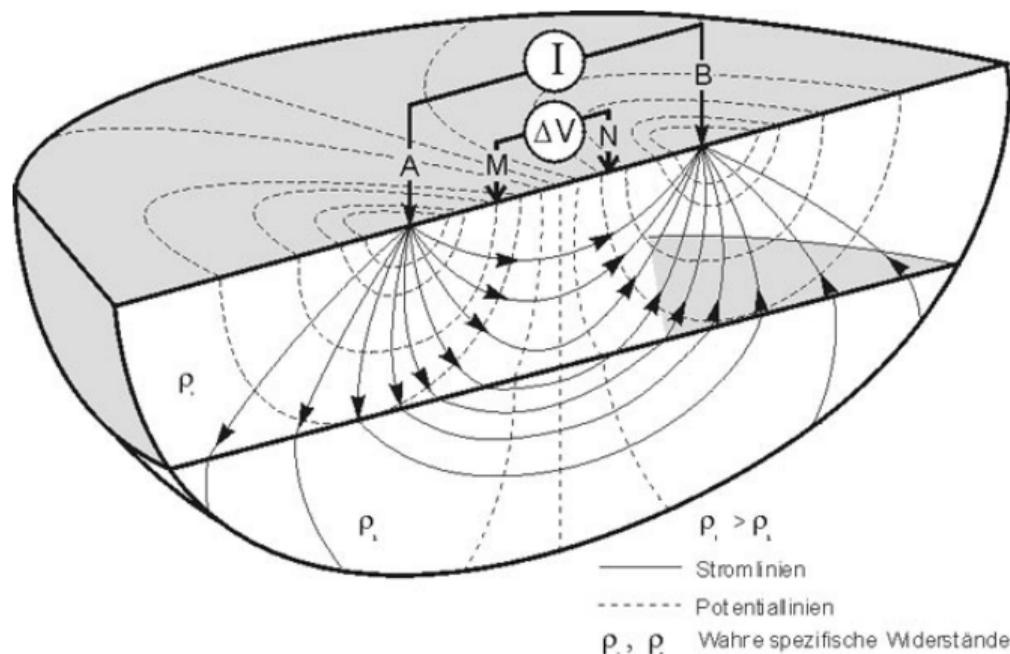
Agenda

- Einführung und Anwendungsgebiete
- Physikalische Grundbegriffe
- Vier-Punkt Anordnungen
- Tiefensondierung
- Kartierung
- Beispiel einer Widerstandstomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

Agenda

- Einführung und Anwendungsgebiete
- Physikalische Grundbegriffe
- Vier-Punkt Anordnungen
- Tiefensondierung
- Kartierung
- Beispiel einer Widerstandstomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

Messprinzip in der Geoelektrik



(Knödel et al. 2005)



Messprinzip in der Geoelektrik

- Ohmsches Experiment für die Erde: Einspeisung eines Stroms I und Messung eines Spannungsabfalls ΔV
- Untergrundparameter: **spezifische elektrische Widerstand** $\rho(x, y, z)$. Dieser wird beeinflusst durch z.B.
 - Wassergehalt
 - Metalle/Erze
 - Salze
 - Tone
- Anwendungsgebiete sind zum Beispiel
 - Hydrologie - Kartierung von Wasserwegen
 - Grundwasserqualität, z.B. Salzgehalt
 - Deponiemonitoring - Grundwasserverunreinigung
 - Archäologische Prospektion - Metallkörper, Bodenfeuchte an Mauern

Der spezifische elektrische Widerstand

Gestein	spez. Widerstand [Ωm]
Steinsalz	$10^5 - 10^7$
Sand trocken	10^5
wassergesättigt	$1000 - 10^4$
Quarzit	$3000 - 10^5$
Eis	$1000 - 10^5$
Granit	$300 - 3 \cdot 10^4$
Böden sandig	$150 - 7000$
lehmig	$50 - 9000$
tonig	$20 - 4000$
Kalkstein	$100 - 7000$
Moore	$30 - 700$
glaziale Moränen	$10 - 300$
Tonschiefer	$10 - 1000$
Mergel	$5 - 200$
Lehme	$3 - 300$
Ton trocken	$30 - 1000$
naß	$1 - 30$
Schluff	$10 - 1000$
Hausmüll	$1 - 100$

Abnahme des spez. elektrischen Widerstandes mit der Zunahme von

- Wassergehalt
- Porosität
- Metalle/Erze
- Tongehalt

Das Gesetz von Archie

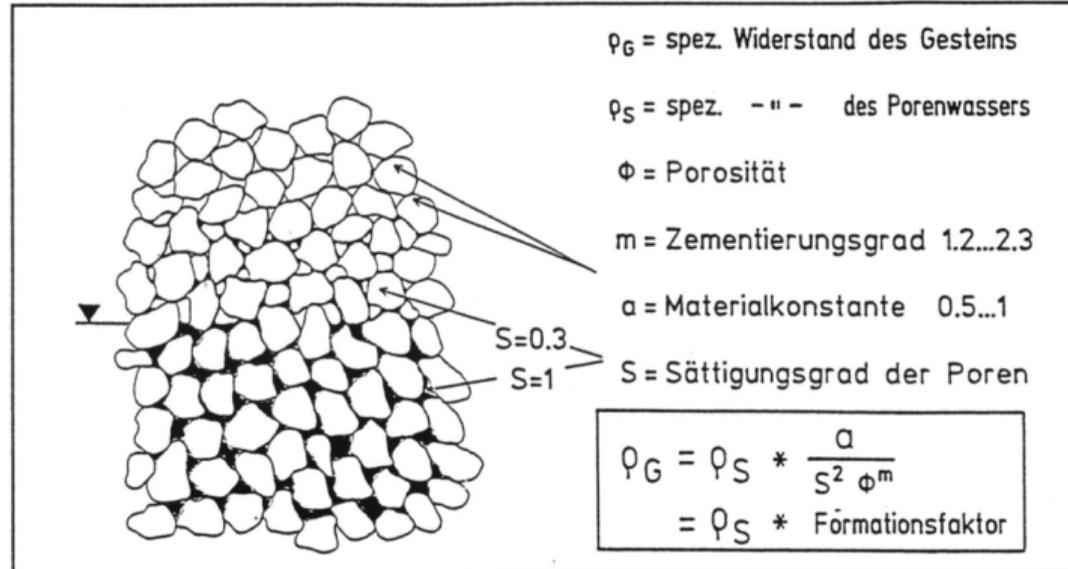


Abb. 1 Gesetz von Archie, Abhängigkeit des spezifischen Gesteinswiderstandes vom spezifischen Widerstand des Porenwassers und den Gesteinseigenschaften

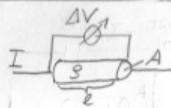
Agenda

- Einführung und Anwendungsgebiete
- **Physikalische Grundbegriffe**
- Vier-Punkt Anordnungen
- Tiefensondierung
- Kartierung
- Beispiel einer Widerstandstomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

Ohmsches Experiment - Analogie zwischen Bauteil und Kontinuum

Physikalische Grundbegriffe - Analogie zwischen Bauteil und Kontinuum

Elektrotechnik (Bauteile)



$$R = s \frac{l}{A}$$

Ohmsches Gesetz

$$\Delta V = R \cdot I = s \frac{l}{A} I$$

ΔV : Potentialdifferenz [V]

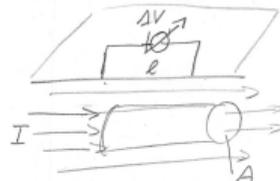
I : Stromstärke [A]
Ladungsmenge/zeit

R : Ohmscher Widerstand [Ω]

s : spez. elekt. wid. [Ωm]

$s^{-1} = \sigma$ spez. elekt. Leitfähigkeit [Ωm^{-1}]

Geoelektrik (Erde)



Elektrische Feldstärke

$$|\vec{E}| = \frac{\Delta V}{l} \rightarrow \frac{dV}{dl} \left[\frac{V}{m} \right]$$

Elektrische Stromdichte

$$|\vec{J}| = \frac{I}{A} \rightarrow \frac{dI}{dA} \left[\frac{A}{m^2} \right]$$

$$|\vec{E}| \cdot l = \Delta V = s \frac{l}{A} \cdot |\vec{J}| A$$

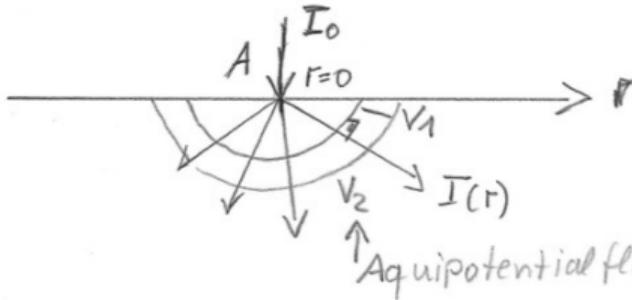
$$|\vec{E}| = s |\vec{J}| \quad \text{Ohmsches Gesetz}$$

$$|\vec{J}| = \sigma |\vec{E}|$$

Agenda

- Einführung und Anwendungsgebiete
- Physikalische Grundbegriffe
- **Vier-Punkt Anordnungen**
- Tiefensondierung
- Kartierung
- Beispiel einer Widerstandstomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

Ein Monopol an einem homogenen Halbraum



Strom $I(r)$
 Potential $V(r)$
 $\vec{E} = -\text{grad } V = S \vec{j}$

Aquipotentialflächen

Ablenkverhalten des Stroms I und des Potentials V

$|\vec{E}|(r) = S |\vec{j}|(r)$ Ohmsches Gesetz

$|\vec{j}| = I_0 \frac{1}{\underbrace{2\pi r^2}_{\text{Oberfläche Halbkugel}}}$ (Kugeloberfläche $\frac{1}{4\pi r^2}$)

Ein Monopol an einem homogenen Halbraum

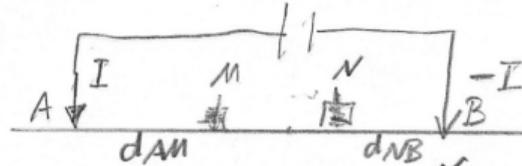
$$E := |\vec{E}| = |-\text{grad}V| = -\frac{dV}{dr} \Rightarrow V = -\int E dr = -\frac{\rho I_0}{2\pi} \int_0^r \frac{1}{r^2} dr$$

$$\Rightarrow V = \frac{\rho I_0}{2\pi} \frac{1}{r}$$

Polstelle bei $V(r=0)$
 Abnahme $\sim \frac{1}{r}$

Vier-Punkt Anordnung

Betrachten wir die folgende 4-Punktanordnung



Das Potential im Punkt M beträgt
neg. Strom an B

$$V_M = \frac{SI}{2\pi} \left(\frac{1}{d_{AM}} - \frac{1}{d_{BN}} \right)$$

$$V_N = \frac{SI}{2\pi} \left(\frac{1}{d_{AN}} - \frac{1}{d_{BN}} \right)$$

Vier-Punkt Anordnung

Die Potentialdifferenz ist demnach

$$\Delta V = V_m - V_n = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{d_{AM}} - \frac{1}{d_{BM}} + \frac{1}{d_{AN}} + \frac{1}{d_{BN}} \right)$$

K^{-1} : Geometriefaktor

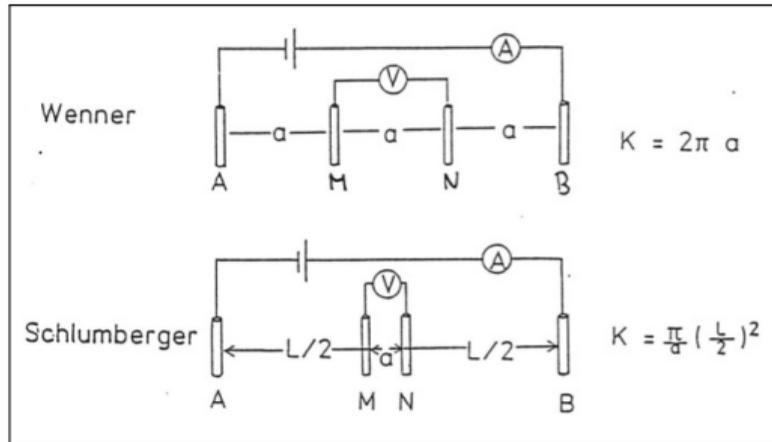
$$= \frac{\rho I}{K}$$

$$K = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{d_{AM}} - \frac{1}{d_{BM}} - \frac{1}{d_{AN}} + \frac{1}{d_{BN}} \right)^{-1}$$

Die Meßgröße $S_a := -K \frac{\Delta V}{I}$ heißt

„scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand“

Typische Vier-Punkt Anordnungen

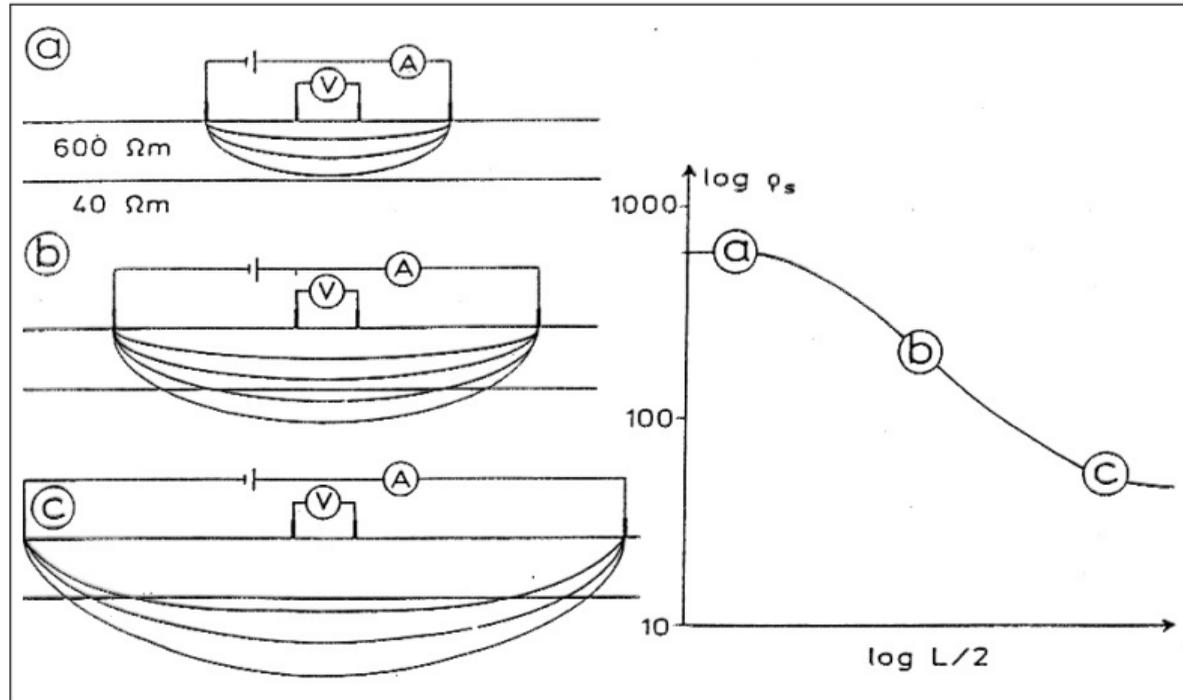


- Scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand $\rho_a = K \frac{V}{I}$
- Schlumberger: Tiefensondierung
- Wenner: Kartierung

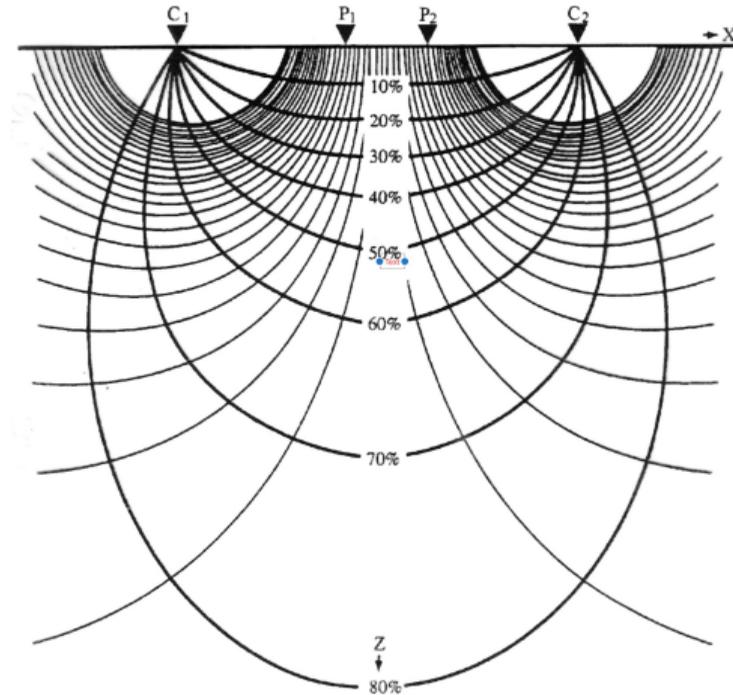
Agenda

- Einführung und Anwendungsgebiete
- Physikalische Grundbegriffe
- Vier-Punkt Anordnungen
- **Tiefensondierung**
- Kartierung
- Beispiel einer Widerstandstomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

Entstehung der Sondierungskurve

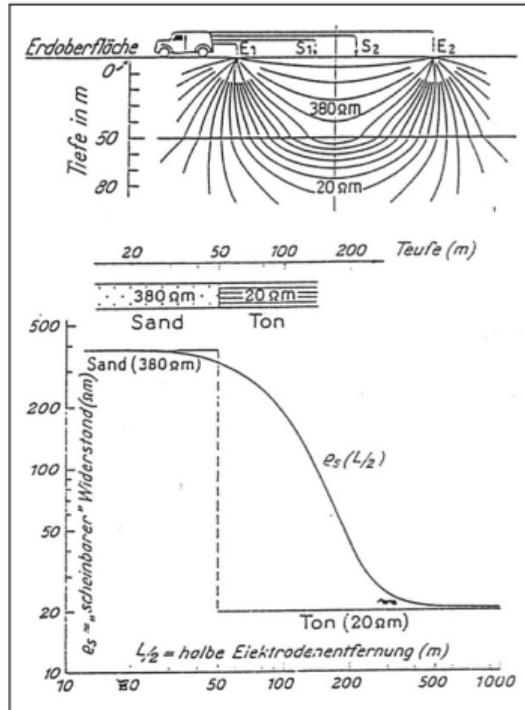


Tiefeneindringung



- Im homogenen Medium dringt 50 Prozent der Energie etwa bis in eine Tiefe von $L/2$ - $L/3$

Sondierungskurve bei 2 Schichten



- Bei kleinen L gibt ρ_a den tatsächlichen spez. Widerstand bei geringen Tiefen wieder
- Es findet Brechung der Stromlinien statt
- Der Widerstand des Halbraumes wird erst bei sehr großen L erreicht

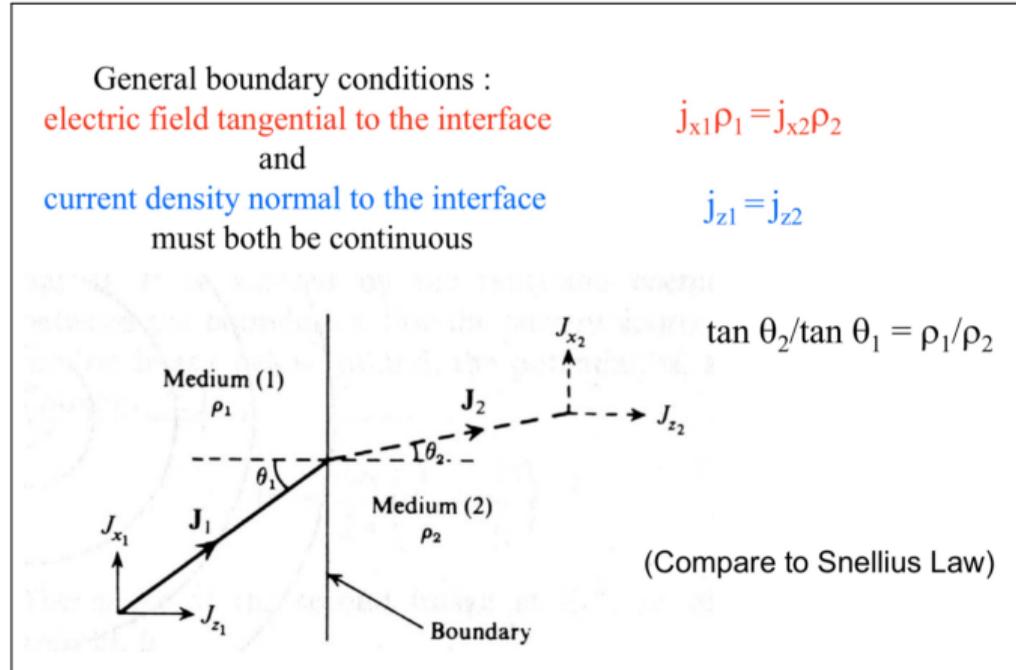
Brechungsgesetz für Stromlinien

General boundary conditions :
 electric field tangential to the interface
 and
 current density normal to the interface
 must both be continuous

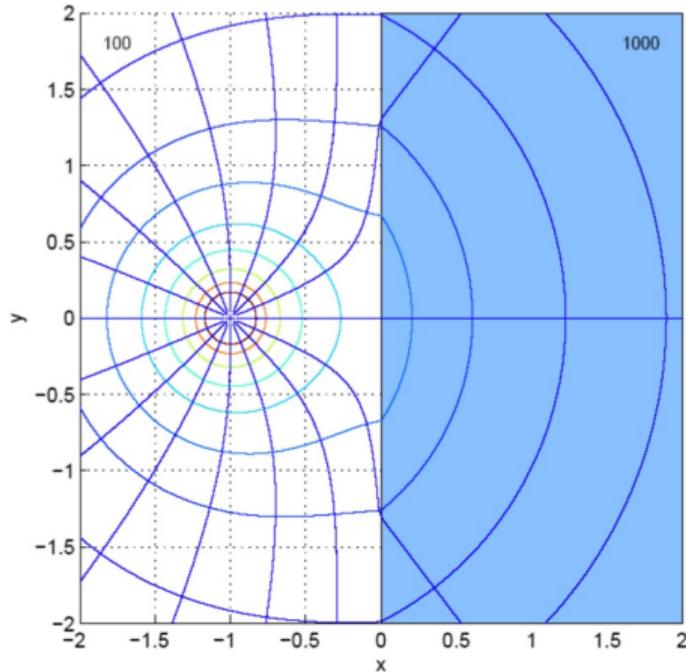
$$j_{x1}\rho_1 = j_{x2}\rho_2$$

$$j_{z1} = j_{z2}$$

$$\tan \theta_2 / \tan \theta_1 = \rho_1 / \rho_2$$

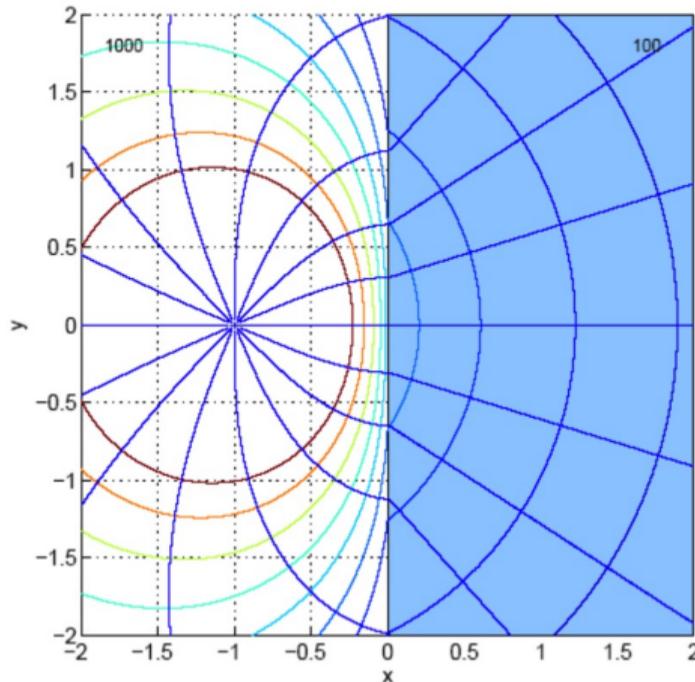


Brechung von Stromlinien



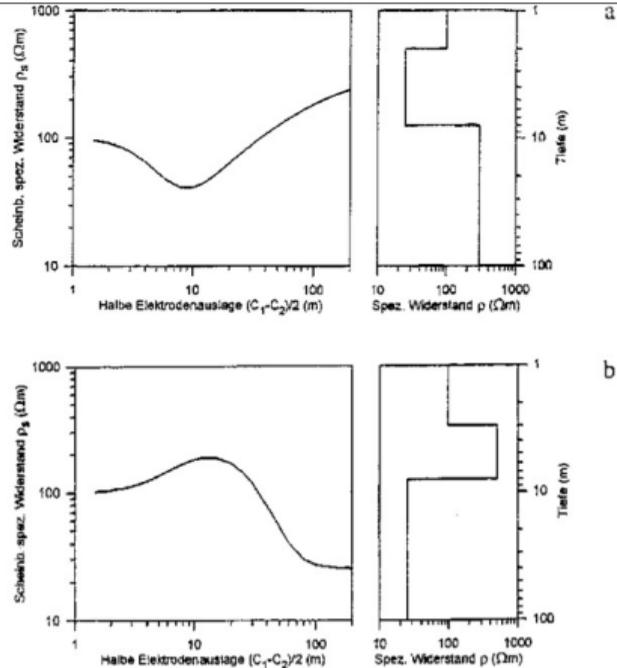
- Übergang vom guten zum schlechten Leiter
- Stromlinien im guten Leiter werden von der Grenzfläche „abgestossen“.
- Stromdichte ist geringer in schlechtleitender Schicht

Brechung von Stromlinien



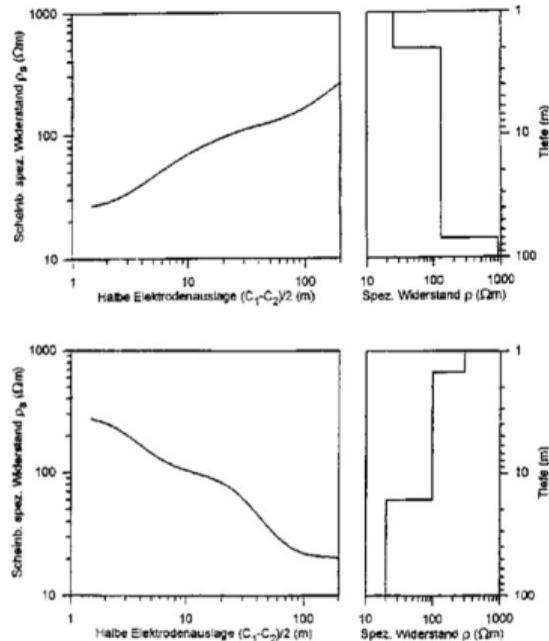
- Übergang vom schlechten zum guten Leiter
- Stromlinien im guten Leiter werden "angezogen"
- Stromdichte ist höher in gutleitender Schicht

Sondierungskurve bei 3 Schichten



- Ein guter bzw. schlechter Leiter im Bereich der Eindringung äußert sich als ein Minimum bzw. Maximum der Sondierungskurve
- Der Betrag von ρ_a gibt nicht die tatsächlichen spezifischen Widerstände im Untergrund wieder

Sondierungskurve bei 3 Schichten

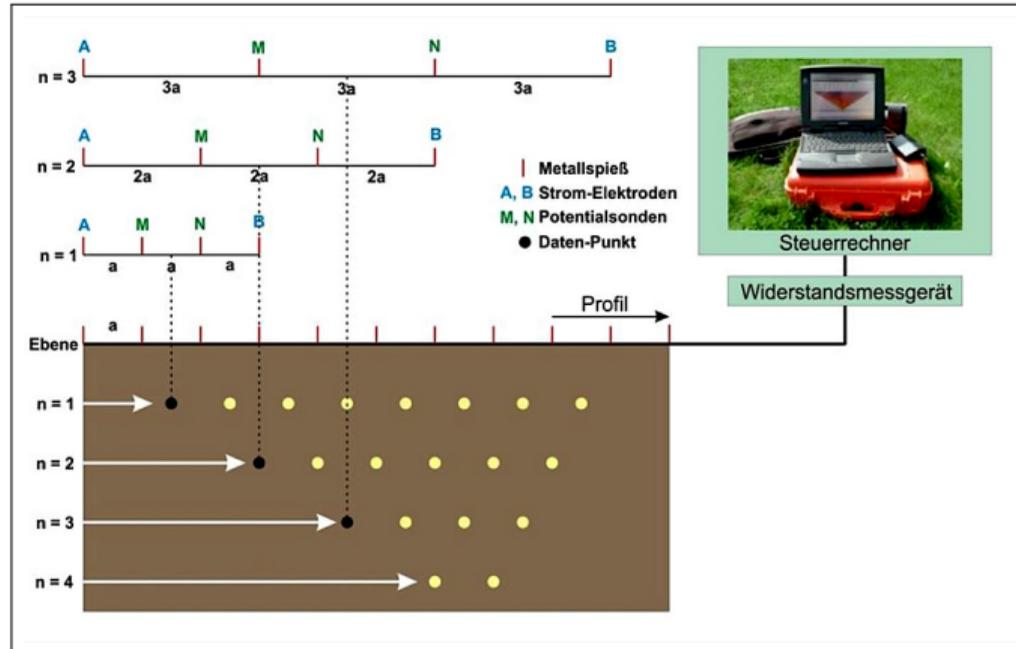


- Ein kontinuierliche Abnahme/Zunahme des tatsächlichen spezifischen Widerstandes mit der Tiefe äußert sich als kontinuierliche Abnahme/Zunahme des scheinbaren spez. Widerstandes ρ_a in der Sondierungskurve

Agenda

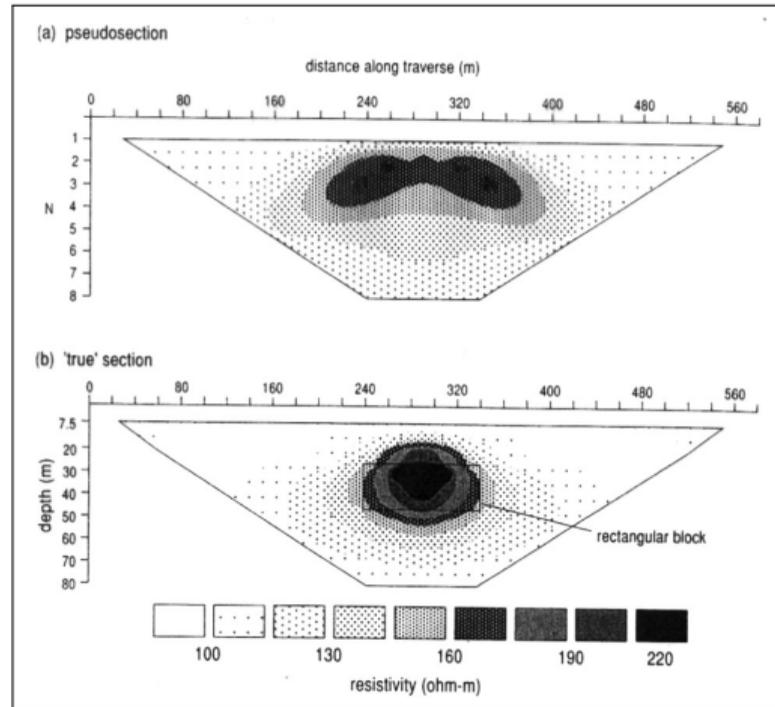
- Einführung und Anwendungsgebiete
- Physikalische Grundbegriffe
- Vier-Punkt Anordnungen
- Tiefensondierung
- **Kartierung**
- Beispiel einer Widerstandstomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

Kartierung mit der Wenner-Konfiguration



Zuordnung von ρ_a in den Tiefenpunkt. Kein wahres Abbild sondern nur Kartierung von Anomalien.

Kartierung mit der Wenner-Konfiguration



- Eine Pseudosektion zeigt scheinbare spez. Widerstände ρ_a .
- Anomalien in ρ_a lassen sich gut erfassen.
- Eine anschließende Tiefensondierung/Tomographie nötig, um ρ_{true} zu bestimmen.

Agenda

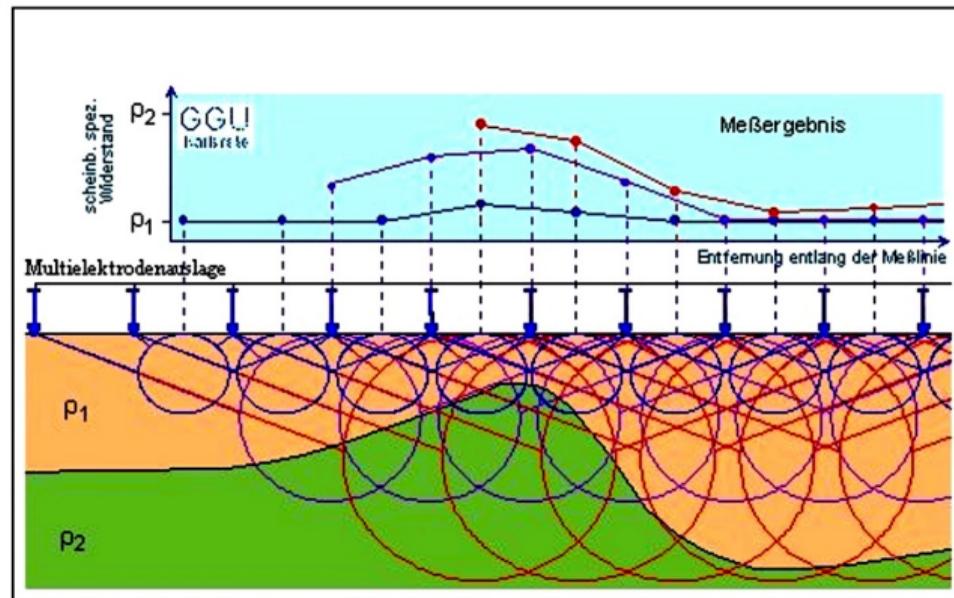
- Einführung und Anwendungsgebiete
- Physikalische Grundbegriffe
- Vier-Punkt Anordnungen
- Tiefensondierung
- Kartierung
- **Beispiel einer Widerstandstomographie**
- Zusammenfassung
- Referenzen

Widerstandstomographie

Bei komplexen (nicht geschichteten) Widerstandsverteilungen ist die Durchführung einer Widerstandstomographie erforderlich (engl. ERT=Electrical Resistivity Tomography).

- Messung verschiedener Konfigurationen mit verschiedenen Geometriefaktoren
- Rekonstruktion eines Modells, das alle beobachteten scheinbaren spez. Widerstände ρ_a möglichst gut erklärt.
- Tomographie liefert ein 2D-Modell des spez. Widerstandes $\rho(x, z)$ unter dem Messprofil.
- Die Modelle sind nicht unbedingt eindeutig.

Widerstandstomographie



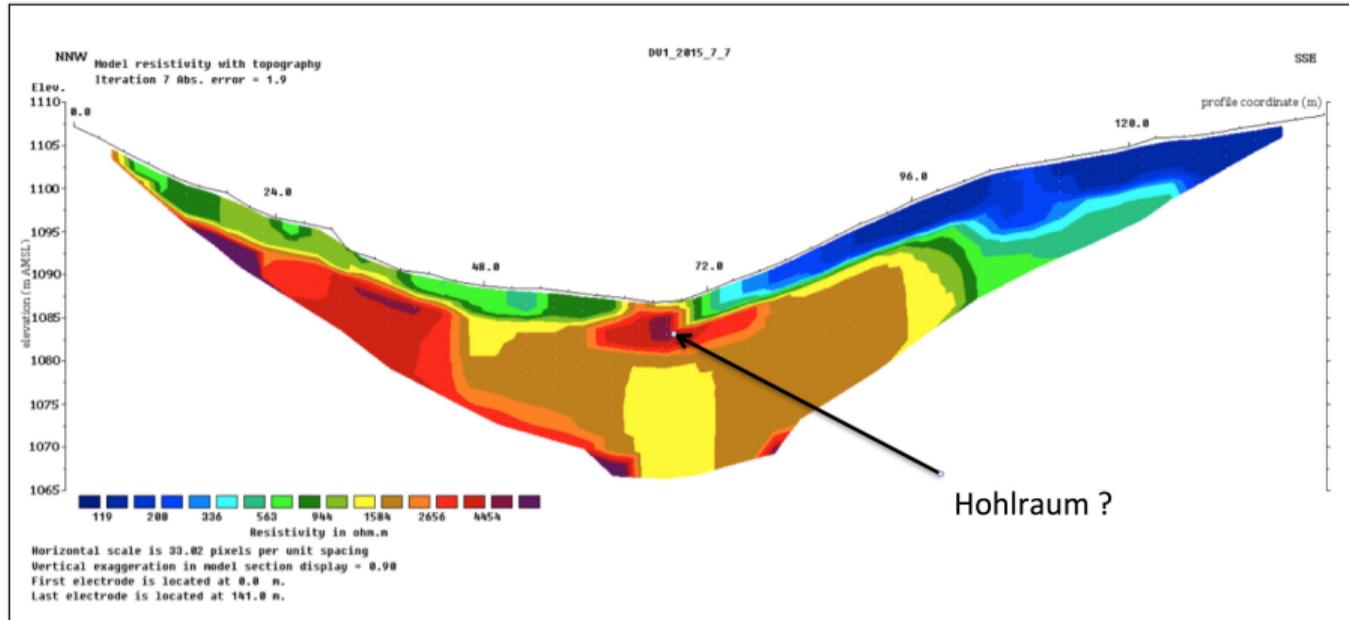
Widerstandstomographie im Kleinwalsertal 2015



Profil 1

- Ziel: Detektion unterirdischer Wasserkanäle oder Hohlräume im Kleinwalsertal
- Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Goldscheider, Hydrogeologie, KIT
- Bachelorarbeit Svenja Schaneng, 2015 (Schaneng 2015)

Ergebnis der Tomographie auf Profil 1

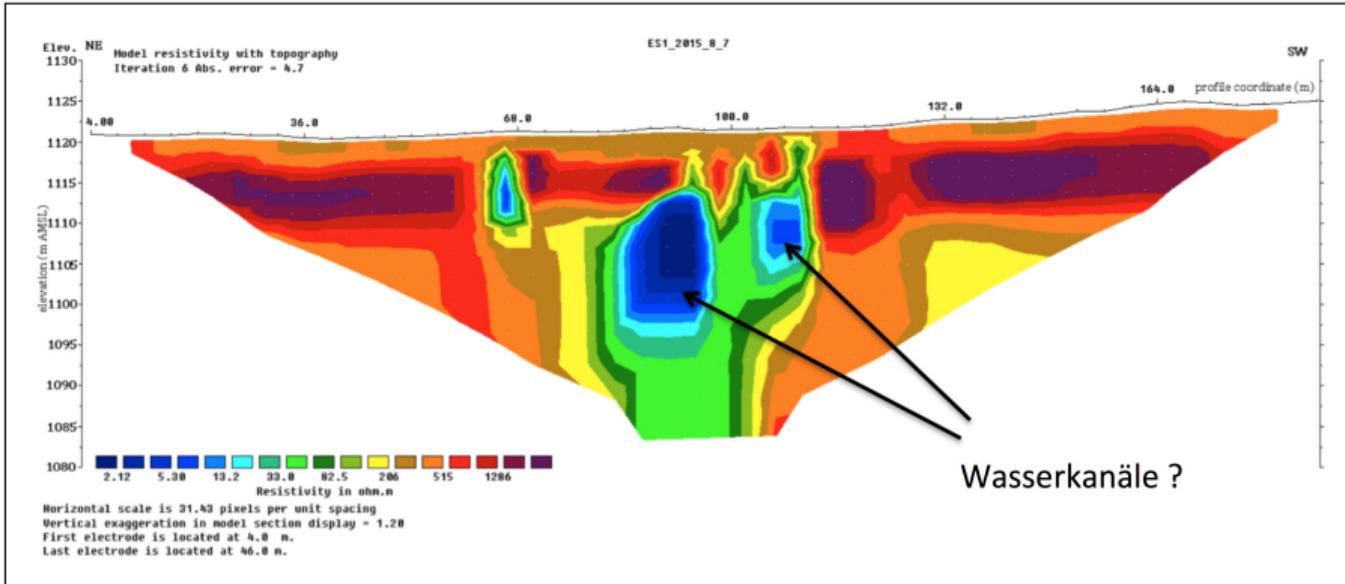


Der Bereich hoher Widerstände in der Talmitte wird als luftgefüllter Wasserkanal interpretiert.

Messungen auf Profil 2



Ergebnis der Tomographie auf Profil 2



Die Bereiche niedriger Widerstände in der Talmitte werden als wassergefüllte Kanäle interpretiert.

Agenda

- Einführung und Anwendungsgebiete
- Physikalische Grundbegriffe
- Vier-Punkt Anordnungen
- Tiefensondierung
- Kartierung
- Beispiel einer Widerstandstomographie
- **Zusammenfassung**
- Referenzen

Zusammenfassung

- Die Zielgröße in der Geoelektrik ist der spezifische elektrische Widerstand $\rho(x, y, z)$ im Untergrund.
- Zu deren Bestimmung wird i.d.R. ein Ohmsches Experiment durchgeführt: in einer Vierpunkt-Anordnung von 2 Sonden (A,B) und 2 Elektroden (M,N) mit dem Geometriefaktor K wird bei einem in (A,B) eingespeisten Strom I die Potentialdifferenz ΔV an (M,N) gemessen.
- Die abgeleitete Messgröße in der Geoelektrik ist der scheinbare spezifische elektrische Widerstand $\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$.
- Eine Inversion (Least-Squares-Fit) von ρ_a liefert den wahren spezifischen Widerstand ρ im Untergrund.
 - Die Tiefensondierung mit der Schlumberger-Konfiguration liefert die Sondierungskurve $\rho_a(L/2) \rightarrow \rho(z)$.
 - Die Wenner-Kartierung ergibt Pseudosektionen $\rho_a(x, z)$, in denen sich Anomalien von $\rho(x, z)$ abbilden.
 - Die Widerstandtomographie führt eine Rekonstruktion $\rho_a(K, L) \rightarrow \rho(x, z)$ durch.
- Der spezifische elektrische Widerstand wird vor allem beeinflusst durch den Wassergehalt, die Porosität und den Tongehalt.
- Anwendungen sind daher vor allem hydrologische Fragestellungen, z.B. die Kartierung von Fließwegen des Grundwassers.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

✉ Thomas.Bohlen@kit.edu

🔗 <http://www.gpi.kit.edu/>

Veröffentlicht unter  Lizenz.

Agenda

- Einführung und Anwendungsgebiete
- Physikalische Grundbegriffe
- Vier-Punkt Anordnungen
- Tiefensondierung
- Kartierung
- Beispiel einer Widerstandstomographie
- Zusammenfassung
- **Referenzen**

Referenzen

Knödel, K., Krummel, H. & Lange, G. (2005), *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten / BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe* Bd. 3: *Geophysik*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

URL: <http://dx.doi.org/10.1007/b137869>

Schaneng, S. (2015), 'Goelektrische Tomografien und Seismik für die Detektion von Karstgrundwasserleitern im Schwarzwassertal'.

URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000052723>