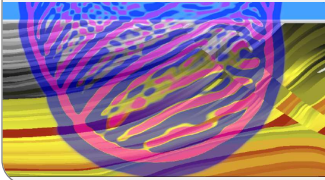


# Einführung in die Geophysik I

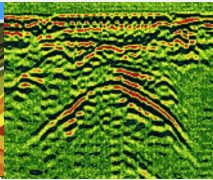
## Geoelektrik

Thomas Bohlen, Geophysikalisches Institut, Fakultät für Physik

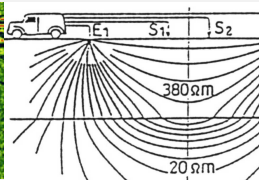
Seismik



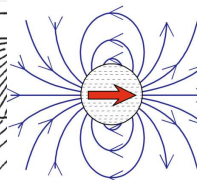
Georadar



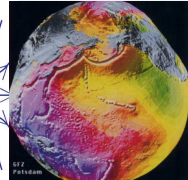
Geoelektrik



Magnetik



Gravimetrie



# Inhalte der Vorlesung im Semester WS 2022/23

- |                                |                       |
|--------------------------------|-----------------------|
| 1 Einführung                   | (02.11)               |
| 2 Seismische Wellenausbreitung | (02.11, 09.11)        |
| 3 Refraktionsseismik           | (16.11)               |
| 4 Reflexionsseismik            | (23.11)               |
| 5 Elektromagnetische Verfahren | (30.11, 07.12, 14.12) |
| 6 Geoelektrik                  | (11.01)               |
| 7 Gravimetrie                  | (18.01, 25.01)        |
| 8 Magnetik                     | (01.02, 08.02)        |

Die Klausur findet voraussichtlich am 15.02.2023 statt.

# 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

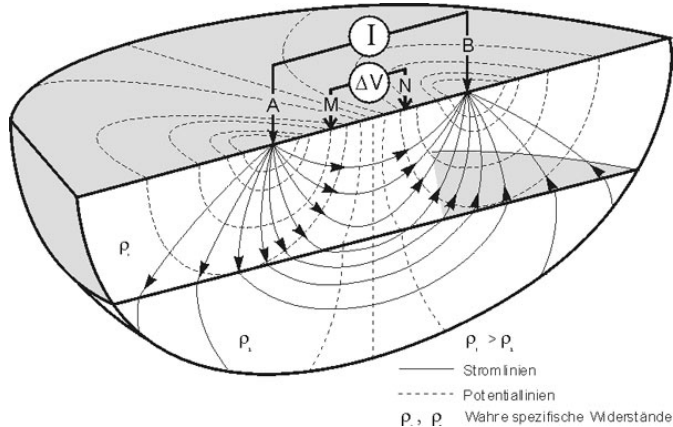
# Agenda

- 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  $\Delta V$
- 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

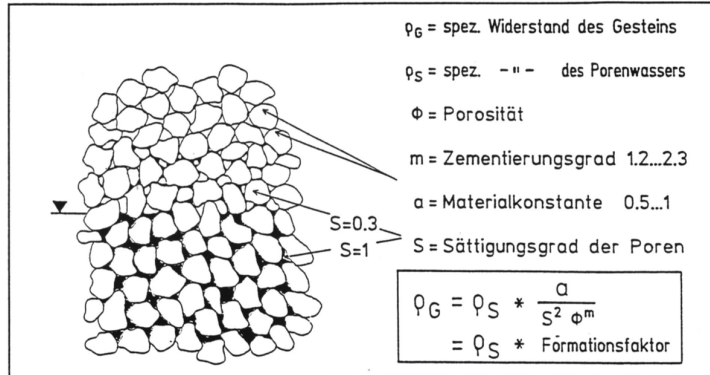
| Gestein          | spez. Widerstand [ $\Omega\text{m}$ ] |
|------------------|---------------------------------------|
| Steinsalz        | $10^5 - 10^7$                         |
| Sand trocken     | $10^5$                                |
| wassergesättigt  | $1000 - 10^4$                         |
| 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

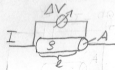
# Agenda

- 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

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

$\Delta V$ : Potentialdifferenz [V]

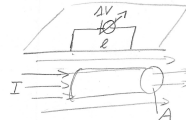
$I$ : Stromstärke [A]  
Ladungsmenge/zeit

$R$ : Ohmscher Widerstand [ $\Omega$ ]

$S$ : spez. elekt. wid. [ $\Omega m$ ]

$S^{-1} = \sigma$  spez. elekt. Leitfähigkeit [ $\Omega m^{-1}$ ]

### Geoelektrik (Erde)



Elektrische Feldstärke

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

Elektrische Stromdichte

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

$$|\vec{E}| \cdot l = \Delta V = S \frac{l}{A} \cdot |\vec{j}| A$$

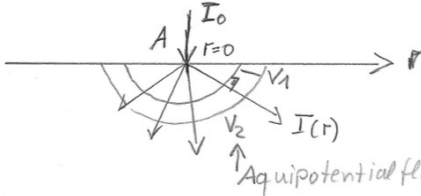
$$|\vec{E}| = S |\vec{j}| \quad \text{Ohmsches Gesetz}$$

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

# 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  $V(r)$   
 $\vec{E} = -\text{grad } V = \rho \vec{j}$

Aquipotentialflächen

Ableitungsverhalten des Stroms  $I$  und des Potentials  $V$

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

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

# Ein Monopol an einem homogenen Halbraum

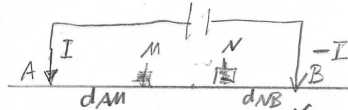
$$E := |\vec{E}| = |-\text{grad} V| = -\frac{dV}{dr} \Rightarrow V = -\int E dr = -\frac{\rho I_0}{2\pi} \int_0^r \frac{1}{r^2} dr$$

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

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

# Vier-Punkt Anordnung

Betrachten wir die folgende 4-Punktanordnung



Das Potential im Punkt M<sup>N</sup> beträgt  
neg. Strom an B

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

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

# 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

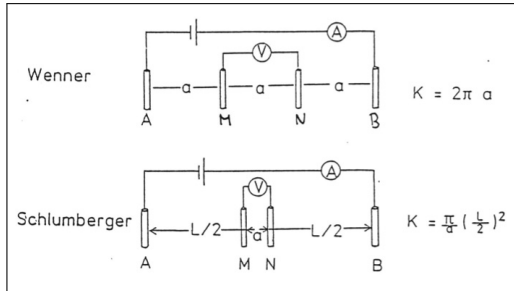
$$= \frac{\rho I}{K}$$

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

Die Meßgröße  $S_a := -K \frac{\Delta V}{I}$  heißt  
 "scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand"



# Typische Vier-Punkt Anordnungen

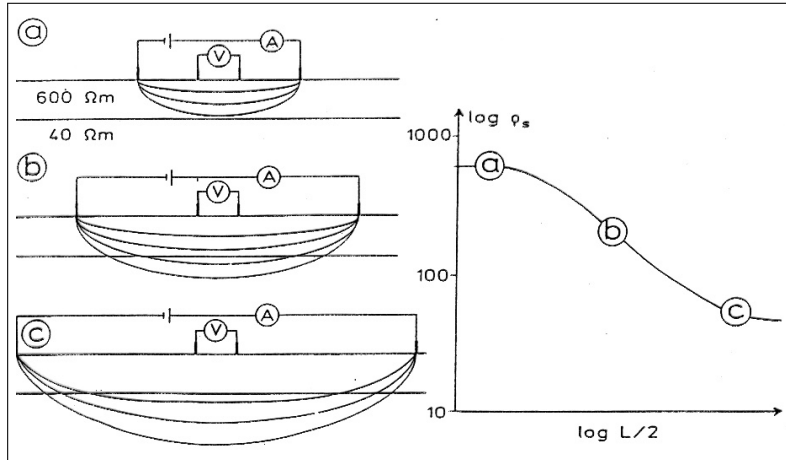


- Scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand  $\rho_a = K \frac{V}{I}$
- Schlumberger: Tiefensondierung
- Wenner: Kartierung

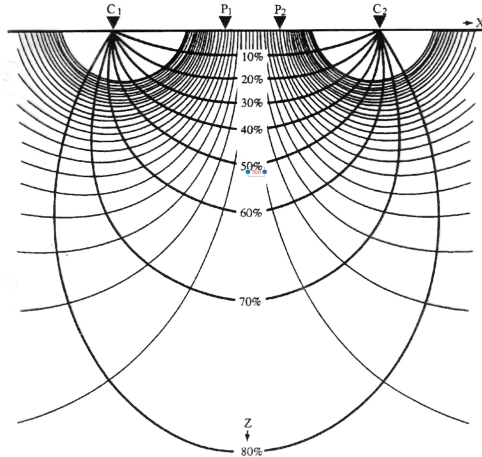
# Agenda

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

# Entstehung der Sondierungskurve

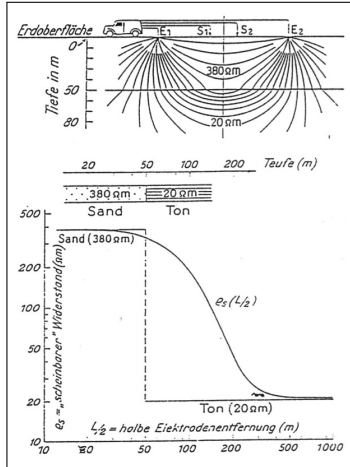


# Tiefeneindringung



- 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  $\rho_a$  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

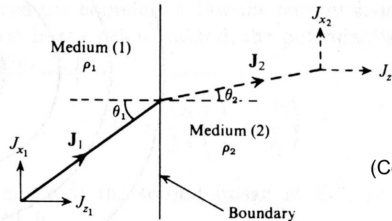
General boundary conditions :  
**electric field tangential to the interface**  
and  
**current density normal to the interface**  
must both be continuous

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

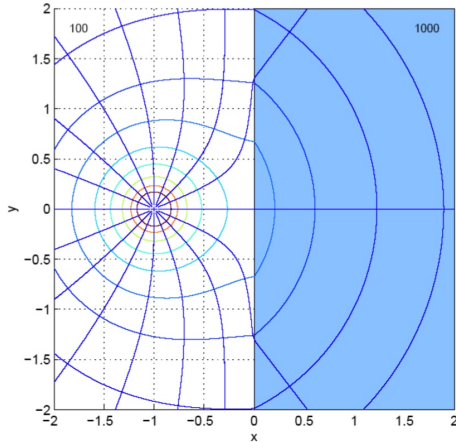
$$j_{z1} = j_{z2}$$

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

(Compare to Snellius Law)

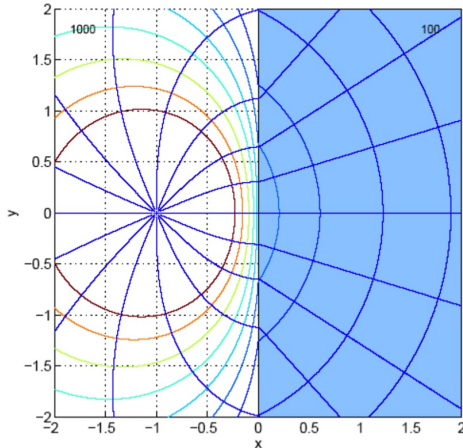


# Brechung von Stromlinien



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

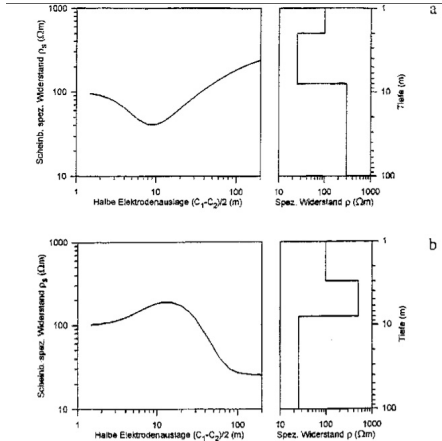
# Brechung von Stromlinien



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

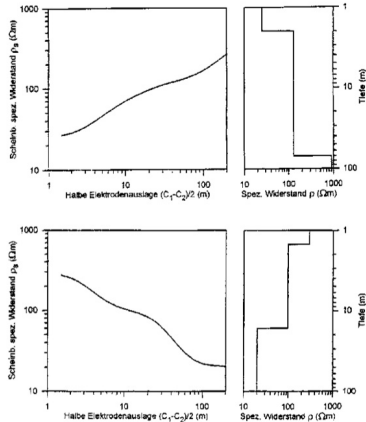


# Sondierungskurve bei 3 Schichten



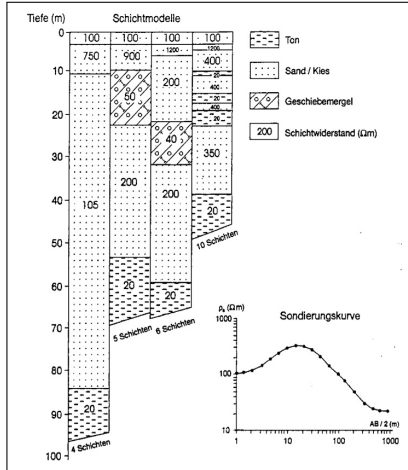
- Ein guter bzw. schlechter Leiter im Bereich der Eindringung äußert sich als ein Minimum bzw. Maximum der Sondierungskurve
- Der Betrag von  $\rho_a$  gibt nicht die tatsächlichen spezifischen Widerstände im Untergrund wieder

# 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  $\rho_a$  in der Sondierungskurve

# Mehrdeutigkeiten bei der Tiefensondierung

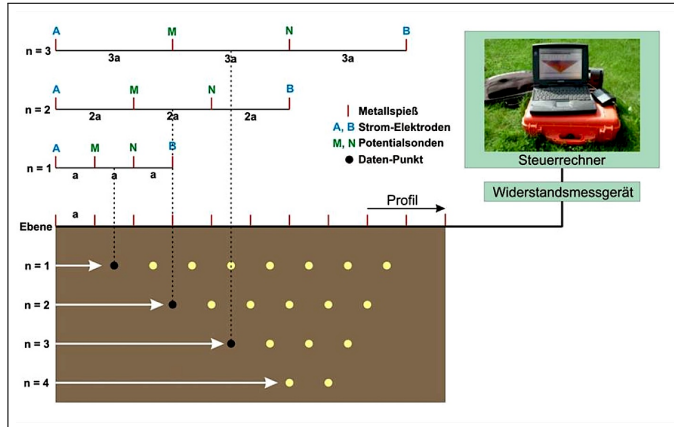


- Es existieren verschiedene Modelle  $\rho(z)$ , die die Sondierungskurve  $\rho_a(L/2)$  gleich gut erklären
- Einbeziehung unabhängiger Informationen notwendig

# Agenda

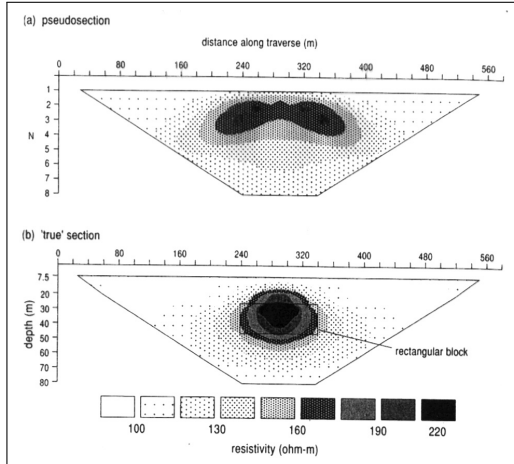
- Einführung und Anwendungsgebiete
- Physikalische Grundbegriffe
- Vier-Punkt Anordnungen
- Tiefensondierung
- **Kartierung**
- Beispiel einer Widerstandstomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

# Kartierung mit der Wenner-Konfiguration



Zuordnung von  $\rho_a$  in den Tiefenpunkt. Kein wahres Abbild sondern nur Kartierung von Anomalien.

# Kartierung mit der Wenner-Konfiguration



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

# Agenda

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

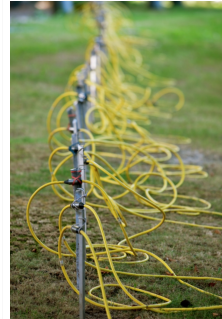
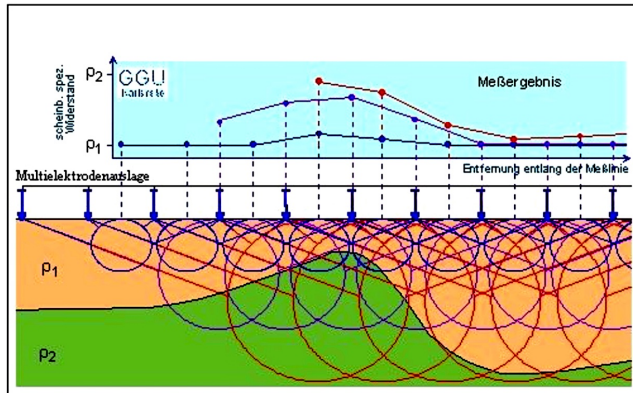
# Widerstandstomographie

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  $\rho_a$  möglichst gut erklärt.
- Tomographie liefert ein 2D-Modell des spez. Widerstandes  $\rho(x, z)$  unter dem Messprofil.
- Die Modelle sind nicht unbedingt eindeutig.



# Widerstandstomographie



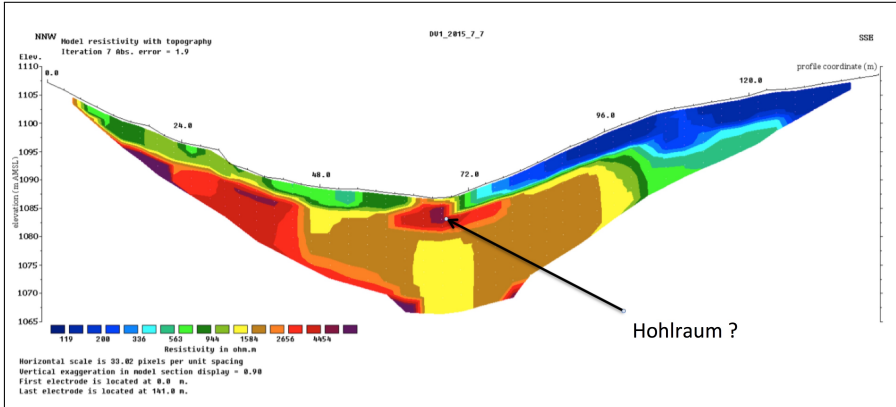
# Widerstandstomographie im Kleinwalsertal 2015



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

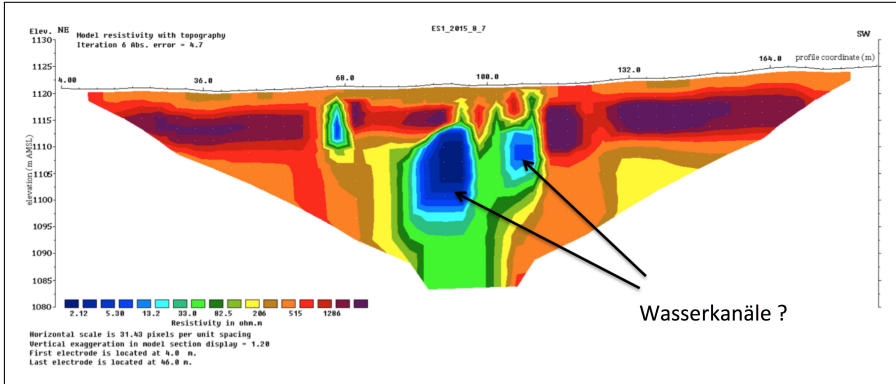


Der Bereich hoher Widerstände in der Talmitte wird als luftgefüllter Wasserkanal interpretiert.

# 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  $\Delta V$  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  $\rho_a$  liefert den wahren spezifischen Widerstand  $\rho$  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 hydologische 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), 'Geelektrische Tomografien und Seismik für die Detektion von Karstgrundwasserleitern im Schwarzwassertal'.

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