

Goethe – Universität Frankfurt am Main
Institut für Didaktik der Physik
Max-von-Laue-Straße 1
60438 Frankfurt am Main

Entwicklung eines Schülerlabors zur Geoelektrik

Wissenschaftliche Hausarbeit im Rahmen der ersten Staatsprüfung für das Lehramt
an Gymnasien im Fach Physik

10.05.2017

Eingereicht dem Landesschulamt Hessen

– Prüfungsstelle Frankfurt am Main –

Vorgelegt von:

Peter Albert Kunert

Betreuer:

Prof. Dr. Thomas Wilhelm (Institut für Didaktik der Physik – Goethe-Universität)

Prof. Dr. Andreas Junge (Institut für Geophysik – Goethe-Universität)

Die Natur wird allein verständlich, wenn man die verschiedensten isoliert scheinenden Phänomene in methodischer Folge darzustellen bemüht ist.

Johann Wolfgang von Goethe

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonders herzlich möchte ich mich bei Prof. Dr. Thomas Wilhelm bedanken, der mich auf dieses Thema hingewiesen hat und mir während der Zeit der Anfertigung mit Rat und Hilfe zur Seite stand.

Ebenso herzlich bedanke ich mich bei Prof. Dr. Andreas Junge für die Anregungen zu Experimenten und für die Hilfen aus dem Bereich der Geophysik.

Besonders danke ich Christoph Kalden für die große Unterstützung in allen technischen Fragen, beim Aufbau und der Durchführung der Experimente.

Michael Wenzel danke ich für die Vorbereitung und Hilfe bei der Durchführung und der Organisation der Schülerlabortage.

Meiner Freundin Christiane Zentner danke ich ganz besonders dafür, dass sie mich während der Zeit der Anfertigung dieser Arbeit in allen Belangen unterstützt hat, vor allem für das sehr gewissenhafte Korrekturlesen dieser Arbeit.

Dr. Mario Vormstein und Elke Schäfer danke ich ebenfalls für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich während meiner Studienzeit immer unterstützt haben und mich ermutigt haben, meine Ziele zu verfolgen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Geophysik	3
3. Gleichstromgeoelektrik	4
4. Theoretische Grundlagen der Geoelektrik	6
4.1 Die elektrische Leitfähigkeit	6
4.1.1 Elektronische Leitfähigkeit	7
4.1.2 Elektrolytische Leitfähigkeit	7
4.1.3 Grenzflächenleitfähigkeit	9
4.1.4 Beispiele	10
4.2 Grundgleichungen der Gleichstromgeoelektrik	11
4.2.1 Potential einer Punktelektrode	15
4.2.2 Potential zwischen zwei Punktelektroden	17
4.3 Das Messprinzip	18
4.4 Messanordnungen	23
4.4.1 Die Wenner-Anordnung	23
4.4.2 Die Schlumberger-Anordnung	24
4.4.3 Tomographie	25
4.5 Stromverteilung im Untergrund	26
4.6 Verhalten an Grenzflächen	29
5. Schülerlabor	31
5.1 Grundlagen Schülerlabor	31
5.2 Experimente im Physikunterricht	33
5.3 Computereinsatz im Physikunterricht	35
5.4 Texte im Physikunterricht	36
5.5 Schülerlabor im Kerncurriculum gymnasiale Oberstufe	37
5.6 Schülerlabor Geophysik	38

6. Laborversuche zur Geophysik	39
6.1 Station 1 - Versuch: Widerstandsmessung am Draht.....	40
6.2 Station 2 - Versuch: Widerstandsmessung unterschiedlicher Materialien in kleinen Wannen.....	47
6.3 Station 3 - Versuch: Widerstandsmessung von unterschiedlichen Störkörpern in großer Wanne	56
6.4 Station 4 - Textstation: Geoelektrik in Forschung und Praxis	77
7. Durchführung des Schülerlabors	80
7.1 Station 1	82
7.2 Station 2	83
7.3 Station 3	85
7.4 Station 4	89
8. Zusammenfassung und Ausblick	90
9. Literaturverzeichnis	92
10. Selbstständigkeitserklärung.....	98
11. Anhang.....	99

1. Einleitung

In einer zunehmend technisierten und vernetzten Welt kommt den Naturwissenschaften eine besondere Bedeutung zu. Um sich den Anforderungen zu stellen und vor allem die Fähigkeit zu entwickeln, kritische Fragen zu stellen und auf befriedigende Antworten zu bestehen, wird vorausgesetzt, dass man sich mit den Fragen der Lebenswelt fundiert auseinander setzen kann. Der Schule und den Lernenden kommt dabei eine besondere Aufgabe zu. Zum einen müssen die wissenschaftlichen Inhalte vermittelt, zum anderen die Lernenden motiviert werden sich mit diesen Lerngegenständen auseinanderzusetzen.

Bei Lernenden gelten oftmals jedoch die Naturwissenschaften und die Mathematik als schwer zugänglich und lebensfern. Besonders die Physik gilt als sperrig, abstrakt und ohne große Relevanz für den Alltag im späteren Leben. Der Physik wird wenig gesellschaftliche Bedeutung beigemessen. Diesen Irrtum zu revidieren ist u.a. Aufgabe der Lehrenden.

Besonders motivierend für die Lernenden ist es, fächerverbindend und fächerübergreifend zu arbeiten. Gerade hier bietet die Physik vielfältige Chancen. Bewegungsabläufe im Sport, Beschleunigungen und Bremsvorgänge bei Autofahrten oder die Energieversorgung, berühren die unmittelbare Lebenswelt der Lernenden.

Die knapper werdenden Ressourcen an Mineralien und Bodenschätzen, besonders der fossilen Brennstoffe und Trinkwasser erzwingen eine noch bessere Erforschung des Bodens und seiner Schätze, möglichst unter Vermeidung von Zerstörungen. Dies ist eine der Aufgaben der Geophysik.

In dieser wissenschaftlichen Hausarbeit soll herausgearbeitet werden, wie sich angewandte Physik, hier als Beispiel die Geophysik, in den Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe einbinden lässt. Man kann davon ausgehen, dass sowohl die Lernenden als auch die Lehrenden kaum differenzierte Vorstellungen von deren Anwendungsbreite haben.

In der Schule bietet sich selten die Gelegenheit, eine Verbindung zwischen Geowissenschaften und Physik zu schaffen. Diese Verbindung umfasst in der außerschulischen Lebenswelt große Aufgabengebiete mit weitreichenden Problemstellungen,

deren Lösungen von erheblicher gesellschaftspolitischer Bedeutung sind. Der Lehrenden hat die Aufgabe, die Lernenden zu motivieren und zu sensibilisieren, sodass sie die Bedeutung der zu lösenden Probleme erfassen.

Diese Relevanz den Lernenden Themen der Geophysik näher zu bringen, sie zu motivieren, kritisch zu denken und zu zeigen, welche Möglichkeiten insbesondere die Physik bietet, hat mich bewogen, mich mit diesem Thema näher zu befassen. Eine Möglichkeit, geophysikalische Themen schülergerecht aufzuarbeiten, bietet beispielsweise ein Schülerlabor

Das Spektrum der geophysikalischen Methoden ist sehr umfangreich. Es schließt die Methoden der Geoelektrik, der Geomagnetik, des Georadars und der Seismik ein. Dies alles eingehend zu behandeln, würde über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen.

Ich habe mich daher auf das Teilgebiet der Gleichstromgeoelektrik beschränkt und dazu ein Schülerlabor entwickelt.

2. Geophysik

Die Geophysik beschreibt im weitesten Sinne die Physik der Erde. Sie ist sowohl den Geowissenschaften als auch der Physik zugeordnet [1: S. 1]. Ziel der geophysikalischen Forschung ist die Untersuchung der Oberfläche und des Inneren der Erde mit physikalischen Methoden.

Dabei wird eine Vielzahl von Teilgebieten mit dem Ziel erforscht, Aufschlüsse über geologische Strukturen zu erhalten, Prozesse zu beobachten und zu beschreiben, Zustände zu erkennen und einzuordnen. Daneben ist die direkte Forschungsarbeit (wie beispielsweise Untersuchungen in Bohrlöchern) nur ein kleiner Teil der Arbeit eines Geophysikers. Wesentlicher Bestandteil der Arbeit sind indirekte Forschungen auf Grundlage der theoretischen Physik [2].

In der angewandten Geophysik wird durch Vermessung physikalischer Felder nahe der Erdoberfläche auf physikalische Vorgänge und Eigenschaften im Erdinneren geschlossen [1: S. 3 ff.]. Besondere Bedeutung haben diese bei der Suche nach Rohstoffen, wie Gas, Wasser, Erdöl und Eisen. Untersuchungen von Deponien, Baugründen, Deichbauten, Altlasten und die Suche nach geeigneten Endlagerstätten gehören ebenfalls zum Untersuchungsbereich und zeigen die volkswirtschaftliche und gesellschaftspolitische Bedeutung der Geophysik auf. Die Überwachung von Vulkanen und Beobachtungen in erdbebengefährdeten Gebieten sind ebenso wichtig und von erheblicher, humanitärer und volkswirtschaftlicher Bedeutung [1: S. 3 ff.][2].

Auch wenn letzteres die Lernenden nicht unmittelbar betrifft, im europäischen Raum ist eine immer bessere Kenntnis für die gefährdeten Regionen von erheblicher sozialer und wirtschaftlicher Bedeutung.

Eine zeitlich großzügige Teilnahme der Lernenden an Feldmessungen ist aufgrund des gedrängten Lehrplans und des erheblichen Aufwandes in der Regel nicht möglich, da die meisten Messungen im Gelände durchgeführt werden.

Deshalb, aber auch um den Anforderungen des Lehrplans zu genügen, die Lernenden an außerschulische Lernorte heranzuführen, bietet es sich an, in einem Schülerlabor auf Schülerniveau reduzierte Experimente durchzuführen.

3. Gleichstromgeoelektrik

Die Gleichstromgeoelektrik gehört zu den geophysikalischen Methoden, die zur Untersuchung von oberflächennahen Schichten der Erde eingesetzt werden. Sie arbeitet mit technisch erzeugten stationären Feldern und Strömen [9, S. 128]. Ziel ist es, mittels der elektrischen Leitfähigkeit, Informationen über die Struktur des Untergrundes des Gesteins zu erhalten. Der spezifische elektrische Widerstand ρ bzw. die elektrische Leitfähigkeit σ des Untergrundes sind grundlegende Parameter des Gesteins.

Der spezifische Widerstand wird in Ωm (Ohmmeter) gemessen und ist der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit. Die elektrische Leitfähigkeit misst, wie gut ein Material elektrischen Strom leitet. Der spezifische elektrische Widerstand kann sehr stark variieren [4]. So erreicht beispielsweise Kupfer einen Widerstandswert von $10^{-7} \Omega\text{m}$, während Diamant einen Widerstandswert von $10^{18} \Omega\text{m}$ aufweist [3: S. 17].

Der spezifische Widerstand kann auch innerhalb eines Materials stark variieren, da er von verschiedenen Faktoren, wie der Wassersättigung, dem Salzgehalt und der Porosität und der Füllung des Bodenraumes abhängt [3: S. 18][5]. Er sinkt mit steigender Wassersättigung, wachsendem Anteil toniger Bestandteile und zunehmendem Ionen- bzw. Salzgehalt des Porenraumes.

Die durch die Messungen von ρ bzw. σ erhaltene räumliche Verteilung lässt Rückschlüsse auf die Struktur des Untergrundes zu [3: S. 16][5].

Bei der Gleichstromgeoelektrik speist man über zwei Elektroden einen Strom bekannter Stromstärke in einen leitfähigen Untergrund ein. An zwei weiteren Sonden misst man eine Spannung. Die Stromdichte im Untergrund bestimmt diese Spannung. Aus dem Verhältnis zwischen Strom, Spannung und Abstand der Elektroden bzw. Sonden kann der elektrische Widerstand bzw. die Leitfähigkeit bestimmt werden. Die Veränderung des Elektrodenabstandes bestimmt die Eindringtiefe der Messung.

Eine ausführliche Beschreibung der Theorie und der Messmethoden erfolgt in Kapitel 4.

Die durch zerstörungsfreie Messungen erhaltenen Ergebnisse geben unter anderem Auskunft über Unregelmäßigkeiten im Aufbau des Bodens und über die Verhältnisse im Untergrund.

Aus diesen Gründen verwendet man die Gleichstromgeoelektrik zur Erkundung von:

- Altablagerungen, Altstandorten, Deponien, Abstromfahnen von Schadstoffen, Hohlräumen, Fundamenten,
- Rohstoffvorkommen und Lagerstätten,
- Grundwasservorkommen,
- unterschiedlichen lithologischen Ablagerungen im Untergrund für die Einschätzung des Baugrundes (Deiche und Dämme)
- und archäologischen Objekten.

[6][7]

4. Theoretische Grundlagen der Geoelektrik

In der Regel haben Lehrende, Studierende und Lernende kaum Berührungspunkte mit dem Forschungsgebiet der Geophysik und speziell der Geoelektrik. Deshalb werden hier die theoretischen Grundlagen behandelt, soweit sie für das Verständnis des Untersuchungsgegenstandes benötigt werden.

Zur weiteren Vertiefung der Theorie kann im Vorlesungsskript „Geoelektrik“ von Ralph-Uwe Börner [3] sowie im Lehrbuch „Geophysik“ von Knödel, Krummel und Lange [9] nachgelesen werden.

Für die Grundlagen der Elektrizitätslehre empfehlen sich die Lehrbücher von Demtröder [10], sowie Halliday oder Tipler.

4.1 Die elektrische Leitfähigkeit

Grundlage aller geoelektrischen Untersuchungen ist die elektrische Leitfähigkeit. Sie kann je nach Material stark variieren und ist abhängig von der Wassersättigung, dem Chemismus der Porenwässer (Salzgehalt) und der Lithologie (Porenraumstruktur) [9: S. 89]. Sie steigt mit zunehmender Wassersättigung, wachsendem Anteil toniger Bestandteile und steigendem Ionengehalt der elektrolytischen Porenfüllung [9: S. 89]. Gleichzeitig sinkt der spezifische Widerstand [3: S. 19].

Die elektrische Leitfähigkeit kann drei Ursachen haben:

- Elektronische (metallische) Leitfähigkeit,
- Elektrolytische Leitfähigkeit,
- Grenzflächenleitfähigkeit.

4.1.1 Elektronische Leitfähigkeit

Die elektronische Leitfähigkeit trockener Gesteine ist sehr gering, folglich ist ihr spezifischer Widerstand sehr hoch. Der Stromfluss erfolgt bei diesem Leitungsprozess durch freie Elektronen. Elektronische Leitfähigkeit kann man bei geoelektrischen Messungen bei metallhaltigen Erzen, Kohlenstoffverbindungen (z.B. Graphit) und Metallen erwarten [3: S. 20] [9: S. 90].

4.1.2 Elektrolytische Leitfähigkeit

Befindet sich eine wässrige Lösung in den Poren eines Gesteins, so führt dies zu einer elektrolytischen Stromleitung und dadurch zu einer sehr starken Erhöhung der Leitfähigkeit. Dabei wird der Ladungstransport von den Ionen der im Wasser gelösten Salze übernommen, wobei die Voraussetzung für das Entstehen eines Stromflusses die galvanische Kopplung der Wassereinschlüsse ist [3: S. 21][9: S. 90].

Bereits ein durchgehender dünner Feuchtigkeitsfilm kann selbst bei niedriger Wassersättigung die elektrische Leitfähigkeit erhöhen. Die Leitfähigkeit umfasst mit Werten von $10^{-18} \left[\frac{S}{m} \right]$ für Diamant und $10^7 \left[\frac{S}{m} \right]$ für Kupfer einen Bereich von 25 Dekaden. Die zu untersuchenden Bodenschichten liegen nahe der Erdoberfläche und sind dadurch zumindest teilgesättigt, so dass ihre Leitfähigkeit von der Porenfüllung und dem Porenraum bestimmt wird [3: S. 17][9: S. 90].

Die Leitfähigkeit teilgesättigter und gesättigter tonfreier Sedimente wird in guter Näherung durch die „*Gleichung von Archie*“ (1942)

$$\sigma_0 = \frac{\phi^m}{a} \cdot \sigma_w \cdot S^n \quad (4.1)$$

beschrieben.

Ist das Gestein vollständig wassergesättigt, gilt $S = 1$ und somit:

$$\sigma_0 = \frac{\phi^m}{a} \cdot \sigma_W . \quad (4.2)$$

Man kann mit der Beziehung

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (4.3)$$

die Archie-Gleichung in die Form des spezifischen Widerstandes überführen:

$$\rho_0 = \frac{a}{\phi^m} \cdot \rho_W \cdot S^{-n} = F \cdot \rho_W \cdot S^{-n} \quad (4.4)$$

mit

σ_0 elektrische Leitfähigkeit des Sediments $\left[\Omega m = \frac{Vm}{A} \right]$,

ρ_0 spezifischer elektrischer Widerstand des Sediments $\left[\Omega m = \frac{Vm}{A} \right]$,

σ_W elektrolytische Leitfähigkeit des Porenwassers $\left[\frac{A}{Vm} \right]$,

ρ_W spezifischer Widerstand des Porenwassers $\left[\frac{A}{Vm} \right]$,

ϕ effektive Porosität,

m Zementationsexponent, $1,3 < m < 2,4$ (experimentell ermittelt),

a Proportionalitätsfaktor, $0,5 < a < 1$ (experimentell ermittelt),

S Sättigungsgrad,

n Sättigungsexponent, $n \approx 2$ (experimentell ermittelt) und

F Formationswiderstandsfaktor (Formationsfaktor) .

[3: S. 22][9: S. 90 ff.]

4.1.3 Grenzflächenleitfähigkeit

Die Grenzflächenleitfähigkeit ist der Anteil der gesamten Gesteinsleitfähigkeit, die nicht durch die elektronische Leitfähigkeit von Gesteinskomponenten und der elektrolytischen Leitfähigkeit des Porenwassers besteht. Dieser Leitfähigkeitsanteil ist eine Eigenschaft der Tonminerale und wird mit deren Kationenaustauschfähigkeit in Verbindung gebracht. Die Kristallstruktur der Tonminerale ermöglicht die Bildung elektrischer Doppelschichten, die aus Ionen der im Schichtwasser enthaltenen Salze aufgebaut sind und den Stromfluss bedingen. Die Grenzflächenleitfähigkeit liefert einen zum Porenwasser zusätzlichen Leitfähigkeitsanteil. Er ist umso stärker, je geringer die Leitfähigkeit des Porenwassers und je höher der Tongehalt ist.

Berücksichtigt man die Grenzflächenleitfähigkeit (σ_{q0}), führt das zur Erweiterung der Archie-Gleichung:

$$\sigma_0 = \frac{\phi^m}{a} \cdot \sigma_w \cdot S^n + \sigma_{q0} \quad (4.5)$$

mit

σ_{q0} Grenzflächenleitfähigkeit $\left[\frac{A}{Vm} \right]$.

[3: S. 25][9: S. 91]

4.1.4 Beispiele

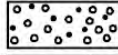
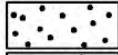
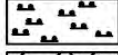
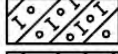
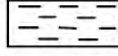
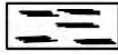
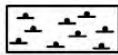
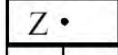
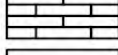
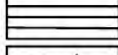
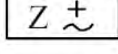
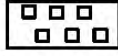
Material	Wertebereich (Ohmmeter)		Symbole nach DIN 21920/4023	
	Minimum	Maximum		
Kies	50 (wassergesättigt)	$>10^4$ (trocken)		Ki
Sand	50 (wassergesättigt)	$>10^4$ (trocken)		Sd
Schluff	20	50		Slf
Geschiebemergel	30	70		Mg
Lößlehm	30	100		Löl
Lehm (als Ziegel)	500	5000		
Ton (erdfeucht)	3	30		T
Ton (trocken)		>1000		
Torf, Humus, Schlick	15	25		H
Mudde, Faulschlamm	10	40		F
Moorböden	10	150		
Braunkohle	10	150		Bk
Erdöl	10^9	10^{12}		
Ölsand (trocken)	10^4	10^{15}		
Haus- u. Industriemüll	< 1	>1000 (Plastik)		
Sandstein	< 50 (klüftig, feucht)	$>10^5$ (kompakt)		Sst
Kalkstein	100 (klüftig, feucht)	$>10^5$ (kompakt)		Kast
Tonschiefer	50 (klüftig, feucht)	$>10^5$ (kompakt)		Tsch
Magmatite, Metamorphite	150 (verwittert, feucht)	$>10^6$ (kompakt)		Ma
Schwarzschiefer	<1	50		
Steinsalz	30 (feucht)	$>10^6$ (trocken)		Salz
Destilliertes Wasser		$>10^3$		
Schneefirn		$>10^5$		
Natürliche Wässer	10	300		
Meerwasser (35‰ NaCl)	0,25			
Salzlaugen	$<0,1$			

Abbildung 4.1: Spezifischer Widerstand verschiedener Materialien

[9, S. 98]

4.2 Grundgleichungen der Gleichstrom-geoelektrik

In der Gleichstromgeoelektrik werden die geoelektrischen Methoden zusammengefasst, die mit stationären Feldern und Strömen arbeiten. Die eingespeisten Ströme breiten sich nach den physikalischen Grundsätzen der Maxwell-Theorie des elektromagnetischen Feldes aus und verknüpfen elektrische Feldstärke, magnetische Feldstärke und magnetische Flussdichte sowie elektrische Raumladungsdichte und elektrische Stromdichte miteinander. Die theoretischen Grundgleichungen der Gleichstromgeoelektrik zeichnen sich dadurch aus, dass in den Maxwell-Gleichungen und den daraus abgeleiteten Gleichungen sämtliche partielle Ableitungen nach der Zeit eliminiert werden. Das bedeutet, dass alle Feldgrößen zeitunabhängig sind [3: S. 27 ff.] [9: S. 75].

Die Maxwell-Gleichungen lauten:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.7)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = \text{div } \vec{B} = 0 \quad (4.8)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \text{div } \vec{D} = q \quad (4.9)$$

mit

$\vec{H}$ magnetische Feldstärke $\left[\frac{A}{m} \right]$,

$\vec{B}$ magnetische Flussdichte $\left[\frac{Vs}{m^2} \right]$,

$\vec{E}$ elektrische Feldstärke $\left[\frac{V}{m} \right]$,

$\vec{D}$ elektrische Flussdichte $\left[\frac{C}{m^2} \right]$,

$\vec{j}$ Stromdichte $\left[\frac{A}{m^2} \right]$,

q Raumladungsdichte $\left[\frac{As}{m^3} \right]$ und

$\vec{\nabla}$ Nabla-Operator $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$.

Neben den vier Maxwell-Grundgleichungen müssen auch die Materialgleichungen beachtet werden:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad (4.10)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (4.11)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (4.12)$$

mit

ϵ Dielektrizitätskonstante $\left[\frac{As}{Vm} \right]$,

μ magnetische Permeabilität $\left[\frac{Vs}{Am} \right]$,

σ spezifische elektrische Leitfähigkeit $\left[\frac{S}{m} \right]$,

wobei die Gleichung (4.12) das **Ohmsche Gesetz** darstellt [3: S. 27][8] [9: S. 75 ff.].

Durch Integration von Gleichung (4.12) entlang einer Länge l und einer Fläche A mit

$$U = \int E \, dl = E \cdot l \text{ und } I = \int \vec{j} \, dA = j \cdot A$$

zu

$$I = \frac{\sigma \cdot A}{l} \cdot U \quad (4.13)$$

und der Definition des elektrischen Widerstandes R

$$R = \frac{l}{\sigma \cdot A} = \rho \cdot \frac{l}{A} \text{ mit } \rho = \frac{1}{\sigma} \quad (4.14)$$

erhält man die den Lernenden bekannte Darstellung

$$R = \frac{U}{I} . \quad (4.15)$$

[10: S.47]

In der Gleichstromgeoelektrik beschäftigt man sich mit stationären Feldern. Aufgrund der Zeitunabhängigkeit folgt aus der Gleichung (4.7)

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad . \quad (4.16)$$

Aus der Zeitunabhängigkeit folgt die Wirbelfreiheit von $\vec{E}$. Daraus folgt, dass $\vec{E}$ aus dem skalaren elektrischen Potential V abgeleitet werden kann:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot V \quad . \quad (4.17)$$

Mit

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot V$$

und

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

gilt außerhalb der Quellen die **Kontinuitätsgleichung**

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad . \quad (4.18)$$

Da bei Gleichstrom die Raumladungsdichte q zeitlich konstant ist, folgt

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = -\frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad . \quad (4.19)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (4.12) in Gleichung (4.19) erhält man:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \text{ für } \sigma = \textit{konstant} \quad (4.20)$$

und mit Verwendung der Gleichung (4.17), folgt daraus

$$\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) = \vec{\nabla} \sigma \cdot \vec{\nabla} V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (4.21)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} V) = \Delta V = 0 \text{ für } \sigma = \textit{konstant} \quad (4.22)$$

Das Potential des elektrischen Feldes erfüllt also die Laplace-Gleichung.

Wird nun am Punkt $\vec{r}_0$ ein Strom der Stärke I eingespeist, folgt

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = I \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \quad (4.23)$$

Daraus ergibt sich die **Gleichstrom-Grundgleichung**

$$\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) = -I \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \quad (4.24)$$

die sich umformen lässt zu:

$$\Delta V = -\frac{1}{\sigma} \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \quad (4.24)$$

Liegt $\vec{r}_0$ an der Oberfläche eines homogenen Halbraums, so hat die Gleichung (4.24) die Lösung:

$$V(\vec{r}) = \frac{I}{2\pi\sigma|\vec{r} - \vec{r}_0|} = \frac{\rho I}{2\pi|\vec{r} - \vec{r}_0|} \quad (4.26)$$

[3: S. 28 - 31][7][8] [9: S. 75 - 80].

4.2.1 Potential einer Punktelektrode

Speist man Strom über eine einzelne Elektrode in den Boden ein, kann mittels der Gleichstrom-Grundgleichung (4.24) das Potential in einer Entfernung $r = |\vec{r} - \vec{r}_0|$ von der Punktelektrode berechnet werden. Es erweist sich als sinnvoll ein kugelsymmetrisches Koordinatensystem zu wählen.

Dann gilt für die Laplace-Gleichung

$$\Delta V = \frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{dV}{dr} = 0 \quad . \quad (4.27)$$

Durch Integration erhält man

$$\frac{dV}{dr} = \frac{C_1}{r^2} \quad . \quad (4.28)$$

Eine weitere Integration ergibt

$$\int_0^V dV = \int_0^r \frac{C_1}{r^2} dr \Leftrightarrow V = -\frac{C_1}{r} + C_2 \quad . \quad (4.29)$$

Die Integrationskonstanten C_1 und C_2 müssen noch bestimmt werden.

Da für $r \rightarrow \infty$ das Potential $V \rightarrow 0$ geht, muss $C_2 = 0$ sein.

Um aus der Stromdichte j den fließenden Strom I zu erhalten, muss über die gesamte Kugeloberfläche A

$$A = 4\pi r^2 \quad (4.30)$$

integriert werden:

$$I = A \cdot j = -4\pi r^2 \sigma \frac{dV}{dr} = -4\pi \sigma C_1 \quad . \quad (4.31)$$

Dabei wird

$$j = -\sigma \frac{dV}{dr} \quad (4.32)$$

verwendet.

Damit ist die Konstante mit $\sigma = \frac{1}{\rho}$

$$C_1 = -\frac{I}{4\pi\sigma} = -\frac{I\rho}{4\pi} \quad (4.33)$$

bestimmt und führt zur Gleichung

$$V(r) = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (4.34)$$

als Potential einer Punktelektrode im Vollraum des spezifischen elektrischen Widerstandes ρ .

Bringt man eine Elektrode an der Oberfläche eines homogenen isotropen Halbraums an, fließt der Gesamtstrom durch den unteren Teil der Halbkugel. Durch die freie Oberfläche kann kein Strom fließen ($\sigma_{Luft} \approx 0$). Deshalb muss nur über eine Halbkugel integriert werden und es gilt:

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (4.35)$$

[3: S. 31 - 38][7]

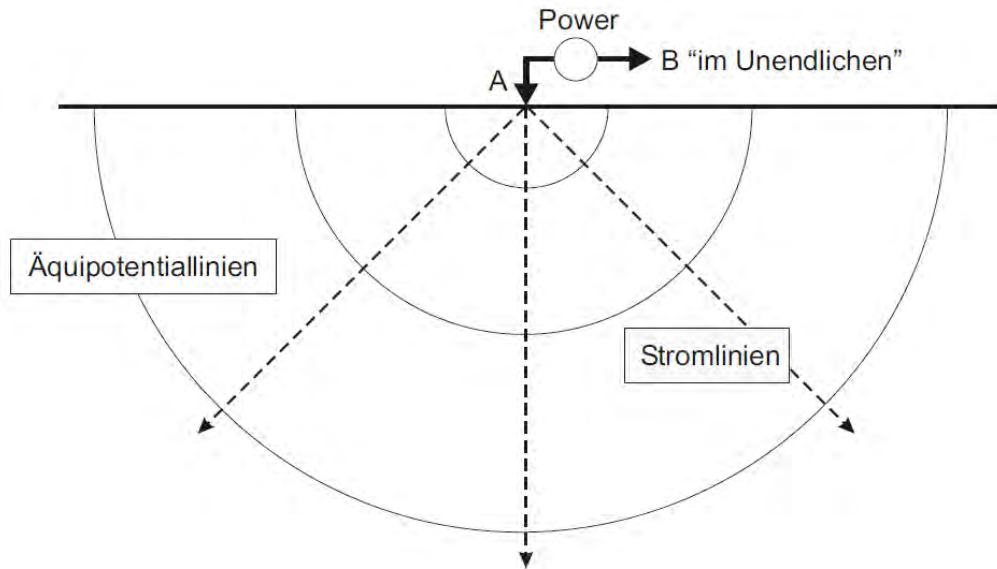


Abbildung 4.2: Die Abbildung zeigt eine punktförmige Stromelektrode A im Halbraum. Stromelektrode B liegt im Unendlichen. Die (gestrichelten) Stromlinien laufen radial nach außen, die Äquipotentiallinien stehen senkrecht zu den Stromlinien.

[3, S.37]

4.2.2 Potential zwischen zwei Punktelektroden

Weit realistischer in der Gleichstromgeoelektrik ist der Fall, dass über zwei Elektroden, die einen endlichen Abstand haben, an der Erdoberfläche an den Punkten $\vec{r}_1$ und $\vec{r}_2$ ein Strom eingespeist wird. Berücksichtigt man die Polaritäten der Einspeisung, kann unter Zuhilfenahme des **Superpositionsprinzips** von Potentialen das Potential im Punkt $\vec{r}$ berechnet werden [3: S. 38][7]:

$$V(\vec{r}) = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} - \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_2|} \right) . \quad (4.36)$$

4.3 Das Messprinzip

Anfang des 20. Jahrhunderts wurden bereits viele Verfahren der Gleichstromgeoelektrik entwickelt. Sie beruhen auf Verfahren, die mit stationären Feldern arbeiten. Bei den Messungen unterscheidet man Kartierung, Sondierung und die Sondierungskartierung oder Tomographie. Die bekanntesten Verfahren sind das Kartierungsverfahren nach Wenner und das Sondierungsverfahren nach Schlumberger [9: S. 128 ff.].

Bei der Kartierung wird der spezifische Widerstand entlang eines Profils oder einer größeren Fläche bestimmt. Bei der Sondierung wird versucht, an einem Punkt den spezifischen Widerstand, abhängig von der Tiefe, zu bestimmen. Die Sondierungskartierung ist eine Kombination aus beiden Verfahren [4]. Sie wird im folgenden Kapitel näher ausgeführt.

Alle Messprinzipien der Geoelektrik beruhen auf der Verwendung von vier Messpunkten, der so genannten „**Vierpunktanordnung**“. Über zwei geerdete Stromelektroden A und B wird Gleichstrom eingespeist. Dabei bildet sich ein Potentialfeld, das von den Leitfähigkeitsstrukturen abhängt. Würde die Stromstärke und die Spannung nur zwischen den Elektroden A und B gemessen werden, erhielte man nur den Erdungswiderstand, der für die Ermittlung der Leitfähigkeitsverteilung allerdings bedeutungslos ist. Aus diesem Grund wird die Spannung mit zwei weiteren Sonden M und N, den Spannungselektroden, gemessen [9: S. 133].

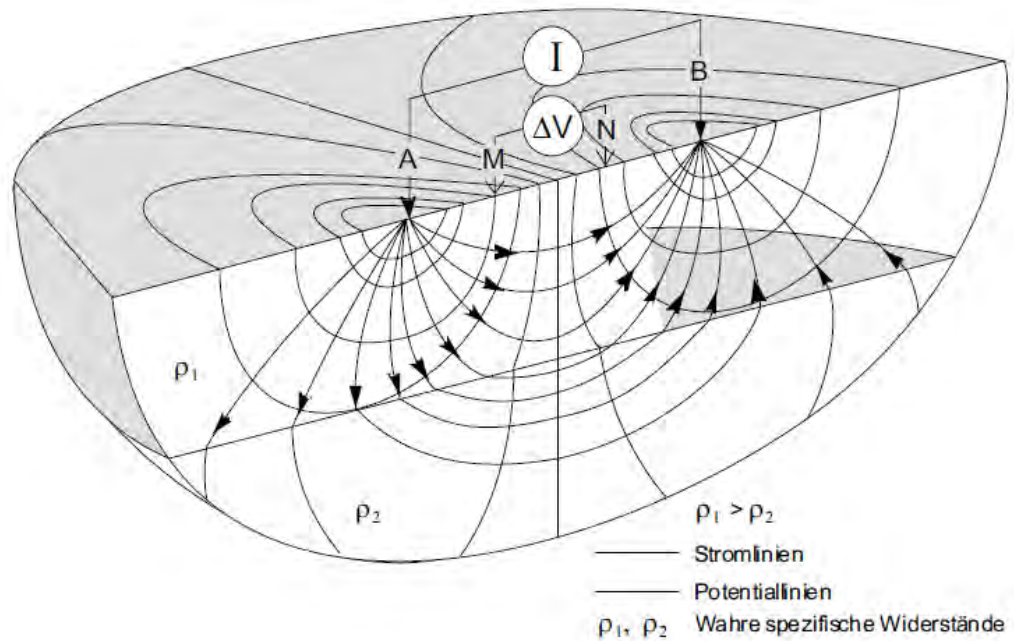


Abbildung 4.3: Die Abbildung zeigt das im Untergrund erzeugte Halbkugelfeld. Dargestellt ist das Prinzip der Widerstandsmessung mit einer Vierpunktanordnung. An den Elektroden A und B erfolgt die Stromeinspeisung, an den Sonden M und N die Spannungsmessung. Die Stromlinien sind mit Pfeilen versehen, die übrigen Linien sind Potentiallinien. Diese Abbildung zeigt ein Zweischichtenmodell mit unterschiedlichen Widerstandswerten ρ_1 und ρ_2 . Man kann ebenso die Brechung der Stromlinien an der Grenzfläche zwischen den Schichten erkennen.

[9, S. 129]

Aus der Potentialdifferenz zwischen den Sonden M und N und der Stromstärke zwischen den Elektroden A und B kann mithilfe des Ohmschen Gesetzes der elektrische Widerstand berechnet werden. Bildet man das Produkt des elektrischen Widerstands mit dem Konfigurationsfaktor oder Geometriefaktor K, erhält man bei homogenen Verhältnissen den spezifischen elektrischen Widerstand. Da in der Realität die Untergründe inhomogen sind, wird der gemessene Widerstand als scheinbarer spezifischer Widerstand bezeichnet.

Um den Geometriefaktor zu berechnen, betrachtet man zunächst eine beliebige Vierpunktanordnung der Elektroden A und B sowie der Sonden M und N und den Ab-

ständen r_{AM} , r_{AN} , r_{BM} und r_{BN} . Der Geometriefaktor K ist von dem gewählten Messverfahren abhängig, was später im Einzelnen noch ausgeführt wird.

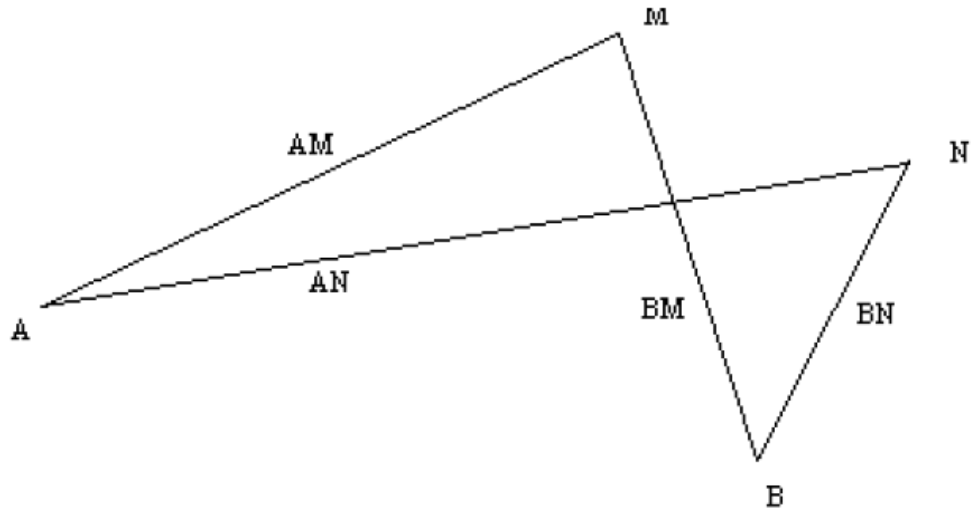


Abbildung 4.4: Die Abbildung einer beliebigen Anordnung von vier Elektroden zu einer Vierpunktanordnung mit den Abständen r_{AM} , r_{AN} , r_{BM} und r_{BN} zwischen den Elektroden A und B und den Sonden M und N.

[11]

In der Vierpunktanordnung ergibt sich die Potentialdifferenz aus der Superposition der Einzelpotentiale

$$\begin{aligned}
 U = \Delta V = V_M - V_N &= \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) - \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) \right] \\
 &= \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right)
 \end{aligned} \tag{4.37}$$

[3: S. 39]

Ersetzt man den Term $\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}\right)$ durch $\frac{1}{K}$, ergibt sich der spezifische Widerstand ρ

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}\right)} \cdot \frac{U}{I} \equiv K \frac{U}{I} \quad (4.38)$$

ρ spezifischer elektrischer Widerstand $\left[\Omega m = \frac{Vm}{A}\right]$

mit den **Geometriefaktor K**

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}\right)} \quad (4.39)$$

Diese Gleichung ist als „Neumannsche Formel“ bekannt [3: S. 40][9: S. 133][11].

Damit lässt sich für den homogenen Halbraum der **spezifische Widerstand ρ** und für den inhomogenen Halbraum der **scheinbare spezifische Widerstand ρ_S** berechnen:

$$\rho = K \cdot \frac{U}{I} \quad \text{bzw.} \quad \rho_S = K \cdot \frac{U}{I} \quad (4.40)$$

In der Realität liegen überwiegend inhomogene Untergründe vor [3: S. 40f.][9: S. 133].

Bei den Messungen in der Geoelektrik treten an den Elektroden Übergangswiderstände auf, die von erheblicher Bedeutung sind. Die Widerstände R_A und R_B entstehen als Folge von Kontaktpotentialen an den Grenzflächen von Metall und Elektrolyt, wenn die Elektroden in den Erdboden gesteckt werden. Sie sind messtechnisch nicht erfassbar. R_E bezeichnet den elektrischen Widerstand des Erdbodens. Bei einer Spannungsmessung zwischen A und B wäre U proportional zu $R = R_E + R_A + R_B$. Durch einen gesonderten Messkreis wird mit stromloser Spannungsmessung über die Sonden M und N nur R_E bestimmt [3: S. 39 - 42][11].

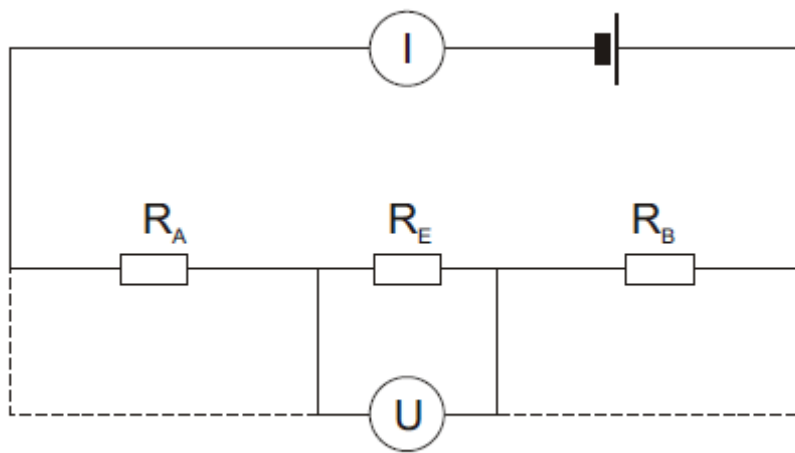


Abbildung 4.5: Diese Abbildung zeigt die Übergangswiderstände bei geoelektrischen Messungen. Misst man die Spannungen zwischen den Elektroden A und B, so misst man auch die Übergangswiderstände R_A und R_B . Misst man die Spannung über zwei weitere getrennte Sonden, bestimmt man R_E , den Widerstand des Erdbodens.

[3: S. 42]

4.4 Messanordnungen

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten für die Elektroden-Sonden-Anordnung, jedoch sind nur wenige von Bedeutung.

4.4.1 Die Wenner-Anordnung

Die Wenner-Anordnung eignet sich besonders bei der **Kartierung** großer Geländeoberflächen. Über die beiden äußeren Elektroden A und B wird ein Strom in den Boden eingespeist und an den inneren Sonden M und N wird die Spannung gemessen. Die Abstände zwischen den Elektroden bzw. Sonden sind zueinander immer gleich. Bezeichnet man den Abstand zweier Elektroden mit a , so ist der Gesamtabstand zwischen A und B $3a$. Bei der Vermessung werden die Elektroden entlang einer Vermessungslinie bewegt. Dort wird eine bestimmte Untergrundtiefe in horizontaler Richtung vermessen.

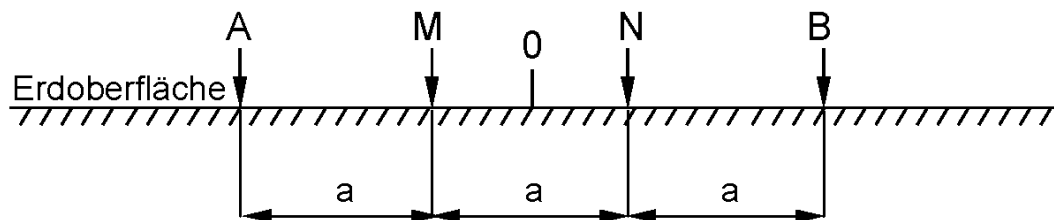


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung einer Wenner-Anordnung

[12]

Bei der Wenner-Anordnung gilt: $r_{AM} = r_{BN} = a$ und $r_{BM} = r_{AN} = 2a$

Somit lässt sich der Geometriefaktor K nach der Gleichung (4.39) berechnen:

$$K = 2\pi a \quad (4.41)$$

Daraus ergibt sich für den spezifischen Widerstand bei der Wenner-Anordnung

$$\rho = K \cdot \frac{U}{I} = 2\pi a \cdot \frac{U}{I} \quad (4.42)$$

[3: S. 68][9: S. 130 und 146 - 148][11][12]

4.4.2 Die Schlumberger-Anordnung

Die Schlumberger-Anordnung eignet sich besonders bei der **Sondierung** größerer Tiefen. Hier wird untersucht, wie sich der scheinbare spezifische Widerstand unter einem Geländepunkt ändert. Über die beiden äußeren Elektroden A und B wird der Strom in den Boden eingespeist und an den inneren Sonden M und N wird die Spannung gemessen. Der Abstand zwischen den Sonden M und N bleibt während der Messung immer gleich. Der Abstand der Elektroden A und B wird schrittweise vergrößert. Dadurch erhöht sich die Eindringtiefe. Der Abstand der Sonden M und N wird mit a und der Gesamtabstand zwischen den Elektroden A und B wird mit L bezeichnet. Hier wird nur der symmetrische Fall betrachtet.

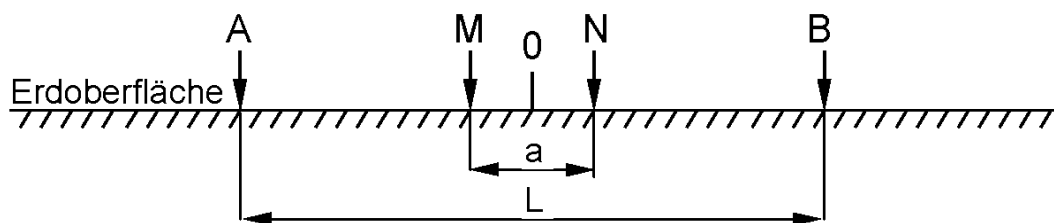


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung einer Schlumberger-Anordnung

[12]

Bei der Schlumberger-Anordnung gilt: $r_{AM} = r_{BN} = \frac{L-a}{2}$ und $r_{BM} = r_{AN} = \frac{L+a}{2}$

Somit lässt sich der Geometriefaktor K nach der Gleichung (4.39) berechnen:

$$K = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{L^2 - a^2}{a} . \quad (4.43)$$

Daraus ergibt sich für den spezifischen Widerstand bei der Schlumberger-Anordnung

$$\rho = K \cdot \frac{U}{I} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{L^2 - a^2}{a} \cdot \frac{U}{I} . \quad (4.44)$$

[3: S. 68][9: S. 130 und 148 - 150][11][12]

4.4.3 Tomographie

Die Sondierungskartierung oder Tomographie ist in der Geoelektrik eine Kombination der Verfahren der Kartierung (Wenner-Anordnung) und der Sondierung (Schlumberger-Anordnung). Dieses Verfahren erfasst die räumliche Widerstandsverteilung und wird häufig eingesetzt, um die vertikalen Schichtenfolgen bei horizontaler Lagerung von Schichten unterschiedlicher Mächtigkeit und spezifischer Widerstände zu bestimmen [9: S. 150 - 152].

4.5 Stromverteilung im Untergrund

Wichtig in der Geoelektrik ist die Kenntnis der Stromverteilung im Untergrund. Weiterhin soll bestimmt werden, welcher Anteil des Gesamtstroms in einer gewissen Tiefe des homogenen Halbraums fließt.

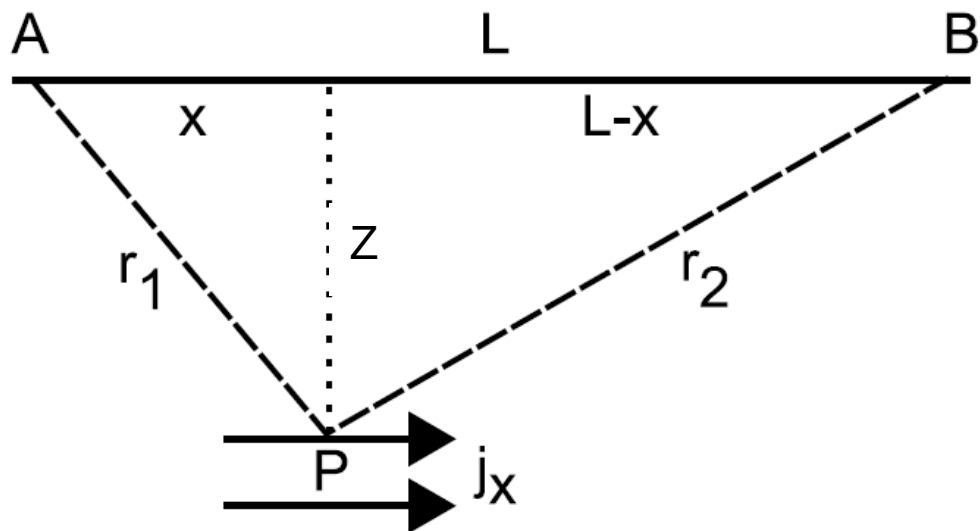


Abbildung 4.8: Diese Abbildung zeigt, wie man die horizontale Stromdichteverteilung j_x an einem Punkt P bestimmen kann. P hat von den Stromelektroden A und B die Abstände r_1 bzw. r_2 . Projiziert man den Punkt P auf die Erdoberfläche, so hat die Projektion des Punktes P den Abstand x von der Elektrode A und den Abstand $L - x$ von der Elektrode B .

[3, S.53, ergänzt durch Verfasser]

Die an der Oberfläche gemessene Potentialdifferenz hängt von der Stromdichte im Untergrund ab:

$$\vec{j} = -\sigma \vec{\nabla} V \quad . \quad (4.45)$$

Um die **horizontale Stromdichte** j_x zu bestimmen, berechnet man mit der Gleichung (4.35)

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (4.46)$$

die Komponente

$$\begin{aligned} j_x &= -\sigma \cdot \frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{I}{2\pi} \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \\ &= \frac{I}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_1^3} - \frac{x-L}{r_2^3} \right) . \end{aligned} \quad (4.47)$$

Bei symmetrischer Messanordnung gilt: $r = r_1 = r_2$ und es ergibt sich mit

$$j_x = \frac{I}{2\pi} \frac{L}{\left(z^2 + \frac{L^2}{4} \right)^{3/2}} . \quad (4.48)$$

Somit ist die **Gesamtstromdichte** abhängig vom Elektrodenabstand L.

Untersucht man einen unendlich ausgedehnten Streifen in einem Intervall $[z_1, z_2]$ (**Teufenintervall**) in der Symmetrieebene zwischen den Stromelektroden, ist

$$r^2 = \frac{L^2}{4} + y^2 + z^2 . \quad (4.49)$$

Infolge ist der Anteil des horizontalen Stromes:

$$\delta I_x = j_x dydz = \frac{1}{2\pi} \frac{L}{\sqrt{\left(y^2 + z^2 + \frac{L^2}{4} \right)^3}} dydz . \quad (4.50)$$

Den Anteil des Gesamtstromes im Intervall $[z_1, z_2]$ erhält man durch Integration:

$$\begin{aligned}\frac{I_x}{I} &= \frac{L}{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} dz \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dy}{\sqrt{\left(y^2 + z^2 + \frac{L^2}{4}\right)^3}} \\ &= \frac{2}{\pi} \left(\arctan \frac{2z_2}{L} - \arctan \frac{2z_1}{L} \right)\end{aligned}\quad (4.51)$$

Der Anteil am Gesamtstrom von der Erdoberfläche ($z_1 = 0$) bis zur Tiefe z_2 ist:

$$\frac{I_x}{I} = \frac{2}{\pi} \arctan \frac{2z_2}{L} \quad (4.52)$$

Setzt man $z_2 = \frac{L}{2}$, folgt

$$I_x = \frac{I}{2} . \quad (4.53)$$

Das bedeutet, dass genau die Hälfte des Gesamtstroms zwischen der Erdoberfläche und $z_2 = \frac{L}{2}$ fließt.

Dies ist die Grundlage der Widerstandstiefensondierung.

Wächst der Elektrodenabstand L , nimmt die Erkundungstiefe zu [3: S.53 - 59].

4.6 Verhalten an Grenzflächen

In einem homogenen Medium breiten sich die Stromlinien radialsymmetrisch von der Punktelektrode aus (siehe Abbildung 4.3). Wechselt das Medium, werden sie an der Grenzfläche gebrochen. Zum Verhalten der Feldgrößen müssen Annahmen über die Stetigkeit von Potentialen, dem elektrischen Feld und der Stromdichte gemacht werden.

1. Die Tangentialkomponenten des elektrischen Feldes sind stetig.
2. Die Normalkomponente der Stromdichte ist stetig.
3. Das Potential ist stetig.

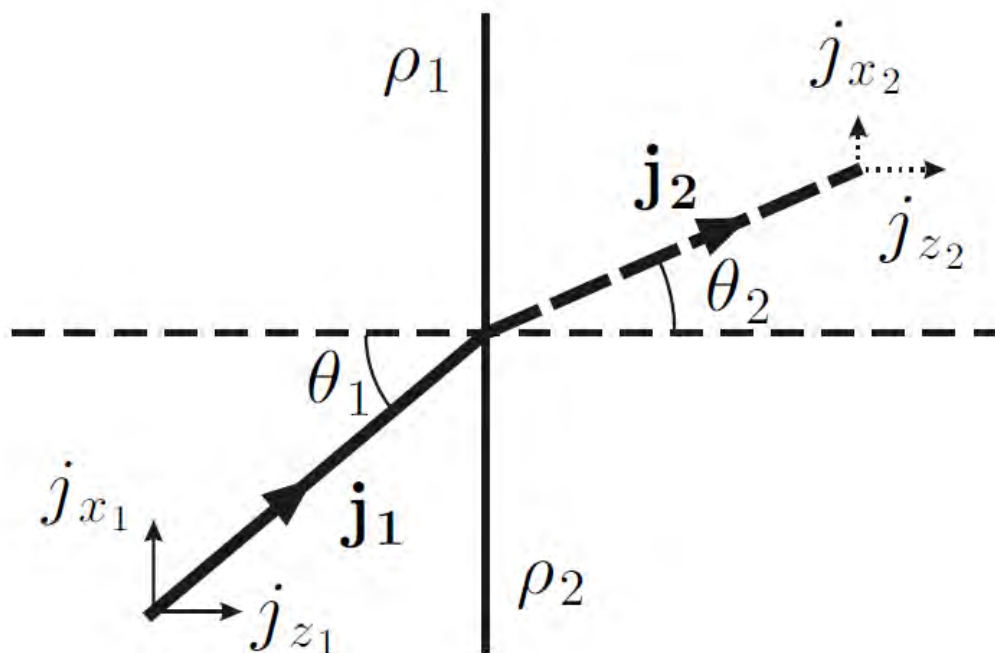


Abbildung 4.9: Diese Abbildung zeigt die Brechung der Stromlinie an der Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen Medien. Diese werden beim Übergang von einem guten zum schlechten Leiter zur Normalen hin gebrochen [3, S. 62].

Unter Beachtung des Ohmschen Gesetzes (Gleichung 4.12) gelten für die Komponenten der Stromdichte:

$$j_{x_1} \cdot \rho_1 = j_{x_2} \cdot \rho_2 \quad (4.54)$$

$$j_{z_1} = j_{z_2} \quad (4.55)$$

Durch Division der beiden Gleichungen erhält man:

$$\rho_1 \cdot \frac{j_{x_1}}{j_{z_1}} = \rho_2 \cdot \frac{j_{x_2}}{j_{z_2}} \quad \text{oder} \quad \rho_1 \tan(\theta_1) = \rho_2 \tan(\theta_2) \quad (4.56)$$

und damit als Brechungsgesetz

$$\frac{\tan(\theta_2)}{\tan(\theta_1)} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (4.57)$$

Daraus kann geschlossen werden, dass die Stromlinien beim Übergang vom guten zum schlechten Leiter zur Normalen hin gebrochen werden [3: S. 61 - 64][9: S. 78].

5. Schülerlabor

5.1 Grundlagen Schülerlabor

Seit Ende der 1990er Jahre gibt es in Deutschland etwa 300 Schülerlabore verschiedener Fachrichtungen, an Universitäten, in Forschungseinrichtungen, Science Centern, Museen und der Industrie [13].

Schülerlabore sind außerschulische Lernorte, die sich zunehmend größerer Beliebtheit erfreuen. Besonders häufig sind sie im MINT-Bereich (Mathematik, Informatik, Natur- und Technikwissenschaft) zu finden. Die Lernenden haben hier die Möglichkeit, in authentischen Einrichtungen zu experimentieren und zu forschen [14] und erhalten damit die Möglichkeit, Wissenschaft und Technik zu begreifen.

Nach den ernüchternden und schockierenden deutschen Ergebnissen der internationalen Vergleichsstudien (TIMSS: Trends in International Mathematics and Science Study, PISA: Programme for International Student Assessment) wurde die Krise des naturwissenschaftlichen Unterrichts, besonders in den Fächern Physik und Chemie offenkundig [15]. Die Bereitschaft, diese Fächer zu studieren und einen entsprechenden Beruf zu ergreifen, war gering [15]. Durch intensive Bemühungen, diesem Trend entgegenzuwirken, wurde eine Verbesserung der unterrichtlichen Qualität erreicht und ein weitgefächertes Angebot an außerschulischen Angeboten bereitgestellt. Dazu gehören die bereits genannten Schülerlabore.

Schülerlabore zeichnen sich dadurch aus, dass sie gemeinsame Ziele verfolgen: Sie wollen das Interesse und die Aufgeschlossenheit der Lernenden für Naturwissenschaft und Technik fördern und ihre selbstständige Auseinandersetzung mit naturwissenschaftlichen und technischen Zusammenhängen aktivieren. Sie zeichnen ein zeitgemäßes Bild und weisen auf ihre gesellschaftliche Bedeutung hin. Sie sollen Lernenden die Gelegenheit geben, Tätigkeiten und Berufe im naturwissenschaftlich-technischen Bereich kennenzulernen [15]. Schülerlabore zeigen damit auch ein immer dringender werdendes Problem auf: Es ist das zu geringe Interesse der Jugendlichen an Berufen im MINT-Bereich und an Umwelt- und Energietechnologien. Schü-

lerlabore spielen deshalb bei der Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) eine wichtige Rolle [16].

Schülerlabore bieten die Gelegenheit, die Lernenden zu eigenständigem Experimentieren zu ermutigen. Sie haben in der Regel keine curricularen Bindungen und ermöglichen den Lernenden eigenständig in kleinen Gruppen oder alleine zu arbeiten. Eine weitere Möglichkeit, die Vorteile eines Schülerlabors zu nutzen, ist es, Themen zu wählen, die im curricularen Rahmen in dieser Form nicht explizit vorgegeben sind, deren fachliche Grundlagen jedoch bereits vorliegen. Hier eröffnet sich ein weites Feld fächerübergreifender und fächerverbindender Themen. Zudem bieten Schülerlabore angehenden Lehrkräften die Chance neue Unterrichtskonzepte zu erproben und die unmittelbaren Erfolge oder Misserfolge zu sehen [16]. Sie haben den Vorteil nicht an den 45-Minuten-Takt gebunden zu sein, sondern einer freien Zeiteinteilung zu unterliegen [17: S. 178].

Schülerlabore bieten einen anderen Ansatz. Sie ermöglichen den Lernenden interessante thematische und methodische Themen und geben ihnen die Möglichkeit, aktiv forschend tätig zu werden [15]. Die Lernenden nutzen Experimentierplätze, die mit Geräten und Apparaturen ausgestattet sind, die in gleicher Form in der aktuellen Forschung verwendet werden und erhalten auf diese Weise einen Einblick in die Arbeit von Wissenschaftlern [18]. Die zu untersuchenden Themen sind häufig sehr anspruchsvoll, in Teamarbeit jedoch weitgehend zu bewältigen [15]. Die Lernenden haben die Gelegenheit, Versuche in einer authentischen Umgebung selbsttätig durchzuführen [17: S. 167].

Authentizität ist ein Synonym zur Beschreibung der Qualität des Bezuges zur realen Welt [17: S. 173], wobei einerseits die Lebenswelt der Lernenden und andererseits die Berufswelt der Physikerinnen und Physiker von Bedeutung ist.

Dabei muss kritisch hinterfragt werden, ob die Schülerversuche tatsächlich authentisch in der oben genannten Bedeutung sind und somit geeignet sind, Lernende in die naturwissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen einzuführen. Sehr häufig werden diese Ziele im alltäglichen Unterricht jedoch nicht erreicht [17: S. 173].

5.2 Experimente im Physikunterricht

Grundsätzlich steht das Experiment im Mittelpunkt des Unterrichts [19]. Experimente sind wesentliche und unverzichtbare Elemente der Physik. Sie haben, je nachdem, wo sie angesetzt werden, verschiedenen Funktionen. Das Experiment ist Grundlage und Voraussetzung dafür, Phänomene kennenzulernen, Erkenntnisse zu gewinnen und ein tieferes Verständnis für die Zusammenhänge in der Natur, speziell in der Physik zu erlangen [20 und 21]. In der Forschung können sie zur Überprüfung neuer Theorien verwendet werden, in Fernsehsendungen (z.B. Lesch Kosmos, Quarks & Co, ...), in Science Centern und Mitmachstationen (ExperiMINTa Frankfurt oder Deutsches Museum in München) dienen sie zur Unterhaltung und im Physikunterricht unterstützen sie das Lehren und Lernen [22: S. 106]. Sie sind eine didaktische Chance für den Physikunterricht [17: S. 167]. Es ist davon auszugehen, dass Experimente, die den Lernenden praktische Erfahrungen möglich machen, besonders nachhaltig sind [17: S. 167].

Die Spannweite bei den Experimenten ist groß: sie reicht von der „Kreidephysik“ mit wenigen Demonstrationsexperimenten durch die Lehrenden der Physik, über stärker lehrerkontrollierte Schülerexperimente durch die Lernenden, die einzeln oder in Gruppen durchgeführt werden, bis hin zu den offenen Schülerexperimenten, bei denen die Lernenden eigenständig experimentieren [21 und 23].

Eigenständiges Arbeiten und Experimentieren stellt hohe Anforderungen an die Lernenden. Besonders bei der offenen Form des Experimentierens bedarf es seitens der Lehrenden einer intensiven Vorbereitung, vor allem bei der Bereitstellung der Geräte, damit die Experimente nicht schon im Vorfeld scheitern. Ebenso wichtig ist ein Ansprechpartner für die Lernenden, da sie sonst häufig von den Anforderungen überfordert sind und die Aufgabe nicht bewältigen können. [21 und 23].

Der Unterricht erfolgt überwiegend im 45-Minuten Takt und ist durch curriculare Vorgaben stark strukturiert. Die Lehrkraft unterrichtet häufig im fragend-entwickelnden Gespräch, unterstützt durch Experimente, die als Demonstrationsexperiment durch den Lehrenden oder ausgewählte Lernende gezeigt werden. Die wünschenswerten Schülerexperimente sind eher selten, oft fallen sie aufgrund des Zeitmangels aus.

Experimente im Unterricht sind wesentlich zeitaufwändiger als ein fragend-entwickelnder Unterricht. Die große Fülle der verbindlichen Lerninhalte lässt im Hinblick auf das Zentralabitur wenig zeitlichen Spielraum [17: S. 178]. Trotzdem sollten die Lernenden die Gelegenheit zum Experimentieren bekommen, da sie hier deutlich mehr lernen als durch die lehrerzentrierte Vermittlung von Faktenwissen [17: S. 178].

Eine gute Alternative zum Experimentieren in der Schule bieten die bereits genannten Schülerlabore.

5.3 Computereinsatz im Physikunterricht

Im modernen naturwissenschaftlichen Unterricht ist der Einsatz des Computers nicht mehr wegzudenken und soll die didaktisch-methodischen Aspekte des Experimentes erweitern [17: S. 149]. Allein der Einsatz neuer Medien verbessert noch nicht das Lernen [24 und 25]. Daher ist der Einsatz des Computers methodisch nicht zu jedem Themenbereich und in jeder Unterrichtsphase sinnvoll, weswegen die Funktionen des Computereinsatzes vorher zu klären sind.

Der Computereinsatz bietet den Lernenden die Möglichkeit, sich aktiv an den Lernprozessen zu beteiligen [24 und 25]. Durch die Visualisierung komplexer Vorgänge in unterschiedlichen Formen, wie beispielsweise virtuelle Experimente oder computergestützte Messwerterfassungen, wird eine Multicodierung erreicht [24 und 25], die es erleichtert die bearbeiteten Sachverhalte besser zu erfassen [25 und 26]. Durch individuelles, eigenverantwortliches Lernen, das durch Lernprogramme oder digitale Arbeitsblätter ermöglicht wird, können die Lernenden ihre selbst aufgestellten Hypothesen überprüfen und ihr Lerntempo selbst bestimmen [24, 25, 26, 17: S. 157]. Durch computergestützte Experimente können aufwendige, teure und gefährliche Experimente ersetzt werden. Sie können beliebig wiederholt werden und lassen Veränderungen der Einstellungen zu, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können [25 und 26].

Ein Computereinsatz ist bei der Erfassung von Messwerten, der Berechnung physikalischer Größen und der daraus ableitbaren graphischen Darstellung der Messdaten sinnvoll [24 und 25, 17: S. 157]. Die Messwerte können abgespeichert und bei Bedarf immer wieder aufgerufen werden. Von Vorteil ist, dass viele Messwerte in kurzer Zeit aufgenommen, erfasst und bearbeitet werden können. Zudem ergeben sich viele Möglichkeiten der Auswertung und Präsentation der Daten [25, 26, 17: S. 157]. Für die Analyse der Messwerte stehen adäquate Programme zur Verfügung, die besonders die zeitaufwendigen Routinerechnungen verkürzen und mehr Zeit zur Deutung und Interpretation der Ergebnisse lassen [24 und 25].

Der Computereinsatz im Physikunterricht ist hilfreich und motivierend. Jedoch besteht die Gefahr, dass die Lernenden, bedingt durch die Informationsflut, den Überblick verlieren und die wesentlichen Fakten aus den Augen verlieren [17: S. 107 ff.].

5.4 Texte im Physikunterricht

Will man sich auch nach oder außerhalb der schulischen Ausbildung mit Physik beschäftigen, muss die Fachsprache beherrscht und mit den Texten umgegangen werden können [18: S. 158]. Erst ein bewusster Umgang mit Texten ermöglicht fachliches Lernen und den Erwerb der Fachsprache [18: S. 158]. Ohne Textarbeit ist Physikunterricht nicht möglich. Neben den Texten aus Schulbüchern, Beschreibungen, Versuchsanleitungen, Arbeitsaufträgen und Protokollen gehören auch Fachtexte oder populärwissenschaftliche Texte aus Zeitschriften, Fachliteratur oder Internet zu den im Unterricht eingesetzten Materialien [18: S. 159]. Diese tragen zu der erwünschten Methodenvielfalt im Physikunterricht bei.

Werden schülerzentrierte Unterrichtsformen bevorzugt, kommt man ohne schriftliche Textarbeit nicht aus. Aufgaben, Anleitungen und Informationen müssen den Lernenden schriftlich vorliegen. Die Ergebnisse sollten ebenfalls schriftlich festgehalten werden [18: S. 159].

Öffnet man den Unterricht und verbindet das Fach Physik mit anderen Fachgebieten, lassen sich leicht fächerverbindende und fachübergreifende Bezüge und Verknüpfungen herstellen. Der Blick der Lernenden wird auf andere Anwendungsgebiete gelenkt, die primär nicht im Zentrum der Beobachtungen standen. Dies eröffnet die Möglichkeit für intensive Diskussionen.

5.5 Schülerlabor im Kerncurriculum gymnasiale Oberstufe

Das Kerncurriculum gymnasialer Oberstufe (KCGO) gibt Bildungsziele für fachliches (Bildungsstandards) und überfachliches Lernen an. Die inhaltlichen Vorgaben sind verbindliche Grundlagen für das Zentralabitur [27: S. 6]. Es setzt auf Kompetenzerwerb und Orientierung.

Überfachliche Kompetenzen gehen über das rein fachliche Wissen hinaus. In allen Fächern sollen die Lernenden sowohl in fachgebundenem als auch im fächerverbindendem Unterricht überfachliche Kompetenzen entwickeln [27; S. 8]. Überfachliche Kompetenzen sind u.a. soziale Kompetenzen, personale Kompetenzen und Sprachkompetenzen.

Neben dem Erwerb fachlicher und überfachlicher Kompetenzen erfahren die Lernenden das fächerübergreifende und fächerverbindende Lernen als ein Verstehen in größeren Sinnzusammenhängen [27; S. 11]. Fachliches Lernen wird in der gymnasialen Oberstufe von fächerübergreifenden und fächerverbindenden Lernformen ergänzt. Dies wird verbindlich in der Oberstufen- und Abiturverordnung (OAVO) gefordert [27; S. 14].

Das in dieser Arbeit entwickelte Schülerlabor erfüllt diese Anforderungen und verbindet die Fächer Physik, Geologie, Geographie und Politik und Wirtschaft und deckt die fachlichen und überfachlichen Kompetenzen ab.

5.6 Schülerlabor Geophysik

Bei der Erstellung eines Schülerlabors im Bereich der Geophysik sollte ein Augenmerk auf die Praxistauglichkeit gelegt werden. Zu den verschiedenen Teilgebieten Geoelektrik, Geomagnetik und Seismik lässt sich eine Vielzahl von schülergeeigneten Versuchen finden, die einen guten Einblick in das Thema geben. Ein Schülerlabor zu allen der genannten Teildisziplinen würde den zeitlichen Rahmen zeitlich sprengen. Für eine Projektwoche oder eine ganzjährige AG wäre dies allerdings denkbar.

Das hier entwickelte Schülerlabor beschränkt sich auf die Teildisziplin Geoelektrik, die, mit hoher Wahrscheinlichkeit, den Lernenden im Zusammenhang mit der Geophysik unbekannt ist. Dies gilt auch für die Anwendungsgebiete, die in der Regel außerhalb der Lebenswelt der Lernenden liegen.

Um die Lernenden zu begeistern, sich mit den Fragestellungen der Geophysik, speziell der Geoelektrik auseinanderzusetzen, sind „bekannte“ Versuche aus der Schulphysik geeignet. Diese lassen sich leicht durchführen und liefern beeindruckende Ergebnisse aus denen Erkenntnisse gezogen werden können.

Mit der Widerstandsmessung, auf der die Wenner- und Schlumberger-Methode beruht (siehe Kapitel 4), lassen sich geophysikalische Methoden zur zerstörungsfreien Erkundung des Bodens erarbeiten, was den Lernenden einen ersten Einblick in die Methoden der Geophysik ermöglicht.

Zudem sollen die Lernenden durch eine Lernstation (Textstation) für die politische und ökologische Bedeutung der Geophysik sensibilisiert werden – sei es durch die Suche nach Grundwasser, Bodenschätzen, sicheren Endlagerstätten, Erkundung der Bodenbeschaffenheit, Beurteilung der Bodenversalzung oder die Erkundung von Altlasten bei Deponien.

Eine Textstation in einem Labor, in dem hauptsächlich experimentiert werden soll, ist zwar ungewöhnlich, aber im Hinblick auf die ökonomische und ökologische Bedeutung der Anwendungsbereiche von großer Wichtigkeit.

6. Laborversuche zur Geophysik

Ziel ist es nun, die komplexen Versuche aus der geophysikalischen Praxis auf Versuche zu reduzieren, die in einem Schülerlabor durchführbar sind. Die zugrunde liegende Theorie wurde schon eingehend im Kapitel 4 behandelt. Die Umsetzung der Versuche und ihre Auswertung wird wegen der Komplexität der Materie im Schülerlabor auf das Niveau der Lernenden vereinfacht.

Die Zielgruppe, die hier angesprochen wird, sind Lernende aus der gymnasialen Oberstufe, die in Physik unterrichtet werden. Eine weitere Zielgruppe könnten Lernende sein, die das Fach Geographie belegt haben. Bei ihnen ist ein anderer Zugang zur Materie zu erwarten.

Die Stationen des Schülerlabors bauen auf dem Vorwissen der Lernenden aus der Mittelstufe auf. Sie sollen trotzdem motivieren, Neues aus dem Bereich der Geophysik zu lernen.

Bei der Planung der Experimente wurde darauf geachtet, dass sie mit den üblicherweise an einer Schule vorhandenen Materialien aufgebaut werden können. Nachdem Lehrende das Schülerlabor besucht haben, können sie solche Experimente mit einfachen Mitteln und somit kostengünstig an ihrer Schule nachbauen. Dadurch ergibt sich für sie die Möglichkeit, eine Unterrichtseinheit, eine Projektwoche oder eine AG zur Geophysik mit dem Schwerpunkt der Geoelektrik anbieten zu können.

Dazu wurden drei Versuche geplant, die im durchzuführenden Schülerlabor jeweils eine eigene Station bilden. Zusätzlich zu den drei Experimentierstationen gibt es eine Textstation.

In diesem Kapitel werden die Versuche zu den einzelnen Stationen beschrieben, ihr Aufbau skizziert, die verwendeten Materialien angegeben, die Ergebnisse präsentiert sowie die aufgetretenen Fehler und Probleme beschrieben.

6.1 Station 1 - Versuch: Widerstandsmessung am Draht

Der Widerstand eines Drahtes wird bei Durchfluss eines Stromes unter anderem vom Material, seiner Länge und dem Durchmesser beeinflusst. An der ersten Station soll dies in verschiedenen Messreihen überprüft werden.

Voraussetzung für die Durchführung dieses Versuches sind Kenntnisse der Mittelstufenphysik aus dem Bereich „Elektrizität im Alltag“ [28] und helfen den Lernenden, ihre Kenntnisse über die Phänomene der Elektrizität zu reaktivieren.

Durch die Messung an Drähten unterschiedlicher Materialien und unterschiedlicher Durchmesser bei einer fest vorgegebenen Länge des Drahtes (drei verschiedene Längen) lässt sich der Widerstand bestimmen und der spezifische Widerstand berechnen.

Ziel dieses Experimentes ist die Erkenntnis der Lernenden, dass der Widerstand proportional zur Länge und abhängig vom Material des Drahtes ist.

Material:

Für das Experiment an dieser Station werden folgende Materialien benötigt:

- Optische Bank von 1m,
- 4 Stativhalter,
- 4 Isolatoren,
- Drähte verschiedenen Materials und Durchmessers,
 - o Eisendraht mit Durchmesser $\varnothing=0,2$ mm,
 - o Eisendraht mit Durchmesser $\varnothing=0,5$ mm,
 - o Konstantandraht mit Durchmesser $\varnothing=0,2$ mm,
 - o Konstantandraht mit Durchmesser $\varnothing=0,4$ mm,
- 2 Zeigerinstrumente,
- 1 Spannungsquelle und
- verschiedenfarbige Kabel.

Messgeräte:

In diesem Versuchsaufbau wurden zwei Zeigermessinstrumente von PHYWE verwendet. Ein Messgerät wurde zum Anzeigen der Stromstärke, ein Zweites zum Anzeigen der Spannung benötigt. Das Zeigerinstrument zur Spannungsmessung wurde an die verschiedenen Messpunkte (1 bis 4) angeschlossen, um eine Potentialdifferenz (= Spannung) zu messen.

Versuchsaufbau:

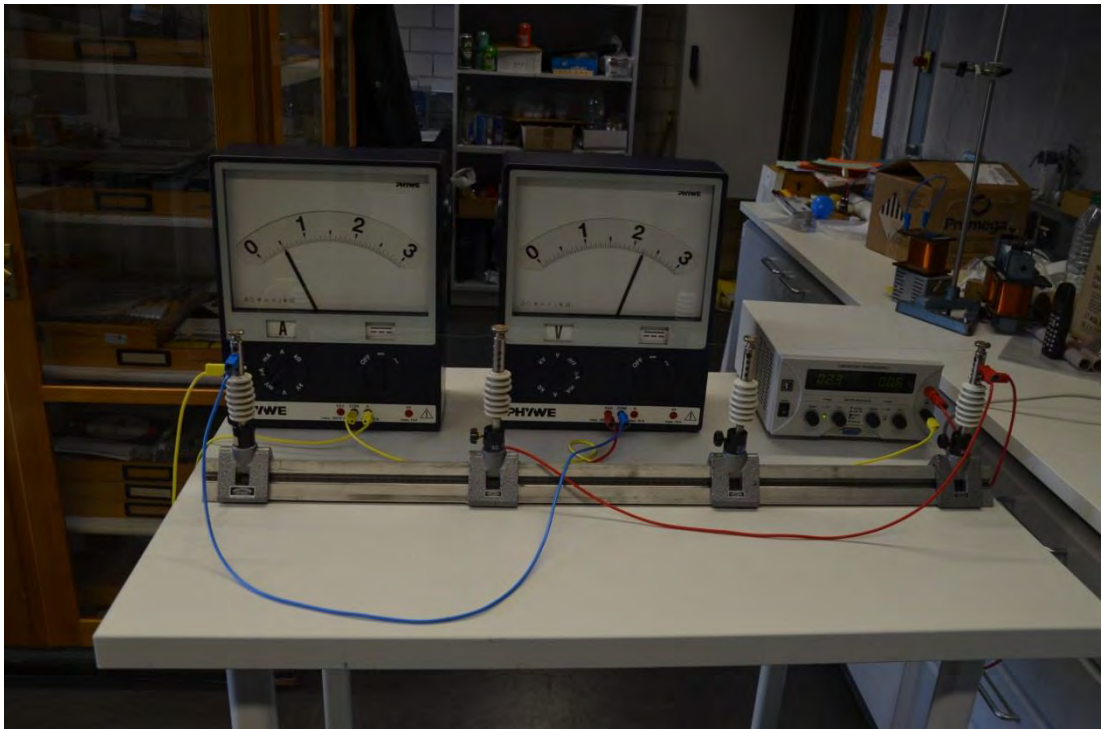


Abbildung 6.1: Versuchsaufbau zur Widerstandsmessung an verschiedenen Drähten. Der Abstand der Messpunkte beträgt 30 cm. Das Zeigerinstrument (links) zur Strommessung ist in Reihe geschaltet. Das Zeigerinstrument (rechts) zur Spannungsmessung ist parallel geschaltet.

Auf einer optischen Bank werden in gleichem Abstand (30 cm) vier Stativhalter mit Isolatoren montiert. Diese Isolatoren sind die Messpunkte (Messpunkte 1 bis 4) zur Messung der Potentialdifferenz. Die „Messstrecke“ wird mit einem Zeigerinstrument zur Strommessung in Reihe geschaltet und an die Spannungsquelle angeschlossen.

Hierbei handelt es sich um eine Spannungsquelle, die eine „geglättete Gleichspannung“ als Eingangsspannung in den Versuchsaufbau abgibt. Das Zeigerinstrument zur Messung der Potentialdifferenz ist nicht in den Stromkreis eingebaut, sondern an den Messpunkten eingesteckt und ist damit parallel geschaltet. Der Versuch wird mit vier unterschiedlichen Drähten durchgeführt: zwei Eisendrähte (mit einem Durchmesser von $d=0,2\text{ mm}$ und $d=0,5\text{ mm}$) und zwei Konstantandrähte (mit einem Durchmesser von $d=0,2\text{ mm}$ und $d=0,4\text{ mm}$). Konstantan ist eine Legierung und besteht aus Kupfer, Nickel und Mangan [29].

Skizze:

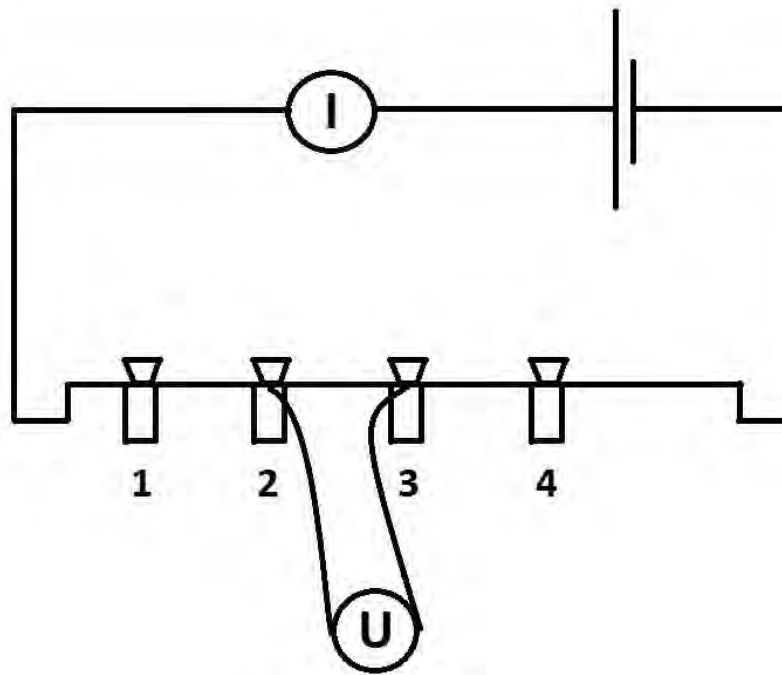


Abbildung 6.2: Schaltskizze des Versuchsaufbaus. 1 bis 4 stellen die verschiedenen Messpunkte zur Spannungsabnahme dar.

Versuchsdurchführung:

Insgesamt werden mehrere Messreihen zu jedem Draht durchgeführt. Dabei wird an der Spannungsquelle eine Eingangsspannung von $U_E = 2,3 \text{ V}$ angelegt.

An den festgelegten Messpunkten 1 bis 4 (Abstand jeweils 30 cm) wird eine Spannung (= Potentialdifferenz) gemessen. Durch die Variation der Abstände an den Messpunkten lässt sich ein Potential für diesen Abstand ablesen. Die gemessenen Werte an den Messpunkten 12, 13, 14, 23, 24 und 34 werden in ein Messprotokoll eingetragen. Der Widerstand wird berechnet und ebenfalls notiert:

$$R = \frac{U}{I}$$

$$\Omega = [R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ampere}} = \text{Ohm}$$

Fehlerabschätzung:

Vor Beginn der Messungen wird eine Fehlerabschätzung durchgeführt, um die Messgenauigkeit angeben zu können. An dieser Station werden die Größen Spannung U und Stromstärke I mit Zeigerinstrumenten gemessen. Aufgrund der geschätzten Ablesegenauigkeiten wird hierfür eine Unsicherheit von $\delta I = 0,05 \text{ A}$ für die Stromstärke und $\delta U = 0,05 \text{ V}$ für die Spannung angenommen. Die Unsicherheit des Durchmessers d des industriell gefertigten Drahtes wird vernachlässigt.

Mit Gauß'scher Fehlerfortpflanzung [30] lässt sich die Unsicherheit ΔF für eine abgeleitete Größe F , die von den Parametern x_i abhängt, berechnen:

$$\Delta F(x_{i,\dots,n}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right)^2} . \quad (6.1)$$

Die berechneten Unsicherheiten sind in den unten stehenden Tabellen hinter den Messwerten notiert.

Zu Beginn werden die Messungen für den Eisen- und Konstantandraht mit jeweils einem Durchmesser von $d = 0,2 \text{ mm}$ durchgeführt:

Messung 1:

Material:	Durchmesser/mm:
Eisen	0,2
Strom I/A: 0,56	
Spannung U/V:	Widerstand R/ Ω :
$U_{12} = 0,75$	$R_{12} = (1,34 \pm 0,15)$
$U_{13} = 1,5$	$R_{13} = (2,68 \pm 0,26)$
$U_{14} = 2,2$	$R_{14} = (3,93 \pm 0,36)$
$U_{23} = 0,75$	$R_{23} = (1,34 \pm 0,15)$
$U_{24} = 1,5$	$R_{24} = (2,68 \pm 0,26)$
$U_{34} = 0,75$	$R_{34} = (1,34 \pm 0,15)$

Messung 2:

Material:	Durchmesser/mm:
Konstantan	0,2
Strom I/A: 0,14	
Spannung U/V:	Widerstand R/ Ω :
$U_{12} = 0,75$	$R_{12} = (5,36 \pm 1,95)$
$U_{13} = 1,5$	$R_{13} = (10,71 \pm 3,84)$
$U_{14} = 2,25$	$R_{14} = (16,07 \pm 5,75)$
$U_{23} = 0,75$	$R_{23} = (5,36 \pm 1,95)$
$U_{24} = 1,5$	$R_{24} = (10,71 \pm 3,84)$
$U_{34} = 0,75$	$R_{34} = (5,36 \pm 1,95)$

In einer zweiten Messreihe werden Drähte mit doppeltem (Konstantan) bzw. zweieinhalbfachem (Eisen) Durchmesser verwendet:

Messung 3:

Material:	Durchmesser/mm:
Eisen	0,5
Strom I/A: 2,5	
Spannung U/V:	Widerstand R/ Ω :
$U_{12} = 0,65$	$R_{12} = (0,26 \pm 0,02)$
$U_{13} = 1,3$	$R_{13} = (0,52 \pm 0,02)$
$U_{14} = 2$	$R_{14} = (0,8 \pm 0,03)$
$U_{23} = 0,7$	$R_{23} = (0,28 \pm 0,02)$
$U_{24} = 1,6$	$R_{24} = (0,64 \pm 0,02)$
$U_{34} = 0,6$	$R_{34} = (0,24 \pm 0,02)$

Messung 4:

Material: Kon-	Durchmesser/mm:
stantan	0,4
Strom I/A: 0,6	
Spannung U/V:	Widerstand R/ Ω :
$U_{12} = 0,75$	$R_{12} = (1,25 \pm 0,13)$
$U_{13} = 1,5$	$R_{13} = (2,5 \pm 0,22)$
$U_{14} = 2,2$	$R_{14} = (3,67 \pm 0,32)$
$U_{23} = 0,75$	$R_{23} = (1,25 \pm 0,13)$
$U_{24} = 1,48$	$R_{24} = (2,47 \pm 0,22)$
$U_{34} = ,75$	$R_{34} = (1,25 \pm 0,13)$

Nach der Durchführung der Messungen, Protokollierung der Messergebnisse und Berechnung des Widerstandes R kann der spezifische Widerstand ρ der beiden Materialien berechnet werden:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

mit

ρ spezifischer Widerstand $\left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$,

l Länge des Leiters $[\text{m}]$,

A Querschnittsfläche des Leiters $A = \pi r^2 = \pi \frac{d^2}{4} [\text{mm}^2]$.

Für jeden Draht wird der spezifische Widerstand berechnet und mit dem Literaturwert [31] verglichen:

	Berechneter spezifischer Widerstand ρ $\left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$	Literaturwert spezifischer Widerstand $\rho \left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$
Eisendraht $d = 0,2 \text{ mm}$	0,139	0,1 bis 0,15
Eisendraht $d = 0,5 \text{ mm}$	0,170	
Konstantandraht $d = 0,2 \text{ mm}$	0,565	0,5
Konstantandraht $d = 0,4 \text{ mm}$	0,515	

Die Messungen werden bei gleicher Temperatur (Raumtemperatur ca. 20°C) durchgeführt. Eine weitere Messreihe bei erhöhten Temperaturen ist in dieser Versuchsreihe nicht vorgesehen, wäre aber eine mögliche Erweiterung dieser Station. Dazu müsste allerdings der Temperaturkoeffizient berücksichtigt werden.

Versuchsergebnisse:

Bei der Versuchsausführung wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Bei gleichen Abständen wurden gleiche Messwerte für die Spannung gemessen bzw. für den Widerstand berechnet. Dies galt für alle verwendeten Drähte.
- Der Widerstand ist materialabhängig
- Der Widerstand ist proportional zur Länge des Drahtes.
- Der Widerstand ist umgekehrt proportional zum Durchmesser bzw. zur Querschnittsfläche des Drahtes.

Die Lernenden sollen aus diesem Versuch Folgendes erkennen:

$$R \sim l \text{ und } R \sim \frac{1}{A}$$

$$\text{und somit } R \sim \frac{l}{A}$$

6.2 Station 2 - Versuch: Widerstandsmessung unterschiedlicher Materialien in kleinen Wannen

Unterschiedliche Materialien haben unterschiedliche Widerstände. Das bedeutet, dass sie den Strom unterschiedlich gut leiten.

Dieser Versuch behandelt die bereits in Kapitel 3 und 4 beschriebenen Fragestellungen und Probleme der Geophysik und leitet zur Geoelektrik über. Wie in der Realität, in der Wissenschaftler und Techniker unterschiedliche Gegebenheiten des Bodens vorfinden, wird auch in diesem Laborversuch mit verschiedenen Materialien gearbeitet.

Dazu werden in kleinen Wannen mehrere Bodenarten wie Sand, Kies und Erde eingefüllt. Die „festen“ Bodenarten sind unterschiedlich stark durchfeuchtet. Ebenso wird eine Wanne mit Leitungswasser gefüllt. Für die Messungen mit der Wasserwanne steht außerdem noch Salz zur Verfügung um zu überprüfen, wie sich der Salzgehalt auf den Widerstand des Materials auswirkt.

Pro Wanne sind drei Messungen vorgesehen, bei denen die Lernenden Strom und Spannung messen und daraus den Widerstand berechnen sollen.

Ziel dieses Experimentes ist, dass die Lernenden erkennen, welche Wirkung Feuchtigkeit und Salz in den unterschiedlichen Materialien auf den Widerstand haben.

Material:

Für das Experiment an dieser Station werden folgende Materialien benötigt:

- 7 kleine Plastikwannen,
- 4 Nägel,
- 4 Krokodilklemmen,
- 1 Platte und diverses Baumaterial von FISCHER-Technik für den Messrechen,
- 2 Zeigerinstrumente (Digitalmultimeter),
- 1 Spannungsquelle,
- verschiedenfarbige Kabel,
- Wasser,
- Salz,
- Kies,
- Blumenerde und
- Sand.

Messgeräte:

In diesem Versuchsaufbau werden zwei Digitalmultimeter von ZIECO des Typs ZD 2002 verwendet. Ein Messgerät wird zum Anzeigen der Stromstärke, ein Zweites zum Anzeigen der Spannung benötigt. Die digitalen Messgeräte haben den Vorteil, dass sie von den Lernenden leichter und weniger fehlerbehaftet abgelesen werden können. Somit können kleinere Unsicherheiten für den Messfehler angenommen werden.

Messrechen:

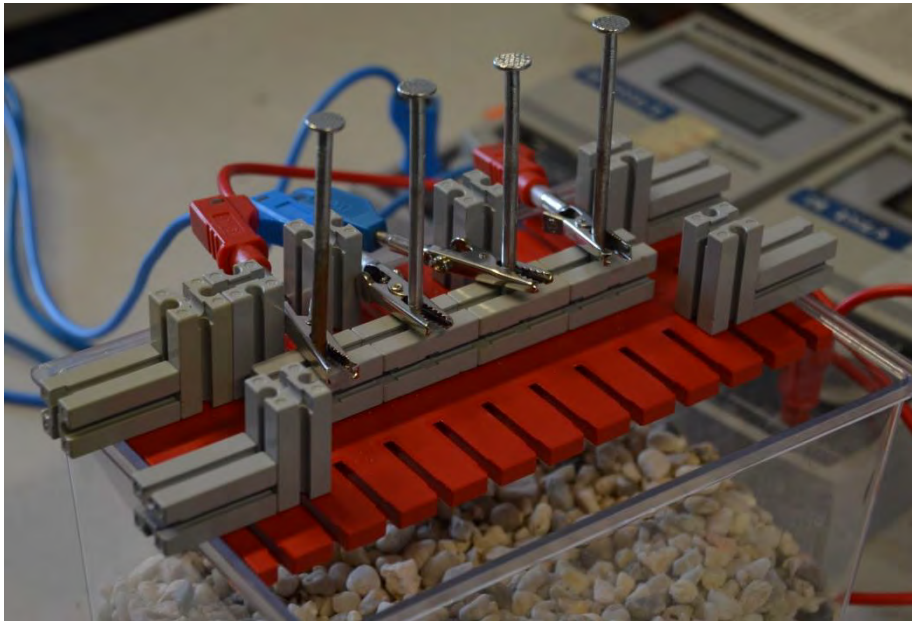


Abbildung 6.3: Verwendeter Messrechen an dieser Station.

Um diesen Versuch durchführen zu können, muss eine Halterung gefunden werden, die die Messelektroden bzw. Messsonden in einem konstant gleichbleibenden Abstand zu hält. Die Halterung soll stabil auf der Wanne aufliegen können. Wichtig ist, dass die Elektroden stabil an ihrer Position verbleiben. Dies ist sowohl für den Abstand der Elektroden als auch für ihre Eintauchtiefe von Bedeutung. Die Elektroden, in diesem Fall handelsübliche 10 cm lange Nägel, werden durch die vorhandenen Löcher der Grundplatte von FISCHER-Technik gesteckt. Die Grundplatte hat eine Größe von $18 \times 9 \text{ cm}^2$. Zur Stabilisierung der Nägel wird noch eine Vierkantschiene über den Löchern angebracht, durch die die Nägel durchgesteckt werden und mehr Seitenhalt bekommen. Die Eindringtiefe t der Nägel (im Versuch $t = 1,5 \text{ cm}$) wird mit Hilfe von Krokodilklemmen bestimmt, die die Nägel auf ihrer Höhenposition halten und gleichzeitig die Anschlüsse für die Kabel der Messgeräte bilden.

Die Anordnung der Elektroden entspricht der Wenner Anordnung (siehe Kapitel 4.4.1) mit einem Elektrodenabstand $a = 3 \text{ cm}$. Damit lässt sich im weiteren Verlauf der Messung auch der spezifische Widerstand ρ für die unterschiedlichen Materialien bei der Wenner-Kartierung berechnen.

Versuchsaufbau:

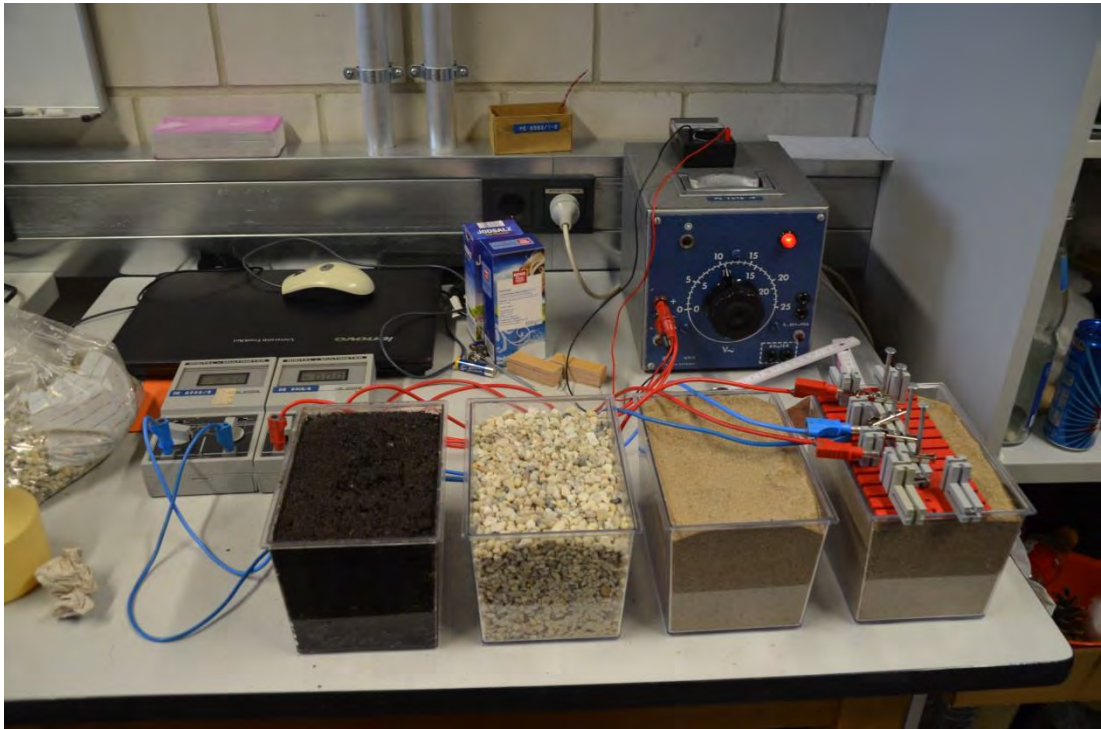


Abbildung 6.4: Versuchsaufbau zur Widerstandsmessung bei unterschiedlichen Materialien. Das Messgerät (rechts, rote Kabel) zur Strommessung ist in Reihe geschaltet – erkennbar an den roten Kabeln. Das Messgerät (links, blaue Kabel) zur Spannungsmessung ist parallel geschaltet – erkennbar an den blauen Kabeln.

Um eine Widerstandsmessung in unterschiedlichen Böden durchzuführen, benötigt man bei diesem Versuch verschiedene Plastikwannen ($16 \times 10,5 \times 11 \text{ cm}^3$, nach oben leicht breiter werdend), die mit unterschiedlichen Materialien gefüllt werden. Ausgewählt werden feinkörniger Sand, grobkörniger Kies, Blumenerde und Leitungswasser.

Der Messrechen wird auf den Rand der Wannen aufgesetzt und in den Schaltkreis eingebaut. An den äußeren Elektroden wird ein Gleichstrom eingespeist. Das Digital-Multimeter (in Abbildung 6.4 - rechts) zur Strommessung wird davor in Reihe geschaltet. Die Spannung wird am Messrechen an den beiden inneren Elektroden abgenommen und mit dem linken Digital-Multimeter parallel gemessen. Zur besseren Unterscheidbarkeit wird der Stromkreis mit roten Kabeln und der Messkreis zur Spannungsmessung mit blauen Kabeln ausgestattet.

Der Abstand der Elektroden beim Messrechen beträgt für alle Versuche an dieser Station $a = 3 \text{ cm}$ in der Wenner-Anordnung. Die Eindringtiefe der Elektroden beträgt $t = 1,5 \text{ cm}$.

Für jede Wanne werden Messungen an drei verschiedenen Positionen durchgeführt. Dabei wird der Messrechen parallel zum linken Rand immer um 1 cm von links nach rechts verschoben. Die Grundplatte bildet mit dem Wannenrand die Begrenzung der Messanordnung.

Dieser Versuchsaufbau wird für alle Experimente an dieser Station beibehalten.



Abbildung 6.5: Messpositionen des Messrechen in der kleinen Wanne bei Sandfüllung

Skizze:

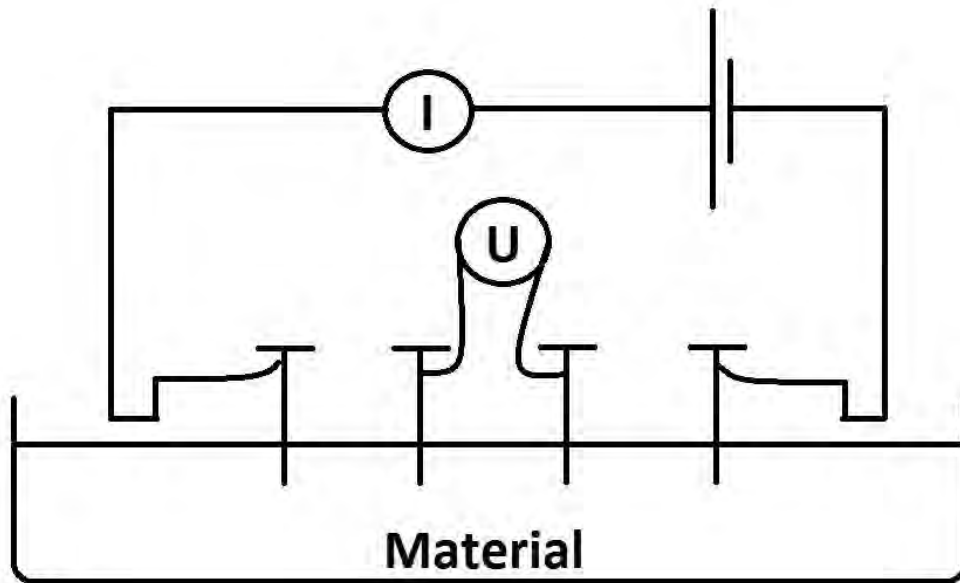


Abbildung 6.6: Schaltskizze des Versuchsaufbaus zur Widerstandsmessung unterschiedlicher Materialien.

Versuchsdurchführung:

Insgesamt werden mehrere Messreihen zu jedem Material durchgeführt. Dabei wird an der Spannungsquelle eine Eingangsspannung von $U_E = 12\text{ V}$ Gleichspannung angelegt. In einer weiteren Messreihe wird die Eingangsspannung auf $U_E = 25\text{ V}$ Gleichspannung erhöht.

Für Schülergruppen im Schülerlabor ist eine Messung mit einer Eingangsspannung von $U_E = 12\text{ V}$ ausreichend, da sie für die Widerstandswerte dieselben Werte wie eine Eingangsspannung von $U_E = 25\text{ V}$ liefert.

Für jeden Messpunkt wird ein Strom I und eine Spannung U gemessen und im Messprotokoll notiert. Daraus lässt sich der Widerstand berechnen:

$$R = \frac{U}{I}$$

$$\Omega = [R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ampere}} = \text{Ohm}$$

Die Messungen werden für die einzelnen Materialien bei unterschiedlicher Wassersättigung und Salzkonzentration durchgeführt.

Dabei zeigt sich, dass bei trockenen festen Materialien (Sand, Kies, Blumenerde) keine Strom- und Spannungsmessungen möglich sind. Der Widerstand des trockenen Materials ist zu groß. Die Materialien müssen befeuchtet werden, um überhaupt Messungen durchführen zu können. Es kann beobachtet werden, dass der elektrische Widerstand von der Wassersättigung abhängig ist. Bei geringer Befeuchtung des Materials werden hohe Widerstandswerte berechnet, bei höherer Wassersättigung sind die Widerstandswerte geringer.

Wird dem Leitungswasser Salz hinzugefügt, ändern sich die Widerstandswerte erheblich. Je höher die Salzkonzentration ist, desto niedriger ist der elektrische Widerstand.

Um Aussagen über die Veränderung des elektrischen Widerstands eines Materials bei unterschiedlicher Wassersättigung zu erhalten, werden drei Wenner-Kartierungen (Messungen) mit gleichem Elektrodenabstand von $a = 3 \text{ cm}$ bei Sand, Kies und Blumenerde durchgeführt. Dabei wird bei trockenem, mäßig feuchtem und feuchtem Material gemessen. Die elektrischen Widerstände werden jeweils berechnet und ins Messprotokoll eingetragen.

Den spezifischen Widerstand ρ erhält man, indem der Widerstand $R = \frac{U}{I}$ mit dem Geometriefaktor K aus Gleichung (4.40) multipliziert wird. Für die Wenner-Anordnung ist der Geometriefaktor $K = 2\pi a$ (Gleichung 4.41), also $K = 2\pi \cdot 0,03m$.

Der Geometriefaktor K darf benutzt werden, da in diesem Versuch die Elektroden als Punktelektroden betrachtet werden müssen. Dies gilt dann, wenn die Eindringtiefe kleiner als der Abstand der Elektroden ist ($t < a$).

Für jede Wanne wurden an drei verschiedenen Positionen (Links, Mitte, Rechts) Messungen durchgeführt und aus den Ergebnissen ein Mittelwert gebildet. Der Abstand der Messpunkte war, wie in Abbildung 6.5 ersichtlich, jeweils 1 cm. Diese Mittelwerte wurden für eine Eingangsspannung von $U_E = 12\text{ V}$ bzw. $U_E = 25\text{ V}$ in die nachfolgende Tabelle eingetragen:

Material	$U_E = 12\text{ V}$		$U_E = 25\text{ V}$	
	Widerstand $R[\Omega]$	Spezifischer Widerstand ρ $[\Omega m]$	Widerstand $R[\Omega]$	Spezifischer Widerstand $\rho[\Omega m]$
Sand trocken	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Sand feucht I (50ml Wasser)	2299,01	433,35	2208,63	416,32
Sand feucht II (150ml Wasser)	1774,97	334,57	1883,89	355,10
Sand feucht mit Salz (50ml Wasser)	54,59	10,29	40,37	7,61
Kies trocken	Seht hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Kies leicht feucht (Wasser abgegossen)	22000	4146,90	18666,71	3518,59
Kies nass (Behälter voll gewässert)	710,92	134,00	715,80	134,92
Blumenerde trocken	Seht hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Blumenerde feucht	19,61	3,70	18,62	3,51
Wasser (Leitungswasser)	159,98	30,16	161,49	30,44
Wasser mit Salz (1g Salz)	85,49	16,11	86,48	16,30
Wasser mit Salz (10g Salz)	37,99	7,16	38,11	7,18
Wasser mit Salz (50g Salz)	9,71	1,83	9,87	1,86
Wasser mit Salz (100g Salz)	3,77	0,71	3,81	0,72

Tabelle 6.1

Den Messtabellen kann entnommen werden, dass bei höherer Wassersättigung der elektrische Widerstand geringer wird. Ursache dafür ist die Lösung von Ionen aus dem Material (Sand, Erde). Dabei wird der Ladungstransport von den Ionen, der im Wasser gelösten Salze, übernommen (siehe Kapitel 4.1.2).

Die berechneten Werte der spezifischen Widerstände aus der Tabelle 6.1 können mit den Literaturwerten aus Kapitel 4.1.4 verglichen werden. Die berechneten Werte liegen im Bereich der in der Literatur angegebenen Werte.

Bei der Durchführung der Versuche wurde bei den Messungen das Phänomen der Elektrolyse beobachtet. Da an den Elektroden eine Gleichspannung angelegt wurde und sich die Nägel, bestehend aus verzinktem Eisen, im Wasser befanden, konnte beobachtet werden, dass bei der Elektrode, bei der der Strom eingespeist wurde, nach einiger Zeit kein Zinküberzug mehr vorhanden war, während an der anderen Elektrode das Zink angelagert wurde. Die differenzierten Messwerte, die sich im Laufe der Versuchsdurchführung ergaben, lassen sich durch die unterschiedlich stark von der Elektrolyse betroffenen Elektroden erklären. Der beobachtete Unterschied war jedoch eher gering, da die Elektroden nur minimal in das Material eingetaucht waren (Punktelektroden).

Versuchsergebnisse:

Bei dieser Station wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Je größer die Wassersättigung ist, desto geringer sind die Werte des elektrischen und des spezifischen Widerstandes.
- Je größer die Salzkonzentration in einem Material ist, desto geringer sind die Werte des elektrischen und des spezifischen Widerstandes.
- Je größer die Wassersättigung des Porenraumes ist, desto geringer sind die Werte des elektrischen und des spezifischen Widerstandes.

6.3 Station 3 - Versuch: Widerstandsmessung von unterschiedlichen Störkörpern in großer Wanne

In der Natur finden sich häufig Störkörper im Boden oder im Wasser. Diese verändern den gemessenen Widerstand. Wie und wie stark soll an dieser Station herausgefunden werden. Dabei soll dabei nachgewiesen werden wie groß der Störkörper ist und vermutet werden aus welchem Material er bestehen könnte. Eine Tiefensondierung kann mit diesem Versuchsaufbau nicht durchgeführt werden, da die Breite der Wanne zu gering ist. Um eine Tiefensondierung durchzuführen, muss der Abstand der Stromelektroden A und B stetig vergrößert werden, wie das Schlumberger-Verfahren vorgibt. Je weiter die Stromelektroden entfernt sind, desto tiefer kann der Strom in den Boden eindringen. Deshalb ist bei diesem Versuch lediglich eine Kartierungsmessung nach Wenner möglich.

Um den Versuch möglichst einfach zu gestalten, wird als Medium in der großen Wanne Leitungswasser verwendet. Dies hat den Vorteil, dass sich der Versuch beliebig oft wiederholen lässt. Der Messrechen mit den Elektroden kann leicht durch das Wasser gezogen werden, ohne wie bei festen Materialien immer wieder neu positioniert werden zu müssen. Dadurch kann in kurzer Zeit eine große Datenmenge erfasst werden, wobei die PC-gestützte Messwertaufnahme vorteilhaft ist.

Material:

Für das Experiment an dieser Station werden folgende Materialien benötigt:

- 1 große Plastikwanne (Mörtelwanne),
- 4 Nägel,
- 4 Krokodilklemmen,
- diverses Baumaterial von FISCHER-Technik für den Messrechen/Schlitten,
- 1 PASCO Strom/Spannungssensor,
- 1 PASCO Drehbewegungssensor,
- 1 Laptop mit „SPARKvue“-Software von PASCO,

- 1 Spannungsquelle,
- verschiedenfarbige Kabel,
- verschiedene Störkörper, wie
 - Metall,
 - Keramik,
 - Glas,
 - Stein und
 - Kunststoff (Plexiglas).

Messgeräte:

In diesem Versuchsaufbau wird ein Strom-/Spannungssensor von PASCO verwendet. Dieser misst Strom und Spannung und stellt diese Messwerte mit dem entsprechenden Programm auf dem PC dar. Daneben wird ein Drehbewegungssensor, ebenfalls von PASCO, eingesetzt, um die Position des Schlittens darzustellen. Die Verwendung der beiden Sensoren setzt in diesem Versuch das Programm „SPARKvue“ des Herstellers PASCO voraus, auf das später noch eingegangen wird.

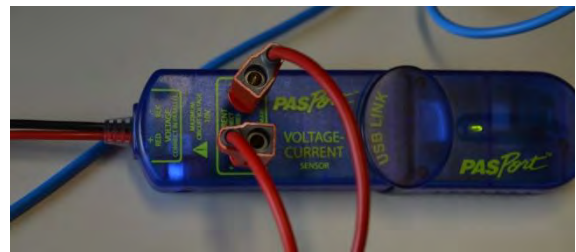
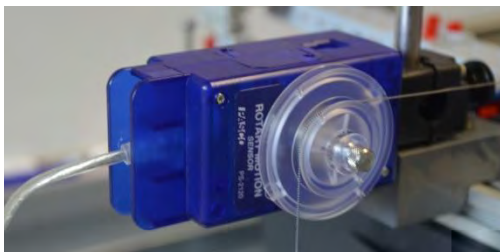


Abbildung 6.7: Drehbewegungssensor (links) und Strom-/Spannungssensor (rechts)

Versuchsaufbau:

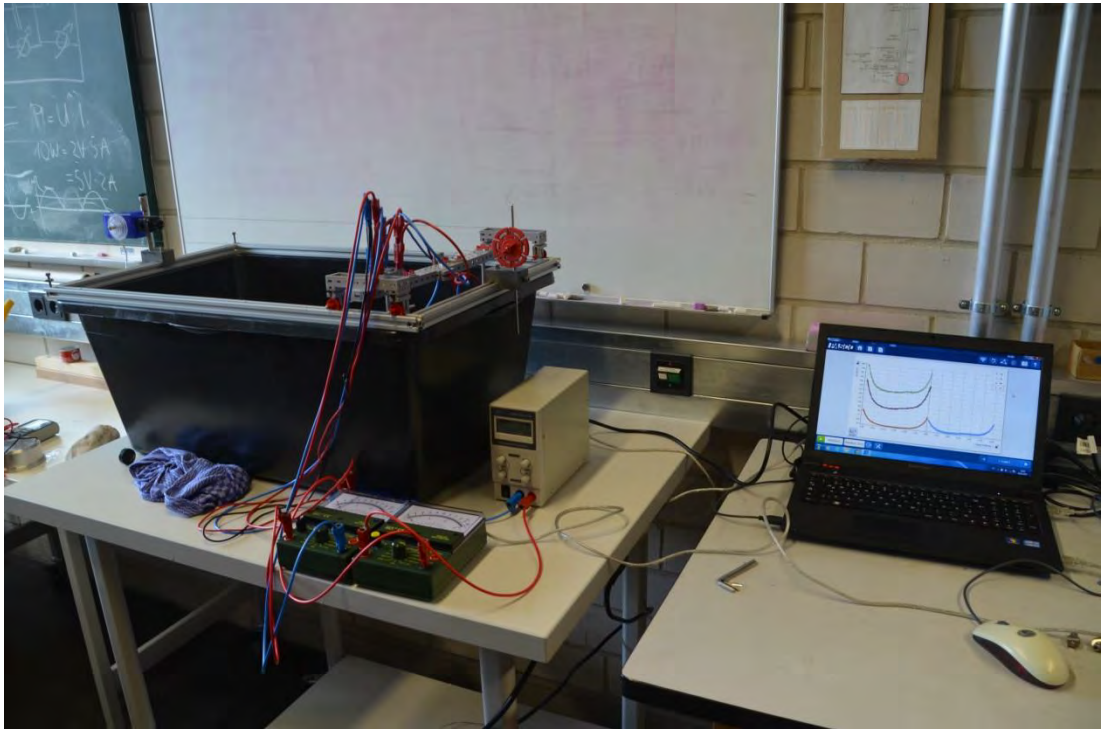


Abbildung 6.8: Versuchsaufbau zur Widerstandsmessung von unterschiedlichen Störkörpern in Wasser. Zur Messwerterfassung ist der PC an den Drehbewegungssensor bzw. Strom-/Spannungssensor angeschlossen.

Um eine Widerstandsmessung in einem Medium durchzuführen, benötigt man bei diesem Versuch eine große Plastikwanne ($60 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$, nach oben leicht breiter werdend), die mit Leitungswasser gefüllt wird. Die Wasserhöhe beträgt 14,5 cm, um auch größere Störkörper hineinlegen zu können. In die Wanne werden verschiedene Störkörper gelegt. In diesem Versuch werden ein Aluminiumblock, eine Blechdose, zwei unterschiedliche Tassen, zwei unterschiedliche Steine, eine Glasflasche und ein Plexiglasblock verwendet.

Für den Messrechen (siehe Versuch 6.2) muss ein Schlitten gebaut werden, um ihn in geeigneter Höhe über das Wasser ziehen zu können. Dazu wird der Schlitten auf den Rand der Wanne gesetzt. Der Schlitten bewegt sich auf parallelen Schienen, die auf den Rand der Wanne geschraubt werden.

Die elektrische Schaltung in diesem Versuch entspricht der Schaltung aus Versuch 6.2.

Der Abstand der Elektroden beim Messrechen beträgt für alle Versuche an dieser Station $a = 3 \text{ cm}$ in der Wenner-Anordnung. Die Eindringtiefe der Elektroden beträgt $t = 8 \text{ cm}$. Diese Eindringtiefe ist erforderlich, da der Messbereich des Strom-/Spannungssensors von -1 A bis $+1 \text{ A}$ zu groß und damit nur schlecht geeignet ist. Das hat zur Folge, dass nicht mehr von einer Punktelektrode ausgegangen und somit der spezifische Widerstand unter Berücksichtigung des Geometriefaktors K nicht mehr berechnet werden kann (siehe Gleichung 4.42).

Die rote Trägerplatte des Messrechen darf die Wasseroberfläche nicht berühren, da bei Kontakt mit der Wasseroberfläche eine Wellenbildung stattfindet. Dadurch können die Messwerte verfälscht werden.

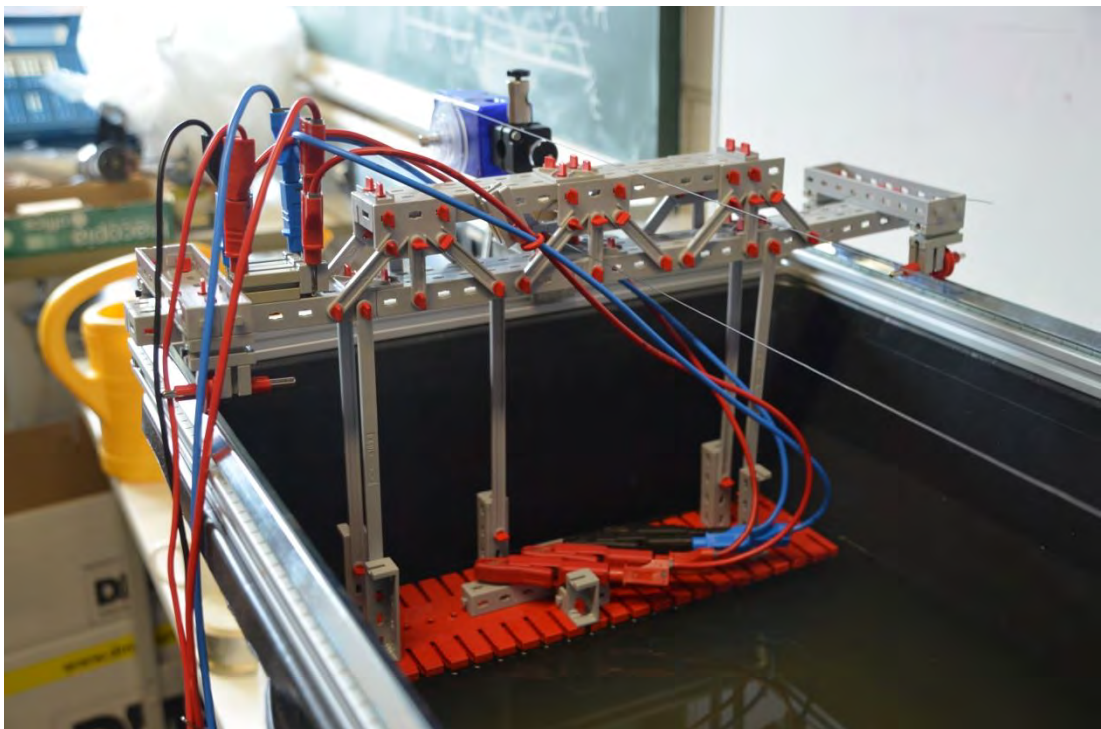


Abbildung 6.9: Versuchsaufbau zur Widerstandsmessung von unterschiedlichen Störkörpern in Wasser. Der Schlitten wird auf den Schienen auf dem Wannenrand hin und her bewegt und trägt den Messrechen mit den vier Elektroden.

Skizze:

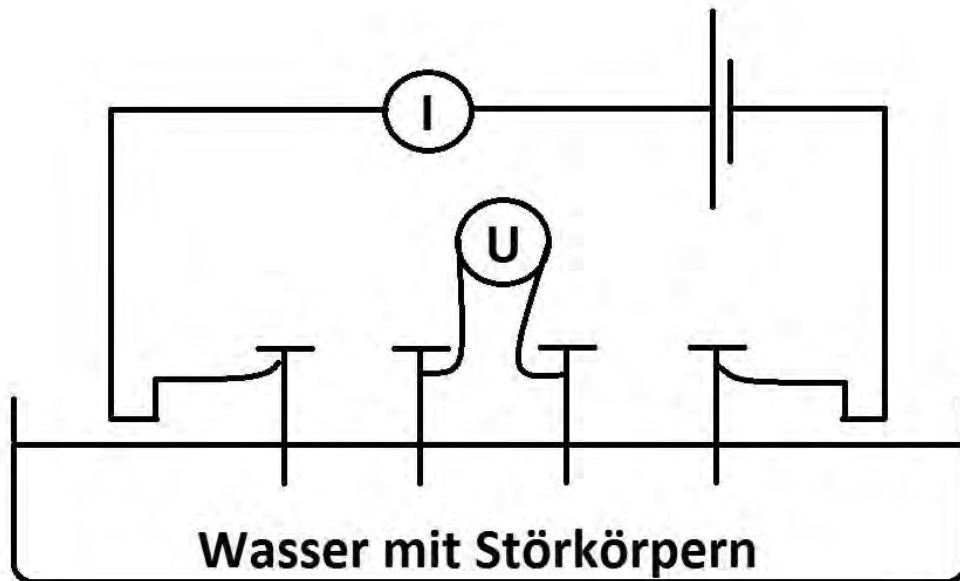


Abbildung 6.10: Schaltskizze des Versuchsaufbaus zur Widerstandsmessung unterschiedlicher Materialien.

Computereinsatz:

Für diesen Versuch wird das Programm „SPARKvue“ des Lehrmittelherstellers PASCO verwendet, um die gemessenen Daten zu berechnen und darzustellen. In den folgenden Abbildungen wird Schritt für Schritt erklärt, wie „SPARKvue“ für diesen Versuch einzurichten und zu verwenden ist.

Da Sensoren des Lehrmittelherstellers PASCO verwendet werden, liegt es nahe, ebenfalls ein Analyseprogramm des gleichen Herstellers zu verwenden, um eine möglichst gute Einbindung der Sensoren zu gewährleisten.

Der Vorgänger des Programms „SPARKvue“ ist das Programm „DataStudio“. „DataStudio“ ist von den Messmöglichkeiten und Einstellungsmöglichkeiten besser und genauer als „SPARKvue“. „DataStudio“ funktioniert allerdings nur auf Computern mit Windows Betriebssystemen bis Windows 7. „SPARKvue“ wird von allen neueren Windows Betriebssystemen unterstützt, sodass die Entscheidung getroffen wurde, das Programm „SPARKvue“ zu benutzen. Dadurch wird den Lernenden gewähr-

leistet, möglichst lange mit dieser sehr intuitiven Software experimentieren zu können.

Im Folgenden wird gezeigt, wie „SPARKvue“ in diesem Versuch verwendet wird:

Zunächst öffnet man das auf dem PC installierte Programm „SPARKvue“ (siehe Abbildung 6.11).

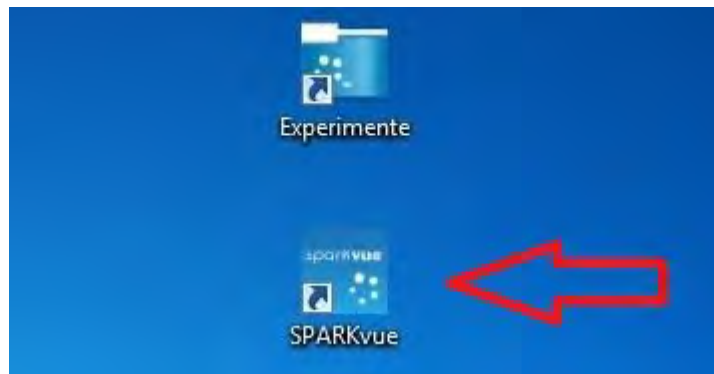


Abbildung 6.11

Sollte sich eine ältere Version von „DataStudio“ auf dem PC befinden, muss durch einen Rechtsklick das „PASPortal“ beendet werden, da die Sensoren sonst in „SPARKvue“ nicht erkannt werden (siehe Abbildung 6.12).

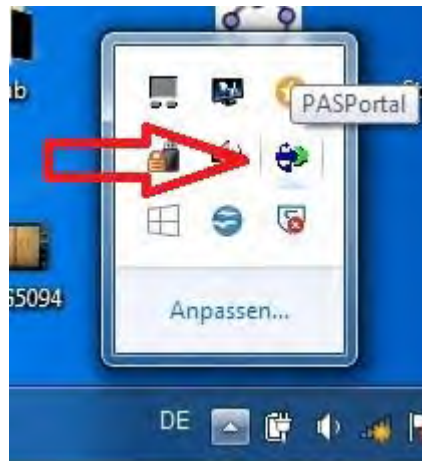


Abbildung 6.12

Ist das Programm „SPARKvue“ geöffnet, gelangt man direkt auf die Startseite (Abbildung 6.13), auf der alle im Computer verbauten (fest eingebaute Mikrofone und Kameras) und alle derzeit angeschlossenen Sensoren angezeigt werden.

Zum Starten einer Versuchsreihe muss der Button „Erstellen“ gedrückt werden.

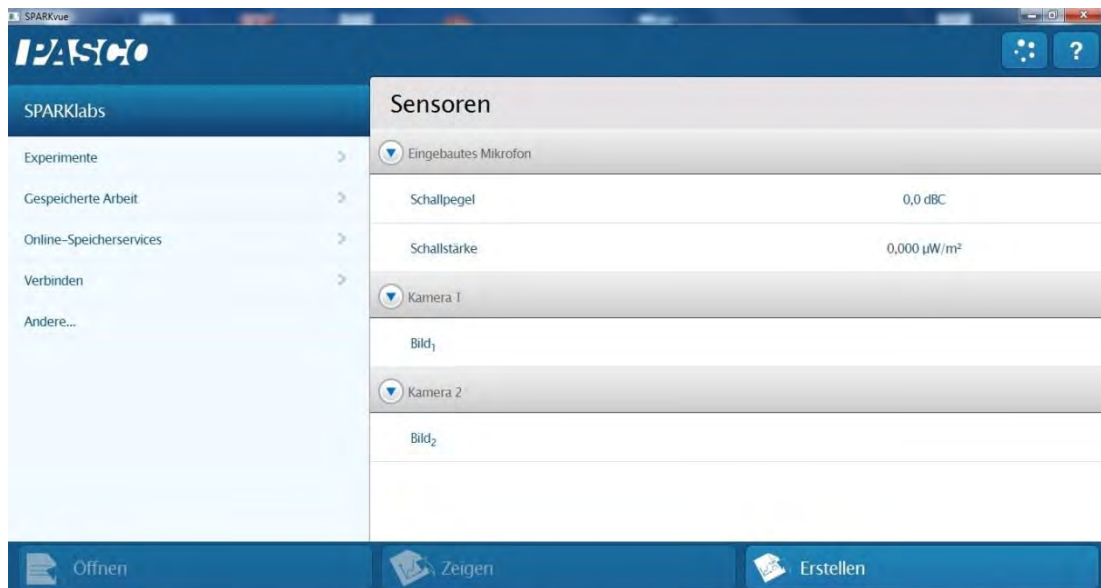


Abbildung 6.13

Danach werden dem Benutzer mehrere Auswahlmöglichkeiten angezeigt. Bei diesem Versuch ist es sinnvoll, zuerst eine Tabelle für die Messwerte und Berechnungen zu erstellen (siehe Abbildung 6.14).

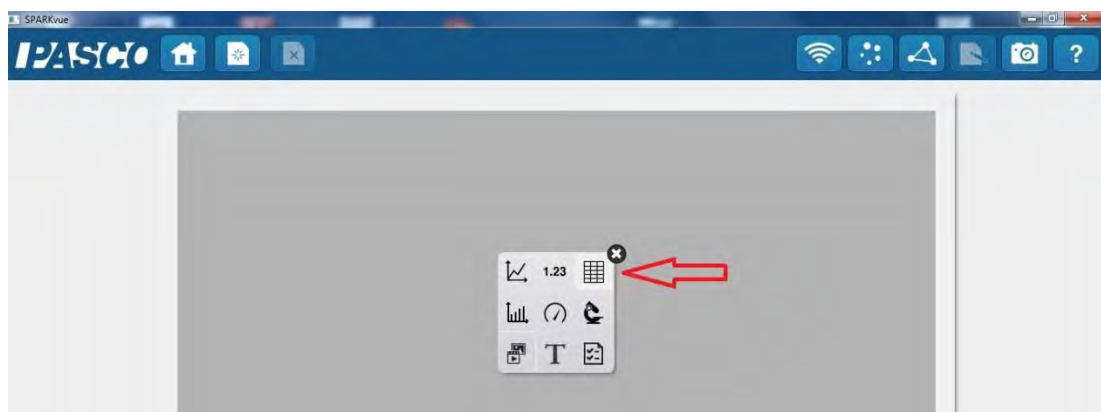


Abbildung 6.14

Da standardmäßig im Programm nur zwei Spalten voreingestellt sind, müssen noch zwei weitere Spalten, wie in Abbildung 6.15, hinzugefügt werden.

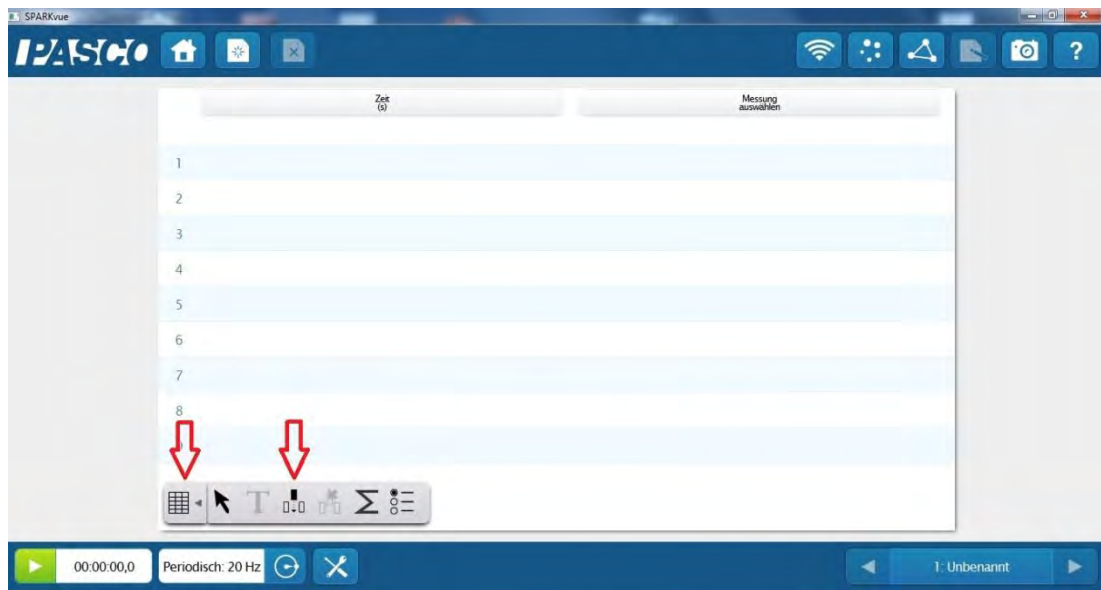


Abbildung 6.15

Nun wird jeder Spalte ein Messwert bzw. eine Berechnung zugewiesen. Bei diesem Versuch wird jeweils eine Spalte für Spannung, Strom, Widerstand und Wegstrecke benötigt.



Abbildung 6.16

Durch Klicken auf die Kopfzeile der jeweiligen Spalte lassen sich die Messwerte bzw. Berechnungen zuweisen sowie die Einheiten festlegen (siehe Abbildung 6.17). Dazu wird im Reiter „Sensoren“ der entsprechende Sensor angewählt.



Abbildung 6.17

Da der Widerstand R keine Messgröße ist, sondern aus zwei Messgrößen berechnet wird, muss dieser Wert manuell vom Benutzer eingegeben werden. Dazu klickt man, wie in Abbildung 6.18 dargestellt, auf den Reiter „Vom Benutzer eingegeben“ und unter dem Punkt „Berechnete Daten“ auf „Berechnung“.

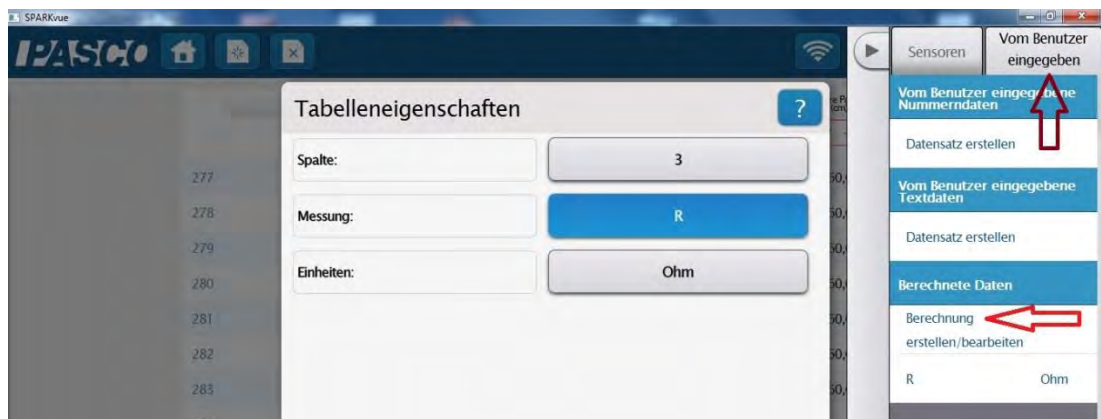


Abbildung 6.18

Es öffnet sich ein Fenster (siehe Abbildung 6.19), in das der Benutzer manuell Formeln eintragen kann. In diesem Versuch werden mit dem orangefarbenen Button „Messungen“ die Sensoren für Spannungen und Strom ausgewählt. Im Textfeld wird eine Formel zur Berechnung der gewünschten Größe erstellt. Danach wird das Fens-

ter mit dem Button „fertig“ wieder geschlossen und die gewünschte Größe wird berechnet.



Abbildung 6.19

Nun kann der Benutzer die erste Messung starten. Dies geschieht durch einen Klick auf die grüne Taste.

Um eine zweite Seite zu erstellen, klickt der Benutzer, wie in Abbildung 6.20, auf ein Button „neues Blatt“.

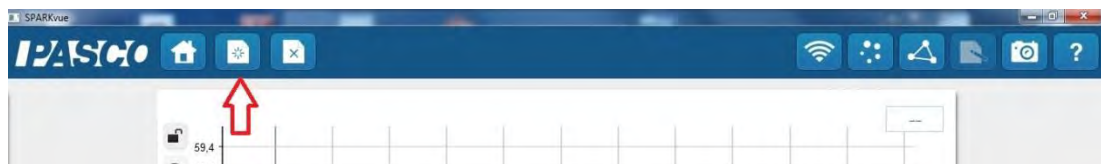


Abbildung 6.20

Es öffnet sich wieder wie zu Anfang ein Auswahlmenü, bei dem nun die Option „Graph“ wie in Abbildung 6.21 gewählt werden kann.



Abbildung 6.21

Nachdem nun ein Koordinatensystem mit einer x- und y-Achse erstellt wurde, werden die gewünschten Größen durch Mausklick den entsprechenden Feldern der Koordinatenachsen zugewiesen (siehe Abbildung 6.22).

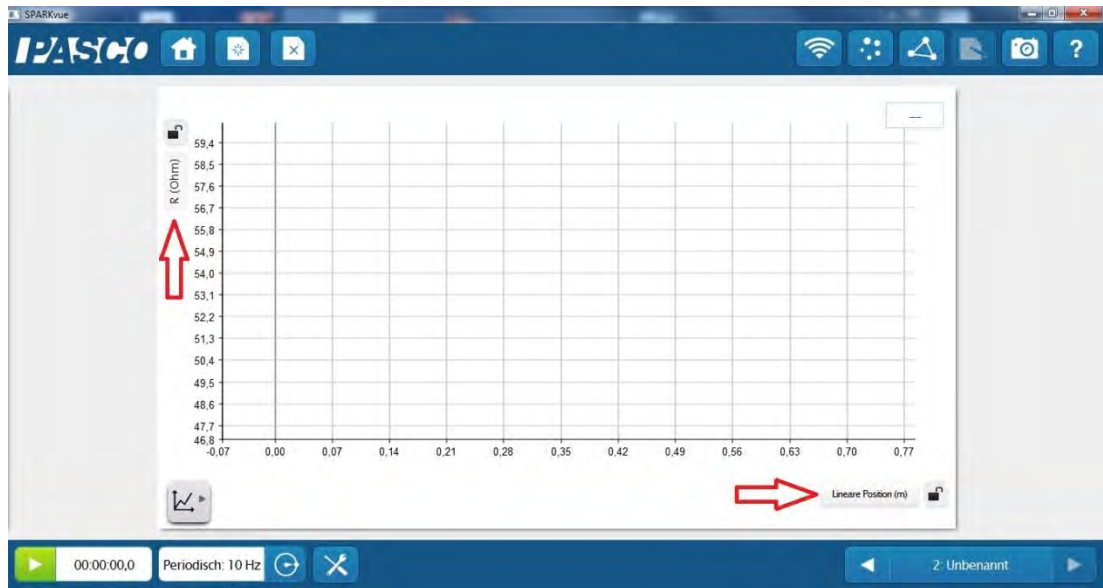


Abbildung 6.22

Es öffnet sich ein Fenster (Abbildung 6.23), in dem man den Größen eine Achse zuweisen kann. In diesem Versuch ist die Wegstrecke auf der x-Achse, der Widerstand auf der y-Achse aufgetragen.



Abbildung 6.23

Im Anschluss daran wird der Graph aus den vorgegebenen Werten erstellt, wie beispielhaft in Abbildung 6.24 ersichtlich. Eine Analyse der Graphen erfolgt im Abschnitt „Versuchsdurchführung“. In „SPARKvue“ können maximal vier Graphen in einem Koordinatensystem abgebildet werden. Finden mehr als vier Messungen statt, werden nur die letzten vier Graphen angezeigt.

Möchte man einzelne Graphen darstellen, können diese angezeigt werden, indem die anderen Graphen vom System ausgeblendet werden. Für die Lernenden ist es daher leichter, den Überblick über die Messreihen zu behalten und bei Bedarf mit den vorherigen Messungen zu vergleichen.

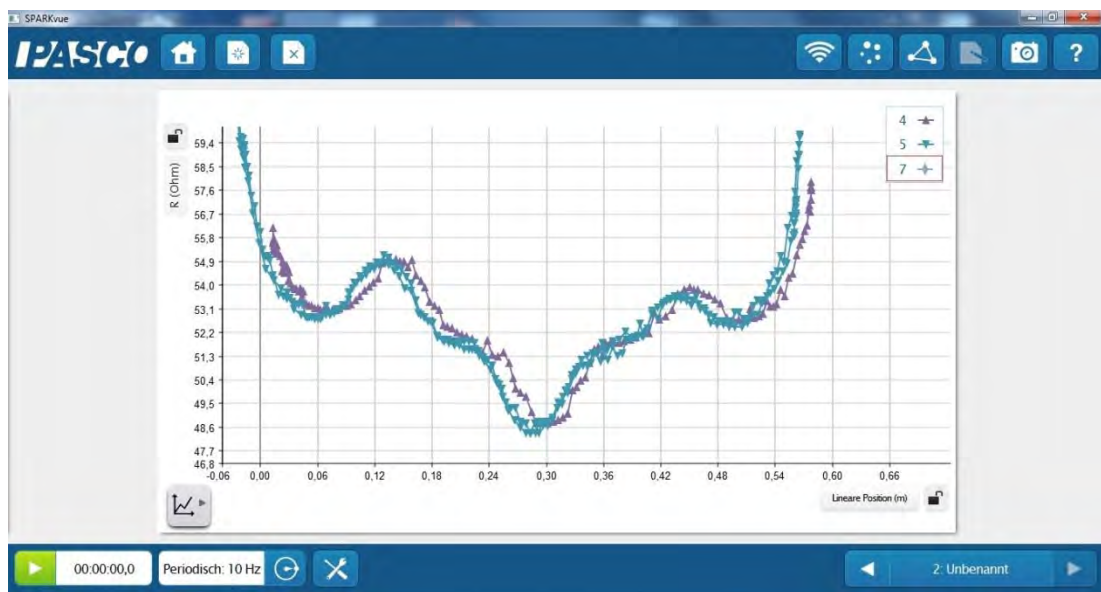


Abbildung 6.24

Nach Beendigung des Experimentes sichert der Benutzer die Ergebnisse (siehe Abbildung 6.25).

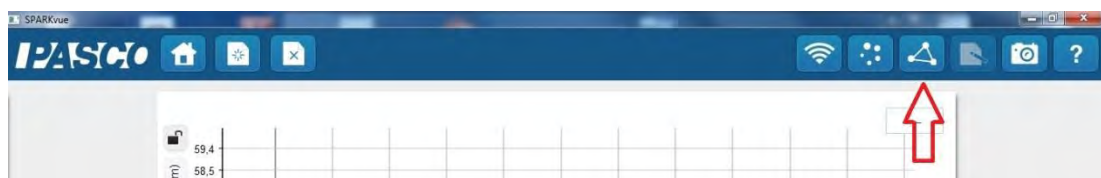


Abbildung 6.25

Ein Export der Daten in ein Tabellenkalkulationsprogramm sowie „Schnappschüsse“ der Messgraphen sind ebenso möglich.

Versuchsdurchführung:

Insgesamt werden für diesen Versuch mehrere Messreihen mit unterschiedlichen Störkörpern durchgeführt. Bei der Auswahl der Störkörper ist es wichtig auf Materialien zu achten, die einen hohen oder niedrigen elektrischen Widerstand haben, damit sich diese Materialien gut im Wasser orten lassen. Sie müssen so dimensioniert sein, dass die fest installierten Messelektroden am Messrechen sie nicht berühren.

Als Trägermedium wird Leitungswasser verwendet, dessen elektrischer Widerstand während der Messung gleich bleibt. Es steht unbegrenzt zur Verfügung und Versuche können beliebig oft unter vergleichbaren Bedingungen wiederholt werden.

Da zu diesem Versuch ein PC-Einsatz geplant wird, muss ein Trägermedium gesucht werden, bei dem eine kontinuierliche Messung mit dem Messrechen möglich ist. Diese Vorgaben lassen Wasser (als einfachste Möglichkeit) als Versuchsmedium zu.

Für die Messwertaufnahme und -auswertung auf dem PC werden über die USB-Anschlüsse ein Strom-/Spannungssensor sowie ein Drehbewegungssensor angeschlossen. Wie bereits ausgeführt, wird das Programm „SPARKvue“ des Lehrmittelherstellers PASCO für die Erfassung und Darstellung der Messwerte verwendet.

Dabei wird an der Spannungsquelle eine Eingangsspannung von $U_E = 30\text{ V}$ Gleichspannung angelegt. Für das Schülerlabor sollte aus Sicherheitsgründen eine Eingangsspannung von $U_E = 24\text{ V}$ Gleichspannung verwendet werden.

Für jeden einzelnen Messpunkt wird zum einen ein Strom I und eine Spannung U erfasst, woraus sich der Widerstand berechnen lässt:

$$R = \frac{U}{I}$$

$$\Omega = [R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ampere}} = \text{Ohm}$$

Zum anderen wurde die Wegstrecke über den Drehbewegungssensor erfasst.

Um die Messung durchzuführen, startet man die Messung und verschiebt dabei von Hand den Schlitten mit den Messelektroden auf dem Rand der großen Wanne hin und wieder zurück.

Für alle Messungen bleibt der Versuchsaufbau gleich. Es werden Wenner-Kartierungen (Messungen) mit gleichem Elektrodenabstand von $a = 3 \text{ cm}$ durchgeführt. Die Eindringtiefe der Elektroden beträgt $t = 8 \text{ cm}$, wobei eine Berechnung des spezifischen Widerstandes ρ nicht möglich ist, da die Elektroden in diesem Versuchsaufbau nicht als Punktelektroden betrachtet werden dürfen. Die hier benötigte Eindringtiefe ist (um einiges) größer als der Abstand der Elektroden. Damit ist der Geometriefaktor K aus Gleichung (4.40) nicht verwendbar. Infolgedessen ist lediglich der elektrische Widerstand und nicht der spezifische elektrische Widerstand darstellbar. Zudem ist bei den hier verwendeten Sensoren der Messbereich für die Strommessung zu groß, um feine Ströme messen zu können.

Aus den erfassten Werten für den Widerstand R und der Wegstrecke x wird in einem Koordinatensystem ein Graph erstellt. Die Werte für die Wegstrecke x werden auf der x-Achse und die Werte für den Widerstand R auf der y-Achse aufgetragen.

Nach diversen Fehlmessungen, die nicht nachvollziehbare Ausschläge in der Messung und Darstellung erkennen lassen, wird die konventionelle Spannungsquelle („PHYWE-Würfel“) durch eine Spannungsquelle mit geglätteter Gleichspannung ersetzt. Es zeigt sich, dass die PASCO-Sensoren nur eine geglättete Gleichspannung korrekt erkennen und diese im Programm dargestellt werden kann.

Um Vergleichswerte zu haben, wird der Widerstandswert des Wassers **ohne** Störkörper gemessen. Dieser Wert wird als „Nullmessung“ bezeichnet und dient als Referenzwert für die weiteren Messungen. Eine solche Nullmessung ist in Abbildung 6.26 beispielhaft dargestellt.

Zu beachten ist, dass bei allen Messungen in dieser Versuchsreihe ein starker Anstieg des Widerstandes an den Rändern der Messwanne zu beobachten ist. Grund dafür ist die schlechte elektrische Leitfähigkeit der Plastikwanne. Für einen optimalen Messbereich sollten die Störkörper in ca. 10 cm Entfernung vom Wannenrand eingelegt werden, um den Effekt des Wannenrandes auszuschließen.

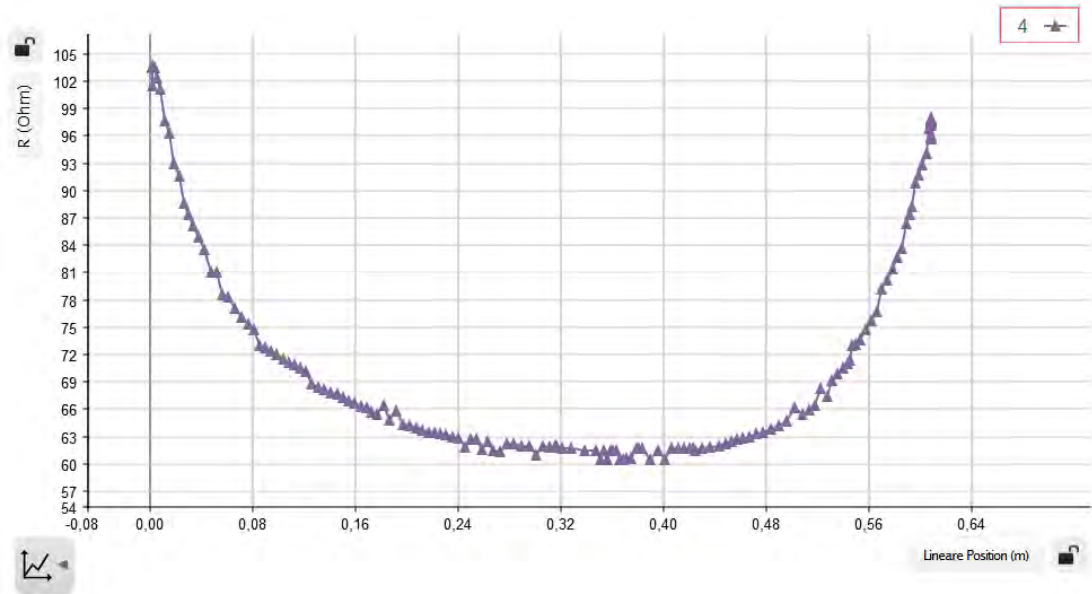


Abbildung 6.26: Nullmessung bei Wenner-Anordnung mit 3 cm Elektrodenabstand, einer Wassertiefe von 14,5 cm und einer Eingangsspannung von 30 V.

In den weiteren Versuchsreihen werden Störkörper in die Wanne gelegt.



Abbildung 6.27: Verwendete Störkörper in dieser Versuchsreihe.

Folgende Störkörper, wie in Abbildung 6.27 dargestellt, finden Verwendung in den Messreihen: Aluminiumblock, Blechdose, zwei unterschiedliche Tassen, zwei unterschiedliche Steine, Glasflasche, Plexiglasblock und Tonkacheln.

Für die Versuchsreihe werden verschiedene Störkörper in die Wanne gelegt. Exemplarisch werden im Folgenden einige Messreihen dargestellt und beschrieben.

In die Messwanne werden ein Stein und ein Plexiglasblock gelegt, wie in Abbildung 6.28 zu sehen ist.

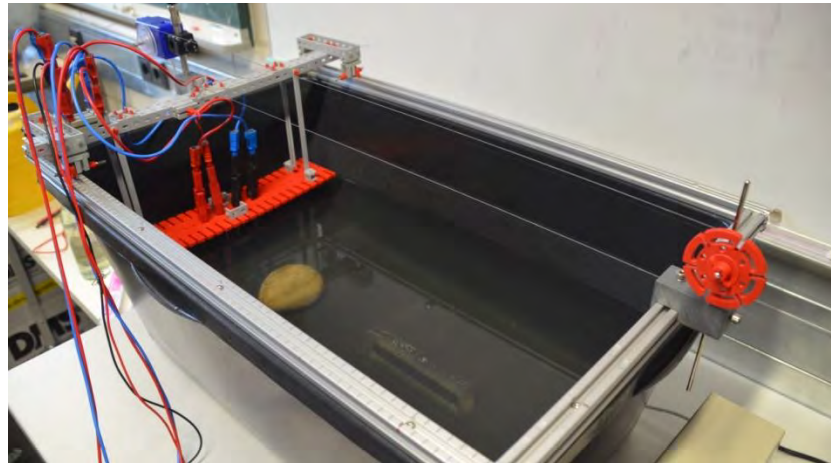


Abbildung 6.28: Messung mit den Störkörpern Stein und Plexiglasblock

Es werden zwei Messungen durchgeführt. Die Hochpunkte in den Messkurven geben die Lage der Störkörper an. Der rechte Hochpunkt in Abbildung 6.29 zeigt die Lage des Steines bei etwa 45 cm an. An der Messkurve lässt sich außerdem die Größe des Steines von etwa 7 cm ablesen. Für den Stein, dessen Lage in beiden Messungen nicht verändert wurde, beträgt der maximale Widerstand etwa 56 Ω .

Der linke Hochpunkt in Abbildung 6.29 zeigt die Lage des Plexiglasblocks an. In Messung M14 liegt die lange Seite parallel zur kurzen Seite der Messwanne bei etwa 19 cm. Die Breite des Blocks kann mit etwa 2 cm abgelesen werden. In der Messung M15 wurde der Plexiglasblock um 90° gedreht. Die erhöhten Widerstände sind in einem Bereich von 10 cm bis 25 cm abzulesen und lassen auf eine Länge des Blocks von 15 cm schließen. Der Widerstand von Plexiglas ist mit 57 Ω höher als der Widerstand des Steins.

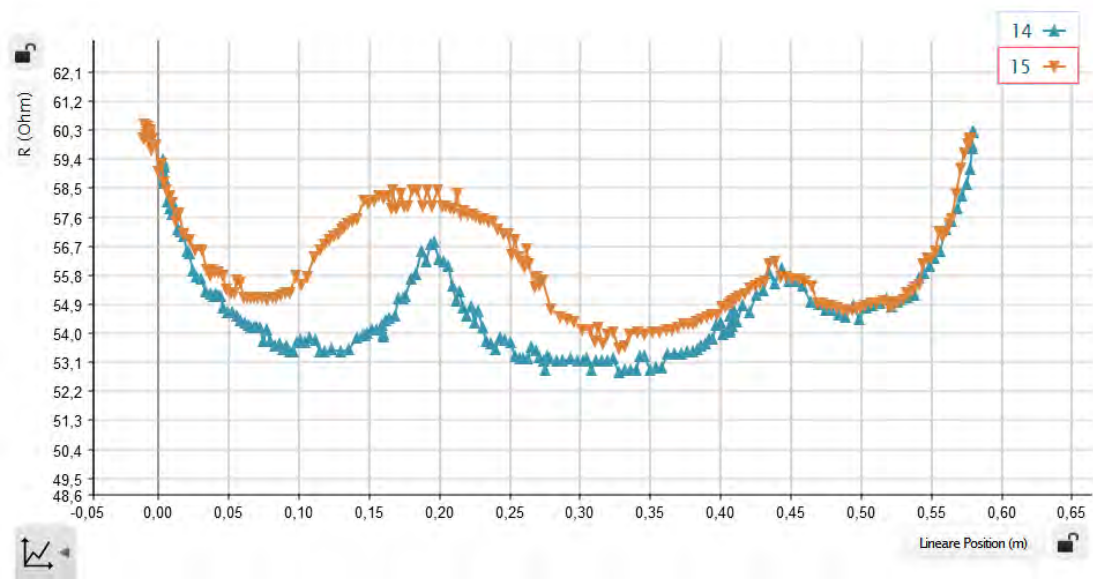


Abbildung 6.29: Störkörpermessung bei Wenner-Anordnung mit 3 cm Elektrodenabstand, einer Wassertiefe von 14,5 cm und einer Eingangsspannung von 30 V.

M14: Störkörper: Stein und Plexiglas-Block,

M15: Störkörper: Stein und Plexiglas-Block (um 90° gedreht).

In der nächsten Versuchsreihe werden als Störkörper ein Stein, eine Tasse aus Keramik und ein Becher, ebenfalls aus Keramik, verwendet.



Abbildung 6.30: Messung mit den Störkörpern Stein, Tasse und Becher

Bei der Messung M2, Abbildung 6.31, sind nur zwei Hochpunkte zu erkennen. Der dritte Störkörper wird nicht erfasst. Der Widerstand des mittleren Körpers (Tasse) ist nicht bestimmbar, da der Gegenstand zu tief im Wasser liegt und wegen der zu geringen Eindringtiefe des Stromes nicht erreicht wird. Eine Widerstandsmessung der Tasse ist nur möglich, wenn die Abstände der Elektroden in der Wenner-Anordnung vergrößert werden würden, was in diesem Versuchsaufbau baulich nicht möglich ist, da man ansonsten die gleichen Widerstandeffekte des Bodens wie bei den Wannenträndern gemessen hätte. Das Problem konnte durch das Anheben der Tasse auf zwei Tonkacheln gelöst werden. Der Widerstand der Tonkacheln verfälscht die Messung nicht, da sie für die Eindringtiefe des Stromes zu tief liegen.

Der linke Hochpunkt der Abbildung 6.31 zeigt die Lage des Steines an, der rechte Hochpunkt die Lage des Bechers. Die Länge des Steines beträgt etwa 7 cm, die Länge des liegenden Bechers etwa 8 cm. Der Maximalwiderstandswert des Steines beträgt in dieser Messung etwa $55\ \Omega$, der Maximalwiderstandswert des Bechers etwa $53\ \Omega$.

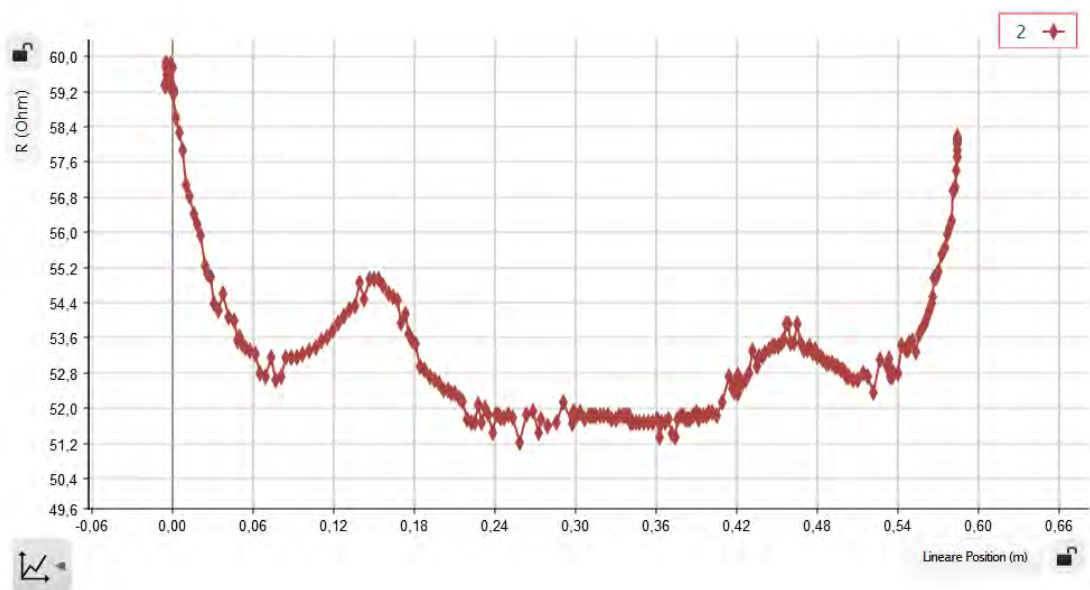


Abbildung 6.31: Störkörpermessung bei Wenner-Anordnung mit 3 cm Elektrodenabstand, einer Wassertiefe von 14,5 cm und einer Eingangsspannung von 30 V. M2: Störkörper: Stein, Tasse und Becher (Tasse nicht zu erkennen).

Nach der Modifizierung des Versuchs durch Anhebung der Tasse auf die Tonkacheln kann diese nun vermessen werden. In der Messung M3 ist sie nun als mittlerer Hochpunkt der Messkurve zu erkennen. Ihr Widerstandswert ist mit $53\ \Omega$ ähnlich hoch wie der Widerstandswert des Keramikbechers. Der Durchmesser der Tasse beträgt etwa 8 cm.

Als Modifizierung des Versuchs wird die Tasse um 180° gedreht und mit der Öffnung nach oben auf die Kacheln gestellt. Man erkennt, wenn auch nur geringfügig, die Ränder der Tasse.

Bei der Messung M4 wird die Tasse durch einen Aluminiumblock ersetzt. Der gemessene Widerstandswert des Aluminiumblocks erscheint in der Kurve M4 als Tiefpunkt, was bedeutet, dass Aluminium einen geringen Widerstand hat und daher ein guter Leiter ist. Der Widerstandswert beträgt $48\ \Omega$ und der Durchmesser des Aluminiumblocks beträgt etwa 11 cm.

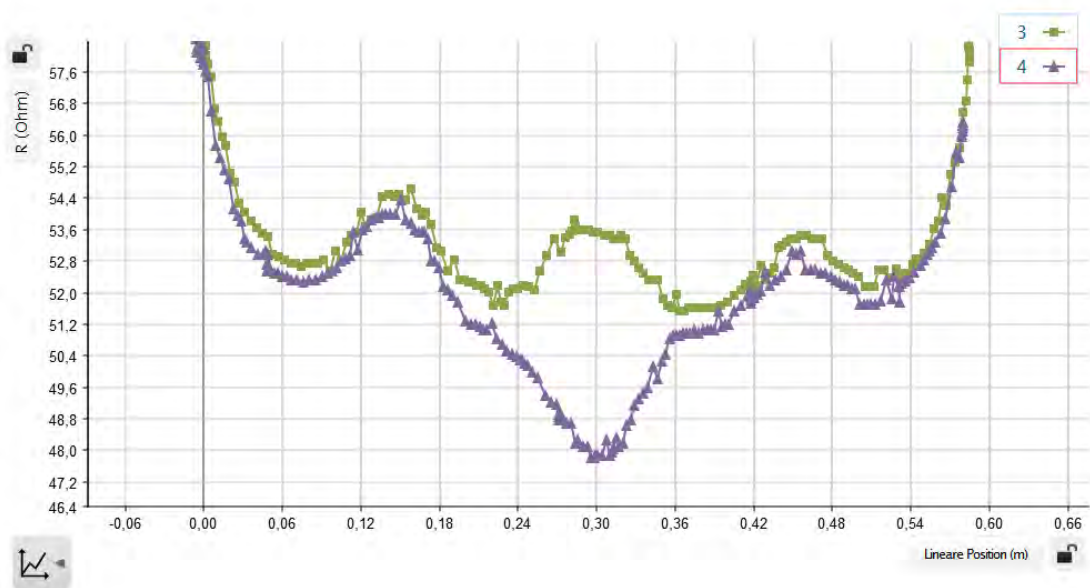


Abbildung 6.32: Störkörpermessung bei Wenner-Anordnung mit 3 cm Elektrodenabstand, einer Wassertiefe von 14,5 cm und einer Eingangsspannung von 30 V.

M3: Störkörper: Stein, Tasse und Becher (Tasse höher gelegt),

M4: Störkörper: Stein, Aluminiumblock und Becher (Aluminiumblock höher gelegt).

In einer weiteren Messreihe wird der Schlitten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durch das Wasser gezogen. Da die Abtastrate des Sensors nicht verstellt wird, können die genauesten Messergebnisse bei mäßig schneller Geschwindigkeit erzielt

werden. Die dargestellten Kurven sind trotz unterschiedlicher Geschwindigkeit vergleichbar, das beste Ergebnis liefert die Kurve M5 in Abbildung 6.34.



Abbildung 6.33: Messung mit den Störkörpern Stein, Aluminiumblock und Becher

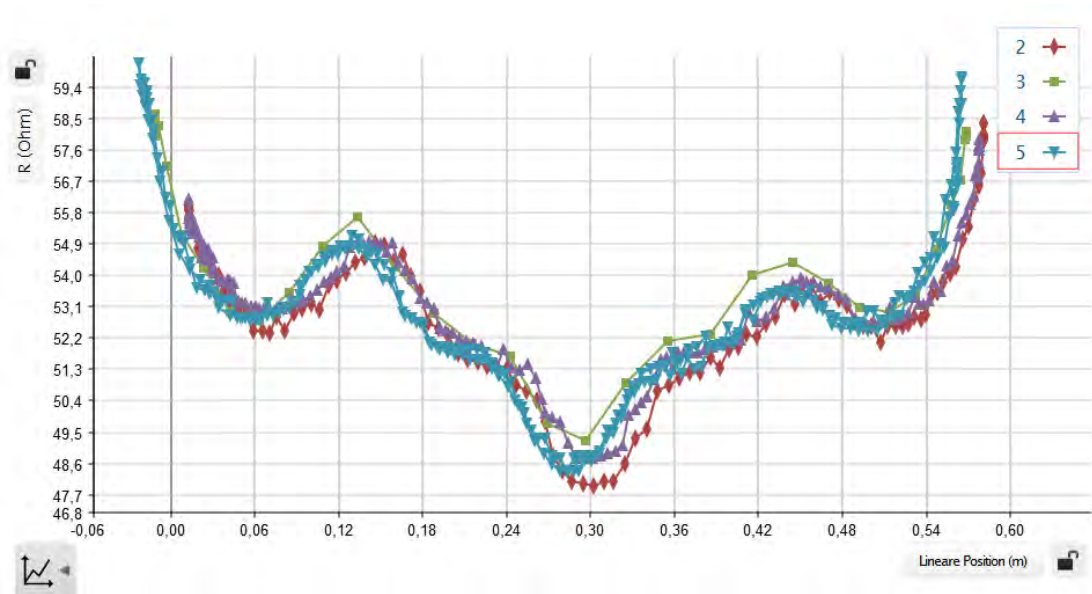


Abbildung 6.34: Störkörpermessung bei Wenner-Anordnung mit 3 cm Elektrodenabstand, einer Wassertiefe von 14,5 cm und einer Eingangsspannung von 30 V. M3 bis M5: Störkörper: Stein, Aluminiumblock und Becher (Aluminiumblock höher gelegt), Schlitten stetig langsamer werdend.

Es zeigen sich Schwierigkeiten bei der Benutzung des Programms „SPARKvue“, wenn noch vor der ersten Messung eine zweite Seite mit einem Graphen erstellt werden soll. Daher kann der Graph immer erst nach der ersten Messung gezeichnet werden.

Der bereits an der zweiten Station aufgetretene Effekt der Elektrolyse kann bei der Versuchsreihe dieser dritten Station ebenfalls beobachtet werden. Durch das tiefere Eintauchen der Elektroden ist dies deutlich stärker sichtbar.

Ebenfalls muss bei der Durchführung aller Versuche darauf geachtet werden, dass während der Messung keine Wellen erzeugt werden, um die Messwerte nicht zu verfälschen. Durch die Wellen wären die Elektroden unterschiedlich hoch im Wasser und könnten abweichende Werte liefern.

Versuchsergebnisse:

Bei dieser Station wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Unterschiedliche Materialien der Störkörper haben unterschiedliche Widerstände.
- Durch die stetige Messung über eine definierte Messstrecke lässt sich die Größe der Störkörper bestimmen.
- Ob ein Störkörper zu erkennen ist, hängt von der Eindringtiefe der Elektroden bzw. den Elektrodenabständen ab.

6.4 Station 4 - Textstation: Geoelektrik in Forschung und Praxis

Zu einem methodisch vielfältigen Physikunterricht gehört auch die Arbeit mit Texten (siehe Kapitel 5.4). Die hier vorliegenden Texte, Basistexte und Fallbeispiele (siehe Anhang) sind Beispiele und Informationen über die Anwendungsgebiete und Einsatzmöglichkeiten der Geoelektrik im Rahmen der Geophysik, die nicht nur für die Forschung und die Arbeit im Labor von Interesse sind, sondern ebenfalls die hohe Bedeutung in der Ökonomie und Ökologie zeigen.

Als Basistext wurde eine Anleitung für ein geophysikalisches Geländepraktikum zur Geoelektrik gewählt. Dieser ist für Studierende gedacht und eignet sich, den Lernenden einen ersten Einblick in die Fachsprache zu geben, mit der die Lernenden im schulischen Bereich noch wenig Berührungspunkte haben, die jedoch im Rahmen eines Studiums und der universitären Arbeit erforderlich ist.

Die Fallbeispiele wurden der Homepage eines professionellen Anbieters entnommen, der seine Leistungen im Bereich der „zerstörungsfreien geophysikalischen Untersuchungen“ anbietet. Die Ausschreibungen und Fallbeispiele richten sich an potentielle Kunden, wobei die verwendete Sprache sehr wissenschaftlich und fachbezogen ist. Hier haben die Lernenden wieder die Gelegenheit, Bereiche kennenzulernen, die außerhalb ihrer Lebenswelt liegen.

Bevor sich die Lernenden mit dem Basistext und den Fallbeispielen auseinandersetzen, haben sie die Gelegenheit, in einem Video, die wichtigsten Aspekte über Geoelektrik zu erfahren. Dieses Video stellt die wichtigsten Aspekte der Geoelektrik in einer den Lernenden verständlichen Sprache vor.

Material:

- Video „Goelektrik – Strukturen im Untergrund sichtbar machen“, 1:36 min, YouTube-Video, Autor: Redaktion Erde [32]
- Basistext & Übersicht; Autoren: Praktikumsunterlagen Angewandte Geophysik TU Braunschweig [4] & GGU Karlsruhe [33]
- Fallbeispiele; Autoren: GGU Karlsruhe [34]

Alle Materialien dieser Station sind im Anhang aufgeführt.

Durchführung:

Durch die kurze Videosequenz werden die Grundlagen der Goelektrik visualisiert und bereiten den Einstieg in den Basistext und die Fallbeispiele vor.



Abbildung 6.35: Videosequenz: Goelektrik – Strukturen im Untergrund sichtbar machen

Der Basistext unterstützt die Videosequenz inhaltlich und führt auf die Fallbeispiele hin.

Die Fallbeispiele stellen ein breites Spektrum der Anwendungsmöglichkeiten geophysikalischer Methoden mit besonderem Schwerpunkt auf die Geoelektrik dar. Die ausgewählten Texte sollten derart bearbeitet werden, dass in einer anschließenden Informations- und Diskussionsphase die wirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung des Einsatzes der Geoelektrik und ihre vielfältigen Anwendungsbereiche klar erkennbar dargestellt werden können.

7. Durchführung des Schülerlabors

Das Goethe-Schülerlabor Physik an der Goethe Universität Frankfurt kann von Lernenden aller Altersstufen besucht werden. Es bietet eine Fülle von Möglichkeiten, sich mit Fragestellungen der Physik auseinanderzusetzen und Physikexperimente in Ergänzung zum Physikunterricht durchzuführen.

Das von mir entwickelte Schülerlabor „Goelektrik“ richtet sich an die Lernenden der Oberstufe und die Lernenden am Ende der Mittelstufe.

Für den Besuch des Schülerlabors sollte etwa ein halber Tag (etwa vier Stunden) eingeplant werden.

Für das Schülerlabor „Goelektrik“ wurden vier Stationen entwickelt. Für jede Station sollten 45 Minuten eingeplant werden. Nach der Durchführung der ersten beiden Stationen ist es sinnvoll, eine Pause von 15 bis 20 Minuten einzuplanen, um die Konzentrationsfähigkeit der Lernenden zu erhalten. Danach erfolgt die Durchführung der Versuche an den beiden verbliebenen Stationen.

Das Schülerlabor wurde in zwei Durchgängen erprobt. Der erste Durchgang erfolgte mit 20 Lernenden eines Physikkurses der Einführungsphase mit heterogener Leistungsfähigkeit und Leistungsbereitschaft.

Der zweite Durchgang wurde mit einer gemischten Gruppe aus Lernenden der Klasse 9, der Einführungsphase und eines Physik-Leistungskurses mit insgesamt 32 Lernenden durchgeführt. Die Motivation der Lernenden war überdurchschnittlich gut, genauso wie ihre Leistungsfähigkeit. Es wurden heterogene Gruppen gebildet, wobei darauf geachtet wurde, dass in jeder Gruppe mindestens ein Mitglied des Leistungskurses war. Die räumliche und sachliche Ausstattung war bei der Gruppengröße von 32 Lernenden an ihrer Kapazitätsgrenze. Trotz der beengten Verhältnisse arbeiteten die Lernenden diszipliniert und zielorientiert.

Die Arbeit im Schülerlabor begann um 9:00 Uhr nach der Begrüßung mit einer kurzen Einführung in das Thema Goelektrik im Rahmen dieser Examensarbeit. Nach

der Gruppeneinteilung und Ausgabe der Arbeitshefte (Geoelektrik – siehe Anhang) begannen die Gruppen um 9:15 Uhr mit dem Experimentieren an den einzelnen Stationen. Da die Versuche an den einzelnen Stationen unabhängig voneinander bearbeitet werden konnten, war die Reihenfolge der Stationen beliebig. Nach Beendigung der Arbeit an zwei Stationen wurde eine viertelstündige Pause gemacht. Im Anschluss daran wurde an den beiden verbliebenen Stationen gearbeitet. Gegen 12:30 Uhr waren die Versuche beendet. Nach einer kurzen Abschlussrunde endete um 13:00 Uhr der Besuch im Schülerlabor.

Um den Aufbau der Experimente für das Schülerlabor vorzubereiten, waren etwa zwei Stunden Arbeitszeit nötig, die Abbaupzeit betrug etwa eine Stunde.

Im ersten Durchgang waren die Gruppentische und die Experimentiertische voneinander getrennt, was sich als ungeeignet erwies, da ein Teil der Lernenden beim aktiven Experimentieren nicht aktiviert werden konnte.

Um die Aktivität der Lernenden zu erhöhen, wurde im zweiten Durchgang auf die Tischtrennung verzichtet und die Lernenden saßen an Gruppentischen um die Experimente.



Abbildung 7.1: Lerngruppe aus dem zweiten Durchgang an den Stationstischen

7.1 Station 1

Die Lernenden experimentierten an der Station 1 wie es in Kapitel 6.1 beschrieben wurde.

Das Experimentieren stellte für die Lernenden keine Schwierigkeit dar, jedoch bereitete das Erstellen der Schaltskizze Probleme, die mit Hilfe des Betreuers gelöst werden konnten. Dabei erwies sich das den Lernenden vorliegende Arbeitsheft als hilfreich, um die Ergebnisse zu notieren, die Widerstände und spezifischen Widerstände zu berechnen und die erwarteten Folgerungen aus den Messreihen zu ziehen.

Um mehr Lernende beim Experimentieren einzubinden und die zeitlichen Vorgaben nicht zu überschreiten, wurde das Experiment im zweiten Durchgang ein zweites Mal aufgebaut.

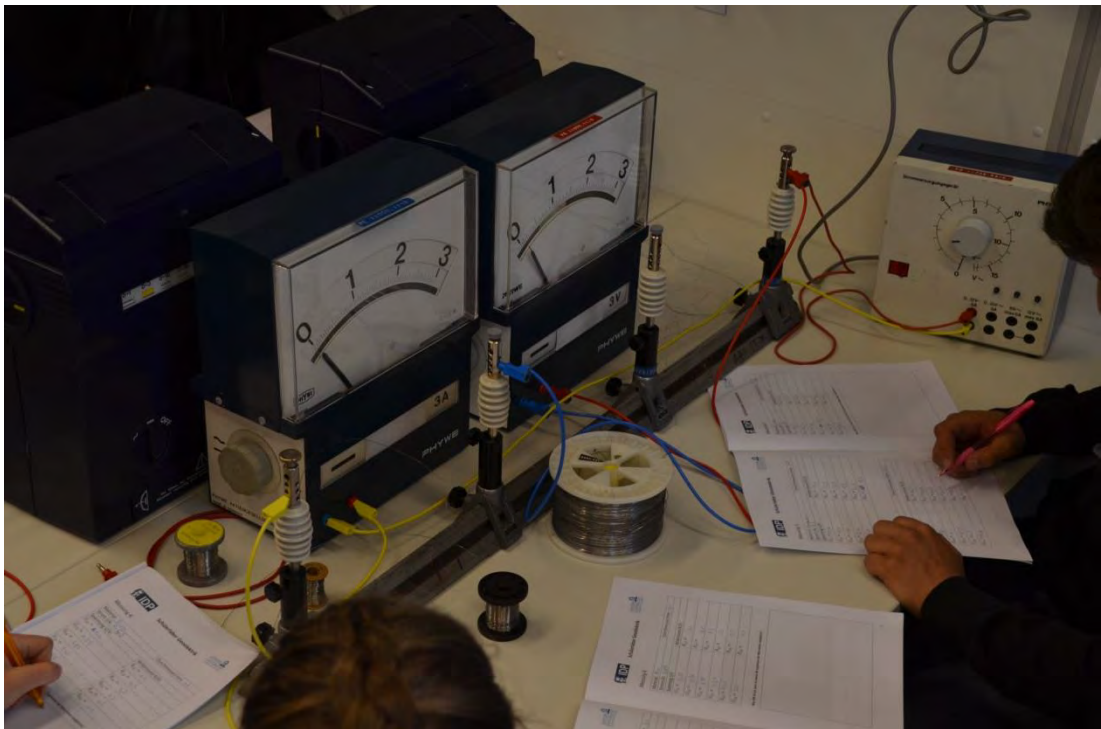


Abbildung 7.2: Station 1 im Schülerlaborversuch

7.2 Station 2

Die Lernenden experimentierten an der Station 2, wie es in Kapitel 6.2 beschrieben wurde. Bei der Widerstandsmessung mit Salzwasser wurde ausschließlich 10g Salz verwendet, da bereits unter diesen Gegebenheiten der gewünschte Effekt deutlich sichtbar war.

Das Experimentieren stellte für die Lernenden keine Schwierigkeit dar, jedoch bereitete ebenfalls das Erstellen der Schaltskizze Probleme, die mit Hilfe des Betreuers gelöst werden konnten. Auch an dieser Station half das vorliegende Arbeitsheft den Lernenden bei der Durchführung der Versuche.

Um mehr Lernende beim Experimentieren einzubinden und die zeitlichen Vorgaben nicht zu überschreiten, wurde wie in Station 1 das Experiment im zweiten Durchgang ein zweites Mal aufgebaut.

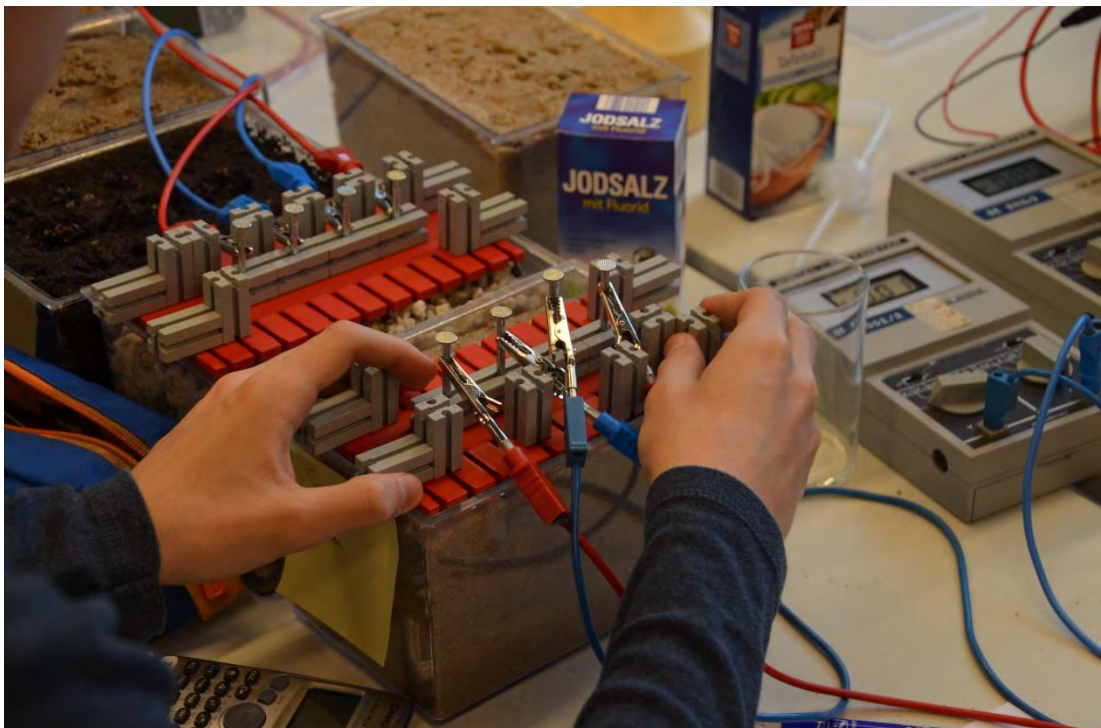


Abbildung 7.3: Station 2 im Schülerlaborversuch: Widerstandsmessung bei feuchtem Sand.

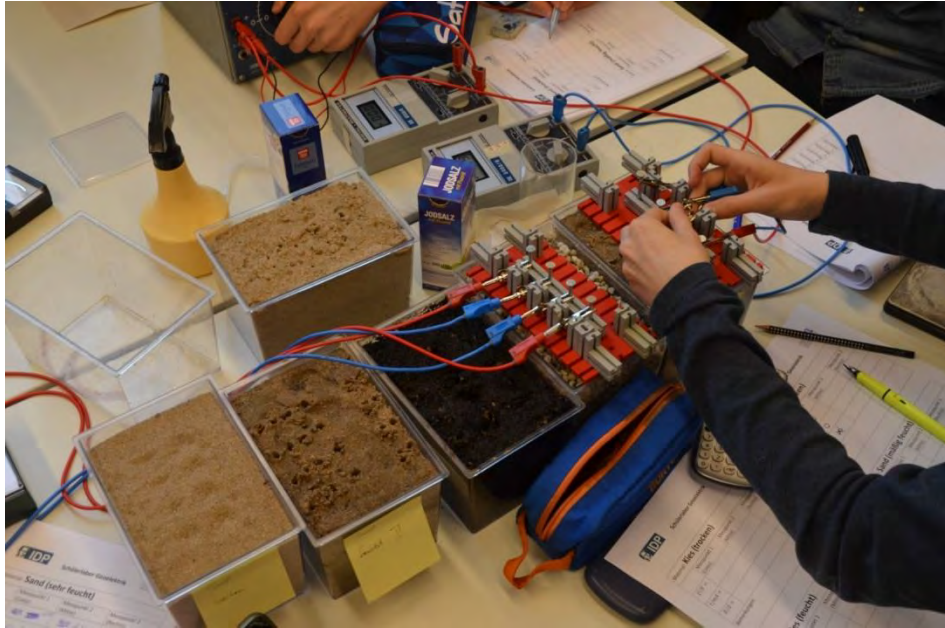


Abbildung 7.4: Station 2 im Schülerlaborversuch: Widerstandsmessung bei Kies (links) und feuchtem Sand (rechts).

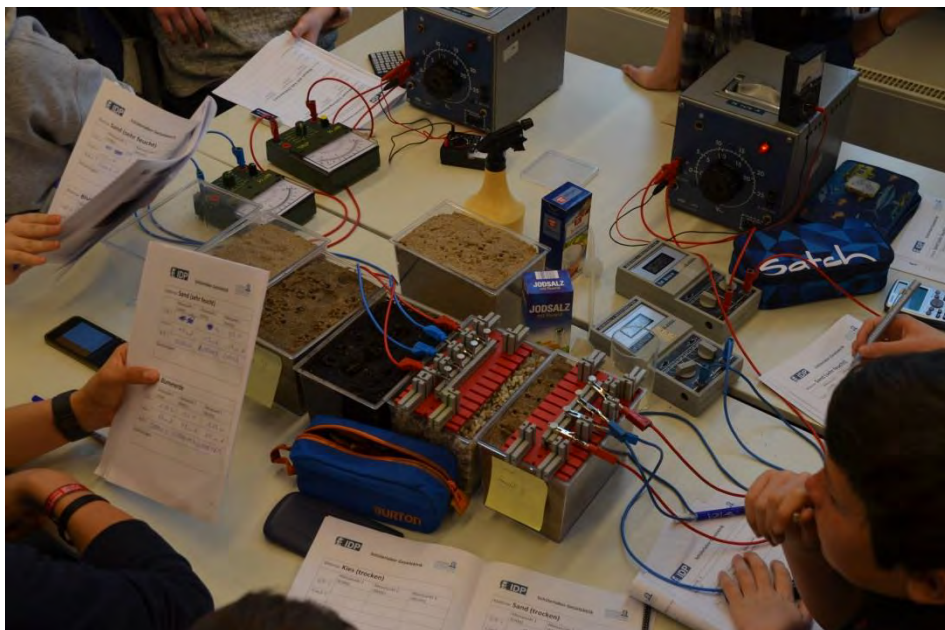


Abbildung 7.5: Station 2 im Schülerlaborversuch: Widerstandsmessung und Sicherung der Ergebnisse.

7.3 Station 3

Die Lernenden experimentierten an der Station 3, wie es in Kapitel 6.3 beschrieben wurde.

Das Experimentieren stellte für die Lernenden keine Schwierigkeit dar, jedoch bereitete ebenfalls das Erstellen der Schaltskizze Probleme, die mit Hilfe des Betreuers gelöst werden konnten. Auch an dieser Station half das vorliegende Arbeitsheft den Lernenden bei der Durchführung der Versuche.

Das an dieser Station verwendete PC Programm „SPARKvue“ konnte von den Lernenden intuitiv bedient werden und stellte sie nicht vor große Probleme. Im ersten Durchgang musste die Messtabelle durch die Lernenden selbst erstellt werden. Dies erwies sich trotz genauer Anleitung als großes Problem und konnte nur mit Hilfe des Betreuers gelöst werden. Im zweiten Durchgang wurde den Lernenden bereits eine fertige Messtabelle in „SPARKvue“ bereitgestellt. Dies erwies sich als großer Vorteil, da sich die Lernenden auf die wesentlichen Aspekte dieses Versuches konzentrieren konnten und Zeit für die Entwicklung eigener Ideen für die Versuchsdurchführung hatten. Neben der obligatorischen Nullmessung, der Klärung des Wannenrandproblems und der Messung einzelner Störkörper wurden auch beliebige Störkörperkombinationen gemessen. Dabei konnten die Lernenden die Lage und Anzahl der Störkörper beliebig bestimmen und die Messungen durchführen.

Die anfänglichen Schwierigkeiten, die einzelnen Störkörper und deren Größe den entsprechenden Messgraphen zuzuordnen, wurden nach einem kleinen Hinweis des Betreuers überwunden. Die weiteren Messungen und Zuordnungen erfolgten problemlos.

Exemplarisch wird die Durchführung des Versuches mit unterschiedlichen Störkörpern nach Ideen der Lernenden und die entsprechenden Messgraphen gezeigt.

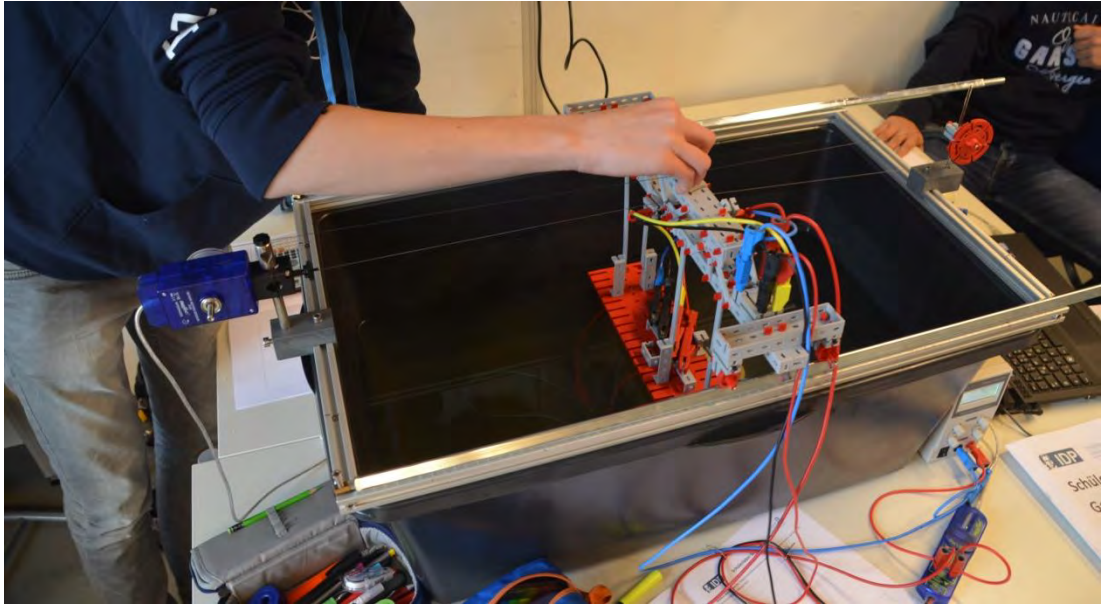


Abbildung 7.6: Station 3 im Schülerlaborversuch: Widerstandsmessung von Störkörpern. Durchführung des Versuches.



Abbildung 7.7: Station 3 im Schülerlaborversuch: Widerstandsmessung von Störkörpern und Darstellung der Messgraphen auf dem PC.



Abbildung 7.8: Station 3 im Schülerlaborversuch: Widerstandsmessung von Störkörpern: Glasflasche, Blechdose, Plexiglasblock

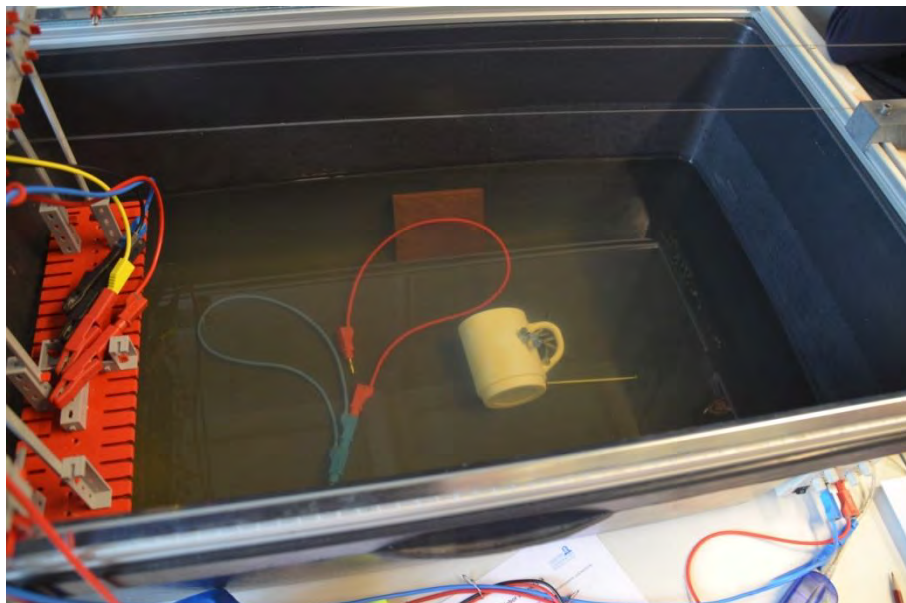


Abbildung 7.9: Station 3 im Schülerlaborversuch: Widerstandsmessung von Störkörpern: Kabel, Becher, Nägel

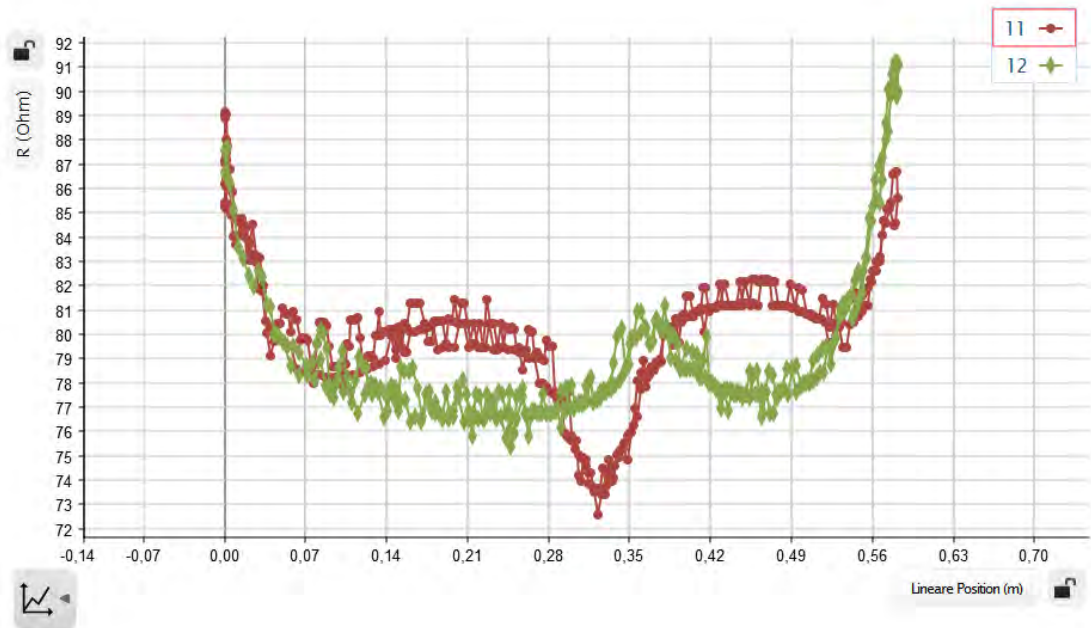


Abbildung 7.10: Station 3 im Schülerlaborversuch:

M11: Störkörper: Glasflasche, Blechdose, Plexiglasblock wie in Abbildung 7.8

M12: Störkörper: Kabel, Becher, Nägel wie in Abbildung 7.9

7.4 Station 4

Die Lernenden experimentierten an der Station 4, wie es in Kapitel 6.4 beschrieben wurde.

Das Video motivierte die Lernenden, sich mit den weiteren Texten der Geoelektrik auseinander zu setzen.

Der Basistext, der im ersten Durchgang verwendet wurde, erwies sich als zu lang und sowohl sprachlich als auch inhaltlich als zu schwierig. Er wurde im zweiten Durchgang durch einen wesentlich kürzeren und verständlicheren Text ersetzt.

Die Fallbeispiele wurden von den Lernenden als sehr aufschlussreich erachtet, jedoch mussten auch hier Fachbegriffe durch den Betreuer geklärt werden.

Die anschließenden Diskussionen verliefen konstruktiv und trugen dazu bei, den Lernenden die Bedeutung der Geoelektrik aus ökonomischer und ökologischer Sicht näher zu bringen.



Abbildung 7.11: Station 4 im Schülerlaborversuch: Textarbeit

8. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Examensarbeit war die Entwicklung eines Schülerlabors zur Geoelektrik an der Goethe-Universität Frankfurt am Main. Mit der Geoelektrik als Teildisziplin der Geophysik kommt man als Physiklehramtsstudent normalerweise nicht in Berührung. Darin lag für mich der Reiz. Ich wollte mich mit dieser Materie auseinandersetzen und sie mit einem Schülerlabor in den Fokus der Lehrenden und Lernenden rücken.

Nach einer kurzen Einleitung, worum es in dieser Examensarbeit inhaltlich geht, wurde zunächst die Disziplin der Geophysik näher beleuchtet.

Als Teil der geophysikalischen Messungen wurde nochmals explizit auf die Geoelektrik, genauer die Gleichstromgeoelektrik, eingegangen. Mit der Messmethode der (Gleichstrom-)Geoelektrik wird in der Wissenschaft mittels Widerstandsmessung des Bodens eine Aussage über die Beschaffenheit des Bodens, seines Materials und eventueller Störkörper gegeben.

Im folgenden Kapitel (Kapitel 4) wurden die theoretischen Grundlagen für die Messungen der Geoelektrik dargestellt und hergeleitet. Das Kapitel 5 beschäftigte sich mit der Grundlage des Schülerlabors, der Einbindung von Experimenten und dem Computereinsatz im Physikunterricht sowie mit der inhaltlichen Verortung der Lerneinheit Geophysik in den Lehrplan bzw. KCGO.

In Kapitel 6 wurden die vier für das Schülerlabor entwickelten Stationen beschrieben. Hierbei wurden der Versuchsaufbau, eine Schaltskizze, eine Materialliste, die Durchführung sowie die Versuchsergebnisse jeder Station formuliert. Im Einzelnen waren dies an Station 1 eine Widerstandsmessung an verschiedenen Drähten, an Station 2 eine Widerstandsmessung von unterschiedlichen Materialien, an Station 3 eine Widerstandsmessung von Störkörpern und an Station 4 eine Textstation zur Anwendung von Geoelektrik in Wissenschaft und von Dienstleistern (beispielsweise Ingenieurbüros).

Die Durchführung des Schülerlabors Geoelektrik in zwei Durchgängen an der Goethe-Universität wurde in Kapitel 7 erläutert. Dort wurden auch Situationen beschrieben, die nach dem ersten Durchgang mit den Lernenden aufgefallen waren und zu Verbesserungen der Stationen und Arbeitsblättern für die zweite bzw. kommende Gruppen führten.

Ein Schülerlabor zum Thema Geoelektrik durchzuführen ist möglich – für eine ständige Aufnahme in das Schülerlaborprogramm der Goethe-Universität würde ich empfehlen, zusätzlich ein weiteres Themengebiet aus der Geophysik zu wählen, um eine möglichst große Vielfalt an Methoden zu zeigen. Dieses Themengebiet könnte die Geomagnetik, die Seismik oder das Georadar sein.

Des Weiteren kann, wenn das Schülerlabor um ein zweites Themengebiet ergänzt wurde, der Besuch des Labors von einem halben Tag (vier Stunden) auf einen ganzen Tag ausgeweitet werden, um einen „Feldversuch“ auf einer freien Fläche durchzuführen.

Folgende Änderungen könnten im Rahmen des Ausbaus dieses Schülerlabors vorgenommen werden:

- **Station 1** ersatzlos streichen und durch ein Experiment des anderen Themengebietes ersetzen,
- **Station 2** bestehen lassen bzw. folgende Ergänzungen überlegen:

Mehrere Wannen mit unterschiedlicher Salzkonzentration vorbereiten,

- **Station 3** ebenfalls bestehen lassen bzw. folgende Ergänzungen überlegen:

In mehreren Versuchsdurchgängen Salz in das Wasser einbringen und die Störkörper erneut vermessen. Schrittweise die Salzkonzentration erhöhen, um die Aussage zu beweisen: Desto salziger ein Medium ist, desto besser ist die Abgrenzung zum Störkörper?

- **Station 4** durch Texte des anderen Themengebietes erweitern.

9. Literaturverzeichnis

- [1]: Berckhemer, Hans (2005): *Grundlagen der Geophysik*. 2. Auflage, Veröffentlichung des Fachbereichs Geowissenschaften der Johann Wolfgang Goethe Universität, Frankfurt.
- [2]: Karlsruher Institut für Technologie (2017): *Geophysikalisches Institut - Studium*.
<https://www.gpi.kit.edu/Studium.php> (letzter Zugriff: 2.3.2017)
- [3]: Börner, Ralph-Uwe (2016): *Vorlesungsskript Geoelektrik – Modul Elektromagnetik und Geoelektrik, WS 2016/17*. Technische Universität Bergakademie Freiberg, S. 12 – 64.
- [4]: Hördt, Andreas (2010): *Praktikumsunterlagen Angewandte Geophysik im Modul TF3..* Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik. TU Braunschweig
<http://www.soil.tu-bs.de/lehre/Bachelor-Feldmethoden/2010/Geoelektrik.pdf> (letzter Zugriff: 25.3.2017)
- [5]: Junge, Andreas (2016): *Vorlesungsskript Geoelektrik*. Johann Wolfgang Goethe Universität, Frankfurt.
- [6]: Munstermann, Dirk: *Geophysik*. Geophysikbüro Munstermann. Gommern.
<https://www.geophysik-munstermann.de/geophysik/geoelektrik.php> (letzter Zugriff: 20.2.2017)
- [7]: Kroner, Corinna (2012): *Geophysikalisches Laborpraktikum Geoelektrik*. Überarbeitet von Jentzsch, Gerhard und Schindler, Peter im August 2008. Universität Jena. 15. Oktober 2012.
<http://www.geophysik.uni-jena.de/igwphymedia/Versuchsanleitungen/Geoelektrik-p-29.pdf> (letzter Zugriff: 15.3.2017)
- [8]: Wassermann, Joachim (2006): *Gleichstromgeoelektrik*. Ludwig-Maximilians-Universität München.
https://www.geophysik.uni-muenchen.de/~jowa/obs/Geoelektrik_bach.pdf (letzter Zugriff: 13.3.2017)
- [9]: Knödel, Klaus; Krummel, Heinrich; Lange, Gerhard (Hrsg.) (2005).: *Geophysik. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Band 3*. 2. Überarbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin. S. 71 – 100 und 128 – 173.
- [10]: Demtröder, Wolfgang (2004): *Experimentalphysik 2 – Elektrizität und Optik*. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, S. 43 – 80.

- [11]: Von Larcher, Thomas; Keßler, Markus (1998): *Protokoll zur Geländeübung Geoelektrik*. Freie Universität Berlin. 18. März 1998.
<http://page.mi.fu-berlin.de/larcher/geoelektrik.pdf> (letzter Zugriff: 15.3.2017)
- [12]: Wikipedia: *Geoelektrik*
<https://de.wikipedia.org/wiki/Geoelektrik> (letzter Zugriff: 18.3.2017)
- [13]: Wikipedia: *Schülerlabor*
<https://de.wikipedia.org/wiki/Schülerlabor> (letzter Zugriff: 18.3.2017)
- [14]: Haupt, Olaf J.; Domjahn, Jürgen; Martin, Ulrike; Skiebe-Corrette, Petra; Vorst, Silke; Zehren, Walter; Hempelmann, Rolf (2013): *Schülerlabor – Begriffsschärfung und Kategorisierung*. In: MNU 66/6 (1.9.2013), Verlag Klaus Seeberger. Neuss. S. 324-330.
http://www.lernortlabor.de/download_action.php?load=MNU66
http://genau-bb.de/wp-content/uploads/Schuelerlabor-Kategorisierung_MNU.pdf (letzter Zugriff: 5.3.2017)
- [15]: Engeln, Katrin; Euler, Manfred (2004): *Forschen statt Pauker*. In: Physik Journal 11/2004. Weinheim.
http://www.dlr.de/schoollab/Portaldata/24/Resources/dokumente/Forschenstatt_pauken.pdf (letzter Zugriff: 22.3.2017)
- [16]: Hempelmann, Rolf (2016): *BNE im Schülerlabor*. Aus: Bildung für nachhaltige Entwicklung, Broschüre, LernortLabor.
<http://www.bne-im-schuelerlabor.de/> (letzter Zugriff: 22.3.2017)
- [17]: Mikelskis, Helmut F. (Hrsg.) (2010): *Physikdidaktik – Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II*. 2. Auflage 2010, Cornelsen Verlag Scriptor GmbH, Berlin. S. 149 – 182.
- [18]: Mikelskis-Seifert, Silke; Rabe, Thorid (Hrsg.) (2010): *Physik-Methodik – Handbuch für die Sekundarstufe I und II*. 2. Auflage 2010, Cornelsen Verlag Scriptor GmbH, Berlin. S. 70 – 81, 95 – 114, 158 – 171, 200 – 210.
- [19]: Hessisches Kultusministerium (2010): *Lehrplan Hessen Physik, Gymnasium Oberstufe*
http://verwaltung.hessen.de/irj/servlet/prt/portal/prtroot/slimp.CMReader/HKM_15/HKM_Internet/med/4a1/4a1704b5-267f-121a-eb6d-f191921321b2,22222222-2222-2222-2222-222222222222,true (letzter Zugriff: 5.4.2017)

- [20]: Tesch, Maike; Duit, Reinders (2002): *Zur Rolle des Experiments im Physikanfangsunterricht*. Didaktik der Physik Frühjahrstagung Leipzig 2002
http://www.uni-regensburg.de/physik/didaktik-physik/medien/VeranstMat/gemMat/ExpSem/exp_i_phunt_duit.pdf (letzter Zugriff: 16. 3. 2017)
- [21]: Duit, Reinders; Tesch, Maike; Mikelskis-Seifert, Silke (2010): *Das Experiment im Physikunterricht*. Piko-Brief Nr. 7 (Februar 2010). Kiel
<http://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-der-physik/piko/pikobriefe032010.pdf> (letzter Zugriff: 15. 3. 2017)
- [22]: Wilsner, Hartmut; Schecker, Horst; Hopf, Martin (Hrsg.) (2015): *Physikdidaktik kompakt*. Aulis Verlag in der Stark Verlagsgesellschaft.
- [23]: Kunert, Peter (2014): *Hausarbeit: Experimente in Physikunterricht*. Dozentin: Dr. Friederike Korneck. unveröffentlicht
- [24]: Vogt, Patrick (2007): Computereinsatz im naturwissenschaftlichen Unterricht, Diverse Beiträge zu diesem Thema auf Lehrer-online.de
<http://www.lehrer-online.de/computereinsatz-naturwissenschaften.php> (letzter Zugriff: 9.9.2014)
- [25]: Kunert, Peter (2014): *Hausarbeit: Computereinsatz im Physikunterricht am Beispiel des EKG und EOG*. Dozent: Prof. Dr. Thomas Wilhelm. unveröffentlicht
- [26]: Wilhelm, Thomas (2011): *Allgemeine Fachdidaktik*. Vorlesungsskript, WS 2011/12. Universität Augsburg.
<http://www.thomas-wilhelm.net/vorlesung/AllgemeineDidaktik.pdf> (letzter Zugriff: 8.4.2017)
- [27]: Hessisches Kultusministerium: *Kerncurriculum gymnasiale Oberstufe Physik* Hessen.
<https://kultusministerium.hessen.de/sites/default/files/media/kcgo-ph.pdf> (letzter Zugriff: 18.3.2017)
- [28]: Hessisches Kultusministerium: *Bildungsstandards und Inhaltsfelder* Hessen Physik, Sekundarstufe I.
https://kultusministerium.hessen.de/sites/default/files/media/kerncurriculum_physik_gymnasium.pdf (letzter Zugriff: 20.3.2017)
- [29]: Wikipedia: *Konstantan*
<https://de.wikipedia.org/wiki/Konstantan> (letzter Zugriff: 22.4.2017)
- [30]: Stölzer, Mathias (2001): Hinweise zur Fehlerrechnung. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
<http://www.physik.uni-halle.de/Lehre/Grundpraktikum/gpfehler.htm> (letzter Zugriff: 25.4.2017)

- [31]: Formel-Sammlung.de: *Formelsammlung spezifischer Widerstand*.
<http://www.formel-sammlung.de/formel-Spezifischer-elektrischer-Widerstand-und-elektrische-Leitfaehigkeit-3-25-158.html> (letzter Zugriff: 20.4.2017)
- [32]: RedaktionErde (2014): *Geoelektrik*. YouTube-Video. Veröffentlicht: 21. März 2014.
<https://www.youtube.com/watch?v=CuI5uADLV9k> (letzter Zugriff: 12.3.2017)
- [33]: Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen mbH (GGU): *Gängige Verfahren und typische Anwendungen*. Karlsruhe.
http://www.ggukarlsruhe.de/Allgemeines/Suchl/hauptteil_suchl.html (letzter Zugriff: 27.3.2017)
- [34]: Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen mbH (GGU): *GGU – Fallbeispiele – vollständige Übersicht*. Karlsruhe.
http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/hauptteil_beispiele_ggu_fallbeispiele_ge.html (letzter Zugriff: 27.3.2017)

Alle verwendeten Textquellen befinden sich in den Fallbeispielen.

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-wstau_Erkundung_eines_Grund/hauptteil_el-wstau_erkundung_eines_grund.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-stoer_Erkundung_einer_geolo/hauptteil_el-stoer_erkundung_einer_geolo.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-fluss_Erkundung_der_Decksch/hauptteil_el-fluss_erkundung_der_decksch.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Kante_Lokalisierung_einer_uber/hauptteil_kante_lokalisierung_einer_uber.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-wasse_Geoelektrische_Vorerk/hauptteil_el-wasse_geoelektrische_vorerk.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/hauptteil_geophysik_karst.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/Karst_A/hauptteil_karst_a.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/Karst_B/hauptteil_karst_b.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/Karst_C/hauptteil_karst_c.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/Karst_D/hauptteil_karst_d.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-hoehl_Suche_einer_Karsthohl/hauptteil_el-hoehl_suche_einer_karsthohl.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Baugrunderkundung_Tiefbau/wk-baug_Geoelektrische_Vorerku/hauptteil_wk-baug_geoelektrische_vorerku.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Baugrunderkundung_Tiefbau/Windenergie/hauptteil_windenergie.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Archaeologie_Archaometrie/wk-his-c_Suche_nach_historisch/hauptteil_wk-his-c_suche_nach_historisch.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Archaeologie_Archaometrie/wk-rdk_Widerstandskartierung_u/hauptteil_wk-rdk_widerstandskartierung_u.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Ortung_Atlas ten_Suche_Detekti/el-altab_Erkundung_einer_Altab/hauptteil_el-altab_erkundung_einer_altab.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Ortung_Atlas ten_Suche_Detekti/deponie_Deponieerkundung_mitte/hauptteil_deponie_deponieerkundung_mitte.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Ortung_Atlas ten_Suche_Detekti/el-fahne_Deponieumfelderkundun/hauptteil_el-fahne_deponieumfelderkundun.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Ortung_Atlas ten_Suche_Detekti/i-brache_Geophysikalische_Erku/hauptteil_i-brache_geophysikalische_erku.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstörungsfreie_Prüfung_i/hafenm_Zerstörungsfreie_Prüfung/hauptteil_hafenm_zerstörungsfreie_prüfung.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstörungsfreie_Prüfung_i/Korrosionprüfung_an_eingemauert/hauptteil_korrosionprüfung_an_eingemauert.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstörungsfreie_Prüfung_i/feu-salz_Bestimmung_von_Feucht/hauptteil_feu-salz_bestimmung_von_feucht.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstörungsfreie_Prüfung_i/Naessee_Stuetzmauer/hauptteil_naessee_stuetzmauer.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstörungsfreie_Prüfung_i/Geoelektrik_Erdbauwerke/hauptteil_geoelektrik_erdbauwerke.html

(letzte Zugriffe: 27.3.2017)

10. Selbstständigkeitserklärung

Ich, Peter Albert Kunert, versichere hiermit, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen, als die angegebenen Hilfsmittel verwandt und Stellen, die anderen benutzten Druck- und digitalisierten Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, mit Quellenangaben kenntlich gemacht habe. Soweit nicht anders angegeben, wurden alle Abbildungen selbst erstellt.

(Peter Albert Kunert)

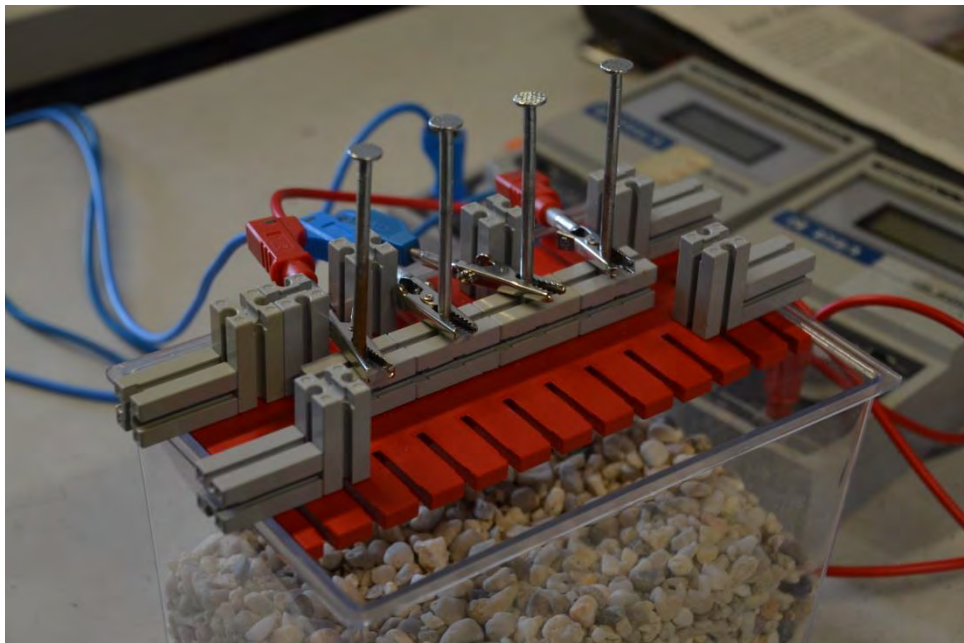
Rüsselsheim, den 10. Mai 2017

11. Anhang

- Schülerlabor Arbeitsblätter
- Schülerlabor Basistext
- Schülerlabor Fallbeispiele



Schülerlabor Geoelektrik

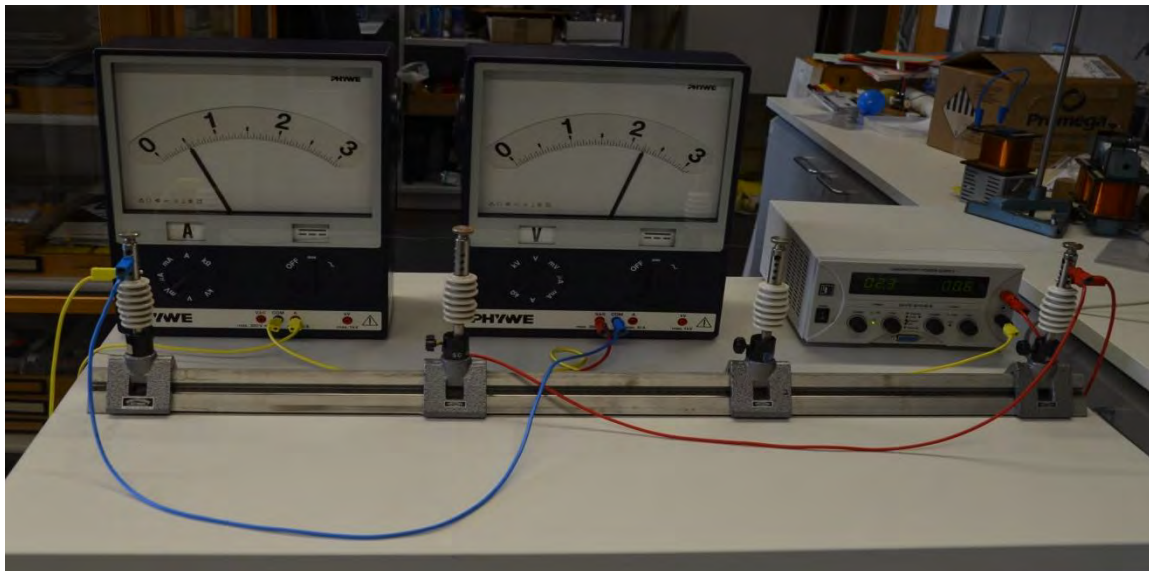


Name:

Station 1: Draht

Wie du sicherlich weißt, hängt der Widerstand des Drahtes unter anderem vom Material, der Länge und dem Durchmesser ab. An dieser Station sollst du dies in verschiedenen Messreihen überprüfen.

Schließe nun den Versuchsaufbau an einen Stromkreis an, so dass du Strom und Spannung am Zeigerinstrument ablesen kannst. Das Zeigerinstrument zur Strommessung wird in Reihe geschaltet, das Zeigerinstrument zur Spannungsmessung wird nicht in diesen Stromkreis eingebaut.



Zur Verdeutlichung erstelle eine **Schaltskizze** für diesen Versuch.

Wenn du den Draht eingespannt hast, kannst du mit den Messungen beginnen.

Bitte unbedingt beachten:

Beginne die Messungen erst, wenn ein Betreuer den Versuchsaufbau kontrolliert hat!

Ist alles in Ordnung, stelle an der Spannungsquelle eine Spannung von $U_E = 2,3 \text{ V}$ Gleichspannung ein und miss nun für jeden Punkt einen Strom I und eine Spannung U . Daraus lässt sich der Wider-

stand berechnen: $\Omega = [R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ampere}} = \text{Ohm}$

$$R = \frac{U}{I}$$

Beachte auch die Abstände zwischen den einzelnen Messpunkten.

Notiere dir in den folgenden Tabellen das Material und den Durchmesser des Drahtes, sowie die gemessenen Werte für Strom und Spannung. Daraus lässt sich der Widerstand berechnen.

Messung 1:

Material:	Durchmesser/mm:
Strom I/A:	
Spannung U/V:	Widerstand R/ Ω :
$U_{12} =$	$R_{12} =$
$U_{13} =$	$R_{13} =$
$U_{14} =$	$R_{14} =$
$U_{23} =$	$R_{23} =$
$U_{24} =$	$R_{24} =$
$U_{34} =$	$R_{34} =$

Messung 2:

Material:	Durchmesser/mm:
Strom I/A:	
Spannung U/V:	Widerstand R/ Ω :
$U_{12} =$	$R_{12} =$
$U_{13} =$	$R_{13} =$
$U_{14} =$	$R_{14} =$
$U_{23} =$	$R_{23} =$
$U_{24} =$	$R_{24} =$
$U_{34} =$	$R_{34} =$

Messung 3:

Material:	Durchmesser/mm:
Strom I/A:	
Spannung U/V:	Widerstand R/ Ω :
$U_{12} =$	$R_{12} =$
$U_{13} =$	$R_{13} =$
$U_{14} =$	$R_{14} =$
$U_{23} =$	$R_{23} =$
$U_{24} =$	$R_{24} =$
$U_{34} =$	$R_{34} =$

Messung 4:

Material:	Durchmesser/mm:
Strom I/A:	
Spannung U/V:	Widerstand R/ Ω :
$U_{12} =$	$R_{12} =$
$U_{13} =$	$R_{13} =$
$U_{14} =$	$R_{14} =$
$U_{23} =$	$R_{23} =$
$U_{24} =$	$R_{24} =$
$U_{34} =$	$R_{34} =$

Was fällt dir auf, wenn du jeweils die Ergebnisse der Messreihen vergleichst?

Nachdem du die Messungen durchgeführt und die Messergebnisse notiert hast, kannst du jetzt den **spezifischen Widerstand ρ** der beiden Materialien berechnen.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

mit ρ = spez. Widerstand, l = Länge des Leiters, A = Querschnittsfläche des Leiters $A = \pi r^2 = \pi \frac{d^2}{4}$

Für die Länge l benutze den Abstand zwischen zwei Messpunkten – hier $l = 30 \text{ cm}$.

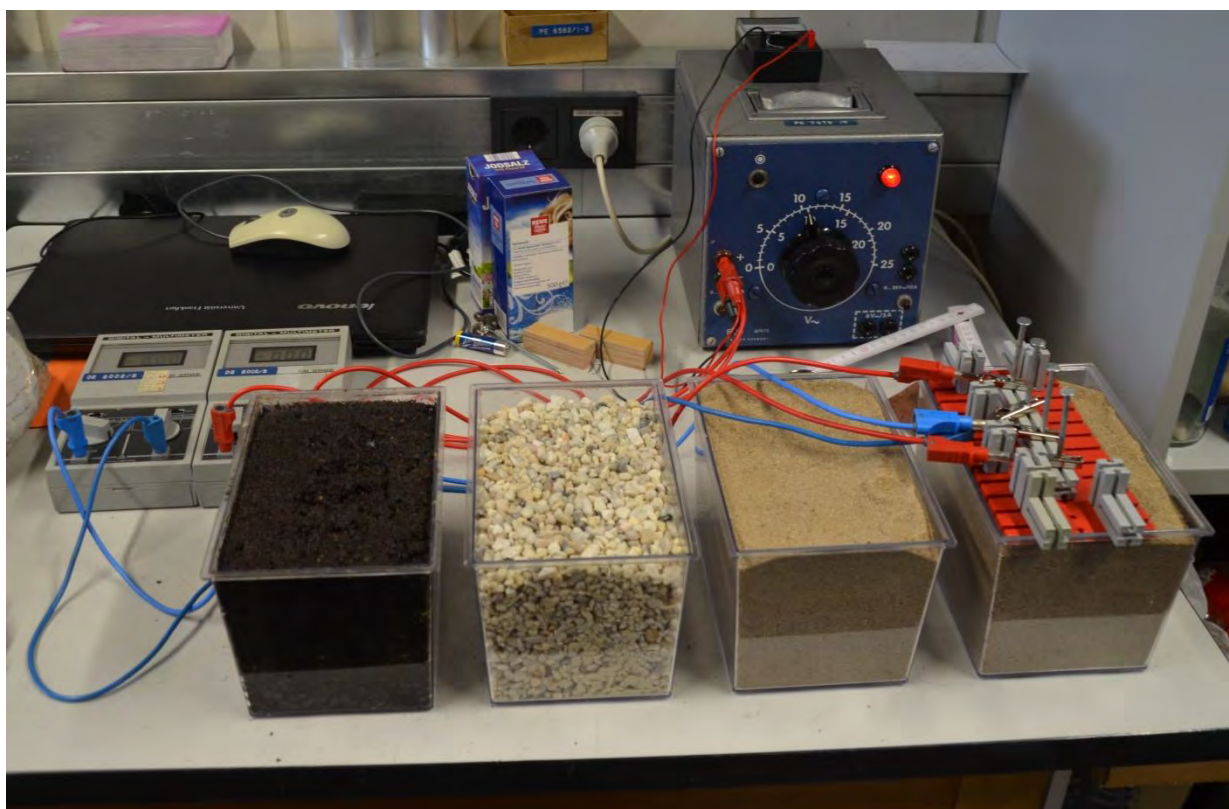
Wovon hängt der spezifische Widerstand ab? Formuliere einen Merksatz.

Station 2: Kleine Wannen

Unterschiedliche Materialien haben unterschiedliche Widerstände, wie dir vielleicht bekannt ist. Das bedeutet, dass sie den Strom unterschiedlich gut leiten.

Du siehst in den kleinen Wannen Wasser und verschiedene Bodenarten. Die „festen“ Bodenarten werden unterschiedlich stark durchfeuchtet. Für die Messung mit der Wasserwanne steht außerdem noch Salz zur Verfügung.

Bei dieser Station sollst du herausfinden, welche Wirkung Feuchtigkeit und Salz für den Widerstand haben.



Schließe dazu den Versuchsaufbau an einen Stromkreis an, so dass Du Strom und Spannung am Zeigerinstrument/Multimeter ablesen kannst. Das Zeigerinstrument/Multimeter zur Strommessung wird in Reihe geschaltet. Stromrichtung beachten!

Zur Verdeutlichung erstelle eine **Schaltskizze** für diesen Versuch.

Bitte unbedingt beachten:

Beginne die Messungen erst, wenn ein Betreuer den Versuchsaufbau kontrolliert hat!

Ist alles in Ordnung, stelle an der Spannungsquelle eine Spannung von $U_E = 12\text{ V}$ Gleichspannung ein und miss nun für jeden Punkt einen Strom I und eine Spannung U . Daraus lässt sich der Widerstand berechnen: $\Omega = [R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ampere}} = \text{Ohm}$

$$R = \frac{U}{I}$$

Teilt eure Gruppe in zwei Kleingruppen auf, damit möglichst alle Gruppenmitglieder messen können.

Notiere dir in den folgenden Tabellen das Material, sowie die gemessenen Werte für Strom und Spannung. Daraus lässt sich der Widerstand berechnen. Einheiten nicht vergessen!

Erstelle eine Messreihe pro Wanne. Insgesamt gibt es 6 Wannen mit unterschiedlichem Inhalt, in denen Du messen sollst, wobei die Wanne mit Kies und Wasser mehrfach verwendet wird.

Bei der Wasser-Wanne misst du zuerst den Widerstand des Leitungswassers, danach den Widerstand von Salzwasser, wobei du 10g Salz hinzufügst.

Bei der Kies-Wanne misst du zuerst den Widerstand des trockenen Kiesel, danach füllst du die Wanne mit Wasser auf.

Vor der Durchführung des Versuches mit der zweiten Teilgruppe muss das Wasser vom Kies sorgfältig abgegossen werden. Ebenfalls musst du bei dem Versuch mit der Wasser-Wanne die Wanne frisch befüllen.

Die Messpunkte sollen in der Wanne am linken und rechten Rand, sowie in der Mitte liegen. Die rote Platte begrenzt den Versuch.

Material: Wasser (Leitungswasser)			
	Messpunkt 1 (Links)	Messpunkt 2 (Mit- te)	Messpunkt 3 (Rechts)
$U/V =$			
$I/mA =$			
$R/\Omega =$			
Bemerkungen:			

Material: Wasser mit Salz (Salzwasser)			
	Messpunkt 1 (Links)	Messpunkt 2 (Mit- te)	Messpunkt 3 (Rechts)
$U/V =$			
$I/mA =$			
$R/\Omega =$			
Bemerkungen:			

Material: Kies (trocken)			
	Messpunkt 1 (Links)	Messpunkt 2 (Mit- te)	Messpunkt 3 (Rechts)
$U/V =$			
$I/mA =$			
$R/\Omega =$			
Bemerkungen:			

Material: Kies (feucht)			
	Messpunkt 1 (Links)	Messpunkt 2 (Mit- te)	Messpunkt 3 (Rechts)
$U/V =$			
$I/mA =$			
$R/\Omega =$			
Bemerkungen:			

Material: Sand (trocken)			
	Messpunkt 1 (Links)	Messpunkt 2 (Mit- te)	Messpunkt 3 (Rechts)
$U/V =$			
$I/mA =$			
$R/\Omega =$			
Bemerkungen:			

Material: Sand (mäßig feucht)			
	Messpunkt 1 (Links)	Messpunkt 2 (Mit- te)	Messpunkt 3 (Rechts)
$U/V =$			
$I/mA =$			
$R/\Omega =$			
Bemerkungen:			

Material: Sand (sehr feucht)			
	Messpunkt 1 (Links)	Messpunkt 2 (Mit- te)	Messpunkt 3 (Rechts)
$U/V =$			
$I/mA =$			
$R/\Omega =$			
Bemerkungen:			

Material: Blumenerde			
	Messpunkt 1 (Links)	Messpunkt 2 (Mit- te)	Messpunkt 3 (Rechts)
$U/V =$			
$I/mA =$			
$R/\Omega =$			
Bemerkungen:			

Was fällt dir auf, wenn du jeweils die Ergebnisse der Messreihen vergleichst?

Zusatzaufgabe:

Führe nun eine weitere Messung in einer zusätzlichen Wanne mit mäßig feuchtem Sand durch und vergleiche mit der bereits durchgeführten Messung bei mäßig feuchtem Sand. Du erhältst ein überraschendes Ergebnis.

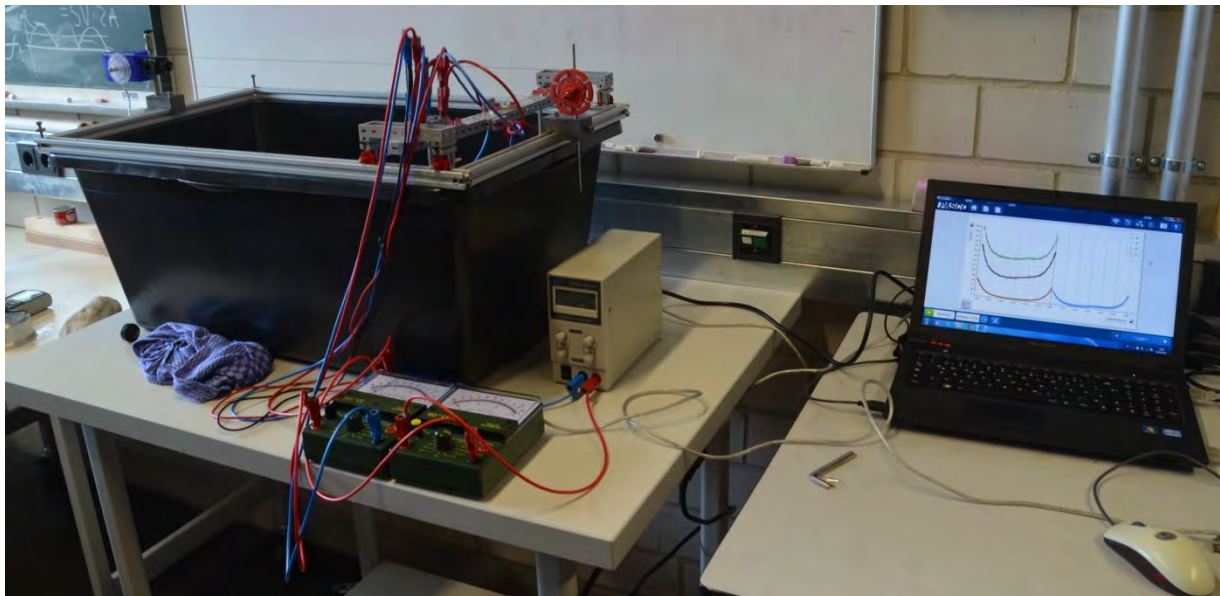
Material: Sand (mäßig feucht) Spezial			
	Messpunkt 1 (Links)	Messpunkt 2 (Mit- te)	Messpunkt 3 (Rechts)
$U/V =$			
$I/mA =$			
$R/\Omega =$			
Bemerkungen:			

Wie sind diese unterschiedlichen Ergebnisse erklärbar?

Station 3: Große Wanne mit PC Einsatz

Häufig finden sich in der Natur Störkörper im Boden oder im Wasser. Diese verändern den gemessenen Widerstand. Wie und wie stark soll an dieser Station herausgefunden werden. Es soll dabei nachgewiesen werden, wie groß der Störkörper ist und aus welchem Material er bestehen könnte. Eine Tiefensondierung kann mit diesem Versuchsaufbau nicht durchgeführt werden.

Um den Versuch möglichst einfach durchzuführen, wird als Medium in der großen Wanne einfaches Leitungswasser verwendet. Der Messrechen mit den Elektroden lässt sich leicht durch das Wasser ziehen und wodurch die PC-gestützte Messwertaufnahme erleichtert wird.



Mache dich mit der bereits aufgebauten Messapparatur vertraut! Überlege dabei:

- Wie sind die Elektroden angeschlossen?
- Wo sind die Elektroden für Strom und Spannung?

Zur Verdeutlichung erstelle eine **Schaltskizze** für diesen Versuch.

Du verwendest für die Messwertaufnahme und –auswertung einen PC. An dem PC sind über die USB-Anschlüsse ein Strom/Spannungssensor sowie ein Drehbewegungssensor angeschlossen.

Das Programm, das du verwendest, heißt „**Sparkvue**“.

Öffne die Datei „**Messwanne**“. In dieser Datei findest du eine Seite mit einer leeren Tabelle mit den Spalten für Strom I, Spannung U, Widerstand R und der Wegstrecke.

Für die Berechnung des Widerstandes gilt:

$$R = \frac{U}{I}$$

Auf einer weiteren Seite findest du ein Koordinatensystem. Dort ist auf der x-Achse die Wegstrecke und auf der y-Achse der Widerstand R aufgetragen.

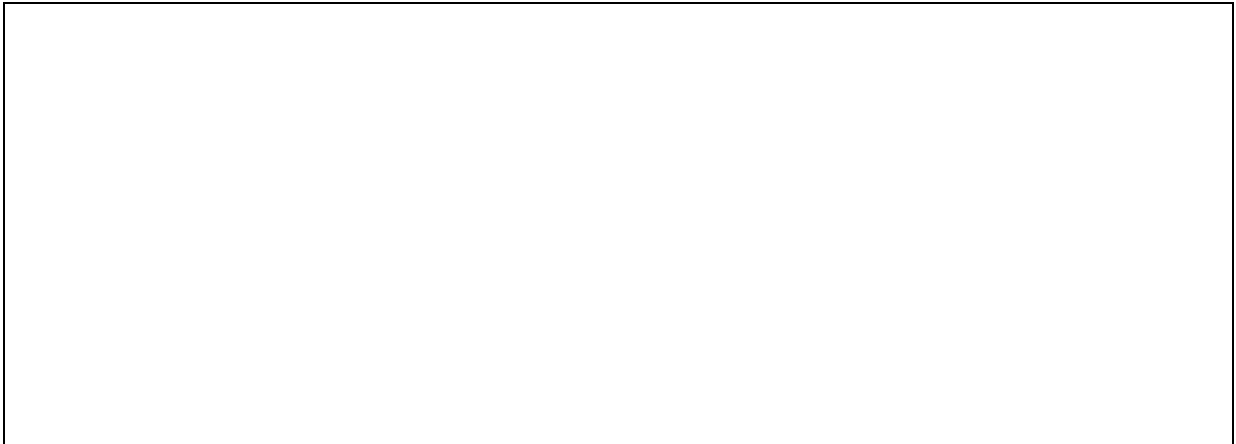
Stelle nun an der Spannungsquelle eine Spannung von $U_E = 24\text{ V}$ Gleichspannung ein.

Nun kannst du eine Messung auf dem PC starten. Dabei verschiebst du von Hand den Schlitten mit den Messelektroden auf der großen Wanne.

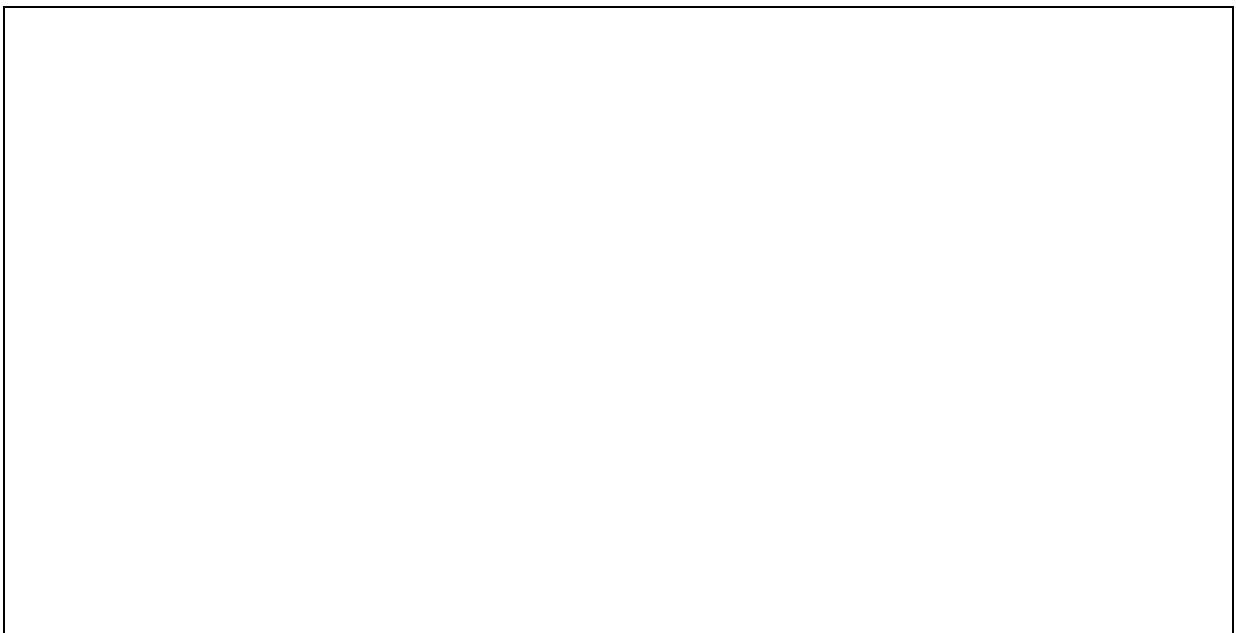
Messe über die ganze Stecke der Wanne – hin und zurück! Am Ende der Wanne stoppst Du die Messung und beobachtest, wie sich der Graph entwickelt hat.

Um vergleichen zu können, miss den Widerstandswert von Wasser **ohne** Störkörper. Den gemessenen Wert nennt man „Nullmessung“.

Beschreibe den Graphen für die Nullmessung. Eine Skizze kann deine Beschreibung verdeutlichen.

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for a student to draw a sketch of the graph for the null measurement.

Warum kommt es an den Rändern der Wanne zu einem Anstieg des Widerstandes?

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for a student to write an explanation for the increase in resistance at the edges of the tank.

Im Anschluss kannst du verschiedene Gegenstände, die neben dem Experiment stehen, in die Wanne legen.

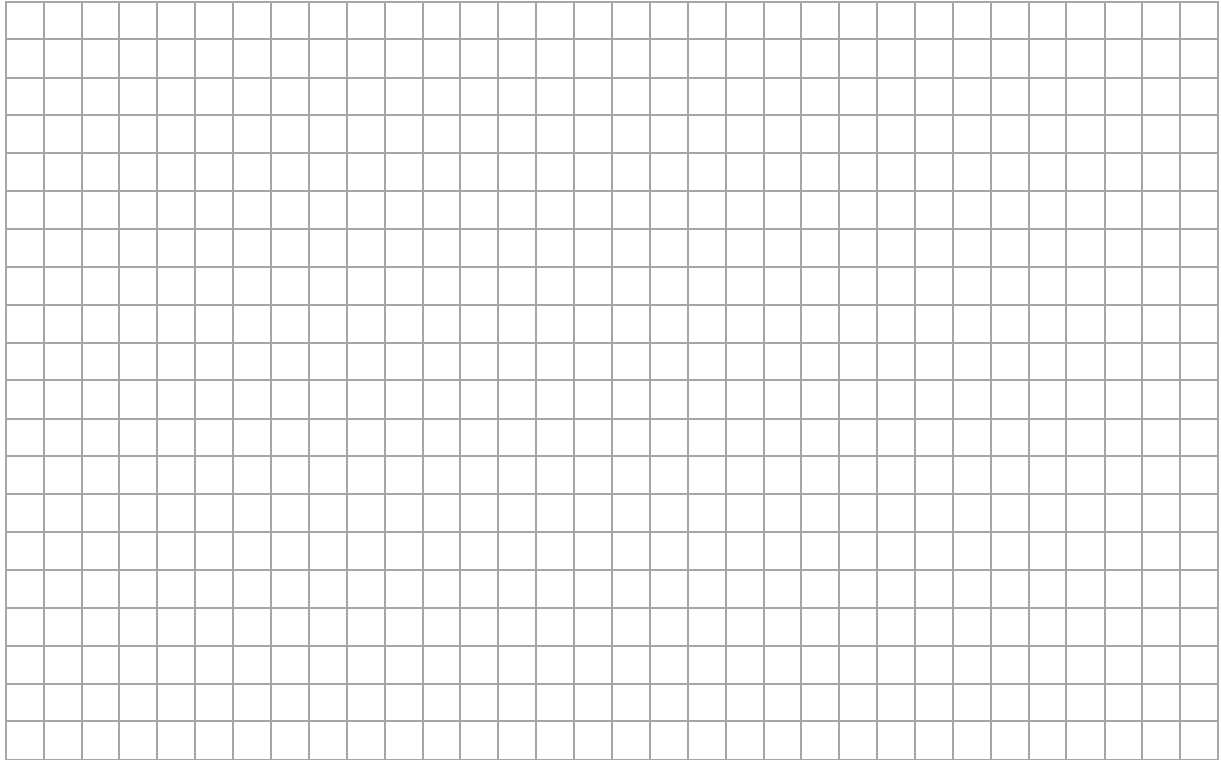
Lege zunächst nur einen Gegenstand in die Wanne und warte, bis das Wasser in Ruhe ist. Führe die Messung mit dem Messrechen durch. Lies aus dem Graphen den Widerstand und die Länge des Gegenstandes ab.

Notiere in der Tabelle diese Gegenstände und die gemessenen Werte.

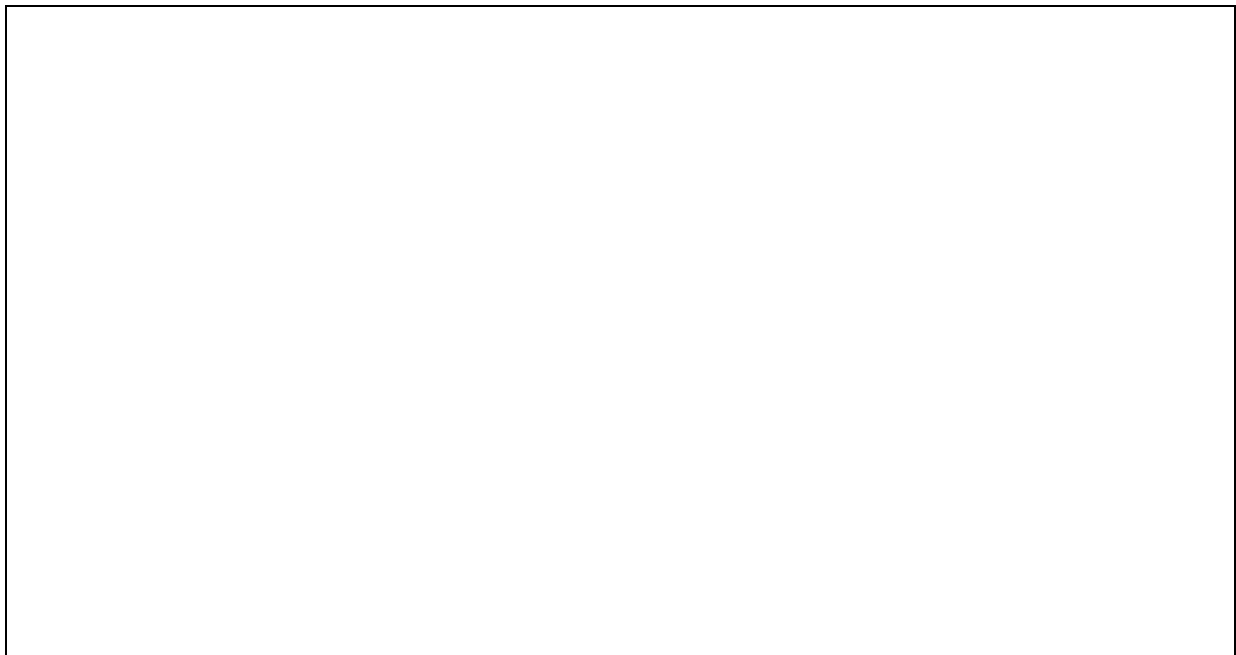
Wiederhole die Messung mit anderen Störkörpern.

	Widerstand R/Ω	Länge des Gegenstandes (in cm)
Nullmessung		-----
Gegenstand (Material):		

Skizziere die Graphen der Wegstrecke/Widerstandsmessung in ein Koordinatensystem und benenne die herausragenden Messpunkte.



Ordnet den Graphen die Störkörper zu.



Nun kannst Du Gegenstände in der Wanne platzieren, ohne dass die anderen Gruppenmitglieder erkennen können, was du hinein gelegt hast. Sie müssen jetzt erkennen – nur durch Analyse des Graphen auf dem PC und den Aufzeichnungen – welcher Gegenstand im Wasser liegt und welche Länge er hat.

	Widerstand R/Ω	Länge des Gegenstandes (in cm)
Nullmessung		- - - -
Gegenstand (Material):		

Am Ende des Versuches bitte die Messwerte abspeichern!

Zusatzaufgabe:

Lege eine Tasse in die Wanne und führe das Experiment erneut durch. In einem zweiten Durchgang drehst Du die Tasse um. Führe das Experiment erneut durch.

Vergleiche die Ergebnisse der Graphen. Gibt es Unterschiede, obwohl sich das Material der Tasse nicht verändert hat.

Station 4: Geoelektrik in Forschung und Praxis

Bei dieser Station findest du Informationen über den Einsatz und Anwendungsgebiete der Geoelektrik außerhalb des Labors.

Zur ersten Information schaue dir den kleinen Film auf dem PC an.

Lies zunächst den Basistext und schaue dir die Übersicht geophysikalischen Methoden an. Lass dich nicht entmutigen, wenn du nicht alles verstehst – diese Texte sind häufig in Vorlesungen oder Praktikas eingesetzt und für Studierende gedacht.

Notiere dir die wichtigsten Informationen. Anschließend präsentiere KURZ deine Ergebnisse deiner Gruppe.

Platz für Notizen

In einem weiteren Heft findest du Fallbeispiele zur Geoelektrik.

Suche dir ein Beispiel heraus und mache dich damit so vertraut, dass du es deinen Gruppenmitgliedern vorstellen kannst.

Platz für Notizen

Erstelle gemeinsam mit deiner Gruppe eine Auflistung der Anwendungen und Anwendungsbereiche der Geoelektrik und diskutiere ihre wirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung.



Schülerlabor Geoelektrik

Station 4

Basistext

Basistext:

1. Einleitung

Mit geoelektrischen Verfahren misst man den spezifischen Widerstand des Untergrundes. Der spezifische Widerstand wird in Ωm (Ohmmeter) gemessen und ist der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit, welche ein Maß dafür ist, wie gut ein Material elektrischen Strom leiten kann. Der Widerstand kann um viele Größenordnungen variieren und hohe Kontraste aufweisen, er ist daher oft eine sehr gute diagnostische Größe. Die Anwendungsmöglichkeiten sind sehr vielfältig. Neben der Bestimmung der Lithologie eignet sich der Widerstand u.a. zur Erkundung von Erzkörpern, zur Grundwassererkundung und zur Untersuchung von Altlasten und Altstandorten.

2. Messprinzip

Über zwei Stahlspeie, die Stromelektroden, wird ein elektrischer Strom in den Untergrund eingespeist. Mit zwei weiteren Speien, den Spannungselektroden, wird die Spannung gemessen.

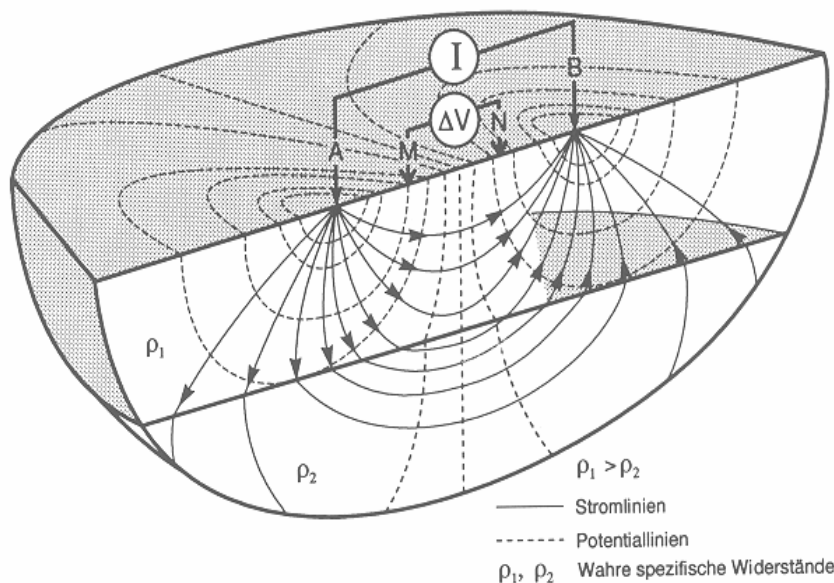


Abbildung 1: Messprinzip der Geoelektrik (aus Knödel et al.). Die Stromeinspeisung erfolgt an den Elektroden A und B, die Spannungsmessung zwischen den Elektroden M und N. Die durchgezogenen Linien sind die Stromlinien für ein Modell, welches aus 2 Schichten besteht.

tem Strom I und gemessener Spannung ΔV bekommt man den spezifischen Widerstand ρ :

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I}$$

Die Proportionalitätskonstante k ist der Geometriefaktor, der von der Konfiguration der Strom- und Spannungselektroden abhängt. Wenn der Untergrund homogen ist, entspricht der

Über das Verhältnis zwischen eingespeis-

nach der oben genannten Gleichung berechnete spezifische Widerstand dem spezifischen Widerstand des Untergrundes. Normalerweise ist der Untergrund inhomogen, und kann z.B. durch eine Schichtung oder durch homogene Bereiche, die durch Verwerfungen getrennt sind, beschrieben werden. Der gemessene Widerstand wird daher als scheinbarer Widerstand bezeichnet, der einem gewichteten Mittelwert der wahren Widerstandsverteilung entspricht. Um die räumliche Verteilung des wahren Widerstandes zu ermitteln, muss man die Messung mit vielen verschiedenen Konfigurationen durchführen.

3. Durchführung

Bei Geoelektrikmessungen unterscheidet man Sondierung und Kartierung. Bei der Sondierung versucht man, an einem Punkt den spezifischen Widerstand als Funktion der Tiefe zu bestimmen. Bei der Kartierung wird der spezifische Widerstand entlang eines Profils oder auf einer Fläche bestimmt. [...]

Als dritte, und modernste Möglichkeit gibt es noch die Kombination von Sondierung oder Kartierung, die Sondierungskartierung oder Tomografie.[...]

Quelle: Praktikumsunterlagen Angewandte Geophysik TU Braunschweig

<http://www.soil.tu-bs.de/lehre/Bachelor-Feldmethoden/2010/Geoelektrik.pdf>

Übersicht:

Gängige Verfahren und typische Anwendungen

[...]

Verfahren	Eignung	Häufigkeit	typische Anwendungen
Geologie/Hydrogeologie			
Georadar	o	mittel	Hohlräume, Klüfte
Geoelektrik	++	oft	laterale und Tiefengliederung
Elektromagnetik nieder-freq.	+	mittel	laterale Gliederung des Untergrundes
Geomagnetik	o	selten	laterale Gliederung des Untergrundes (Basalt)
Seismik	+	oft	Felstiefe
Baugrund			
Georadar	+	oft	Hohlräume
Geoelektrik	+	oft	universell, laterale und Tiefengliederung
Elektromagnetik nieder-freq.	+	mittel	laterale Gliederung des Untergrundes
Geomagnetik	-	selten	
Seismik	+	mittel	Felstiefe
Archäologie			
Georadar	++	oft	universelle, detaillierte, tiefendifferenzierte Erkundung, Bebauungsreste, Bodenveränderungen
Geoelektrik	+	selten	flächige Groberkundung
Elektromagnetik nieder-freq.	+	selten	flächige Groberkundung
Geomagnetik	+	oft	schnelle, großflächige Erkundung
Bauwerk/zerstörungsfreie Prüfung			
Bauradar	++	oft	universelle Erkundung, Objektdetektion (z.B. Bewehrung)
Elektrik	+	selten	Feuchte/Salze
Elektromagnetik hoch-freq.	+	oft	Objektdetektion (Klammern, Dübel usw.)
Ultraschall/Mikroseismik	+	oft	Bauteildicken, Materialeigenschaft, Risse
Altlasten/Umwelt			
Georadar	+	mittel	Objektdetektion (Leitungen, Tanks, Gruben usw.)
Geoelektrik	++	oft	Kontaminationen, Grundwasserstauer, laterale Gliederung

			derung
Elektromagnetik nieder-freq.	+	mittel	Kontaminationen, laterale Gliederung des Untergrundes
Geomagnetik	+	mittel	Altablagerungen, Eisenobjekte (z.B. Tanks, Leitungen)
Seismik	+	mittel	Felstiefe
Objektortung			
Georadar	++	oft	metallische und nichtmetallische Objekte, Hindernisse
Geoelektrik	o	selten	Großobjekte (Fundamentreste)
Elektromagnetik hoch-freq.	++	oft	selektive Metalldektion
Geomagnetik	++	oft	selektive Eisendetektion

++ sehr gut, + gut, o mittel, - gering

In konkreten Fällen kann die Eignung positiver oder negativer sein. Bei obiger Eignungsbewertung handelt es sich um mittlere Erfahrungswerte.

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Allgemeines/Suchl/hauptteil_suchl.html

Literaturverzeichnis:

Alle Textquellen sind Internetquellen:

Basistext:

<http://www.soil.tu-bs.de/lehre/Bachelor-Feldmethoden/2010/Geoelektrik.pdf>

(letzter Zugriff: 08.04.2017)

Übersicht:

http://www.ggukarlsruhe.de/Allgemeines/Suchl/hauptteil_suchl.html

(letzter Zugriff: 27.03.2017)

Video zur Geoelektrik:

<https://www.youtube.com/watch?v=CuI5uADLV9k>

(letzter Zugriff: 27.03.2017)



Schülerlabor Geoelektrik

Station 4

Fallbeispiele

Text 1 (Fallbeispiel)

Erkundung eines Grundwasserstauers durch Geoelektrik

Aufgabe

Morphologie des Grundwasserstauers, Grundwasserabflußrichtung

Meßverfahren

- geoelektrische Widerstandssondierungen (WS)

Vorgehensweise/Ergebnisse

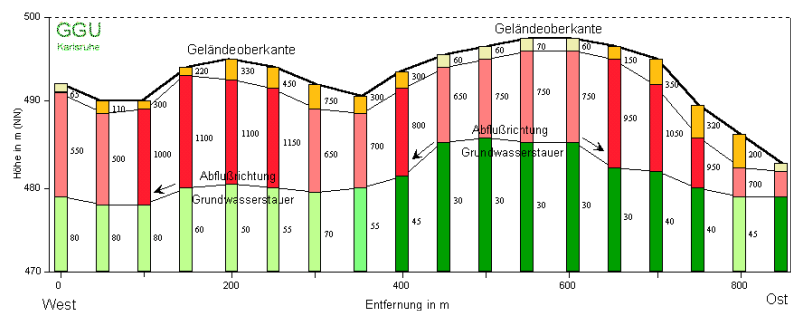
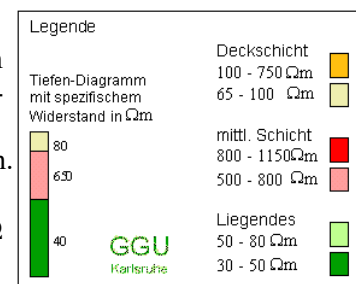
Die im 50 m-Abstand durchgeführten Widerstandssondierungen liefern entlang der Meßlinie ein klares Bild des dreischichtigen Untergrundaufbaus.

Die Deckschicht unterscheidet sich je nach den örtlichen Gegebenheiten. Ihre Mächtigkeit variiert zwischen 0,9 m und 4,4 m. Im Bereich landwirtschaftlicher Nutzflächen ist sie mit einem Mittelwert von rund 70 Ω m relativ geringohmig (Mutterboden, bindige Anteile, Düngung). Die Deckschichten in den untersuchten Waldabschnitten sind dagegen hochohmig (Mittelwert bei 300 Ω m). Diese Werte belegen das Fehlen einer ausgeprägten Mutterbodenschicht über dem Sandboden.

Die mittlere Schicht weist i.d.R. eine Mächtigkeit von etwa 10 m auf, die jedoch gegen Osten bis auf weniger als 4 m abnimmt. Diese hochohmige Schicht kann aufgrund der in der Nähe erbohrten geologischen Verhältnisse sowie den ermittelten Widerstandswerten eiszeitlichen Schottern zugeordnet werden.

Die Größe der Widerstandswerte paßt sehr gut zu den zu erwartenden hohen Wasserdurchlässigkeiten. Die Werte variieren je nach Zusammensetzung der Schicht. Eine Widerstandserniedrigung (= Leitfähigkeitserhöhung) wird beispielsweise durch die Verringerung der Korngröße, Feuchteanstieg und Erhöhung des Gehaltes an gelösten Salze verursacht.

Die niederohmige Schicht im Liegenden ist den sandigen Schluffen bis Tonen des gesuchten Grundwasserstauers zuzuordnen. Die niedrigeren Widerstandswerte im Osten zeigen einen dort höheren Anteil an tonigen Bestandteilen an.



Kostengrößenordnung der Untersuchung: ca. 3 TEur

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-wstau_Erkundung_eines_Grund/hauptteil_el-wstau_erkundung_eines_grund.html

Text 2 (Fallbeispiel)

Erkundung einer geologischen Störung durch Geoelektrik

Aufgabe

Lokalisierung einer ost-west-streichenden Störung und Abschätzung deren Sprunghöhe sowie die gezielte Platzierung von Bohrungen. Die Untersuchung fand im Rahmen der Anlage eines Flotationsbeckens statt.

Meßprogramm

- Widerstandsprofilierung
- Doppel-Widerstandssondierungen

Ergebnis

Mehrere Widerstandsprofile wurden entsprechend den vorliegenden Kenntnissen etwa senkrecht zur Störung gelegt. Der Profilabstand betrug im Mittel 30 m, die integrale Eindringtiefe wurde auf etwa 25 bis 30 m festgelegt. Die Abbildung 1 zeigt die Daten des sogenannten scheinb. spez. Widerstandes ρ_s entlang von 4 Profilen. Die Störung ist in den Kurven als markanter Anstieg (dicker Pfeil) zu einem höheren Widerstandsniveau erkennbar.

Mit Doppel-Widerstandssondierungen (Auslagelänge $AB/2_{\max} = 178$ m) wurde die Aussage der Kartierung bestätigt und gleichzeitig die Widerstandstiefenverteilung, d.h. die Bodenschichtung ermittelt. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse von 5 dieser Sondierungen als Tiefendia-gramme zu sehen. Links neben einem Balken ist die Tiefe der Schichtgrenze und rechts der spez. Widerstand vermerkt. Der Betrag der Sprunghöhe ist aus den Tiefendia-grammen zu entnehmen.

In der Abbildung 3 sind beispielhaft die Meßdaten der ersten Sondierung bei Profilmeter 165 zu sehen. Man erkennt, daß die Werte für die beiden orthogonalen Auslagerichtungen (Sterne und Kreise) bei größeren Auslagelängen auseinanderlaufen.

Dies kommt durch laterale Abweichungen der Geologie vom ebenen Schichtenverlauf zustande und kann, da dies mit der Doppelsondierung erkannt wird, in der Auswertung berücksichtigt werden.

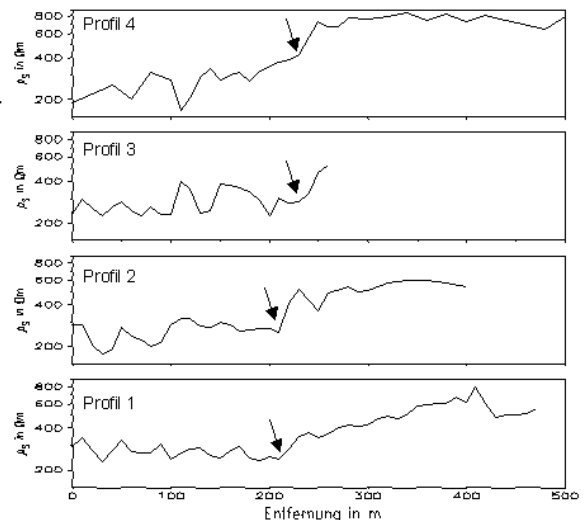


Abb. 1 Vier parallele Widerstandsprofile

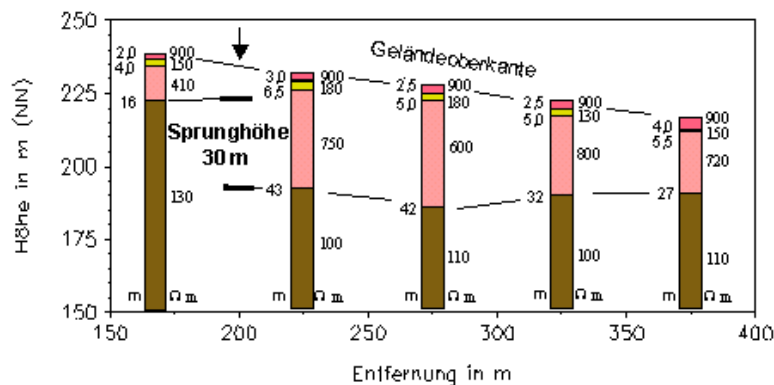


Abb. 2 Tiefendiagramme von 5 Widerstandssondierungen

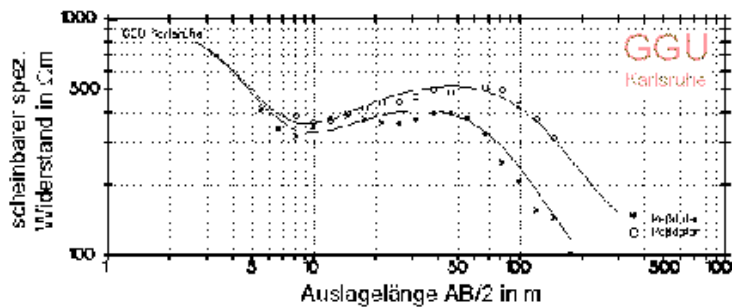


Abb. 3
Daten einer Doppel-Widerstandssondierung in zwei Auslagerichtungen
Kreise und Sternchen: Meßdaten getrennter Richtungen
Linien: synthetische Daten des jeweiligen Tiefenmodells

Fazit

Die geologische Störung sowie ihre Sprunghöhe konnten gut bestimmt werden. Bohrpunkte konnten mit diesen Ergebnissen gezielt festgelegt werden.

Kostengrößenordnung

Messung, Auswertung, Bericht: ca. 5 TEur

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-stoer_Erkundung_einer_geolo/hauptteil_el-stoer_erkundung_einer_geolo.html

Text 3 (Fallbeispiel)

Erkundung der Deckschicht in einer alten Flußschleife mittels Geoelektrik

Aufgabe

Flächendeckende Angabe der Ausdehnung und Mächtigkeit der gering durchlässigen Deckschicht sowie Bestimmung von geologisch-strukturellen Auffälligkeiten. Hintergrund der Untersuchung war eine Deponienuanlage.

Meßprogramm

- flächendeckende Widerstandskartierung
- Doppel-Widerstandssondierungen

Vorgehensweise/Ergebnisse

Eine kostengünstige, echt flächendeckende Aufnahme der Deckschichtmächtigkeit kann praktisch nur indirekt, z.B. mit der Widerstandskartierung erfolgen. Dieses integrale Verfahren liefert bei geeignetem Meßraster eine lückenlose Verteilung des sogenannten scheinbaren spezifischen Widerstandes als elektrischen Mittelwert des ausgewählten Tiefenbereiches.

Eine eindeutige Zuordnung der Meßwerte zur Geologie ist jedoch nicht möglich. Insbesondere kann durch die Kartierung nicht unterschieden werden, ob die Werte durch eine Variation in der Zusammensetzung der Deckschicht oder durch die Änderung der Deckschichtmächtigkeit herrühren.

Diese Frage ist durch Widerstandssondierungen zu klären. Die Widerstandssondierung liefert ein Tiefenmodell des Untergrundes in Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes, welches an Aufschlüssen (z.B. Bohrungen) mit dem geologischen Tiefenmodell verglichen werden kann. Dementsprechend wurden bei dem vorliegenden Fallbeispiel zunächst die Widerstandskartierung und danach gezielt einige Widerstandssondierungen durchgeführt. Zur Korrelation mit der Geologie standen Bohrprofile zur Verfügung.

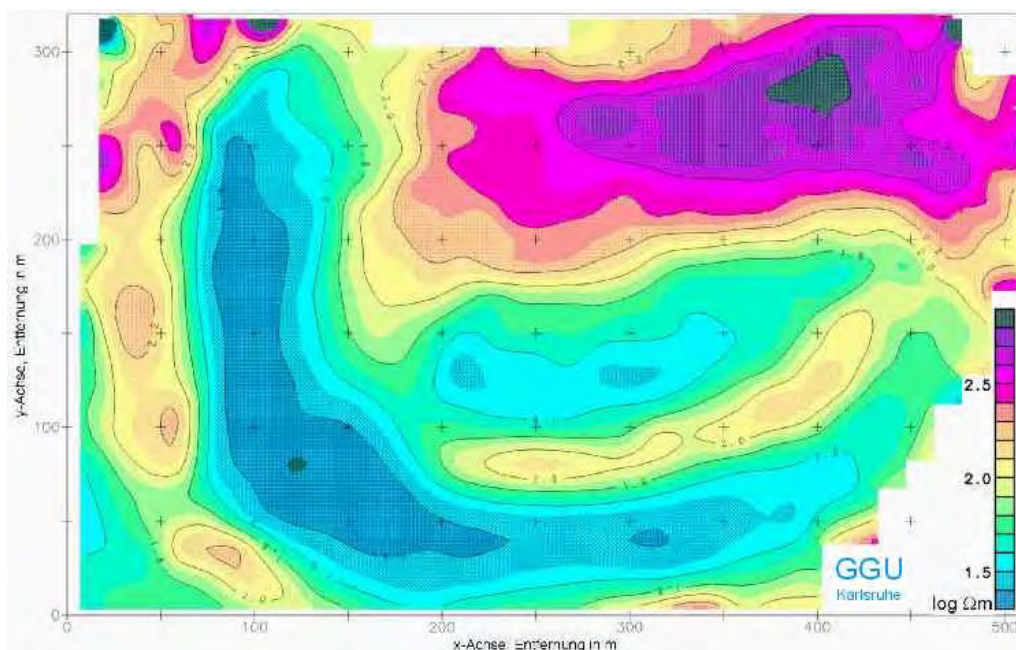


Abb. 1 Verteilung des (logarithmierten) scheinb. spez. Widerstandes, ermittelt durch eine geoelektrische Kartierung.

Die Widerstandskartierung wurde flächendeckend in einem Meßraster von 15 m * 15 m ausgeführt. Die integrale Eindringtiefe betrug etwa 10 m. Sie wurde auf denjenigen Tiefenbereich eingestellt, in dem die größten Unterschiede des spez. Widerstandes erwartet wurden.

In der Abbildung 1 sind die aus den Meßwerten berechneten logarithmierten scheinbaren spezifischen Widerstände zu sehen. Man erkennt klar abgrenzbare Bereiche mit deutlich unterschiedlichen Werten. In den blauen Bereichen (unterhalb ca. 60 Ω m) ist eine niederohmige bindige Deckschicht (im wesentlichen Fließerde) vorhanden und in den gelben Bereichen dünnt diese aus (oberhalb 200 Ω m), sodaß der hochohmige Fels (Dolomit) in den roten Bereichen fast zutage tritt.

Die Form der Widerstandsverteilung zeigt den Verlauf der ehemaligen Flußschleife. Neben den lateralen Grenzen ist in Hinsicht auf den Untersuchungshintergrund insbesondere der ost-west-verlaufende Sporn zwischen x = 200 und 450 m wichtig, da dort eine starke Abnahme der bindigen Deckschicht angenommen werden muß.

Die Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse des zweiten Erkundungsschrittes (Doppel-Widerstandssondierungen) in Form von Tiefendiagrammen. Hiermit werden die kartierten Bereiche in ihrer Tiefenausdehnung quantifiziert. Der in der Abbildung 2 markierte Bereich beinhaltet Deckschichtmächtigkeiten ab rund 5 m. Wie zu sehen ist, verschwindet die Deckschicht über dem fraglichen Sporn fast vollständig.

Die Werte der Widerstandskartierung korrelieren gut mit der Deckschichtmächtigkeit, da die Variation des spez. Widerstandes nahezu allein eine Folge der veränderten Deckschichtmächtigkeit ist. Die dreidimensionale Ergebnisdarstellung der Widerstandskartierung (Abb. 3) gibt einen anschaulichen Eindruck der vorliegenden Felslinie bzw. indirekt der Deckschichtmächtigkeit.

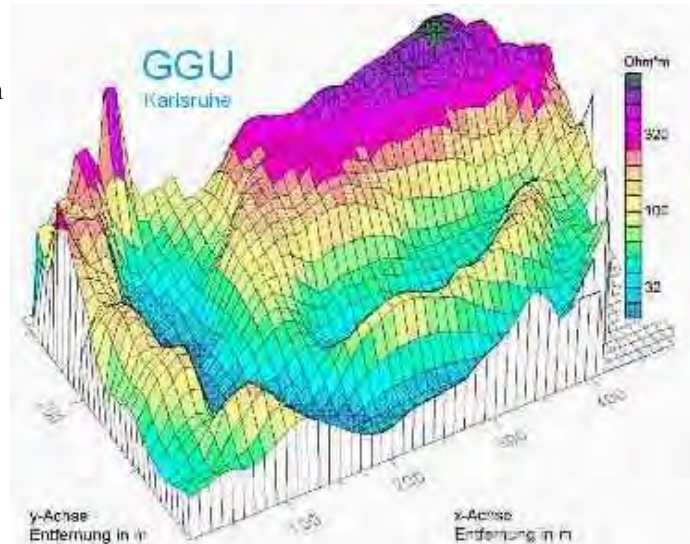


Abb. 3

Dreidimensionale Darstellung des scheinb. spez. Widerstandes, ermittelt durch die Widerstandskartierung. Nach Interpretation durch die Widerstandssondierungen kann dieses Diagramm qualitativ als Tiefendiagramm gelesen werden.

Fazit

Das Untersuchungsziel, die flächendeckende Erkundung der bindigen Deckschicht, wurde durch die gewählte Vorgehensweise erreicht. Im ersten Schritt, der Widerstandskartierung, wurde die laterale Verteilung der gesuchten bindigen Deckschicht erfaßt. Im zweiten Schritt ist durch Widerstandssondierungen die Mächtigkeit der Deckschicht bestimmt worden. Diese materialspezifische, geoelektrische Gliederung ist anhand von Bohrungen mit der geologischen Beschreibung der Untergrundverhältnisse verbunden worden.

Kostengrößenordnung des abgebildeten Umfangs
Messung, Auswertung, Befund, Bericht: 10 bis 15 TEur

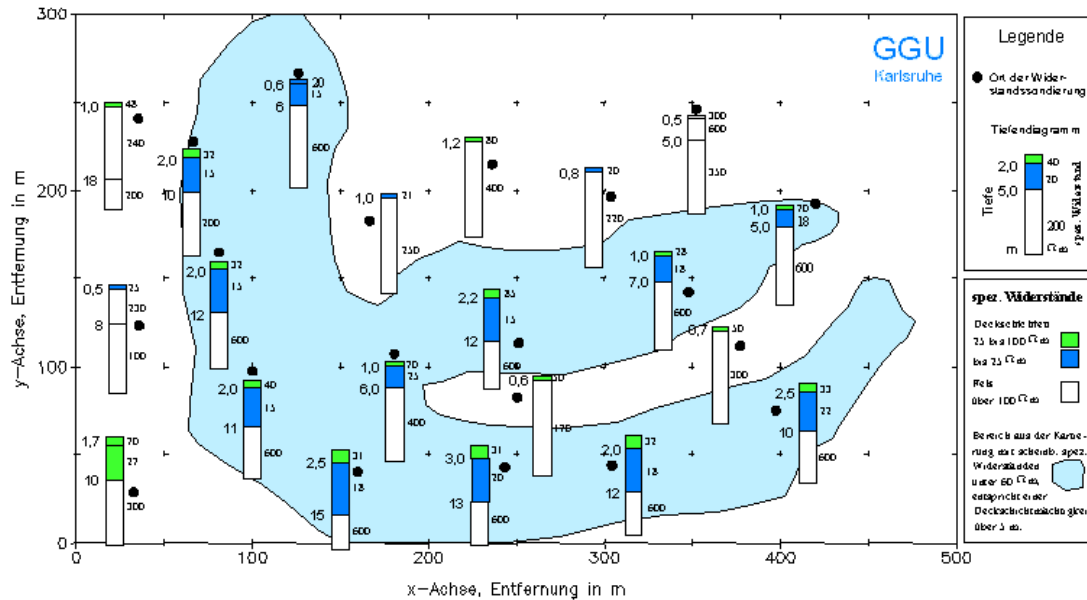


Abb. 2 Tiefendiagramme, ermittelt durch Widerstandssondierungen und kartierter Bereich erniedrigten Widerstandes, der Deckschichtmächtigkeiten über 5 m repräsentiert.

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-fluss_Erkundung_der_Decksch/hauptteil_el-fluss_erkundung_der_decksch.html

Text 4 (Fallbeispiel)

Lokalisierung einer überdeckten Steinbruchkante

Aufgabe

Im Rahmen einer Altlastenerkundung war die Lage der Abbruchkante eines verfüllten Steinbruchs genau anzugeben. Desweiteren interessierte der Bodenzustand in Hinsicht auf eine mögliche Bebauung.

Meßprogramm

- *refraktionsseismisches Meßprofil*
- *geoel. Widerstandskartierung und -sondierungen*

Vorgehensweise/Ergebnisse

Bei der Untersuchung kamen zwei Untersuchungsmethoden zum Einsatz.

Die Seismik erbrachte auf dem Refraktionsprofil die genaue Lage der Steinbruchkante sowie die Felsentiefe außerhalb des Steinbruchs. Die seismische Kompressionswellengeschwindigkeit zeigte im Bereich der Kante einen Auflockerungsbereich, in dem erhöhte Setzungen durch die um etwa 1/3 erniedrigte Festigkeit zu erwarten sind. Zwar kann nahe der Kante die Steinbruchsohle aus geometrischen Gründen nur durch aufwendigere Untersuchungen erfaßt werden, jedoch konnte hier eine Mindestdtiefe angegeben werden.

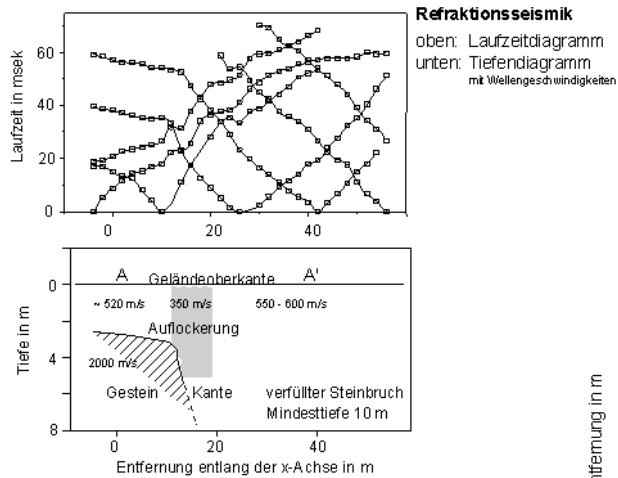
Die beiden Widerstandssondierungen dienten einer Tiefenabschätzung und v.a. der Einstellung der Widerstandskartierung. Die im Bereich des verfüllten Steinbruchs liegende Widerstandssondierung (WS2) belegt eine Tiefe von rund 15 m, wogegen die Überdeckung des Festgesteins außerhalb nur knapp 3 m beträgt (WS1).

Die Widerstandskartierung stellt großflächig Bereiche unterschiedlichen Untergrundaufbaus dar. Durch die Refraktionsseismik wird geklärt, welcher Widerstandsübergang (Isoohme) mit der Steinbruchkante korreliert.

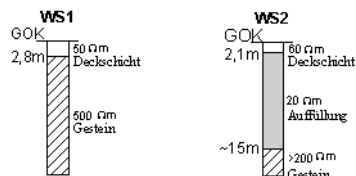
Fazit

Die Untersuchung erbrachte folgendes:

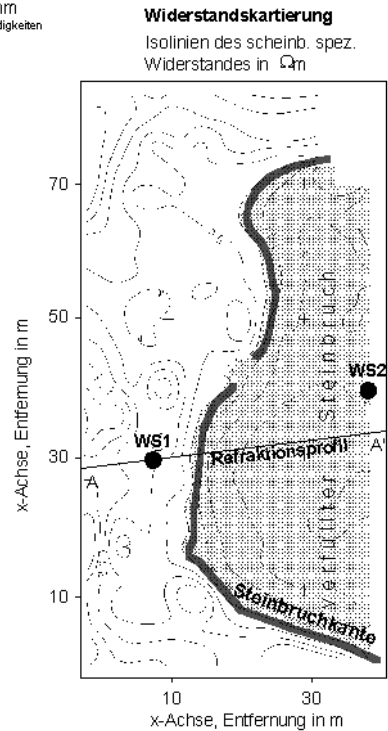
Lage der Steinbruchkante, Tiefenabschätzung der Steinbruchsohle, Hinweis auf eine Auflockerungszone und die Gesteinstiefe außerhalb des Steinbruchs.



Widerstandssondierungen (WS)
Tiefendiagramme des spez. Widerstandes in Ωm



GGU
Karlsruhe



Kostengrößenordnung

Messung, Auswertung, Befund, Bericht: ca. 5 TEur

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Kante_Lokalisierung_einer_uber/hauptteil_kante_lokalisierung_einer_uber.html

Text 5 (Fallbeispiel)

Geoelektrische Vorerkundung zur Wassererschließung

Aufgabe

Für die Wasserversorgung einer Gemeinde sollte ein neuer Brunnenstandort festgelegt werden. Hierzu waren geophysikalische Vorerkundungen in einem kleinen Seitental vorgesehen.

Geologisch stehen Schichten des Buntsandsteins an, welche vom Zechstein unterlagert werden. Eine vorhandene Brunnenbohrung zeigt Wechsellagen von v.a. Sandstein und Konglomerat. Der Sandstein ist leicht bis stark tonig, teilweise sind Tonschichten eingelagert. Im Rahmen der Vorerkundung sollen laterale Veränderungen der an der Bohrung aufgeschlossenen Schichten festgestellt werden.

Meßprogramm

- Widerstandssondierungskartierung (= 2D-Tomografie)

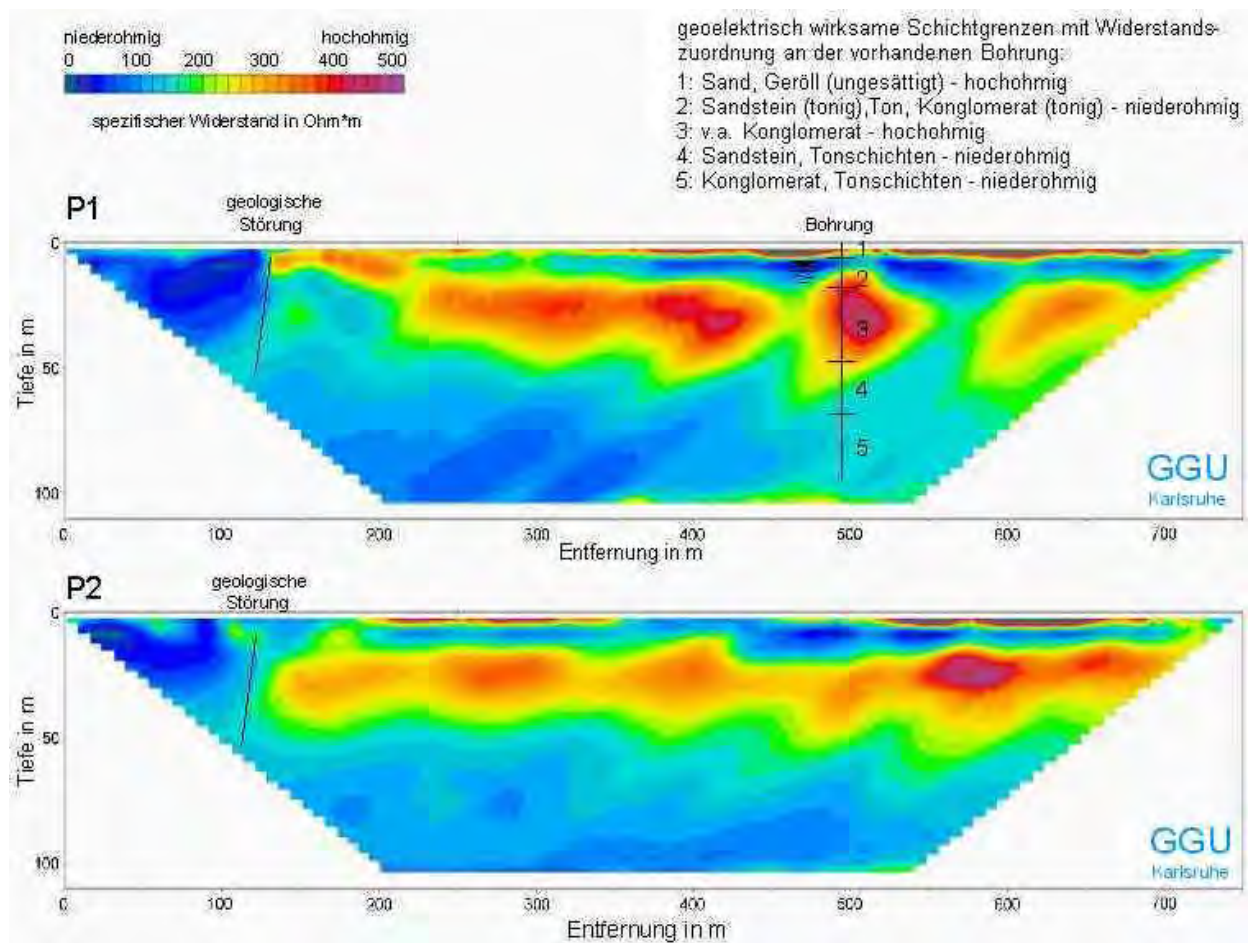
Vorgehensweise/Ergebnisse

Zur Erkundung des vertikalen Schichtenaufbaus wurde die Widerstandssondierungskartierung mit einer Anordnung nach Wenner entlang von zwei parallelen Meßprofilen angewendet. Sie liefert einen vertikalen Schnitt der Untergrundsichtung auf der Grundlage des spezifischen elektrischen Widerstandes. Die Meßprofile verlaufen entlang der Talachse mit einem Abstand von etwa 70 m. Die Meßparameter wurden auf eine Erkundungstiefe von ca. 100 m eingestellt.

Die Abbildung zeigt die Inversionsergebnisse der Meßdaten auf den beiden Meßprofilen P1 und P2, ferner ein vereinfachtes Bohrprofil mit dessen Hilfe die Meßergebnisse kalibriert werden können.

Niederohmige Werte gehen dabei einher mit einer Erhöhung des Tonanteils. Die vertikale Schichtung des Untergrundes sowie ihr lateraler Verlauf kann durch den spezifischen Widerstand sehr gut erkannt werden.

Das Vorerkundungsergebnis ist damit eine Grundlage für die anschließende hydrogeologische Beurteilung des Untergrundes.



Kostengrößenordnung

gezeigte Messung, Auswertung, Bericht, ca. 5 TEur

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-wasse_Geoelektrische_Vorerk/hauptteil_el-wasse_geoelektrische_vorerk.html

Text 6 (Fallbeispiel)

Geophysikalische Vorerkundung bei der Karstproblematik

Vorbemerkung

In einigen Regionen Deutschlands kommt es zu ausgeprägten Verkarstungserscheinungen wie Hohlräume, Erdfälle und Dolinen. Die Verkarstung beruht auf der Lösung und Auslaugung von Gestein durch Wasser. Das Wasser transportiert das Material ab. Zurück bleiben Massendefizite in Form von Hohlräumen und Senkungen, die bei baulicher Nutzung eine Gefährdung darstellen können.

Die Baugrunderkundung in karstgefährdeten Gebieten gestaltet sich schwierig, da sich Verkarstung nicht unbedingt an der Oberfläche abzeichnet. Hier kann durch eine geophysikalische Vorerkundung eine Übersicht über die Verhältnisse im Untergrund erzielt werden. I.a. reicht jedoch das Auflösungsvermögen der Geophysik nicht aus, Details zu liefern (Ausnahme u.U. Georadar). Der Einsatz der direkten Verfahren (Bohrungen, Schürfe) kann jedoch durch die Vorerkundung gezielter erfolgen.

Abb. F Karsterscheinungen im Steinbruchaufschluß



Geophysikalische Vorerkundungsverfahren

Erfahrungsgemäß haben sich einige Verfahren für die Karsterkundung im Rahmen der Baugrunderkundung bewährt. Dies ist vor allem die Geoelektrik/Elektromagnetik. Daneben sind auch die Seismik sowie die Gravimetrie im Einsatz. Diese Methoden haben den Vorteil, daß ein Gebiet in seiner Gesamtheit erfassbar ist. Das präzisere Georadar kann häufig erst in einer späteren Erkundungsstufe eingesetzt werden.

Geoelektrik und Elektromagnetik basieren auf der Materialeigenschaft 'spez. elektr. Widerstand' und reagieren deshalb gut auf Verkarstung. Ein luftgefüllter Hohlraum wirkt als Isolator und führt deshalb zu einer hochohmigen Anomalie. Ein bindig (leitfähig) verfüllter Hohlraum oder Erdfall bedeutet dagegen eine niederohmige Anomalie. Daneben spiegelt sich in den Daten auch die weitere Untergrundsituation (z.B. Deckschicht, Verwitterungszone, Fels) wider. Zwei Verfahrensvarianten haben sich in der Praxis als praktikabel erwiesen: die linienhafte 2D-Widerstandstomografie und die flächige Widerstandskartierung. Je nach Variante ist die Darstellung von mehr oder weniger großen Grobstrukturen zu erwarten.

Bei der ersten Variante erhält man einen Widerstandstiefenschnitt entlang der Meßlinie, wie dies in

mehreren folgenden Abbildungen dargestellt ist. Sie ist vorteilhaft für lineare Bauwerke (z.B. Pipelinetrassen, Straßentrassen, Tunnel), kann aber auch in der Fläche (parallele Meßlinien) eingesetzt werden (3D-Widerstandstomografie).

Die **Widerstandskartierung** dient der flächigen Erkundung, indem die Meßfläche im engem Raster und mit einer vorbestimmten Eindringtiefe abgescannt wird. Sehr ökonomisch läßt sich dies mit der Elektromagnetik durchführen. Das Resultat ist eine Karte des scheinbaren spez. Widerstandes. Es handelt sich dabei um integrale Werte ab der Oberfläche bis in die vorgegebene Tiefe. Mit dieser Karte können die lateralen Veränderungen im Untergrund in der Fläche beurteilt und kritische Stellen zur näheren Erkundung ausgewiesen werden.

[...]

Weiter zu den Fallbeispielen

Fall A (Pipeline-Trasse)

Aufgabe: Karsterkundung entlang einer Pipeline-Trasse

Meßprogramm: 2D-Widerstandstomografie

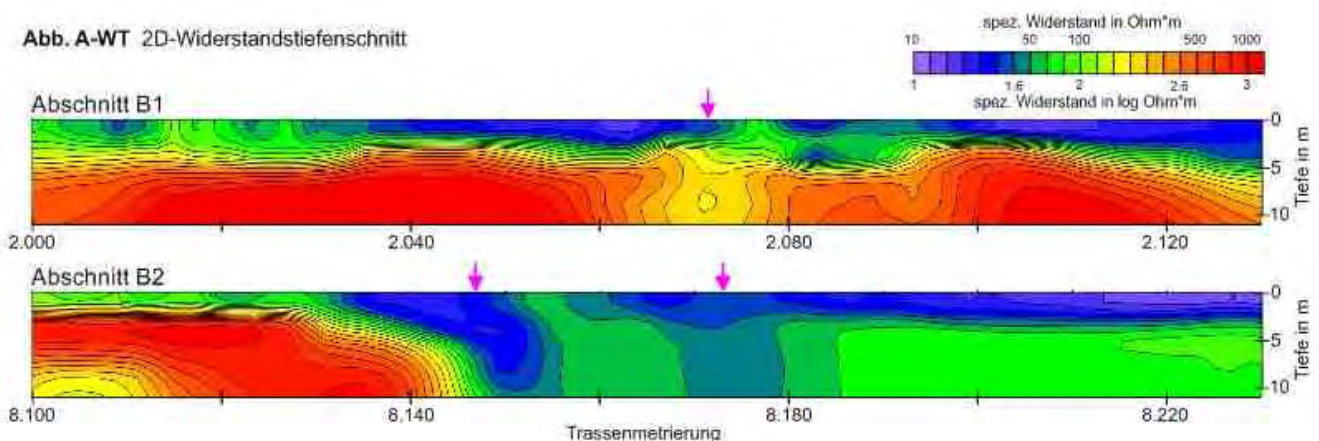
Vorgehensweise/Ergebnisse

Die karstgefährdeten Trassenabschnitte wurden durchgehend erkundet und nach auffälligen Stellen durchsucht. In den beiden unten gezeigten Abschnitten ist eine bindige Deckschicht über Fels vorhanden (blau). Es sind drei Anomalien in Form von lokalen tiefgründigen Widerstandsniedrigungen zu sehen (Pfeile). Es könnte sich um bindig verfüllte Erdfälle bzw. Dolinen handeln. Hier sind nähere Erkundungen angezeigt. Im Abschnitt B2 ist die linke Anomalie mit einem Wechsel des Erscheinungsbildes des Felses verbunden.



Abb. A-F Foto der Meßauslage mit Meßwagen

Abb. A-WT 2D-Widerstandstiefenschnitt



Fall B (Tunnelbauprojekt)

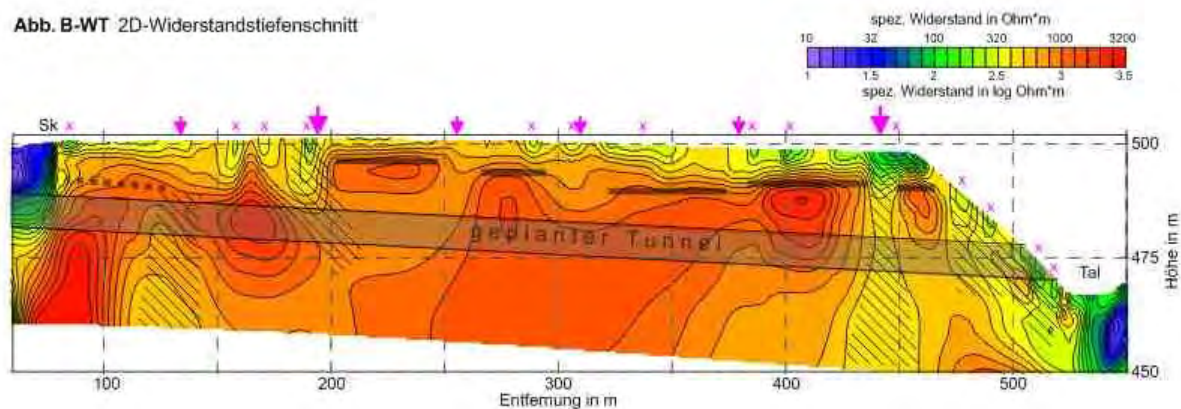
Aufgabe: Karsterkundung bei einem Tunnelbauprojekt

Meßprogramm: 2D-Widerstandstomografie

Vorgehensweise/Ergebnisse

Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse erzielen zu können, wurden die Messungen mit einer gut auflösenden Wenner-Schlumberger-Anordnung, engen Elektrodenabständen und optimalen Meßzeitparametern durchgeführt. Die Abbildung B-WT zeigt den nach der Inversion erhaltenen Tiefenschnitt mit eingezeichneter Tunneltrasse. Die Erkundungsstrecke reicht links von einem verfüllten Steinbruch (Sk = Steinbruchkante) bis rechts in ein Tal. Entlang der Meßstrecke treten oberflächennah vielfach lokale Stellen erniedrigten Widerstandes (x) auf. Sie kommen vermutlich durch mehr oder weniger tiefgründige Verwitterungsbereiche zustande. Die Pfeile markieren weiter in der Tiefe befindliche Anomalien, wovon die beiden größeren Pfeile die bedeutsameren Auffälligkeiten anzeigen. Gleichzeitig gliedern die Pfeile Abschnitte, in denen die Felsoberkante (horizontale Striche) auf unterschiedlichem Niveau liegt. Hier deuten sich geologische Störungen an. Die besonders auffälligen Bereiche sind schraffiert. Die deutlichste karstverdächtige Anomalie liegt nahe am Hang.

Abb. B-WT 2D-Widerstandstiefenschnitt



Fall C (Tunnelportal)

Aufgabe:

Durch karstgefährdetes Gebirge soll ein neuer Tunnel verlaufen. Im Bereich des künftigen Portals sollten erste flächige Vorerkundungen Angaben zur Untergrundsituation und insbesondere zum Verlauf der Felslinie liefern.

Meßprogramm:

- flächendeckende Widerstandskartierung
- linienhafte 2D-Widerstandstomografie
- linienhafte refraktionsseismische Tomografie

Vorgehensweise/Ergebnisse

Um eine Übersicht über die lateralen Verhältnisse zu erhalten, wurde zunächst eine flächige Widerstandskartierung mit der Elektromagnetik durchgeführt. Meßraster und Eindringtiefe betrugen jeweils 10 m. Die Abbildung C-K zeigt das Meßergebnis als Widerstandskarte, woraus die geologische Gliederung der Fläche gut erkennbar ist. Die hochohmigen Bereiche (rot) werden durch geringe und die niederohmigen (grün bis blau) durch große Feltiefe verursacht.

Im zweiten Schritt sind Messungen entlang mehrerer Linien zur näheren Erkundung mittels 2D-Widerstandstomografie und Refraktionsstomografie erfolgt. Die Abbildung C-WT/RT zeigt die zugehörigen Ergebnisse. Die 2D-Widerstandstomografie bestätigt die Annahme aus der Widerstandskartierung bezüglich der Feltiefe. Sie zeigt weiterhin an, daß etwa in Mitte der Meßlinie eine tiefgründig verwitterte Zone vorkommt. Die Refraktionsstomografie löst hier die hangende Deckschicht mit niedriger Wellengeschwindigkeit und den verwitterten Fels besser auf. Die Seismik gibt die Tiefe des festen Felses an. Die Zone tiefer Felslage und tiefgründiger Verwitterung birgt eine erhöhte Gefahr von Verkarstung und ist deshalb Ziel für direkte Erkundungsverfahren (Bohrungen).

Abb. C-WT/RT

WT: Tiefenschnitt der 2D-Widerstandstomografie

RT: Tiefenschnitt der Refraktionsstomografie mit Wellengeschwindigkeiten und Festigkeitsgrenzen aus der GRM-Inversion

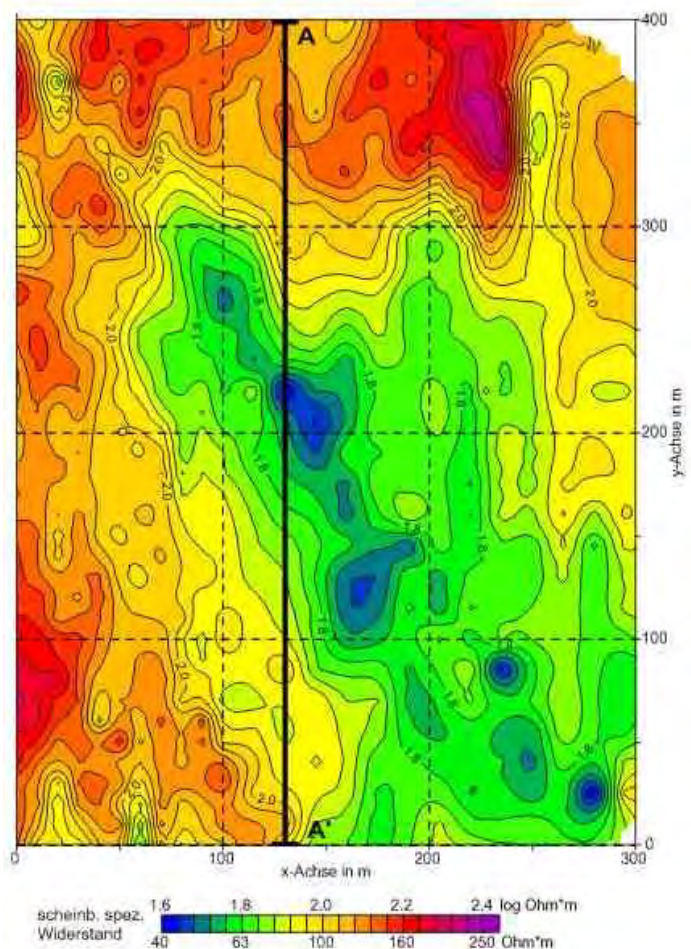
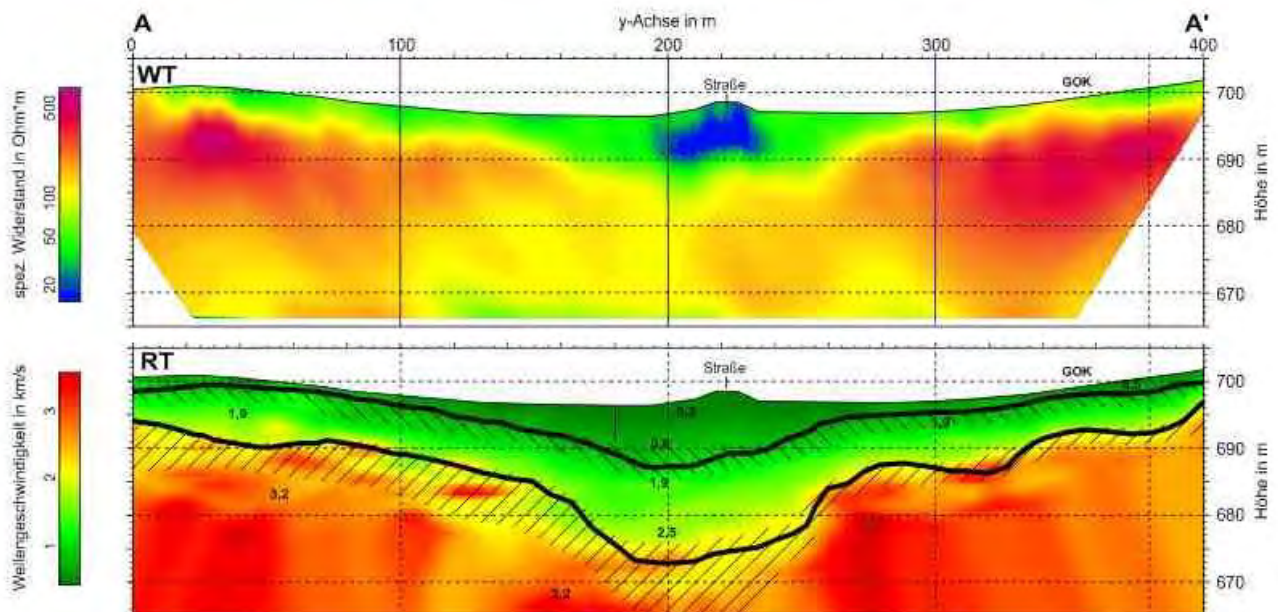


Abb. C-K

Karte des scheinbaren spezifischen Widerstands im Meßgebiet



Fall D (Gewerbegebiet)

Aufgabe:

Gesucht wurde ein geeignetes Bauareal für eine größere Gewerbebaumaßnahme. Nahe der hier untersuchten Fläche sind karstverdächtige Erscheinungen aufgefunden worden. Deswegen sollte eine flächendeckende Vorerkundung durchgeführt werden, um einen Überblick über die Untergrundsverhältnisse zu erhalten.

Meßprogramm: - flächige Quasi-3D-Widerstandstomografie

Vorgehensweise/Ergebnisse

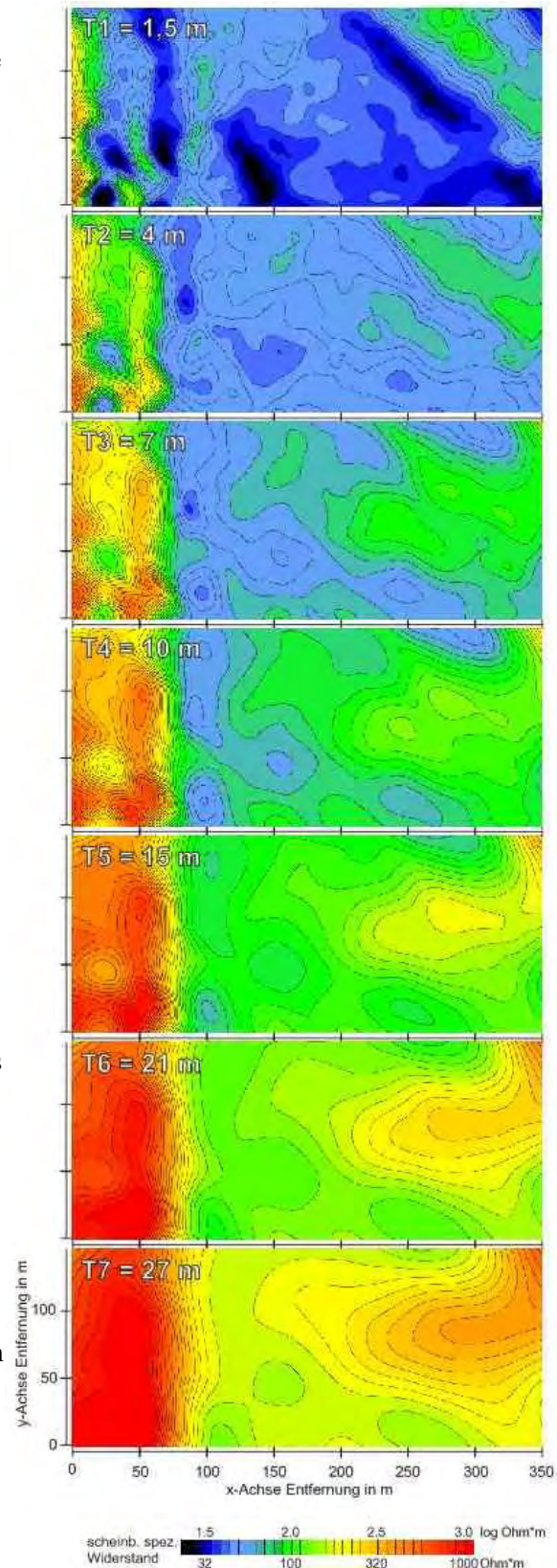
Um den Untergrund des potentiellen Baugebietes möglichst dreidimensional zu erfassen, wurde das Meßgebiet flächendeckend mit parallelen Messungen der 2D-Widerstandstomografie erkundet. Wegen des geringen Meßlinienabstandes konnte eine 3D-Inversion der Daten erfolgen. Hierbei werden bei der Rechnung nicht nur die Werte innerhalb einer sondern auch die der benachbarten Meßlinien berücksichtigt. Der Meßlinien- und der Meßpunktabstand auf der Meßlinie sind dabei ein Kompromiß zwischen Auflösungsvermögen und Kosten in Hinsicht auf eine wirtschaftliche Vorgehensweise.

Als Ergebnis der flächigen Erkundung liegen nicht nur die vertikalen Tiefenschnitte (siehe vorherige 2D-Fälle) sondern auch Horizontalschnitte für diverse Tiefen vor. Eine Reihe dieser Horizontalschnitte ist in nebenstehender Abbildung dargestellt.

Die niedrigen Widerstandswerte (blau) stehen für bindige Bodenbestandteile, d.h. für hohen Verwitterungsgrad. Umgekehrt bedeuten hohe Werte (rot) festen Fels und die dazwischen liegenden Werte (grün) verwittertes Gestein. Die Karten zeigen damit sehr deutlich die räumliche Situation im Untergrund und eine erste Beurteilung auf geeigneten Baugrund ist möglich. Mithilfe dieser Ergebnisse läßt sich ein gezieltes Bohrprogramm zur näheren punktuellen Baugrunderkundung bzw. Kalibrierung der Geoelektrik erstellen.

Vorzugsweise sind in Hinsicht auf Verkarstung lokale Stellen mit auffällig niedrigen Werten (evtl. verfüllte Dolinen/Erd-fälle) sowie Zonen geologischer Störungen (links in der Abbildung zwischen $x = 70$ m und $= 90$ m) direkt zu erkunden. Bei Stellen mit auffällig hohen Werten ist der Verdacht auf einen (unverfüllten) Hohlraum unsicherer, da auch Felshochlagen ähnliche Anomalien bewirken.

Bemerkung zur 3D-Widerstandstomografie



Die Quasi-3D-Tomografie (Dahlin und Loke, 1997) beruht auf der Messung entlang einer einzigen Meßlinien- und damit Stromrichtung (eine von 3 Raumrichtungen x, y, z). Die Begründung für eine zweite Richtung liegt darin, daß die orthogonale Anordnung bei besonderen geologischen Situationen (z.B. Störung) und Anisotropie andere Stromstärken und damit andere Widerstände ergeben kann. Um aus Kostengründen eine zweite Meßrichtung zu vermeiden, wird die Richtung der Meßlinien bei der Quasi-3D-Tomografie möglichst zielgerecht gemäß Kenntnisstand eingestellt.

Abb. D-WT

Horizontalschnitte der 3D-Widerstandstomografie in
7 verschiedenen Tiefen T1 = 1,5 m bis T7 = 27 m unter GOK

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/hauptteil_geophysik_karst.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/Karst_A/hauptteil_karst_a.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/Karst_B/hauptteil_karst_b.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/Karst_C/hauptteil_karst_c.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/Karst_D/hauptteil_karst_d.html

Text 7 (Fallbeispiel)

Suche einer Karsthöhle mit Geoelektrik

Aufgabe

Neben einer bekannten Karsthöhle wurden weitere Höhlen vermutet. Mit kostengünstigen geophysikalischen Mitteln sollten geeignete Bohransatzpunkte aufgezeigt werden.

Meßprogramm

- Widerstandssondierungskartierung (2D-Tomografie)

Vorgehensweise/Ergebnis

Zur Erkundung wurde eine Meßlinie mit der sog. Widerstandssondierungskartierung quer über die bekannte Höhle bis in Nachbarbereiche vermessen. Es wurde eine Multielektroden-Meßanordnung nach Wenner mit einer Erkundungstiefe von ca. 35 m verwendet.

Die Abbildung 1 zeigt die gemessenen Widerstandsdaten als Pseudotiefenschnitt. Darin sind die unverarbeiteten Meßdaten in Form des scheinbaren spez. Widerstandes als Funktion der Länge der Meßanordnung (= Pseudotiefe) aufgetragen.

In Abbildung 2 ist das durch rechnerische Inversion abgeleitete Tiefenmodell des spez. Widerstandes dargestellt. Gegenüber der Pseudotiefendarstellung verbessert sich vor allem die Lagen- und Tiefenangabe.

Der große Pfeil (bei 42 m) zeigt auf die Position der bekannten Höhle. Sie macht sich im Tiefenschnitt durch ein starkes Maximum des spez. Widerstandes bemerkbar. Die tatsächliche Lage und die Lage nach der Geoelektrik stimmen sehr gut überein.

Eine weiteres, etwas schwächeres Maximum ist bei Profilmeter 87 und ein sehr schwaches bei 184 m zu sehen (siehe Pfeile). Ersteres ist eine Stelle, an der mit großer Wahrscheinlichkeit ebenfalls mit einer Höhle gerechnet werden muß. An der zweiten Stelle bei 184 m ist die Hohlraumwahrscheinlichkeit geringer. Hier könnten auch Inversionseffekte, die durch die Randlage bedingt sind, Mitverursacher des kleinen Maximums sein.

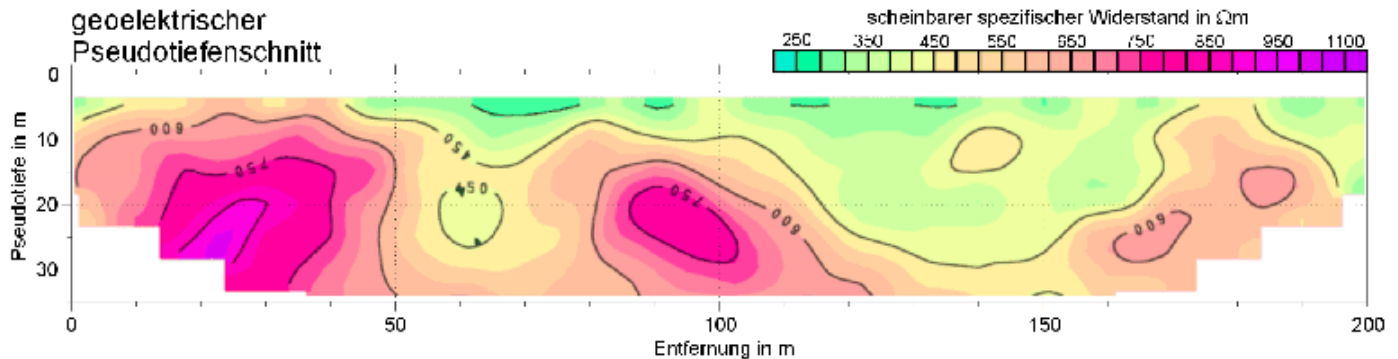


Abb. 1 Daten (scheinbarer spezifischer Widerstand) in Form des Pseudotiefenschnitts. Die Widerstandsdaten werden als Funktion des Meßortes und der Meßanordnungslänge (= Pseudotiefe) dargestellt. Diese Darstellung der Rohdaten ist frei von potentiellen Artefakten, gibt aber noch keine guten Angaben über die Lage und Tiefe.

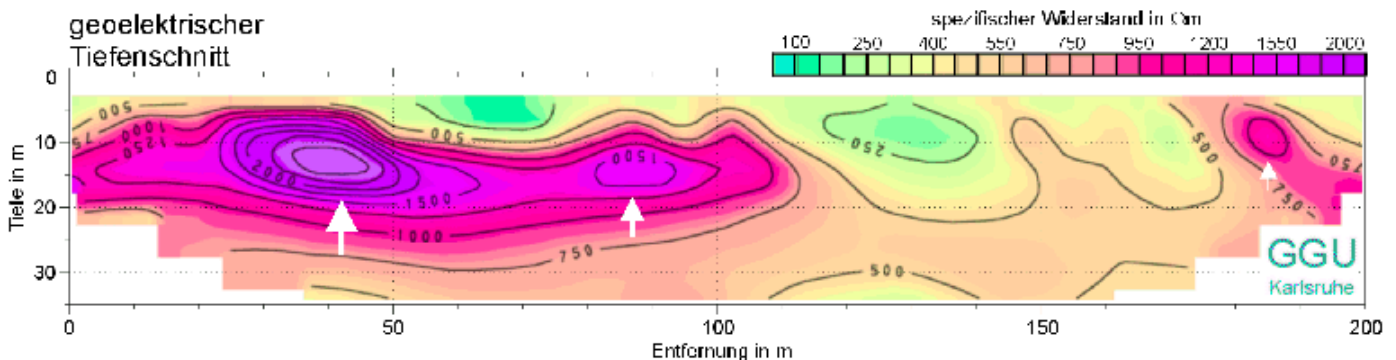


Abb. 2 Invertierte Daten (spezifischer Widerstand) in Form des 2D-Tomografieschnittes. Die Rohdaten werden rechnerisch in eine Funktion Meßort über Tiefe (wahre Tiefe) überführt. Diese Darstellung der Daten gibt eine genauere Übersicht über die Lagen- und Tiefenverhältnisse. Die bekannte Karsthöhle (großer Pfeil) ist als starke Widerstandserhöhung zu sehen. Eine Erhöhung in Bildmitte (mittlerer Pfeil) zeigt mit großer Wahrscheinlichkeit auf einen weiteren Hohlraum. Ganz rechts im Bild ist eine kleinere Widerstandserhöhung zu sehen (kleiner Pfeil), die aber nur unsicher als Hohlraum zu interpretieren ist.

Kostengrößenordnung

Messung, Auswertung, Bericht: ca. 1 TEur

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-hoehl_Suche_einer_Karsthohl/hauptteil_el-hoehl_suche_einer_karsthohl.html

Text 8 (Fallbeispiel)

Geoelektrische Vor-/Nacherkundung eines Baugebiets

Aufgabe

In einem erschlossenen, aber nur teilweise genutzten Gewerbegebiet sollten weitere Grundstücke verkauft werden. Setzungserscheinungen waren bei bestehenden Gebäuden vereinzelt vorgekommen. Die vorliegenden Baugrundbohrungen zeigten weitgehend Sandboden an. Teilweise waren jedoch auch weniger tragfähige Schichten (Mudde, Schlick, Torf) vorhanden. Mittels flächendeckender Untersuchung sollte für die noch freien Baugebiete eine Karte der Untergrundverhältnisse erstellt werden.

Meßprogramm

- geoelektrische Widerstandskartierung

Vorgehensweise/Ergebnis

Auf den vorgegebenen Flächen wurden Messungen der Bodenwiderstände durchgeführt. Die Widerstände korrelieren mit der Bodenart. Rollige (Sande, Kiese) Böden zeigen hohe Werte, bindige Böden dagegen niedrige.

Die sog. "scheinbaren" spez. Bodenwiderstände wurden mit einer Wenneranordnung von ca. 3 m Tiefenreichweite bei einem Meßpunktabstand von 5 m * 5 m ermittelt. "Scheinbar" bedeutet, daß es sich um integrale Werte für ein Meßvolumen ab Geländeoberfläche bis in die gewählte Tiefe handelt.

Die Abbildung zeigt die aus den Meßwerten berechnete Widerstandskarte. Es ist eine deutliche geologische Gliederung des Gebietes zu erkennen: Die blauen bis grünen Bereiche mit niedrigen Werten zeigen den Verlauf von alten Flußrinnen, welche v.a. mit weniger tragfähigem Bodenmaterial verfüllt sind. Die vereinzelt durchgeführten Bohrungen konnten die flächige Verteilung nicht ausreichend verdeutlichen; sie sind aber für die Datenkalibrierung notwendig, da es keine eindeutige Zuordnung Widerstand zu Bodenmaterial gibt.

Fazit

Die Widerstandskarte gibt eine sehr gute Übersicht über die Untergrundverhältnisse.

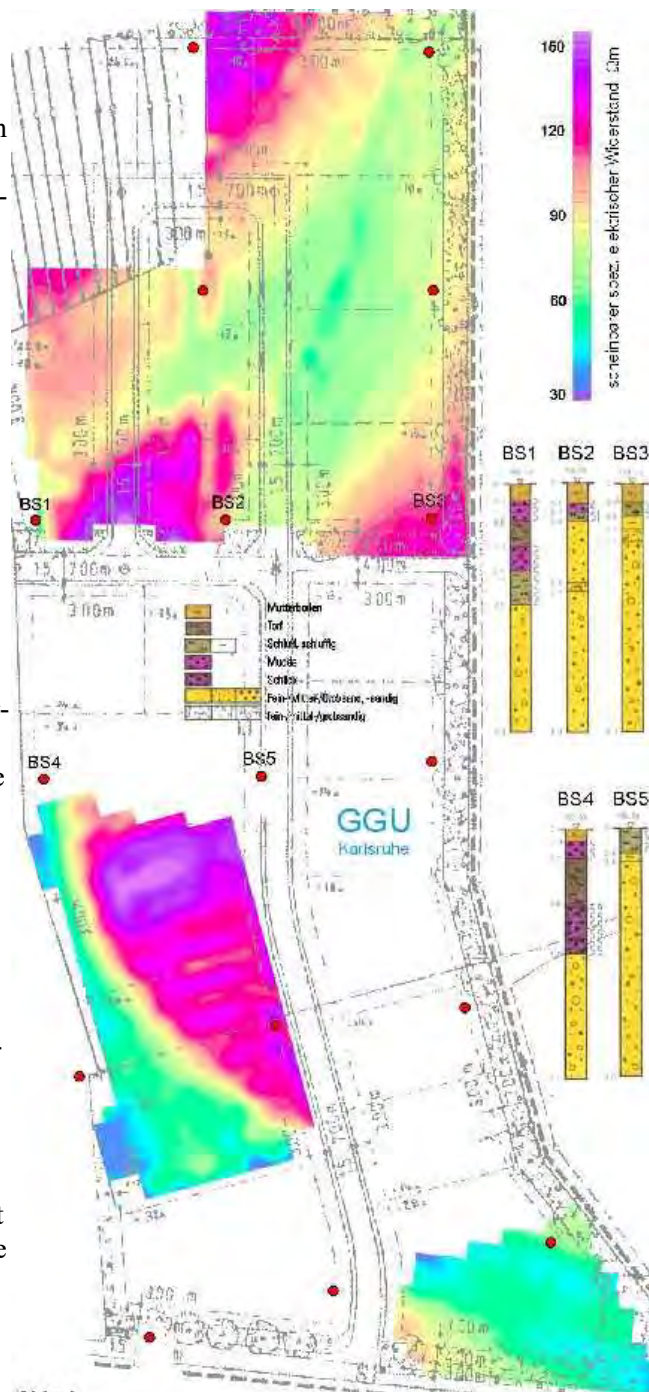


Abb. 1
Karte des scheinbaren spez. Widerstandes einkopiert in den Lageplan
rote Punkte: bestehende Baugrundbohrungen (bis 6 m Tiefe)
BS1 - BS5: bestehende Bohrungen mit dargestellten Tiefenprofilen

Die hier durchgeführte Nacherkundung erbrachte eine Klärung der Untergrundverhältnisse. Besser ist es, die Kartierung als Vorerkundung durchzuführen, damit die Baugrundbohrungen gezielt angesetzt werden können.

Kostengrößenordnung

Messung 2,8 ha, Auswertung, Bericht: ca. 10 TEur

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Baugrunderkundung_Tiefbau/wk-baug_Geoelektrische_Vorerku/hauptteil_wk-baug_geoelektrische_vorerku.html

Text 9 (Fallbeispiel)

Vorerkundung des Untergrundes von Windenergieanlagen (WEA)

Aufgabe

Aufgrund der Bauwerksgröße und -form sowie der dynamischen Belastung werden große Ansprüche an die Fundamentierung von Windenergieanlagen (WEA) gestellt. D.h., bei der Auswahl von Standorten muß auch der geotechnische Zustand des Untergrundes mit einbezogen werden. Daneben ist auch die hydrogeologische Situation des Standortes bedeutsam.

In einer ersten technischen Erkundung des Untergrundes kann die Geophysik Informationen für eine Standortbewertung liefern.

Hier wird eine schematische Erkundungsweise mittels Widerstandsgoelektrik vorgestellt, bei der infragekommene Standorte ohne großen Aufwand untereinander verglichen werden können. So können bereits vor konkreten Standortentscheidungen Baugrundrisiken und -besonderheiten wie z.B. Homogenität und Inhomogenität des Untergrundes, Schichtung, geologische Störungen, Karst, dichtende Schichten, Altbergbau usw. eingeschätzt werden.

Meßprogramm

- flächige Widerstandskartierung (WK)
- linienhafte 2D-Widerstandstomografie (WT)

Vorgehensweise

Die geophysikalische Vorerkundung eines Standortes besteht aus zwei Teilen. Beim ersten Teil wird das vorgegebene Meßgebiet (WK-Fläche) mit gleichbleibendem Meßraster und konstanten Meßeinstellungen flächig erkundet. Das Meßergebnis besteht aus einer Karte des sogenannten scheinbaren spezifischen elektr. Widerstandes. Die Widerstandswerte sind jeweils Mittelwerte (genauer: Integrale) von der Oberfläche bis zu einer vorgegebenen Tiefe. Innerhalb der Wirtiefe erlaubt die Karte die Beurteilung der lateralen Verhältnisse im Untergrund. Beim zweiten linienhaften Teil werden mindestens zwei Meßlinien festgelegt (WT-Schnitte). Dies können beispielsweise zwei sich rechtwinklig im Zentrum der WEA kreuzende Linien sein. Hierdurch wird der zentrale Bereich dichter erkundet und das Einfallen von Bodenschichten kann gut festgestellt werden. Als Ergebnis erhält man Widerstandstomogramme. Dies sind Tiefenschnitte auf Basis der Materialeigenschaft spezifischer elektr. Widerstand entlang der Meßlinien. Hierdurch können auch die Lagerungsverhältnisse des Untergrundes beurteilt werden. Die Erkundungstiefe richtet sich nach den Notwendigkeiten am Standort, wobei allerdings das mit der Tiefe abnehmende Auflösungsvermögen der Geoelektrik und der steigende Aufwand für größere Tiefen (zunehmende Meßlängen) zu berücksichtigen sind.

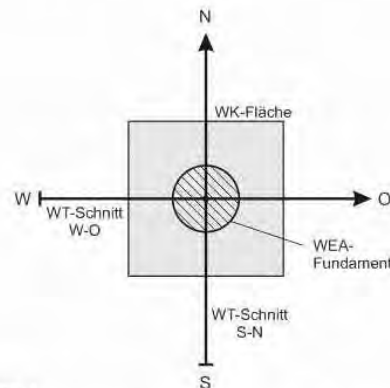


Abb. 1

Schema der geoelektrischen Standortvorerkundung. WK-Fläche: Fläche der Widerstandskartierung mit konstanter Wirtiefe. WT-Schnitt: Meßlinien der beiden widerstandstomografischen Schnitte in S-N- und W-O-Richtung. Die Orientierung und die Tiefenreichweite der WT werden gemäß der Vorkenntnisse, der genauen Fragestellung und den örtlichen Bedingungen festgelegt.

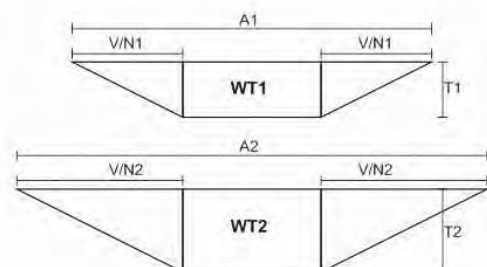


Abb. 2

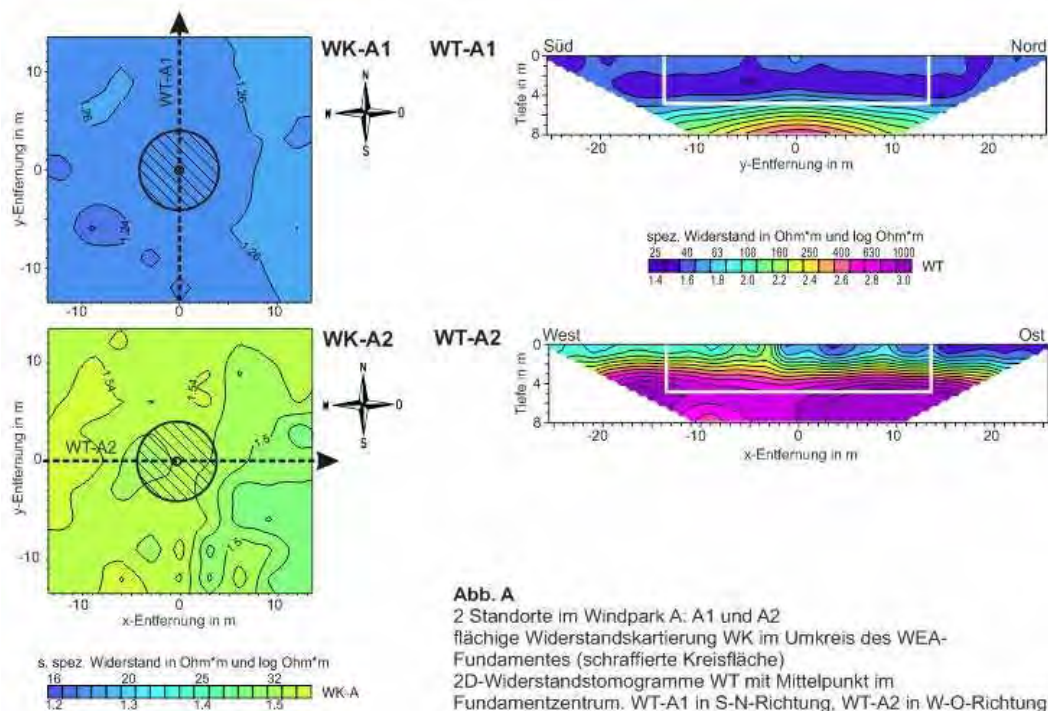
Auslagenanforderung der 2D-Widerstandstomografie WT bei kleiner und großer Eindringtiefe. Entlang der Meßlinie befindet sich die WT-Elektrodenauslage A. Die gewünschte Eindringtiefe T wird durch entsprechend große Elektrodenabstände bzw. Meßauslagen verwirklicht. Im Vor- und Nachlauf V/N nimmt die Eindringtiefe T zur Auslagenmitte hin auf den Maximalwert zu. Je größer die erwünschte Eindringtiefe desto größer ist der notwendige Vor- und Nachlauf (Anhaltspunkt: $V/N \sim 2T$). Die maximale Eindringtiefe sollte etwa um etwa 1/4 bis 1/3 tiefer als die zu erkundenden Strukturen reichen, damit diese zuverlässig erkannt werden.

sichtigen ist.

Die Abb. 1 zeigt das Schema der beiden Erkundungsteile WK und WT. Die Abb. 2 verdeutlicht die Auslagenanforderungen der WT bei unterschiedlicher Tiefeneinstellung (Auslagenvorlauf und -nachlauf V/N).

Ergebnisse Windpark A

Die Abbildungen A zeigen die Meßergebnisse an den zwei Standorten A1 und A2 eines geplanten Windparks. Mit WK sind die Widerstandskartierungen bezeichnet. Ihre Wirktiefe reicht bis 5 m; dies ist in den Widerstandstomogrammen WT durch eine weiße Linie gekennzeichnet. In den WK sind die Richtungen der WT mit einem Pfeil markiert. Wegen der identischen Darstellung können die beiden Standorte direkt miteinander verglichen werden. Es ist jeweils ein 2-Schichtenfall zu sehen: Der hochohmige Fels (magenta) wird durch eine niederohmige bindige Deckschicht (blau) überlagert.



Ergebnisse Windpark B

Die Abbildungen B zeigen zwei Standorte in einem ehemaligen Bergbauegebiet. Es war sowohl mit flachen Abbaustellen als auch mit Hochbrüchen durch tiefer liegende Stollen zu rechnen. Die Erkundungstiefe wurde bei der WT auf 30 m festgelegt, um tiefere Schichten erfassen zu können.

In der WK des Standortes B1 ist in West-Ost-Richtung ein Trend erkennbar. Die WT zeigt, dass es sich um Schichteinfällen von hochohmigem Fels handelt. Damit verbunden variiert die Deckschichtmächtigkeit. Die Untergrundsverhältnisse sind einheitlich.

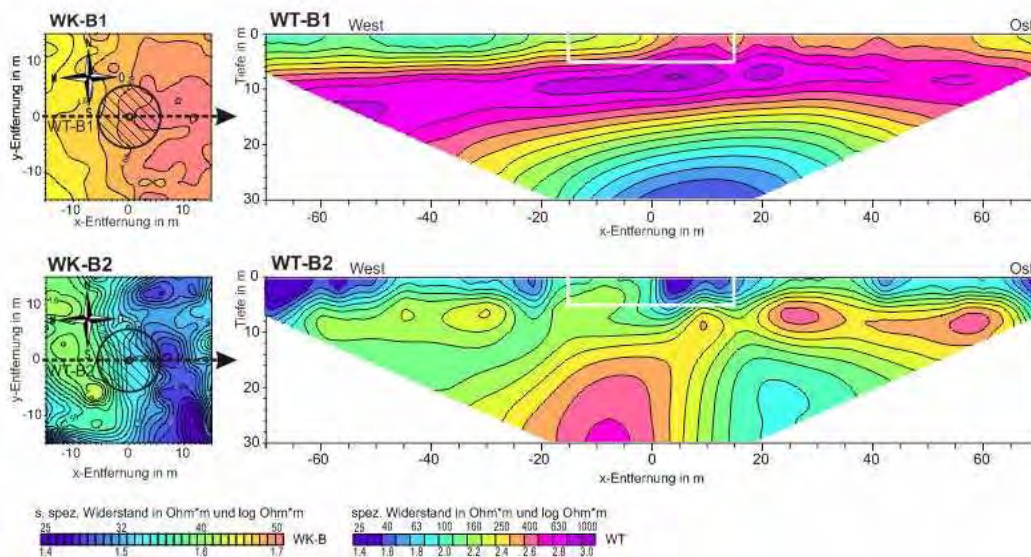
Anders sieht dies am Standort B2 aus. Bereits die WK zeigt starke laterale Inhomogenitäten, die auch in der WT nachvollziehbar sind. Tiefgründig treten weiterhin erhebliche Ungleichförmigkeiten auf, welche Ziel direkter Erkundungsverfahren sein sollten.

Abb. B

2 Standorte im Windpark B: B1 und B2

flächige Widerstandskartierung WK im Umkreis des WEA-Fundamentes (schraffierte Kreisfläche)

2D-Widerstandstomogramme WT mit Mittelpunkt im Fundamentzentrum. WT-B1 und WT-B2 in W-O-Richtung



Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Baugrunderkundung_Tiefbau/Windenergie/hauptteil_windenergie.html

Text 10 (Fallbeispiel)

Suche nach historischen Bebauungsresten in einem geplanten Baugebiet mittels Geoelektrik

Aufgabe

In einem für einen Großmarkt vorgesehenen Baugebiet wurden Reste einer mittelalterlichen Bebauung vermutet. Die Untersuchung sollte dem Bauherrn eine Abschätzung über die Untergrundsituation geben, um gegebenenfalls noch im Planungsstadium darauf reagieren zu können.

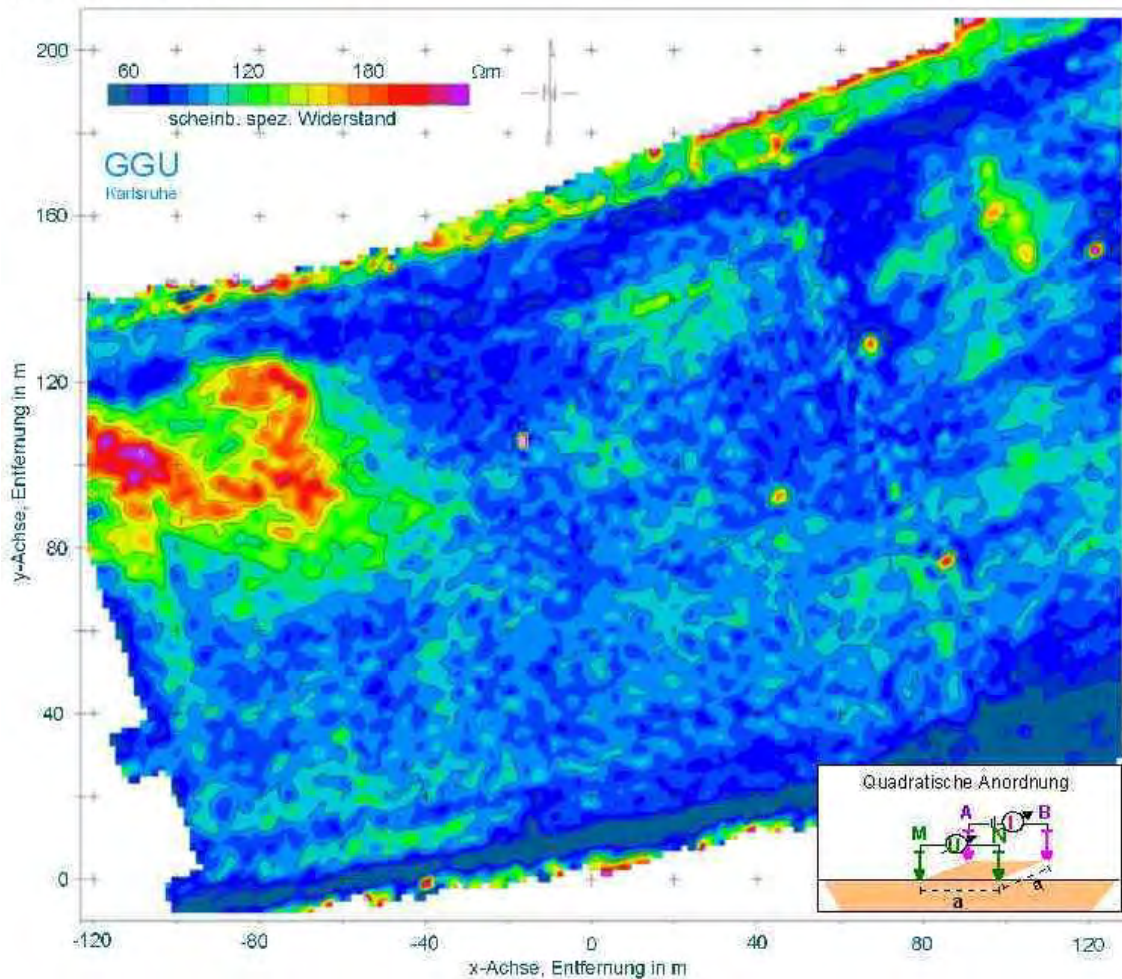
Meßprogramm

- geoelektrische Widerstandskartierung mit der Quadratischen Anordnung

Vorgehensweise/Ergebnisse

Das Meßgebiet war zur Untersuchungszeit eine mit Gras bewachsene Brachfläche. Es wurde erwogen, die Kartierung entweder mit der Geoelektrik oder mit dem Georadar durchzuführen. Wegen des Bewuchses und der niedrigen Bodenwiderstände fiel die Entscheidung zugunsten der Geoelektrik. Vom Bauherrn wurde eine kostengünstige Information erwartet. Aus diesem Grunde wurde die Kartierung mit einem mittel auflösenden Meßraster ausgeführt. Aus der Abbildung ist im Westen deutlich ein größerer Bebauungsrest ersichtlich. Er tritt durch eine Erhöhung der Werte (rot) in Erscheinung. Auf der weiteren Fläche sind nur schwache Untergrundstrukturen erkennbar, die sich aus Einflüssen verschiedener Geländeenutzungen zusammensetzen.

Abb. Karte des scheinbaren spez. Widerstandes ρ_a und Meßanordnung (unten rechts)
Tiefenbereich der Messung: bis ca. 0,7 m
Meßraster: 1,5 m * 1,5 m



Kostengrößenordnung

Messung (3 ha), Auswertung, Bericht: ca. 10 TEur

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Archaeologie_Archaometrie/wk-his-c_Suche_nach_historisch/hauptteil_wk-his-c_suche_nach_historisch.html

Text 11 (Fallbeispiel)

Widerstands- und Georadarkartierung nach Fundamentresten

Aufgabe

Mittels geophysikalischer Verfahren sollte die Fläche eines ehemaligen Klosters nach Resten der früheren Bebauung erkundet werden. Es bestand zunächst die Frage, welches der infragekommenden Verfahren unter den vorliegenden Bedingungen die meisten Informationen liefern kann.

Meßprogramm

- *geoelektrische Widerstandskartierung*
- *Georadarkartierung*

Vorgehensweise/Ergebnisse

Zunächst wurde ein Test mit einem elektromagnetischen Induktionsverfahren durchgeführt. Aufgrund der geringen elektrischen Bodenleitfähigkeit erwies sich dieses einfach anwendbare Verfahren als weniger geeignet.

Die Widerstandskartierung war zwar aufwendiger aber erfolgreicher. Das Ergebnis ist in der Abb. 1 dargestellt. Die Karte zeigt den sog. scheinbaren spez. Widerstand und gibt damit Auskunft über den natürlichen Bodenzustand, überlagert durch die Veränderungen durch Menschenhand. Diese sind in der Karte vor allem als nahezu diagonale Strukturen (von links unten nach rechts oben) zu sehen.

Auf der selben Fläche wurde auch mit Georadar gemessen. Aus den gewonnenen Daten sind sog. Radarzeitscheiben berechnet worden. In ihnen sind die Signalstärken der Reflexionsechos dargestellt. Echos treten dann auf, wenn im Untergrund Objekte oder Strukturen mit ausreichendem Kontrast vorhanden sind.

Ein wesentlicher Vorteil des Radars gegenüber der Geoelektrik (und Elektromagnetik) besteht darin, daß unterschiedliche Tiefenbereiche wesentlich besser differenzierbar sind und die dazu benötigten Daten in einem einzigen Meßvorgang aufgenommen werden können.

Drei dieser Zeitscheiben sind in der Abb. 2 dargestellt. Ebenso wie bei der Geoelektrik sind darin Informationen über den natürlichen Untergrundzustand und anthropogene Einflüsse zu sehen, allerdings tiefendifferenziert und mit besserer Ortsauflösung. Ein Nachteil des Radars kann in der beschränkten Tiefenreichweite liegen. Dies war hier jedoch nicht der Fall.

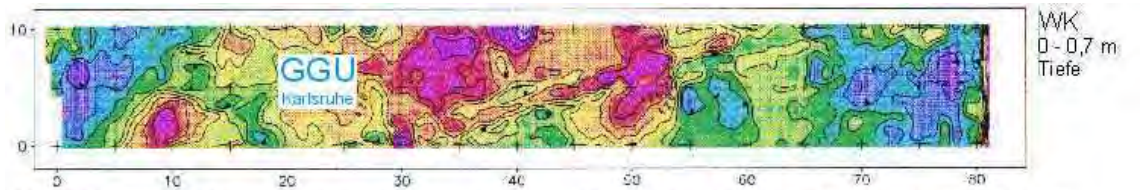


Abb. 1 Meßergebnis der geoelektrischen Widerstandskartierung. Dargestellt ist die Karte (10 m * 80 m) des scheinbaren spezifischen Widerstandes. Größe der Werte: blau < 300 Ω m, rot > 450 Ω m

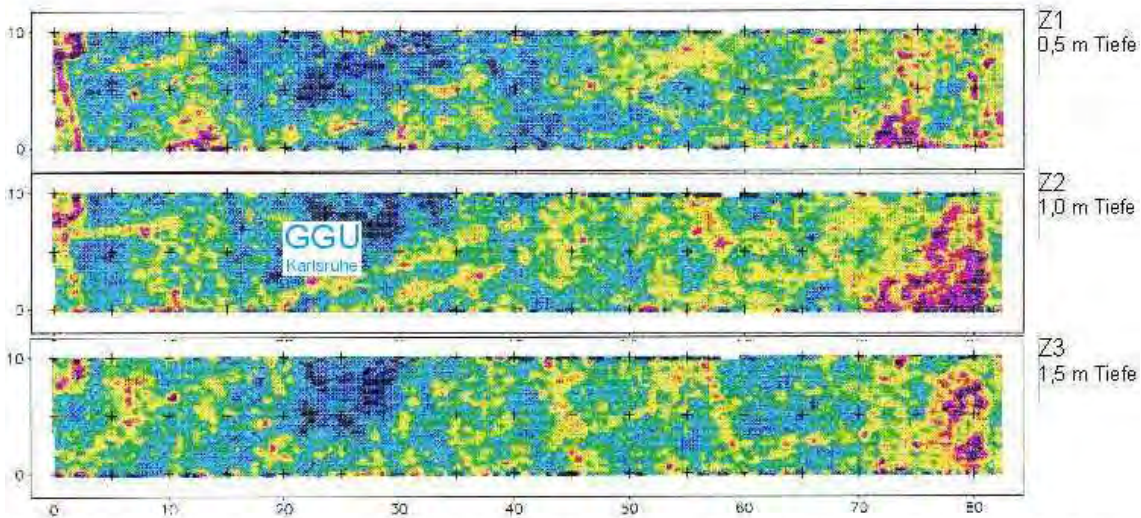


Abb. 2 Meßergebnisse der Radarkartierung. Es sind Karten (10 m * 80 m) der Reflexionsstärke (sog. Radarzeitscheiben) aus drei verschiedenen Tiefen dargestellt. Stärke des Echos: blau = schwach, grün bis gelb = mittel, rot = stark.

Kostengrößenordnung

Messung, Bericht: 2 TEur

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Archaologie_Archaometrie/wk-rdk_Widerstandskartierung_u/hauptteil_wk-rdk_widerstandskartierung_u.html

Text 12 (Fallbeispiel)

Erkundung einer Altablagerung mittels Geoelektrik

Aufgabe

Im Rahmen der Erkundung einer verfüllten Kiesgrube sollen die Ablagerungsgrenzen bestimmt und soweit wie möglich Angaben über die Tiefenausdehnung gemacht werden.

Meßprogramm

- Widerstandskartierung
- 4-fache Widerstandssondierungen

Vorgehensweise/Ergebnisse

Die Widerstandskartierung wurde mit 3 m Eindringtiefe auf die vermutete Ablagerungsmächtigkeit abgestimmt. Die Ablagerung zeigt sich in den Meßwerten typischerweise als Widerstandserniedrigung, die durch leitfähige Stoffe zustandekommt. In Abb. 1 ist das Meßergebnis, der scheinbare spezifische Widerstand, zu sehen. Die Ablagerung ist gekennzeichnet durch die dunkle Schattierung. Insbesondere stimmt die Isolinie $4,0 \ln(\Omega m)$ gut mit den Ablagerungsgrenzen überein.

Entlang einer Profillinie wurden im Abstand von 10 m Widerstandssondierungen durchgeführt (siehe Abb. 1). Aufgrund der starken Inhomogenität von Ablagerungen sind diese als 4-fach-Sondierungen (4 Meßrichtungen) ausgeführt worden. Hierdurch kann ein genaueres Tiefenmodell abgeleitet werden als durch einfache Sondierungen. In Abb. 2 sind die Ergebnisse der Widerstandssondierungen dargestellt. Es ist die untere Verbreitungsgrenze der leitfähigen Stoffe bzw. der Ablagerung ersichtlich.

Die Untergrenze stimmt dann mit der Grubensohle überein, wenn keine leitfähigen Stoffe nach unten austreten. Ansonsten handelt es sich um die Untergrenze der bereits verbreiteten leitfähigen Stoffe.

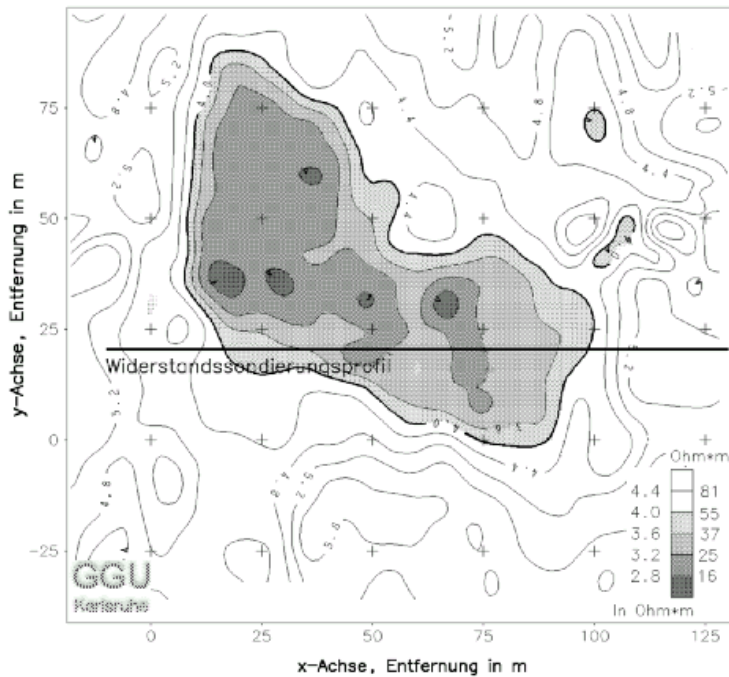
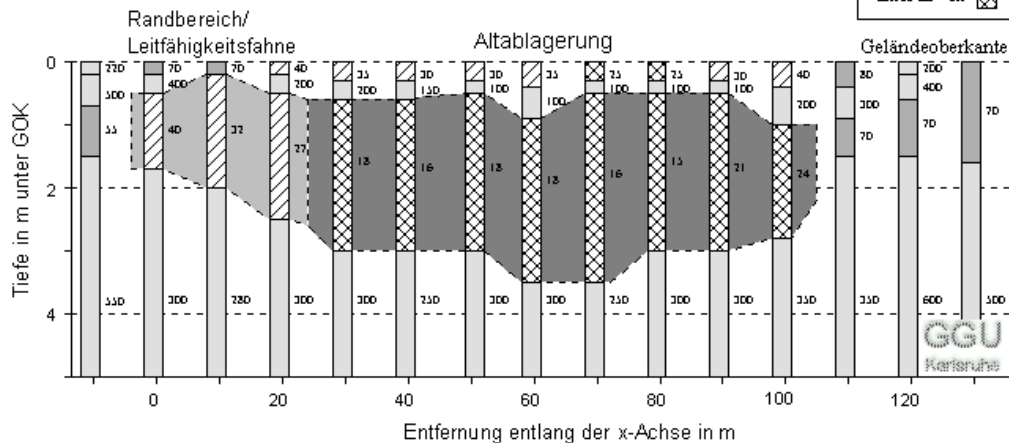


Abb. 1 Verteilung des scheinb. spez. Widerstandes (logarithmiert), ermittelt durch eine Widerstandskartierung. Die dunkel hinterlegten Bereiche zeigen die Ablagerung an.

Abb. 2 Tiefenschnitt, ermittelt aus geoelektrischen Widerstandssondierungen mit jeweils 4-fachen Meßrichtungen. Die dunkel hinterlegten Bereiche zeigen die Ablagerung an.



Kostengrößenordnung

Messung, Auswertung, Bericht: ca. 4 TEur

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Ortung_Altlasten_Suche_Detekti/el-altab_Erkundung_einer_Altab/hauptteil_el-altab_erkundung_einer_altab.html

Text 13 (Fallbeispiel)

Deponieerkundung mittels Geomagnetik, Geoelektrik und Refraktionsseismik

Aufgabe

Die Erkundungen fanden im Rahmen eines Altlastenuntersuchungsprogramms statt. Es handelte sich um eine ehemalige Deponie, die in einer Tongrube angelegt worden war. Aufgabe der Untersuchung war es, die lateralen Deponiegrenzen und die Tiefe der Grubensohle festzustellen sowie Angaben für die gezielte Platzierung direkter Aufschlußverfahren (z.B. Bohrungen) zu liefern. Desweiteren wurde der Abstrombereich nach Austritt leitfähiger Stoffe aus der Deponie erkundet.

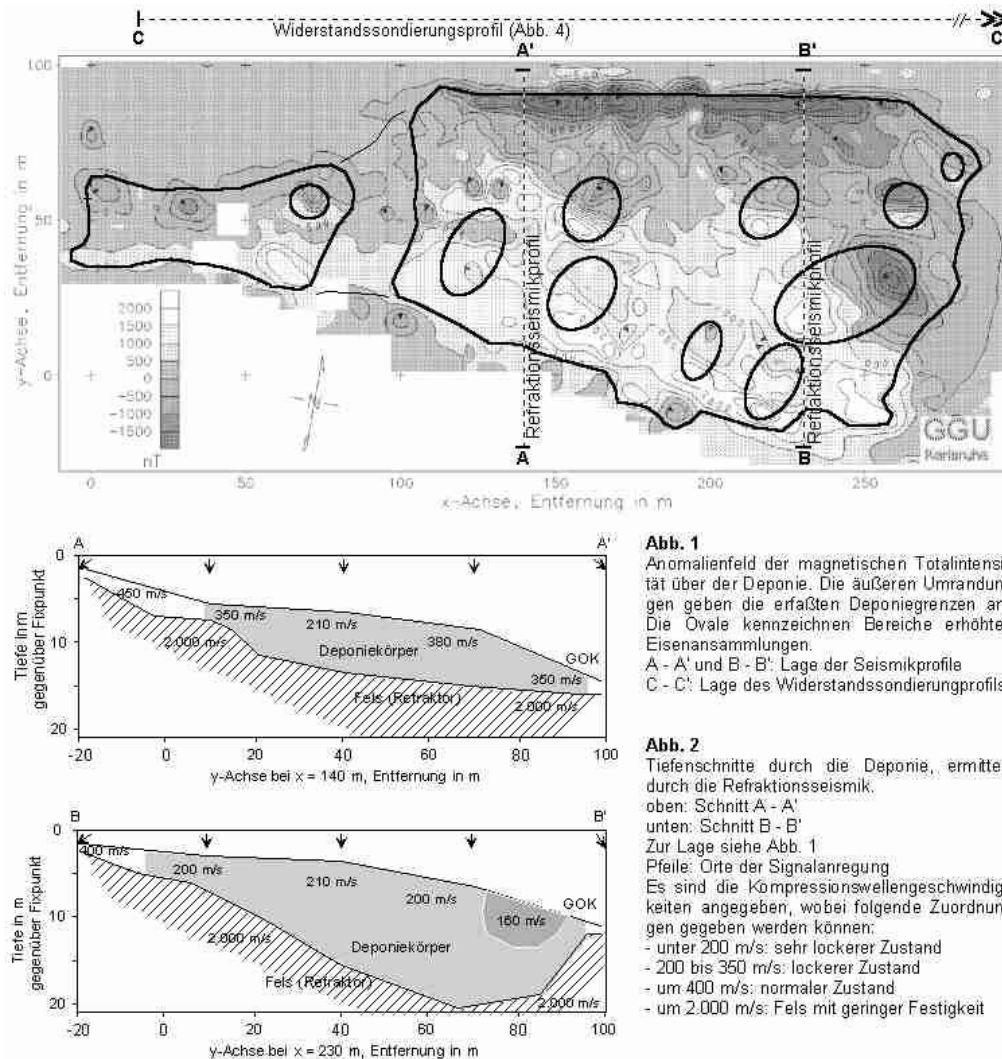
Meßprogramm

- flächendeckende Geomagnetikkartierung
- geoelektrische Doppel-Widerstandssondierungen
- refraktionsseismische Profile

Ergebnisse

Die flächendeckende **Geomagnetik** kartierung zeigt die Begrenzung der Altablagerung aufgrund des darin enthaltenen Eisenanteils an. Die Grenzen sind in der Abbildung 1 umrissen. Die Deponie zeichnet sich insgesamt als magnetischer Dipol ab. Aus der Form des Deponiedipols kann bereits ohne aufwendige Bearbeitung abgeschätzt werden, ob es sich um eine flache oder mächtige Ablagerung handelt. Innerhalb der Deponie sind einzelne lokale Dipole differenzierbar (Ovale in Abb. 1). Auch hier ist es möglich, einfache Abschätzungen über Größe und Tiefe von äquivalenten Eisenmassen ohne besonderen Aufwand zu geben. Gegebenenfalls könnten Modellrechnungen ausgeführt werden, um genauere Abschätzungen zu erhalten. In diesem Falle wären allerdings Messung in zwei unterschiedlichen Höhen sinnvoll.

Die beiden **refraktionsseismischen** Profile (Abb. 2) erbrachten die Grubensohle bzw. den liegenden Fels. Die innerhalb der Deponie gemessenen Kompressionswellengeschwindigkeiten sind teilweise sehr niedrig. Dies sagt aus, daß die Deponie an den entsprechenden Stellen nicht verdichtet ist. Aufgrund des sehr unterschiedlichen Festigkeitszustandes des Deponiematerials ist die Grubensohle nur mit beschränkter absoluter Genauigkeit (ca. $\pm 15\%$) zu bestimmen.



Im Abstrombereich der Deponie wurden entlang eines Meßprofils **Doppel-Widerstandssondierungen** durchgeführt. Die Lage des Profils ist aus der Abbildung 1 zu entnehmen. Das Ergebnis in Form eines Tiefenschnittes ist in der Abbildung 4 dargestellt. Die abseits der Deponie gelegenen Widerstandssondierungen zeigen den ungestörten, natürlichen Zustand (siehe Abb. 3, rechts), der sich in dreifacher Weise vom gestörten Zustand nahe der Deponie unterscheidet (siehe Abb. 3, links).

Ersten: Nahe der Deponie bis in eine Tiefe von bis 4 m ist eine Auffüllung vorhanden.

Zweitens: Es schließt sich darunter in einer Tiefe von rund 4 m ein Bereich stark erniedrigten Widerstandes (= stark erhöhter Leitfähigkeit) an, der einen konkreten Hinweis auf einen breiten Schadaustritt aus der Deponie darstellt.

Drittens: Auch in der wassergesättigten Zone ist eine Widerstandserniedrigung (= Leitfähigkeitserhöhung) zu beobachten.

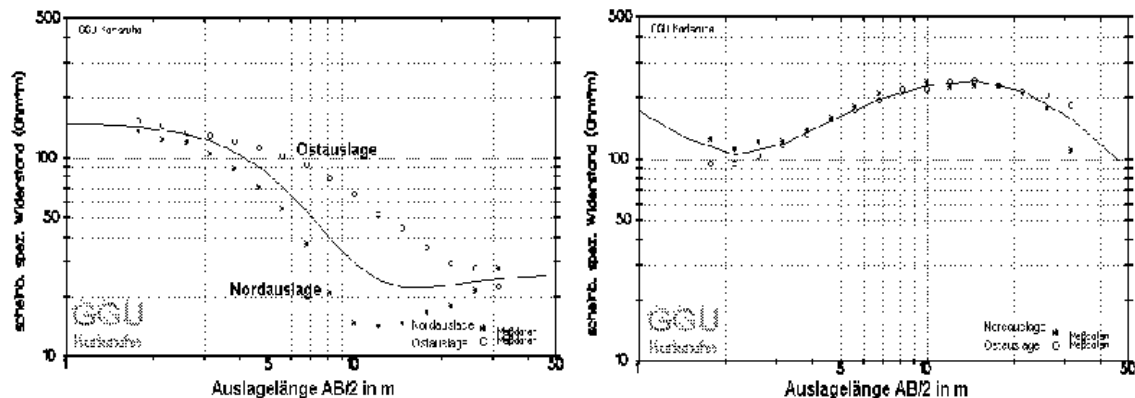


Abb. 3 Daten von 2 Doppel-Widerstandssondierungen. Links: im gestörten Bereich nah der Deponie mit unterschiedlichen Meßwerten in beide Auslagerichtungen und rechts: im ungestörten Bereich mit nahezu identischen Meßwerten in beide Auslagerichtungen.

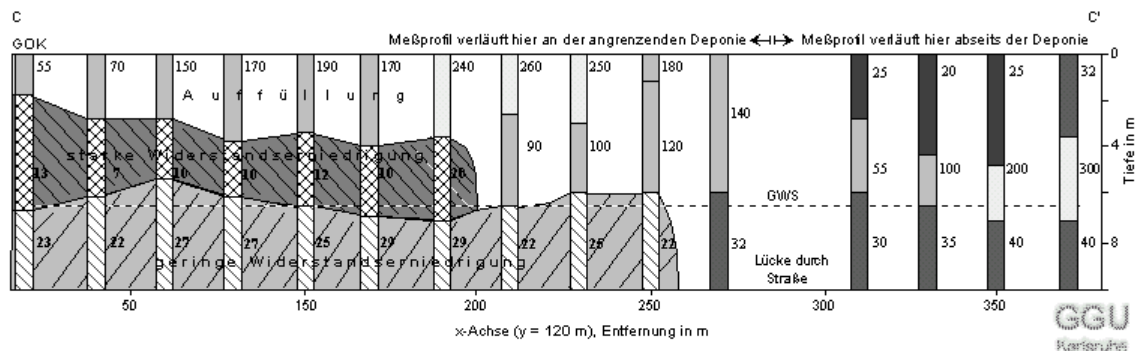


Abb. 4 Tiefenschnitt C - C', ermittelt aus Doppel-Widerstandssondierungen. Der rechte Profiteil befindet sich im ungestörten Gebiet, welches sich stark vom gestörten Gebiet des linken Profiteils unterscheidet. Unter einer Auffüllung sind dort starke Widerstandserniedrigungen durch eine Leitfähigkeitsfahne festzustellen. Unterhalb des Grundwasserspiegels (GWS) tritt ebenfalls eine Widerstandserniedrigung (= Leitfähigkeitserhöhung) auf. (Die Zahlen an den Balkendiagrammen sind Werte des spez. Widerstandes in Ωm .)

Fazit

Durch die Geomagnetikkartierung sind die Ablagerungsgrenzen festgestellt und Massenabschätzungen von lokalen Eisenkonzentrationen durchgeführt worden.

Die Refraktionsseismik erbrachte die Grubentiefe und belegte den i.a. gering und teilweise nicht verdichten Zustand der Deponie.

Die Widerstandssondierungen zeigten im Abstrom eine markante Leitfähigkeitsfahne sowie deren Tiefe an.

Die Geophysik lieferte Daten zur weiteren, gezielten Erkundung mit direkten Verfahren.

Kostengrößenordnung

Messung, Auswertung, Bericht: ca. 10 TEur

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Ortung_Altlasten_Suche_Detekti/deponie_Deponieerkennung_mitte/hauptteil_deponie_deponieerkennung_mitte.html

Text 14 (Fallbeispiel)

Deponieumfelderkundung nach Schadstoffaustritt

Aufgabe

In einer Wasserprobe eines Beobachtungspegels nahe einer Deponie wurden bestimmte Schadstoffe festgestellt. Da einige von ihnen als Deponieinhalt nicht bekannt waren, war unklar, ob es zu einem Schadstoffaustritt gekommen war oder möglicherweise Verunreinigungsquellen außerhalb der Deponie vorlagen. Die Untersuchung sollte Angaben über Herkunft und Verbreitung der Schadstoffe liefern.

Meßprogramm

- Kartierung mit Widerstandsgeoelektrik und
Induzierter Polarisation (IP)

Ergebnis

Es wurde durch eine flächendeckende Kartierung der scheinbare spez. Widerstand und die elektr. Aufladbarkeit (IP) ermittelt. Die Daten sind in den Abb. WK und IPK zu sehen. Das Meßraster war mit 20 m * 30 m bei 10 m Eindringtiefe relativ weitmaschig, reichte jedoch für eine Übersicht über die Verhältnisse aus. Wie in Abb. WK zu sehen, treten auffällig niederohmige Bereiche auf (dunkel schattiert). Sie sind durch die Isolinie 200 Ω m umrandet. Der rechte dieser Bereiche zeigt deutlich eine leitfähige Fahne, welche vom Deponierand ausgeht. Die Widerstände nehmen zur Deponie hin ab bzw. die Leitfähigkeiten nehmen zu. Die Aufladbarkeiten in der Abb. IPK zeigen Vergleichbares (dunkel schattiert). Die allgemein geringe Aufladbarkeit ist hier noch wesentlich weiter herabgesetzt. Daneben sind im linken Bildteil von WK weitere kleinere niederohmige Bereiche zu sehen. Sie sind in der Abb. IPK nur schwach bemerkbar, was darauf hinweist, daß hier eventuell nicht die Deponie als Ursache anzusehen ist. Widerstandstiefensondierungen zeigten für diese Stellen, daß die Widerstandserniedrigung dort durch die Hochlage einer tonigen Schicht verursacht wird. Diese Schicht wird von IP im Gegensatz zur Leitfähigkeitsfahne kaum erfaßt und kann so unterschieden werden.

Fazit

Durch die Methodenkombination konnte ein Bereich angegeben werden, dessen Verlauf sowie die Meßwertgrößen deutlich auf einen Schadstoffaustritt aus der Deponie hinweisen. Der direkte Schadstoffnachweis kann nun durch eine gezielt platzierte Probenahme erfolgen.

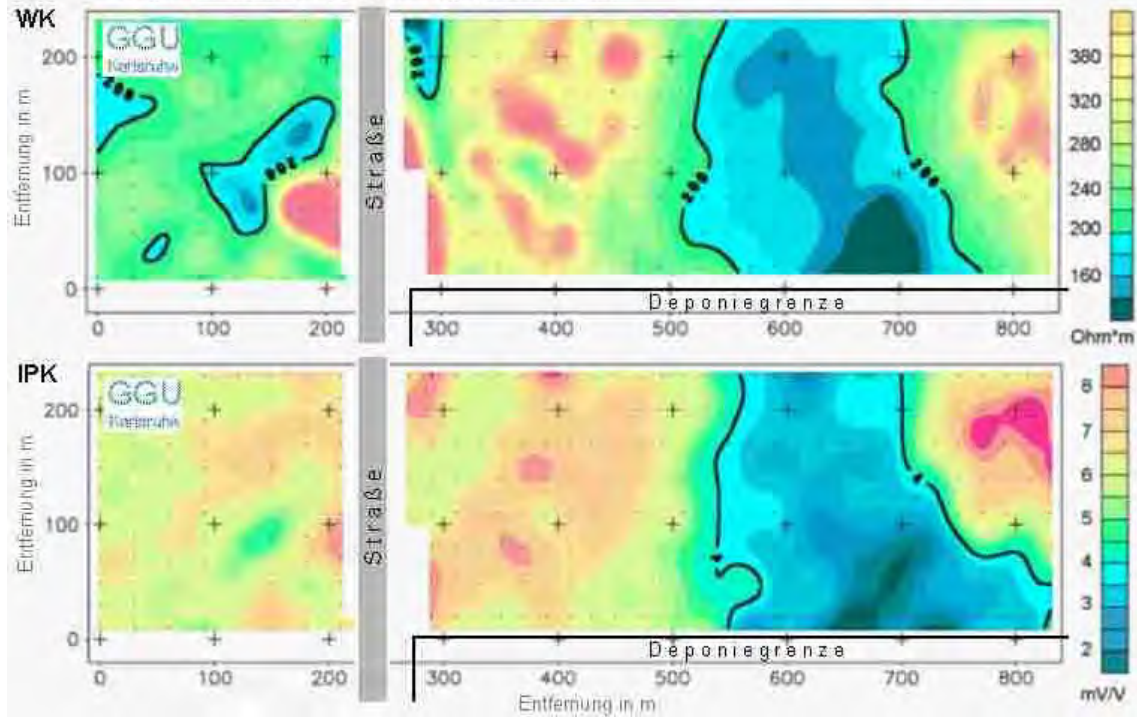
Kostengrößenordnung

Messung, Auswertung, Bericht: ca. 5 TEur

Abb. WK: scheinbarer spezifischer Widerstand aus Geoelektrikkartierung

Abb. IPK: elektrische Aufladbarkeit aus IP-Kartierung

Die eingezeichneten Isolinien (200 Ohm*m bzw. 4 mV/V) umschließen die fraglichen Bereiche.
Die etwa 300 Meßorte sind durch Punkte gekennzeichnet.



Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Ortung_Altlasten_Suche_Deteki/el-fahne_Deponieumfelderkundun/hauptteil_el-fahne_deponieumfelderkundun.html

Text 15 (Fallbeispiel)

Geophysikalische Erkundung einer Industriebrache

Aufgabe

Ein vor allem als Parkplatz genutztes Firmengelände stand zum Verkauf an. Über Reste der früheren Bebauung im Untergrund lagen keine gesicherten Kenntnisse vor, sodaß eine flächendeckende Erkundung mit geophysikalischen Verfahren vorgesehen wurde.

Meßprogramm

- Georadarkartierung
- Kartierung mit TEM-Metalldetektor
- 2 Meßprofile geoelektrische Widerstandstomografie

Vorgehensweise/Ergebnisse

Das vorgegebene Gebiet wurde zunächst mit Georadar flächendeckend kartiert. Die aus den Meßdaten berechneten Radarzeitscheiben zeigen noch vorhandene Untergrundsstrukturen aufgrund deren Reflexionsvermögen. In der Abb. 1 ist die Zeitscheibe für 1,0 m Tiefe zu sehen. Die darin sichtbaren hohen Werte (rot) zeigen Fundamente und Leitungen an. Da eine Materialdifferenzierung mit Georadar weniger möglich ist, wurde eine weitere Kartierung mit dem TEM-Metalldetektor durchgeführt. Der Detektor reagiert selektiv auf Metalle. Das gegenüber Georadar verwendete gröbere Meßraster liefert zwar ein unschärferes Bild, jedoch sind ausschließlich die Metallteile sichtbar (siehe Abb. 2, gelb bis rot). Teilweise sind durch den Metalldetektor deutliche Indikationen an Stellen vorhanden, an denen durch das Radar wenig feststellbar ist.

Als drittes Verfahren wurde entlang von zwei parallelen Linien längs des Meßgebiets die Widerstandstomografie eingesetzt. Die Abb. 3 zeigt die berechneten 2-d-tomografischen Schnitte. Mit Rot sind hohe Widerstandswerte dargestellt. Sie bilden die noch verbliebenen Fundamente in ihrer Tiefenerstreckung gut ab. Daneben sind auch flache Auffüllbereiche zu erkennen.

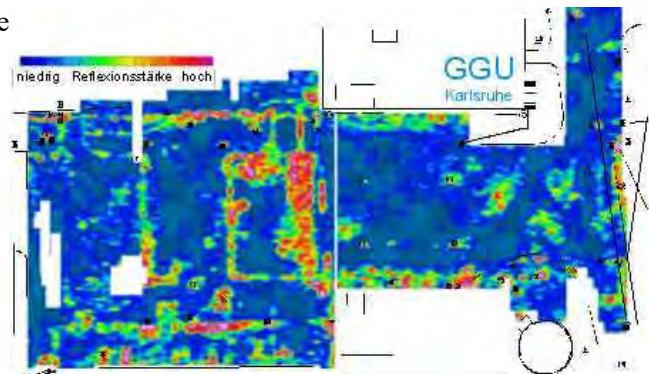


Abb. 1 Die Radarzeitscheibe für die Tiefe bei ca. 1,0 m zeigt neben Leitungen vor allem Fundamente (rot = hohe Werte)

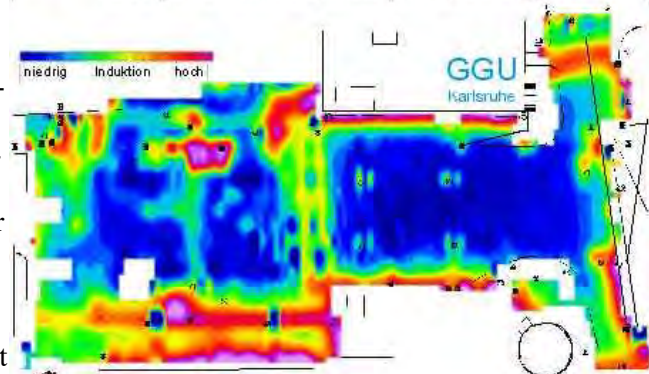


Abb. 2 Die Karte der TEM-Metalldetektor-Daten zeigt Leitungen und Tanks (grün, gelb und rot)

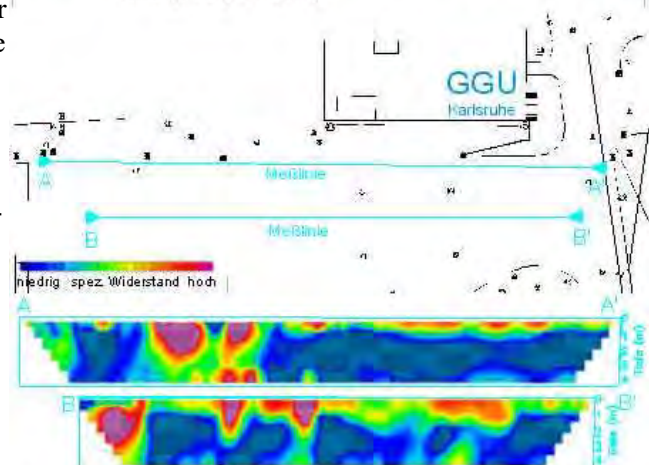


Abb. 3 Die zwei Tiefenschnitte der Widerstandstomografie A-A' und B-B' zeigen bauliche Reste und deren Tiefenerstreckung.



Schülerlabor Geoelektrik



Fazit

Die Untersuchung lieferte eine Übersicht der noch vorhandenen Fundamente, Tanks und Leitungen bezüglich ihrer Position und Tiefe.

Kostengrößenordnung

Messung auf 45 m * 80 m Fläche, Auswertung, Bericht: ca. 6 TEur

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Ortung_Altlasten_Suche_Deteksi/i-brache_Geophysikalische_Erku/hauptteil_i-brache_geophysikalische_erk.html

Text 16 (Fallbeispiel)

Zerstörungsfreie Vorerkundung einer Hafenmauer

Aufgabe

Im Vorfeld der Sanierung einer in der Grundsubstanz über 100 Jahre alten Stützmauer eines Hafenbeckens sollten mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren zunächst großräumig Informationen über den Zustand des Mauerwerks und der unmittelbaren Umgebung gewonnen werden. Im Anschluß daran waren stichprobenartig direkte Untersuchungsverfahren (Bohrungen) vorgesehen.

Meßprogramm

- Radarkartierung
- Widerstandssondierungskartierung
- lokale Mikroseismik

Vorgehensweise

Das Radarverfahren wurde i.w. zur flächigen Erkundung eingesetzt. Hierzu wurde die Wasserseite der Stützmauer in den frei zugänglichen Bereichen mit einem engen Meßlinienabstand abgescantet. Aus den gewonnenen Daten sind sogenannte Zeitscheiben (C-Scan) berechnet worden (siehe Abb. Z1 und Z2). Daneben wurde der Straßenbereich hinter der Mauerkrone linienhaft mit Radar erkundet.



Das elektrische Verfahren Widerstandssondierungskartierung (2D-Tomografie) wurde entlang eines Meßprofils direkt auf der wasserseitigen Wandfläche sowie auf der Straße hinter der Mauerkrone angewendet.

Das dritte Verfahren - die Mikroseismik - kam lokal an der wasserseitigen Wandfläche zum Einsatz.

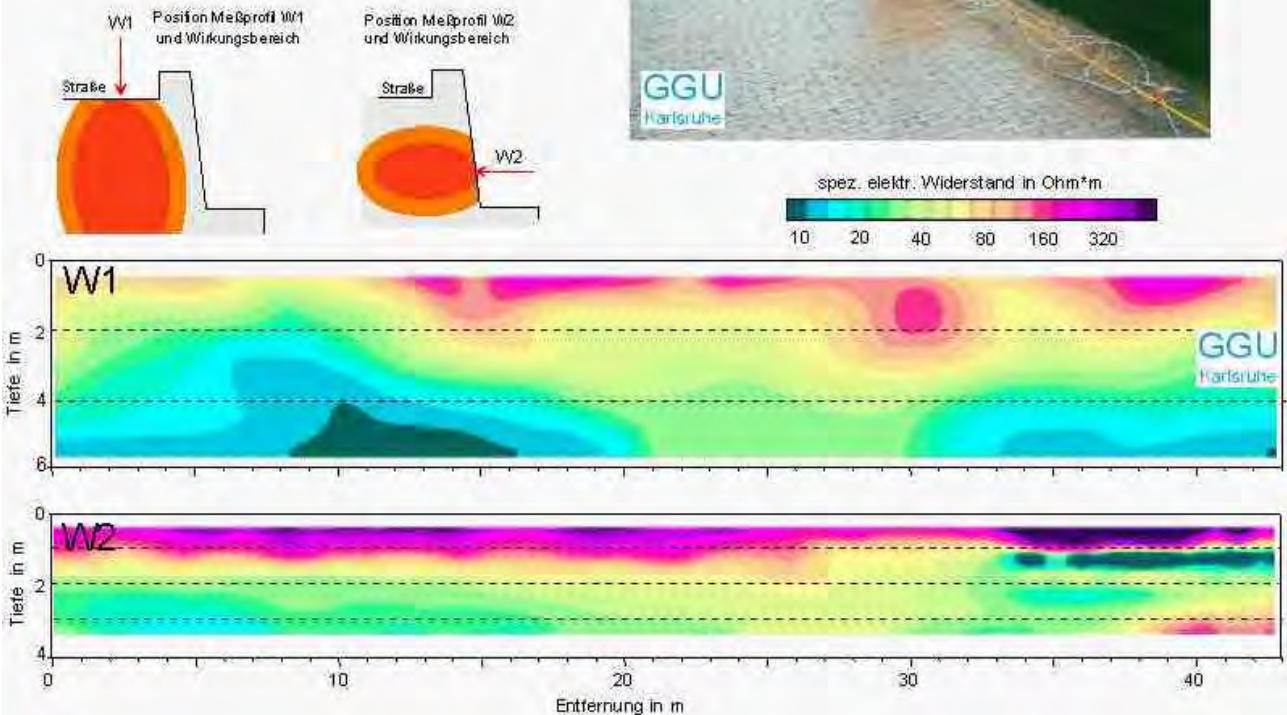
[...]

Ergebnisse der Widerstandssondierungskartierung

Untergrundschichtung (W1) hinter der Stützmauer,
Mauerdicke im unteren Mauerwerksbereich (W2)

Abbildungen zur Widerstandssondierungskartierung

rechts: Straßenbereich hinter der Mauerkrone während der Messung von W1
 unten: Meßpositionen von W1 (Straße nahe Mauerkrone) und W2 (unterer Bereich der Stützmauer)
 W1: niedrige Werte: hoher Feinkornanteil (Schluff), naß
 hohe Werte: geringer Feinkornanteil (Sand), trocken
 W2: sehr hohe Werte (rot): Mauerquerschnitt



[...]

Kostengrößenordnung

angesprochenes Meßprogramm für 100 m Mauerlänge, Auswertung, Befund und Bericht: ca. 10 TEur

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstorungsfreie_Prufung_i/hafenm_Zerstorungsfreie_Prufun/hauptteil_hafenm_zerstorungsfreie_prufun.html

Text 17 (Fallbeispiel)

Korrosionprüfung an eingemauerten Stahlprofilen

Aufgabe

Die oktogonalen Pfeiler (siehe Abb. 1) einer durch Luftangriffe schwer beschädigten Kirche wurden in der Nachkriegszeit wieder aufgebaut. Es wurde je eine Stahlstütze errichtet, die dann ummauert und mit Formsteinen verkleidet wurde (siehe Abb. 2). Nach kurzer Zeit zeigten sich Risse in der Verkleidung. Es bestand die Vermutung, daß der Stahl aufgrund von Salzen im Mörtel korrodiert und durch die damit verbundene Volumenvergrößerung die Ummauerung und die Verkleidung auseinandergedrückt werden. Eine zerstörungsfreie Prüfung sollte die Frage nach der Korrosion klären.

Meßprogramm

- elektrische Potentialfeldmessung
- elektrische Widerstandsmessung
- Radarmessung

Vorgehensweise

Zur Prüfung der Stützen wurden mehrere Verfahren eingesetzt, um zuverlässige Aussagen zu erhalten. Das Potentialfeldverfahren kann den Korrosionsprozess der ummantelten Stahlprofile anzeigen. Die Widerstandsmessung reagiert auf Feuchte und gelöste Salze im Mauerwerk. Die Daten des Radars liefern Aussagen über den strukturellen Aufbau der Stützen sowie auch materialabhängige Kennwerte.

Die Prüfung erfolgte über eine Hebebühne entlang von vertikalen Meßlinien. Dies erlaubte eine zügige Messung.

Ergebnis

Klärend bezüglich der Frage nach Korrosion ist die Potentialfeldmessung. Die Daten (siehe Abb. 3 links) zeigen ein nach unten hin zunehmendes negatives Potential und damit nach unten hin stark ansteigende Korrosionswahrscheinlichkeit.

Die Widerstandselektrik (siehe Abb. 3 Mitte) zeigt vergleichsweise niedrige Werte des scheinbaren spezifischen Widerstandes, die zudem noch nach unten hin abnehmen. Diese geringen Werte sind die Folge einer erhöhten Belastung an (gelösten) Salzen und/oder Feuchte. Sie sind der Grund für die Korrosion des Stahls.

Die Radardaten (siehe Abb. 3 rechts) bestätigen und differenzieren die Aussage der Widerstandselektrik. Danach nimmt die Salzbelastung nach unten zu (abnehmende Reflexionsstärke), der Feuchtegehalt liegt aber einheitlich auf niedrigem Niveau (konstante Dielektrizität).

Kostengrößenordnung

8 Pfeiler: Messung, Auswertung, Bericht: ca. 5 TEuro

oben

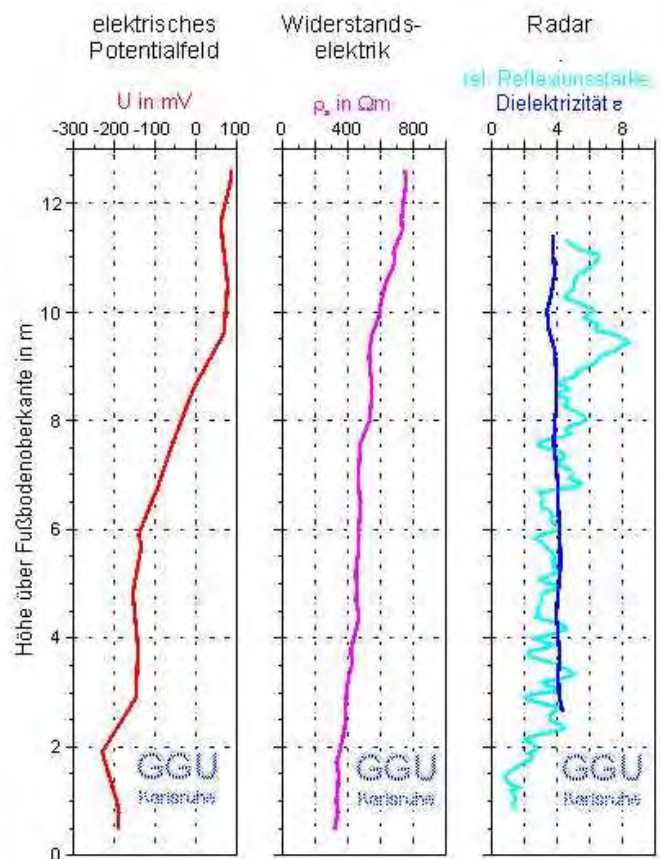
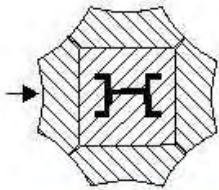
Abb. 2 Pfeilerquerschnitt: außen Formteile, innen ummauerte Stahlprofile. Der Pfeil gibt die Position der vertikalen Meßlinien an.

links

Abb. 1 Foto des Mittelschiffs mit Pfeilern

rechts

Abb. 3 Meßergebnisse an einem Pfeiler



Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstorungsfreie_Prufung_i/Korrosionprufung_an_eingemauert/hauptteil_korrosionprufung_an_eingemauert.html

Text 18 (Fallbeispiel)

Bestimmung von Feuchte und Salzen am Bauwerk

Fall A

Aufgabe

Qualitative Ermittlung der Feuchte-Salz-Verteilung

Meßprogramm

- Widerstandskartierung

Vorgehensweise/Ergebnisse

Mittels einer geoelektrischen 4-Punkt-Anordnung wird die zu untersuchende Oberfläche des Bauwerks abgetastet. Die Eindringtiefe kann grob gesteuert werden. Aus den Messungen erhält man den sog. scheinbaren spezifischen Widerstand ρ_s . Dieser Kennwert wird i.w. durch die Feuchte im Baustoff und den darin gelösten Salzen gebildet. Er veranschaulicht somit die qualitative Verteilung von Feuchte und gelösten Salzen im Baumaterial.

Kostengrößenordnung

Meßfläche ca. 50 m lang * 3 m hoch,
Messung, Auswertung, Bericht: ca. 3 TEur

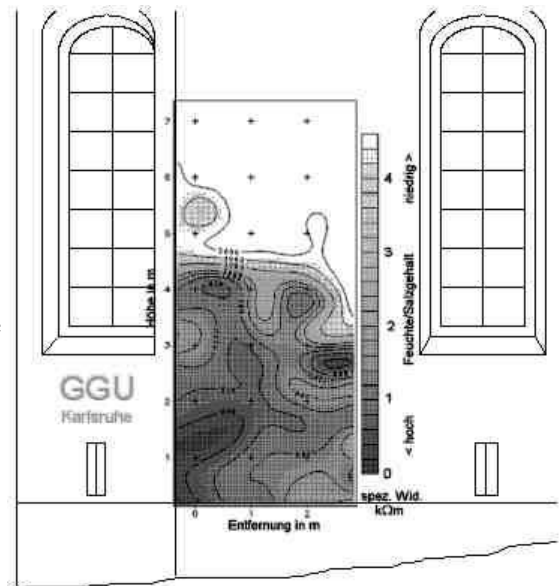


Abb. 1 Scheinbarer spezifischer Widerstand als qualitatives Maß für die Feuchte-Salz-Verteilung

Fall B

Aufgabe

Quantitative Ermittlung der Feuchte und qualitative Angabe der Salz-Verteilung

Meßprogramm

- Radarreflexion oder -transmission

Vorgehensweise/Ergebnisse

Die Laufzeit und die Stärke von Radarsignalen können bezüglich des Gehaltes an Feuchte und Salzen ausgewertet werden.

Aus der Signalgeschwindigkeit kann die Feuchte quantitativ abgeleitet werden. Die Signalabsorption läßt qualitative Aussagen über die Salzverteilung zu.

Die Abbildung B zeigt Ergebnisse einer Untersuchung mittels Radarreflexion am aufgehenden Ziegelmauerwerk

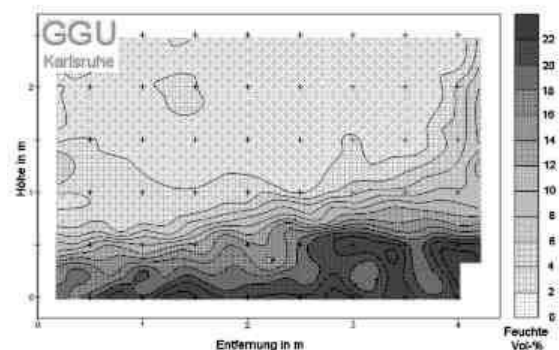


Abb. 2a Feuchte in Ziegelmauerwerk, ermittelt durch Radarreflexion

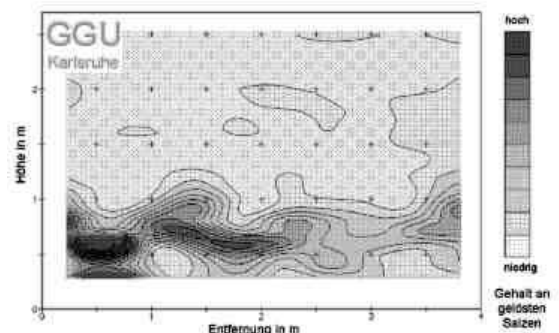


Abb. 2a qualitative Verteilung an gelösten Salzen im Ziegelmauerwerk, ermittelt durch Radarreflexion

(Meßfeld ca. 2,5 m hoch und ca. 4 m breit). Es handelt sich um integrale Werte über den Querschnitt der untersuchten Mauer. Bei größeren Bauteilquerschnitten (~ 50 cm) muß die Untersuchung per Transmission erfolgen, da dadurch die Reichweite erheblich größer wird. Bei Transmission ist eine beiseitige Zugänglichkeit notwendig.

Kostengrößenordnung

Meßfläche ca. 50 m lang * 3 m hoch,
Messung, Auswertung, Bericht: ca. 3 TEur

Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstorungsfreie_Prufung_i/feu-salz_Bestimmung_von_Feucht/hauptteil_feu-salz_bestimmung_von_feucht.html

Text 19 (Fallbeispiel)

Detektion von Nässezonen hinter einer Stützmauer

Aufgabe

Eine Stützmauer sollte aufgrund reparaturbedürftiger Schäden und ihrer historischen Bedeutung saniert werden. U.a. bestand die Frage nach der Herkunft von Feuchte. Hierfür sollte ein Erkundungsverfahren möglichst zerstörungsfrei konkrete Hinweise liefern, um Drainagen korrekt planen zu können.

Meßprogramm

- geoelektrische 2D-Widerstandstomografie

Vorgehensweise

Die geoelektrische Widerstandsmessung spricht sehr stark auf Feuchte und gelösten Salzen an. Sie sind in Form von Ionen die Ladungsträger für das geoelektrische Verfahren. Je höher der Feuchte-/Salz-Anteil desto geringer der elektrische Widerstand. Feuchte/Salze zeigen sich im Widerstandsbild als niedrige Meßwerte.

Die 2D-Widerstandstomografie wird entlang einer Meßlinie durchgeführt. In gleichmäßigen Abständen werden an der Wand Elektroden befestigt, um die Widerstandsmessungen durchzuführen. Die Fixierung der Elektroden kann in einfacher Weise an den Steinfugen oder auch per Haftelektroden erfolgen.

Die gewonnenen Meßdaten werden über einen Inversionsalgorithmus in einen Widerstandstiefenschnitt (Tomogramm) überführt. Er zeigt anschaulich die Widerstandsverhältnisse zwischen der Meßebe und der eingestellten Eindringtiefe.

Ergebnisse

Das Foto zeigt einige an der Maueroberfläche angebrachte Elektroden in etwa 1,2 m über dem Mauerfuß. Die Position der Meßlinie ist aus der

Abb. 1 ersichtlich, ebenso der Wirkbereich der Widerstandsmessung: Mit zunehmender Meßtiefe wird ein größeres Meßvolumen erfaßt.

Die Abb. 2 zeigt das berechnete Tomogramm. Das Mauerwerk unterscheidet sich vom dahinterliegenden Erdreich durch deutlich höhere Widerstände von über 200 Ohm*m (magenta). Das dahinter befindliche Erdreich ist je nach Feuchte- und Salzgehalt mittel- (um 50 Ohm*m) bis sehr niederohmig (20 Ohm*m). Rechts zwischen 140 m und 150 m ist eine sehr markante Nässezone feststellbar. Links ist es trocken. Dazwischen gibt es Zonen erhöhter Feuchte (hellblau - cyan).

Bemerkung: Dieses Verfahren ist bei ausreichendem Kontrast in der Lage, Angaben über die Mauerdicke zu machen. Die Mauer (magenta) ist im Tomogramm überwiegend mit 2 m Dicke feststellbar. Im Vergleich zum Georadar ist die Genauigkeit geringer, jedoch ist die Tiefenreichweite unkritisch.

Foto
Maueroberfläche mit Elektroden

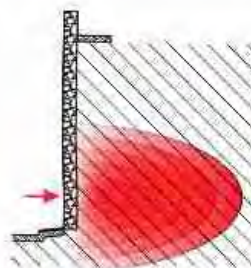
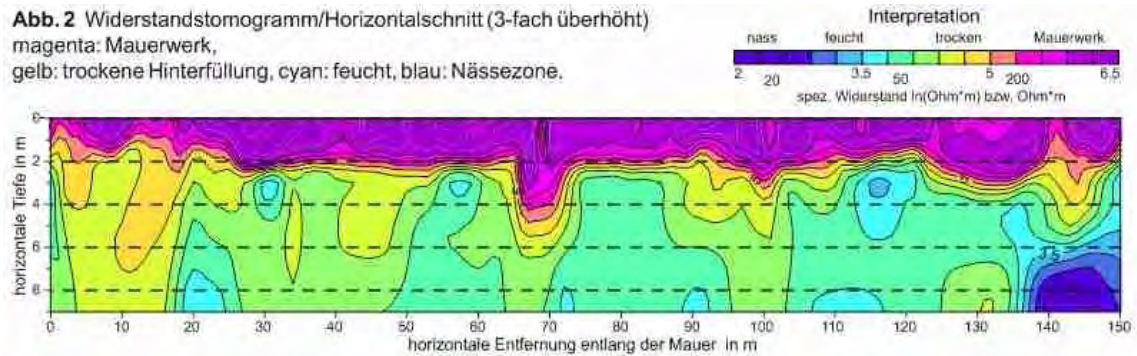


Abb. 1
Schnitt der Stützmauer mit vertikaler Position der Meßlinie (roter Pfeil) und schematischer Wirktiefe der Messung (rote Bögen)

Abb. 2 Widerstandstomogramm/Horizontalschnitt (3-fach überhöht)
 magenta: Mauerwerk,
 gelb: trockene Hinterfüllung, cyan: feucht, blau: Nässezone.



Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstorungsfreie_Prufung_i/Naessee_Stuetzmauer/hauptteil_naessee_stuetzmauer.html

Text 20 (Fallbeispiel)

Geoelektrische Erkundung von Erdbauwerken

Fall A - Deich

Aufgabe

Zur Vorerkundung eines Flußdeiches sollten durchgehende geophysikalische Erkundungen nach Homogenabschnitten durchgeführt werden. Sie sind die Grundlage zur Plazierung von direkten Aufschlüssen und detaillierten geotechnischen Untersuchungen.

Meßprogramm

- geoelektrische 2D-Widerstandstomografie

Vorgehensweise/Ergebnisse

Der zu untersuchende Deichabschnitt wurde durchgehend auf der Deichkrone erkundet. Die 2D-Widerstandstomografie liefert entlang der Meßachse Tiefenschnitte auf Grundlage der Materialeigenschaft spez. elektr. Widerstand. Dadurch ist eine grobe Materialdifferenzierung möglich. Eine der beiden Meßlinien lag wasserseitig und die andere landseitig am Rand der Deichkrone (siehe Abb. oben). Durch die beiden Meßlinien konnte auch die Homogenität des Deiches quer zur Längsachse beurteilt werden. Das Ergebnis besteht aus den widerstandstomografischen Längsschnitten (siehe Abb. unten) und den daraus abgeleiteten Homogenbereichen. In diesen Homogenbereichen wurden nachlaufend Bohrungen zur Kalibrierung durchgeführt. Die Gesamtuntersuchung lieferte somit eine Übersicht über das Bauwerk (Geoelektrik) sowie detaillierte Ergebnisse an ausgewählten Stellen (Geotechnik).



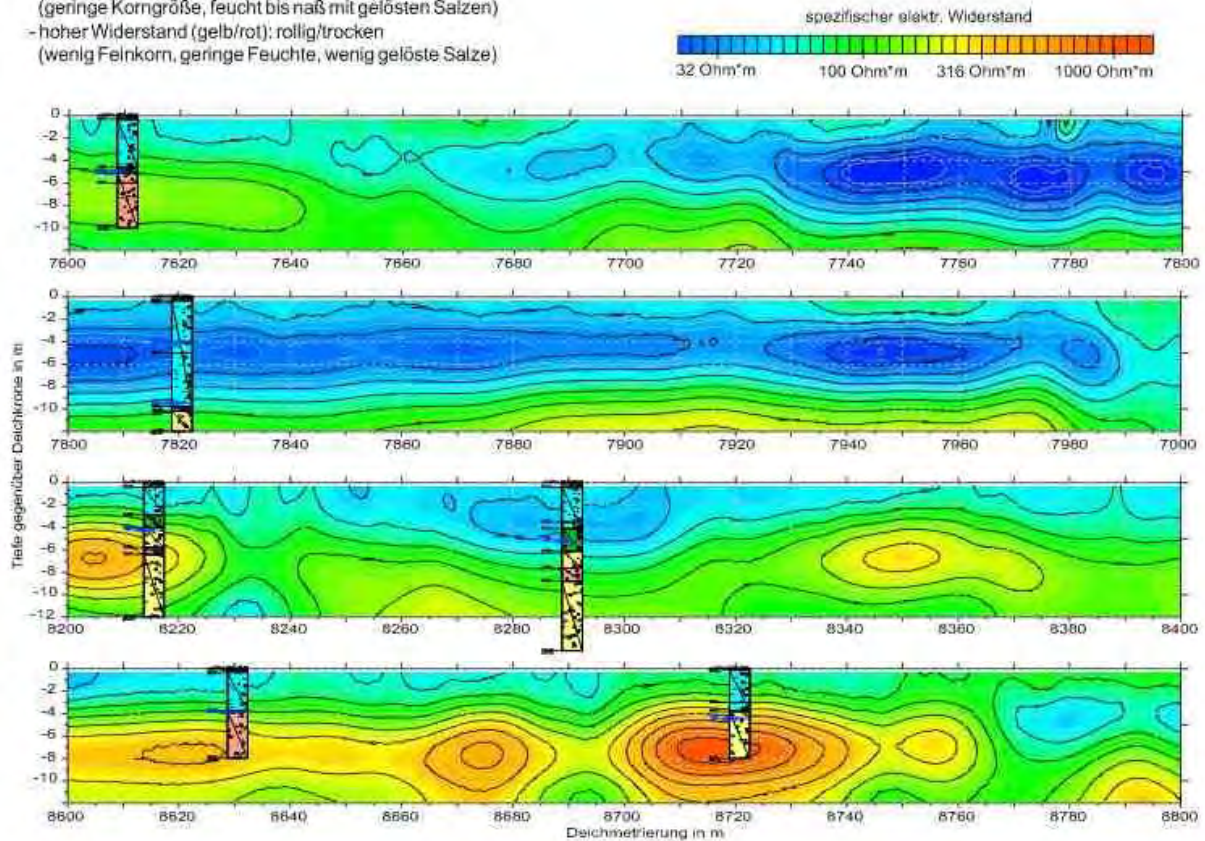
Abb. oben

Foto des Deiches mit Meßlinien links auf der landseitigen (gestrichelt) und rechts auf der wasserseitigen (durchgezogen) Seite entlang der Deichkrone.

Abb. unten

4 Abschnitte der 2D-Widerstandstomografie längs der Deichachse mit unterschiedlichen Verhältnissen im Deich. Eingefügt sind die Ergebnisse der Kalibrierbohrungen. Durch die Geoelektrik ist eine grobe Materialdifferenzierung wie folgt möglich:

- niedriger Widerstand (blau): bindig/feucht (geringe Korngröße, feucht bis naß mit gelösten Salzen)
- hoher Widerstand (gelb/rot): rollig/trocken (wenig Feinkorn, geringe Feuchte, wenig gelöste Salze)



Fall B - Erddamm

Aufgabe

Erkundung des inneren Aufbaus eines älteren Erddammes und des Zustands der Oberflächendichtung. Hintergrund sind festgestellte Wasseraustritte und die damit verbundene Frage nach den unerwünschten Wasserzutritten in das Bauwerk.

Meßprogramm

- 4 Meßlinien mit der 2D-Widerstandstomografie
- flächige Widerstandskartierung

Vorgehensweise/Ergebnisse

Zunächst wurden die 2D-widerstandstomografischen Schnitte erstellt. Damit konnte die innere Struktur des Erddammes erkannt (siehe Abb. rechts) und Überlegungen über deren Wirkungsweise angestellt werden. Demnach ist an der Oberfläche eine mehr oder minder gleichmäßige Schicht mit dichtender Wirkung vorhanden (C). In Teilbereichen weist sie jedoch Lücken auf (E). Die Aussage der Geoelektrik wurde durch Kalibrierungsbohrungen bestätigt. In einem zweiten Erkundungsschritt wurde der oberflächennahe Tiefenbereich flächig mit der Geoelektrik erkundet (siehe Abb. unten, Widerstandskarte). Darin zeigen sich Bereiche mit größerem Anteil an bindigen Bestandteilen in Form niedriger Widerstände (blau). Sie haben eine höhere Dichtwirkung. Umgekehrt sind höhere Widerstände (gelb-grün) mit weniger bindigen Bestandteilen und damit geringerer Dichtwirkung verbunden. Das Ergebnis der Geoelektrik lieferte somit den Aufbau des Dammes sowie die Bereiche erhöhten Zutritts von Niederschlagswasser.

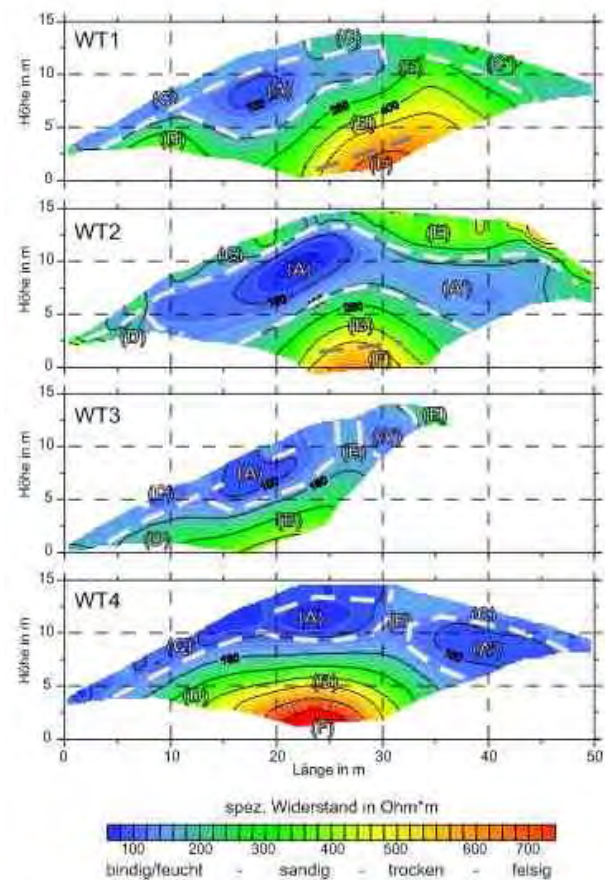


Abb. rechts

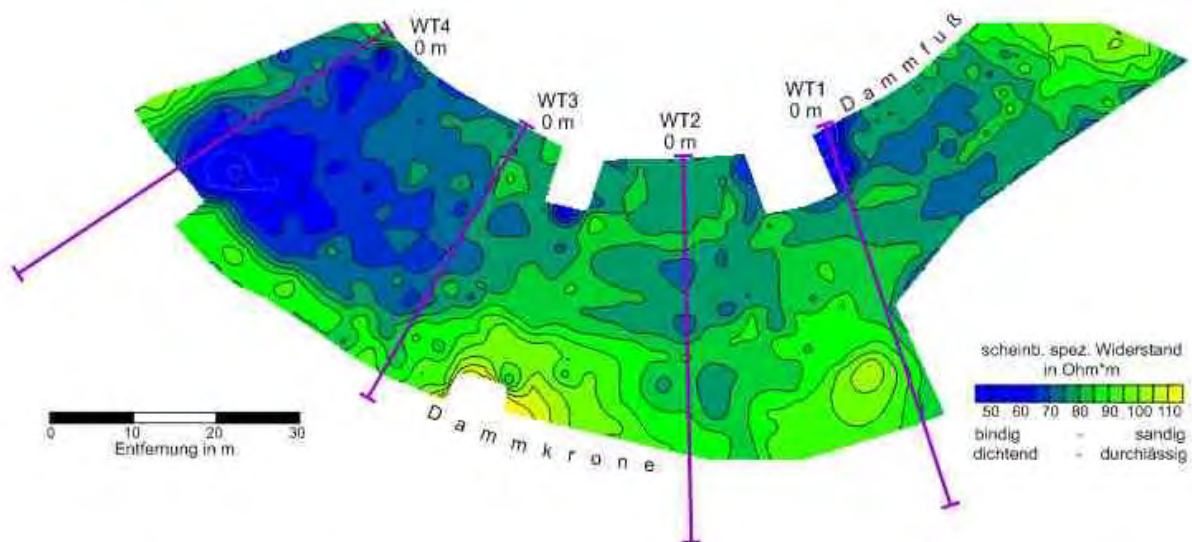
Vier Schnitte quer zur Dammachse (Widerstandstomogramme).

Gliederung des Dammaufbaus:

- A: bindige Zone mit dichtender Eigenschaft
- B: Kern mit weniger bindigen und mehr sandigen Bestandteilen
- C: Decke mit bindigen Bestandteilen in wechselndem Zustand
- D: Dammfuß mit teilweise geringer Bindigkeit
- E: Decke auf der Dammkrone mit geringerer Bindigkeit
- F: Fels

Abb. unten

Karte des scheinb. spez. Widerstandes über die Dammfläche im Tiefenbereich zwischen der Dammoberfläche und ca. 2 m Tiefe. Die Werte geben an, wo eine bessere (blau) und wo eine schlechtere (gelb-grün) Oberflächendichtung vorhanden ist. Rote Linien: Lage der Widerstandstomogramme WT1 bis WT4



Quelle: GGU Karlsruhe

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstorungsfreie_Prufung_i/Geoelektrik_Erdbauwerke/hauptteil_geoelektrik_erdbauwerke.html

Literaturverzeichnis:

Alle Textquellen sind Internetquellen der GGU Karlsruhe, letzter Zugriff: 27.03.2017

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-wstau_Erkundung_eines_Grund/hauptteil_el-wstau_erkundung_eines_grund.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-stoer_Erkundung_einer_geolo/hauptteil_el-stoer_erkundung_einer_geolo.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-fluss_Erkundung_der_Decksch/hauptteil_el-fluss_erkundung_der_decksch.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Kante_Lokalisierung_einer_uber/hauptteil_kante_lokalisierung_einer_uber.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-wasse_Geoelektrische_Vorerk/hauptteil_el-wasse_geoelektrische_vorerk.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/hauptteil_geophysik_karst.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/Karst_A/hauptteil_karst_a.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/Karst_B/hauptteil_karst_b.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/Karst_C/hauptteil_karst_c.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/Geophysik_Karst/Karst_D/hauptteil_karst_d.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Geologie_Hydrogeologie/el-hoehl_Suche_einer_Karsthohl/hauptteil_el-hoehl_suche_einer_karsthohl.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Baugrunderkundung_Tiefbau/wk-baug_Geoelektrische_Vorerku/hauptteil_wk-baug_geoelektrische_vorerku.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Baugrunderkundung_Tiefbau/Windenergie/hauptteil_windenergie.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Archäologie_Archäometrie/wk-his-c_Suche_nach_historisch/hauptteil_wk-his-c_suche_nach_historisch.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Archaologie_Archaometrie/wk-rdk_Widerstandskartierung_u/hauptteil_wk-rdk_widerstandskartierung_u.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Ortung_Altlasten_Suche_Deteksi/el-altab_Erkundung_einer_Altab/hauptteil_el-altab_erkundung_einer_altab.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Ortung_Altlasten_Suche_Deteksi/deponie_Deponieerkundung_mitte/hauptteil_deponie_deponieerkundung_mitte.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Ortung_Altlasten_Suche_Deteksi/el-fahne_Deponieumfelderkundun/hauptteil_el-fahne_deponieumfelderkundun.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/Ortung_Altlasten_Suche_Deteksi/i-brache_Geophysikalische_Erku/hauptteil_i-brache_geophysikalische_erku.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstorungsfreie_Prufung_i/hafenm_Zerstörungsfreie_Prufun/hauptteil_hafenm_zerstorungsfreie_prufun.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstorungsfreie_Prufung_i/Korrosionprüfung_an_eingemauer/hauptteil_korrosionprüfung_an_eingemauer.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstorungsfreie_Prufung_i/feu-salz_Bestimmung_von_Feucht/hauptteil_feu-salz_bestimmung_von_feucht.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstorungsfreie_Prufung_i/Naessee_Stuetzmauer/hauptteil_naessee_stuetzmauer.html

http://www.ggukarlsruhe.de/Beispiele_GGU_Fallbeispiele_Ge/zfP_zerstorungsfreie_Prufung_i/Geoelektrik_Erdbauwerke/hauptteil_geoelektrik_erdbauwerke.html