

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing./DI) der Studienrichtung „Angewandte Geowissenschaften“ an der Montanuniversität Leoben.

Oberflächennahe Gasdetektion mittels geophysikalischer Messverfahren

erstellt in Zusammenarbeit mit

EVN AG



und

Niederl LecksuchTechnik GmbH

NIEDERL



LecksuchTechnik GmbH

Vorgelegt von:

Thomas Niederl

0435081

Betreuer:

Ao.Prof. Dr. Robert Scholger

Leoben, 17.05.2016

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

DANKSAGUNG

Bei der Entstehung meiner Masterarbeit waren mehrere Personen beteiligt, denen ich hiermit meinen Dank aussprechen möchte.

Zu Beginn möchte ich mich bei den Damen und Herren der EVN AG bedanken, die mir die Durchführung dieser Masterarbeit überhaupt erst ermöglicht haben. Besonderer Dank gebührt dabei Herrn Ing Engelbert Amon, der durch seinen Einsatz hauptverantwortlich für das Zustandekommen dieser Arbeit war.

Auch möchte ich mich beim gesamten Lehrstuhl für Angewandte Geophysik, der Montanuniversität Leoben und dessen MitarbeiterInnen bedanken, die mir mit Rat und Tat bei der Bearbeitung dieser Masterarbeit zur Seite standen. Allen voran meinem Betreuer, Ao.Univ.-Prof. Dr.phil. Rober Scholger, der mich bei den Messungen unterstützt hat und immer ein offenes Ohr für meine Fragen hatte. Weiterer Dank gilt auch Univ.-Prof. Dipl.-Geophys. Dr.rer.nat. Florian Bleibinhaus, für die Hilfe bei der Auswertung mit der Inversionssoftware.

Ein besonderer Dank gilt meiner gesamten Familie für die Unterstützung während des gesamten Studiums.

Herzlichen Dank auch an Bettina, die mir mit viel Geduld und Verständnis bei der Entstehung dieser Arbeit geholfen hat.

Zu guter Letzt, auch einen Dank an meine Arbeitskollegen für die tatkräftige Unterstützung während der gesamten Zeit.

Kurzfassung

Oberflächennahe Gasdetektion mittels geophysikalischer Messverfahren

Das Ziel dieser Masterarbeit ist die Untersuchung der verschiedenen geophysikalischen Messmethoden auf ihre Eignung, oberflächennahe Gasleckagen zu orten. Zu diesem Zweck wurden folgende Messverfahren eingesetzt. Magnetik, Suszeptibilität, Elektromagnetik, Eigenpotential und Geoelektrik.

Der größte Vorteil der geophysikalischen Messverfahren gegenüber jenen der derzeit üblichen Lokalisation ist, dass sie entweder komplett invasionsfrei oder immerhin viel weniger invasiv sind. Bei der Lokalisation ist es immer notwendig Sondenlöcher in den Boden zu schlagen und das Gas abzusaugen. Dieser Prozess geht immer mit einer Veränderung der Gaskonzentration im Untergrund einher, und so kann nie von einem ungestörten Boden im Zusammenhang mit der Lokalisation der Leckage gesprochen werden. Das Hauptziel dieser Arbeit ist es daher, neue Ansätze für die Detektion von oberflächennahen Gasleckagen zu finden, oder zumindest die Vorgänge, welche bei einer Gasleckage passieren besser zu verstehen.

Die Messungen wurden auf dem EVN-Testgelände in Tulln durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Versuche zu garantieren. Das Testgelände der EVN war hierfür ideal, da sowohl die Leckmenge als auch der Niederschlag gesteuert werden konnten.

Die Feldmessungen beinhalten einen Vergleich der verschiedenen geophysikalischen Messverfahren. Der praktische Teil dieser Arbeit umfasst dabei, das Sammeln und Interpretieren der geophysikalischen Messdaten in Verbindung mit zusätzlichen Informationen aus den Gasmessungen und der Oberfläche.

Die Ergebnisse zeigen, dass in dieser Versuchsanordnung lediglich die Eigenpotential Methode geeignet ist um Gaslecks nahe der Oberfläche direkt zu erfassen. Aus diesem Grund könnte dieses Messverfahren in gewissen Bereichen eine gute und kostengünstige Alternative zur konventionellen Gasdetektion sein. Ohne Stahlbeton wären vielleicht auch andere geophysikalische Messverfahren, wie Elektromagnetik oder Magnetik geeignet gewesen. Mit der Multielektroden-Geoelektrik war eine direkte Ortung, also ohne einen vorangegangenen

Niederschlag, der Leckage nicht möglich. Die Erkenntnisse aus diesen Messungen führten dafür zu einem völlig neuen Verständnis über den Einfluss von Niederschlägen. Die Ergebnisse der Feldversuche in Verbindung mit vorangegangenen Studien können dazu beitragen Fehlmessungen zu vermeiden und die Gaslecksuche effizienter zu gestalten.

Abstract

Near surface gas detection with geophysical measuring techniques

Task of the present Master thesis is the analysis of different geophysical methods, like magnetics, susceptibility, electromagnetics, self-potential and geoelectric measurements, in respect of their responsiveness on near surface gas leakages.

The advantage of these geophysical methods is, that they are non invasive or rather less invasive than the state-of-the-art technology in exploration of gas leakage today. In the process of locating a gas leak, it is always necessary to penetrate the ground and to vacuum the gas to the measuring system. So we can never talk about an undisturbed ground, in connection with gas leak detection. The main objective of this work is to evaluate new ways for the detection of near surface gas leaks, or even to get a better understanding of the behaviour of the processes that happen when a gas leak occurs.

The measurements were performed at the testing facility of the EVN AG in Tulln, to guarantee the reproducibility of the experiment. There it was possible to perform all the geophysical measurements under controlled conditions, like a known amount of gas or perception.

The methodology contains a comparison of different geophysical methods. The experimental part of this work comprises the collection and analysis of measurement data from the geophysical methods in addition with information gathered by the measurement of the gas concentration at the surface.

The results of the field-measurements showed that only the self-potential method can be used for the direct detection of near surface gas leaks, and for some applications this method could be a good and cheaper alternative to normal gas detection systems. Another method which led to new insights was the multielectrode-geoelectrics. The information gathered by these measurements led to a completely new viewing about the influence of perception and the time to pause the measurements, needed after a rainfall. The outcome of the field-measurements together with previous studies can help to avoid inaccurate measurements and to make gas leak detection more efficient.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	3
1.1 Problemstellung	3
1.2 Zielsetzung	3
2 METHODIK	5
2.1 Gaslecksuche	5
2.2 Geophysikalische Messverfahren	6
2.2.1 Geoelektrische Methoden	7
2.2.1.1 Eigenpotential	8
2.2.1.2 Gleichstromgeoelektrik	11
2.2.1.3 Induzierte Polarisierung	19
2.2.1.4 Elektromagnetische Zweispulen-Systeme	24
2.2.2 Magnetik	26
3 MESSGELÄNDE – EVN- LANDESFEUERWEHRSSCHULE IN TULLN	28
4 FELDMESSUNGEN	34
4.1 Magnetik	37
4.1.1 Messungen	37
4.1.2 Zusammenfassung	38
4.2 Magnetische Suszeptibilität	39
4.2.1 Messungen	39
4.2.2 Zusammenfassung	40
4.3 Elektromagnetik	40
4.3.1 Messungen	40
4.3.2 Zusammenfassung	44
4.4 Eigenpotential	44
4.4.1 Messungen entlang des Profils	45
4.4.2 Messungen über die Zeit	46
4.4.2.1 Messintervall im 10 er Minuten Bereich, maximal 30 Minuten	46
4.4.2.2 Messintervall 4 Sekunden	48
4.4.3 Zusammenfassung	56
4.5 Geoelektrik und Multielektroden-Geoelektrik	56

4.5.1	Geoelektrische Widerstandsmessung und Sondierung	58
4.5.2	Zusammenfassung Geoelektrische Sondierung	69
4.5.3	Multielektroden Geoelektrik	70
4.5.4	Zusammenfassung Multielektroden Geoelektrik	96
5	ERGEBNISSE / DISKUSSION	97
6	VERZEICHNISSE	99
6.1	Literatur.....	99
6.2	Gleichungen Abkürzungsverzeichnis	104
6.3	Tabellen.....	105
6.4	Abbildungen.....	105
ANHANG.....

1 Einleitung

Die derzeit gängigen Messmethoden um Gasausbreitungen im Boden festzustellen, beruhen alle auf den Messprinzipien der Gaslecksuche und Lokalisation von Undichtheiten an erdvergrabenen Leitungen. Für diese Art der Messungen ist es immer notwendig im Zuge der Lokalisation Sondenlöcher anzufertigen, über welche dann die Absaugung des Gas/Luft- Gemisches und in weiterer Folge die Eingrenzung der Leckage erfolgt. Dieser Eingriff in einen ungestörten Boden führt damit schon vor Beginn der Messungen zu einer Veränderung im Untergrund.

1.1 Problemstellung

Alle gängigen Messverfahren in der Gaslecksuche und Leckagenortung verursachen durch das Schlagen von Sondenlöchern und Absaugen des Gas/Luft- Gemisches aus den Sondenlöchern, eine Veränderung des Untergrundes. Dadurch kommt es auch zu einer Veränderung der Gaskonzentration im Untergrund und somit zu einer Verfälschung der Messergebnisse im Vergleich zum ungestörten Boden.

Nicht invasive Messverfahren würden im Gegensatz dazu keine Veränderung im Boden bewirken und es wäre möglich die Gasausbreitung ohne äußere Einflüsse darstellen.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit war es, Leckagen und die damit verbundenen Gasausbreitungen im Untergrund mit geophysikalischen Messverfahren zu lokalisieren. Eine weitere Aufgabe war, die Gasausbreitung und die damit verbundene Kontamination des Untergrundes, unter Anwendung der verschiedenen geophysikalischen Messverfahren näher zu beschreiben. Diese Versuche sollen auch als Ergänzung zu der Arbeit von Brötzenberger und Pass (1987) dienen, bei der schon sehr früh versucht wurde die Auswirkungen von Niederschlägen auf die

Gasausbreitung im Boden genauer zu beschreiben. So könnte mit den Methoden der Geophysik eine Abbildung des nicht durch die Absaugmethode beeinflussten Untergrundes ermöglicht werden. Diese Erkenntnisse könnten helfen, die bereits bestehenden Messverfahren bei der Gaslecksuche und Leckagenortung zu validieren und zu verbessern. Aber auch neue Ansätze bei der Leckortung könnten so in Betracht kommen, da der Vorteil der geophysikalischen Messverfahren im Gegensatz zu den etablierten darin besteht, dass sie nicht bzw. nur minimal invasiv, im Falle der Sonden die bei der Geoelektrik in den Boden geschlagen werden, sind.

2 Methodik

Die nachfolgenden Kapitel dienen dazu einen Überblick über die Messmethoden der Gaslecksuche und der Geophysik, zu geben. Der momentane Stand der Technik in der Ortung von Leckagen, besteht ausschließlich in einer oberirdischen Überprüfung der Leitungstrasse mit hochempfindlichen Gasmessgeräten. In weiterer Folge findet die Lokalisation, also das Abbohren und Ausmessen der Gaskonzentration im Boden statt. Den Abschluss stellt die Klassifizierung des Gasaustrittes nach der ÖVGW Richtlinie G B350 dar, diese geht jedoch nur auf das Gefährdungspotential der jeweiligen Leckage für Personen und Gebäude ein und nicht auf eine Gefährdung der Umwelt durch Erdgas als Treibhausgas oder als Verursacher von Vegetationsschäden (Hoeks, 1987)

2.1 Gaslecksuche

Die Gaslecksuche dient einer Erhöhung der Sicherheit, zusätzlich werden Kosten durch verlorenes Gas im Zuge von Leckagen reduziert, was sowohl ökonomisch als auch ökologisch eine positive Auswirkung darstellt. In Österreich erfolgt die Gaslecksuche nach dem Regelwerk der ÖVGW, die dafür zulässigen Messsysteme sind in der Richtlinie G O241 definiert. Drei der gängigsten Messsysteme, der Flammenionisations-Detektor (FID), der Gas-sensitiver-Halbleitersensor (HL) und das Laser/Infrarot Messsystem sind im Folgenden näher beschrieben. Die Vorgangsweise beim Aufsuchen von Leckagen für „leichte“ brennbare Gase (Kohlenwasserstoffe), also Gase mit einer geringeren Dichte als Luft, ist unabhängig vom verwendeten Messsystem identisch. Über ein Sondensystem wird Bodenluft angesaugt und mittels Schläuchen zur Messeinheit transportiert, wo die eigentliche Messung auf brennbare Kohlenwasserstoffe oder auf einen spezifischen Stoff, wie z.B. Methan, stattfindet. Im Anschluss an die Oberflächengasmessung der Leckage erfolgt die Lokalisation unter Einsatz von Gaskonzentrationsmessgeräte der Kategorien Wärmeleitfähigkeit, Halbleiter und Laser. Entlang der Leitung werden Bohrlöcher mit einer Tiefe von maximal 40 cm angefertigt, um das Beschädigen anderer Leitungssysteme zu verhindern. Anschließend erfolgt das Ausmessen der

Sondenlöcher, dies hat bis zu einer Nullanzeige zu erfolgen. Der Abstand der einzelnen Bohrungen soll in etwa einen Meter betragen. Zum Eingrenzen der Schadensstelle wird nun aus jedem Sondenloch etwa die gleich große Menge Gas abgesaugt (ca.10 sec.). Dieser Vorgang wird für jedes Sondenloch 2-mal durchgeführt. Das Sondenloch, das dabei die höchste Gaskonzentration aufweist, wird als Leckstelle ausgewiesen. Als Abschluss der Lecksuche gilt die Klassifizierung der Leckage nach der ÖVWG-Richtlinie G B350. Wobei für diese Art der Klassifizierung der geringste Abstand der Gaskonzentration zu Hohlräumen, Gebäuden oder Schächten herangezogen wird. Es ist also lediglich eine Beurteilung, die das Explosions- bzw. Personengefährdende Potential einer Leckage darstellt. Der Umweltaspekt, der dabei von einer Kontamination des Untergrundes ausgeht, findet hier keine Beachtung.

2.2 Geophysikalische Messverfahren

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Systemen zur Erfassung von Leckagen an Erdgasleitungen, finden die geophysikalischen Verfahren bisher keine Anwendung in der Gaslecksuche. Sie finden jedoch sehr wohl in anderen Bereichen der Lecksuche, also nicht nur auf das Medium Erdgas bezogen, Anwendung. So kann die Lokalisierung von Undichtheiten an Wasserleitungen unter der Zuhilfenahme von eklettischen oder akustischen Verfahren erfolgen. Auch die Ortung von Leitungssystemen, vor allem Stahlleitungen oder andere Leitungssysteme mit mitverlegtem Ortungsband, erfolgt mit geophysikalischen Methoden.

Ein großer Vorteil der geophysikalischen Methoden besteht darin, dass sie im Gegensatz zu den Methoden der Gaslecksuche nicht invasiv bzw., im Falle einiger geoelektrischer Verfahren, bei denen es ebenfalls nötig ist Sonden ins Erdreich einzubringen, viel weniger invasiv sind. Unabhängig vom Messverfahren kommt es jedoch nie zu einer Veränderung der Gaskonzentration im Untergrund, welche automatisch mit dem Absaugen des Gas/Luft-Gemisches bei der Gaslecksuche einhergeht. Somit können geophysikalische Messungen helfen, die Gasausbreitung im Untergrund besser zu verstehen und eventuell sogar komplett neue Ansätze zum

Erkennen und Auffinden von Leckagen liefern. Ein weiterer Vorteil könnte darin liegen, dass z.B. das Durchbohren von Asphalt oder Beton im Zuge der Lokalisation wegfällt.

2.2.1 Geoelektrische Methoden

Die Verfahren, welche unter dem Begriff Geoelektrik zusammengefasst werden, dienen zur Bestimmung der räumlichen Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit σ bzw. des spezifischen Widerstandes ρ . Es können auch die Polarisationsseigenschaften und das Aufladevermögen von Gesteinen oder anthropogenen Ablagerungen untersucht werden. Somit ist es mit diesen Methoden möglich, Strukturen die eine Veränderung des dielektrischen Feldes erzeugen, zu erkennen und natürliche elektrische Felder im Untergrund zu beobachten (Knödel et al., 2005). Das Ziel dieser Messungen ist es, aus den ermittelten Parameterverteilungen Rückschlüsse auf Strukturen im Untergrund und ihre stofflichen Ursachen zu treffen. Die Aussagekräftigkeit der Ergebnisse wird durch die Kombination mehrerer geoelektrischer Parameter und unter Einbeziehung von Randbedingungen aus der Geologie und aus anderen geophysikalischen Verfahren weiter verbessert. Die geoelektrischen Verfahren werden entweder als elektromagnetisch oder elektrisch klassifiziert. Physikalisch beruhen alle Prospektionsverfahren darauf, dass durch Leitfähigkeitstrukturen das elektrische und/oder elektromagnetische Feld gegenüber dem homogenen Halbraum verändert wird. Die elektrischen Verfahren beschränken sich auf die Messung elektrischer Potentialdifferenzen, es kommen sowohl Gleichstrom als auch Wechselstrom im Frequenzbereich bis 50 Hz zum Einsatz. Die elektromagnetischen Verfahren messen je nach Methode entweder elektrische und/oder magnetische Felder, welche zeitabhängig periodisch oder impulsartig angeregt werden.

2.2.1.1 Eigenpotential

An der Erdoberfläche können natürliche lokale Gleichstromfelder beobachtet werden, die als Eigenpotentiale (EP) bezeichnet werden (Knödel et al., 2005). Ursachen dieser Eigenpotentiale sind elektrochemische und elektrokinematische Vorgänge. Elektrochemische Prozesse führen zur Entstehung von Redoxpotentialen, Diffusions- und Membranpotentialen (Hatzsch, 1994). Elektrokinetische Vorgänge sind mit der Bewegung des Wassers im Untergrund verbunden, sie werden als Fließ- und Strömungspotentiale bezeichnet (Haalick, 1958; Parasnis, 1986; Wienberg, 1990). Die Eigenpotentialmethode ist eine passive Messmethode zur Messung der Verteilung des elektrischen Potentials an verschiedenen Stationen und wurde zum ersten Mal von Robert Fox 1830 angewendet um Kupfer-Sulfid Lagerstätten in Cornwall, England, zu prospektieren (Reynolds, 1997). Die Hauptanwendung liegt zwar in der Metall Exploration, über die Jahre hinweg ergaben sich auch weitere Anwendungsgebiete, wie beispielsweise im Bereich Grundwasser und Geothermie. Auch der Nachweis von CO₂ Anomalien mittels Eigenpotential ist möglich (Byrdina et al., 2009 und Schütze et al., 2012). Auch der Nachweis von Kohlenwasserstoffen im Porenraum nach Ortiz et al. (1972) oder die Änderung des Membranpotentials durch Kohlenwasserstoffe von Yaramanci et al. (1995), stellen weitere Anwendungsmöglichkeiten für die Eigenpotentialmethode dar. Die Messung erfolgt zwischen zwei Punkten an der Oberfläche mittels nicht polarisierbaren Elektroden und eines Voltmeters mit hoher Sensitivität (mindestens 0,1mV) und einer hohen Eingangs Impedanz (typischerweise ~10–100 MΩ) (Revil et al., 2012). Das gemessene Potential kann weniger als einen Millivolt (mV) bis über ein Volt betragen. Das Vorzeichen des Potentials (positiv oder negativ) ist ebenfalls ein wichtiger diagnostischer Faktor für die Interpretation. Das Potential des Bodens besteht aus zwei Komponenten, einer Konstanten und einer, die über die Zeit schwankt. Die konstante Komponente wird in erster Linie durch die elektrochemischen Prozesse, die Variable durch verschiedene Prozesse, wie beispielweise induzierte Wechselströme durch Gewitter oder Variationen im Erdmagnetfeld, aber auch durch Starkniederschlagsereignisse hervorgerufen (Fournier, 1989; Corwin und Hoover, 1979). Ein Synonym für elektrochemische Prozesse ist der elektrische Zweischichtfall an der Mineral/Wasser Grenze, dargestellt in Abbildung 1. Durch den Kontakt des Quarzkornes mit Wasser wird seine Oberfläche durch chemische Reaktionen elektrisch geladen. Dadurch werden Ionen gleicher Ladung abgestoßen und jene von entgegengesetzter Ladung

angezogen. Die durch diesen Vorgang entstehende Diffusionsschicht ist durch einen Überschuss an Ionen entgegengesetzter Ladung und durch einen Mangel an Ionen gleicher Ladung, bezogen auf die Oberfläche des Kornes, definiert. Zusätzlich können einige Ionen direkt an der Korngrenze gebunden werden und formen damit die sogenannte Stern-Schicht, welche somit zwischen der O-Ebene des Kornes und der d-Ebene liegt. Die Existenz des elektrischen Zweischichtfalls führt direkt zu zwei fundamentalen Konsequenzen, dem Überschuss elektrischer Leitfähigkeit im Porenraum an der Mineral/Wasser Grenze und, dass das Porenwasser nie neutral ist. Vor allem der Zustand, dass Porenwasser nie neutral ist, ist entscheidend um das Auftreten von elektrischen Strömen im Zusammenhang mit fließendem Wasser und damit verbundenen Eigenpotential-Signalen zu verstehen.

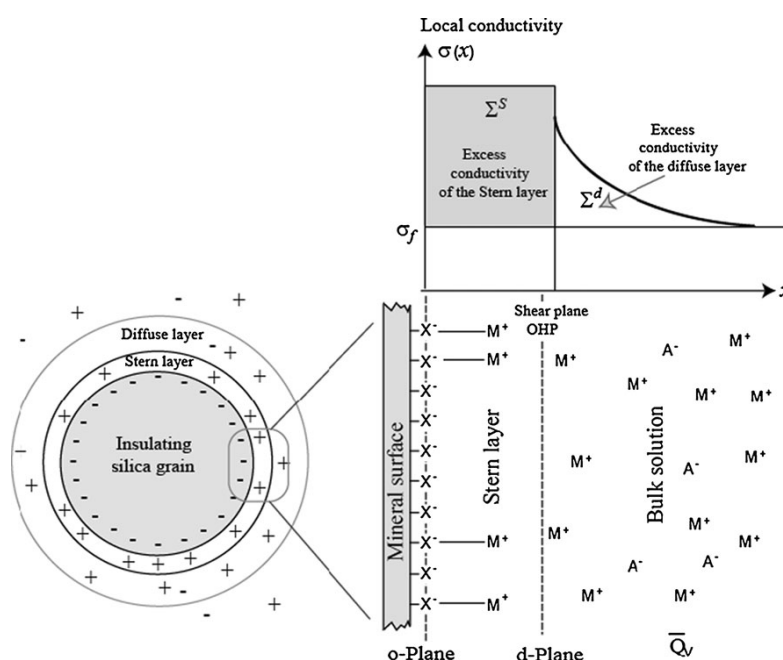


Abbildung 1: Mineral/Wasser Grenze um ein Korn im Porenraum, modifiziert durch Revil and Florsch (2010).

Die Elektroden können entweder aus Kupfer in Kupfersulfat Lösung, Zink in Zinksulfat Lösung oder Silber in Silberchlorid Lösung bestehen, wobei die Lösung durch die Membran einen Kontakt mit dem Untergrund herstellt (Reynolds, 1997). Der schematische Aufbau einer solchen nicht polarisierbaren Elektrode ist in Abbildung 2 dargestellt.

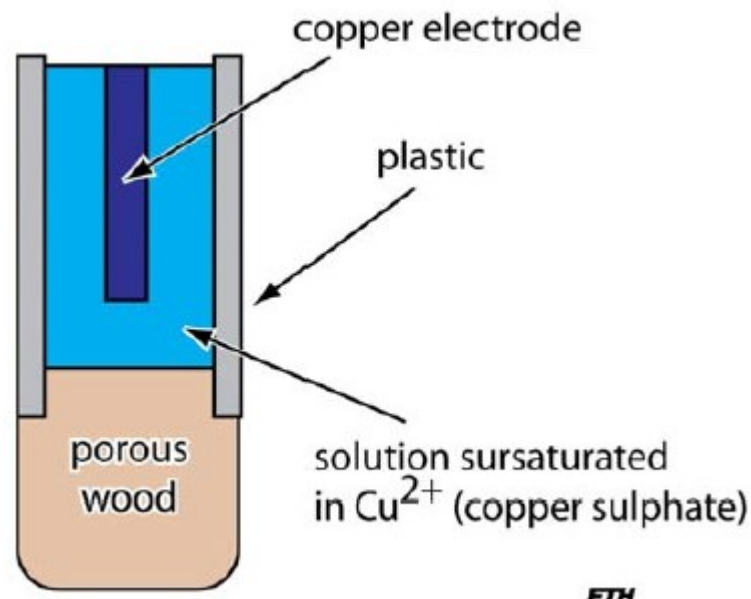


Abbildung 2: Nicht polarisierbare Elektrode, Laurent ETH

Für die Messungen kann entweder die Potential Gradienten Methode oder die Potential Amplituden Methode angewendet werden. Bei der Potential Gradienten Methode werden zwei Elektroden mit fixem Abstand (typischerweise 5m oder 10m) verwendet, die zwischen den beiden Elektroden gemessene Potentialdifferenz wird durch den Elektrodenabstand dividiert, um den Potential Gradienten (mV/m) zu erhalten. Die Potential Amplituden Methode verwendet eine Elektrode als Basis-Elektrode, die andere Elektrode wird bewegt und somit die Potentialdifferenz (mV) zwischen diesen beiden Elektroden über ein Profil ausgemessen (Reynolds, 1997). Es ist entscheidend, dass beide Elektroden dieselbe Konzentration der Lösung haben, da es sonst in Folge des Nernst-Potentials (E_N) (Gleichung(6)), eine erhebliche Potentialdifferenz zwischen den beiden Elektroden entsteht.

$$E_N = -\frac{RT}{nF} \ln (C_1 / C_2) \quad (1)$$

Es sollte darauf geachtet werden, dass es zu keinem signifikantem Temperaturunterschied zwischen den beiden Elektroden kommt, da dies ebenfalls einen Potentialunterschied erzeugen würde. Dieser Effekt kann jedoch leicht korrigiert werden, indem man die Temperatur misst, während sich die Elektroden im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung befinden und wenn der Temperatur Koeffizient der Elektrode bekannt ist. Petiau Elektroden (0,2 mV/°C, Petiau, 2000) sind dabei Kupfersulfat Elektroden (0,7 bis 0,9 mV/°C, Antelman, 1989) aufgrund der

niedrigeren Temperaturabhängigkeit vorzuziehen. Wie oben bereits erwähnt, besteht das Eigenpotential aus zwei Komponenten, und zwar aus einer statischen und einer variablen. Die Variable hat typischerweise Frequenzen von 5-10 Hz und wird durch atmosphärische Effekte gesteuert. Diese und andere unerwünschte Formen der Störungen (Noise), können im Allgemeinen durch den Einsatz von Fourier oder Wavelet basierten Filtern entfernt werden (Moreau et al., 1996). Mehrere Messungen über den Tag verteilt und ein Mitteln der Ergebnisse kann helfen diesen Effekt zu entfernen.

2.2.1.2 Gleichstromgeoelektrik

Bei der Gleichstromgeoelektrik wird mit technisch erzeugten, also künstlichen, stationären Feldern gearbeitet. Abbildung 3 zeigt, wie mit zwei geerdeten Stromelektroden A und B die Einspeisung von Gleichstrom oder niederfrequentem Wechselstrom in den leitfähigen Untergrund erfolgt. Dadurch baut sich ein räumliches Potentialfeld auf, das durch Strukturen im Untergrund beeinflusst wird. Die Spannungsmessung erfolgt durch zwei weitere Elektroden M und N.

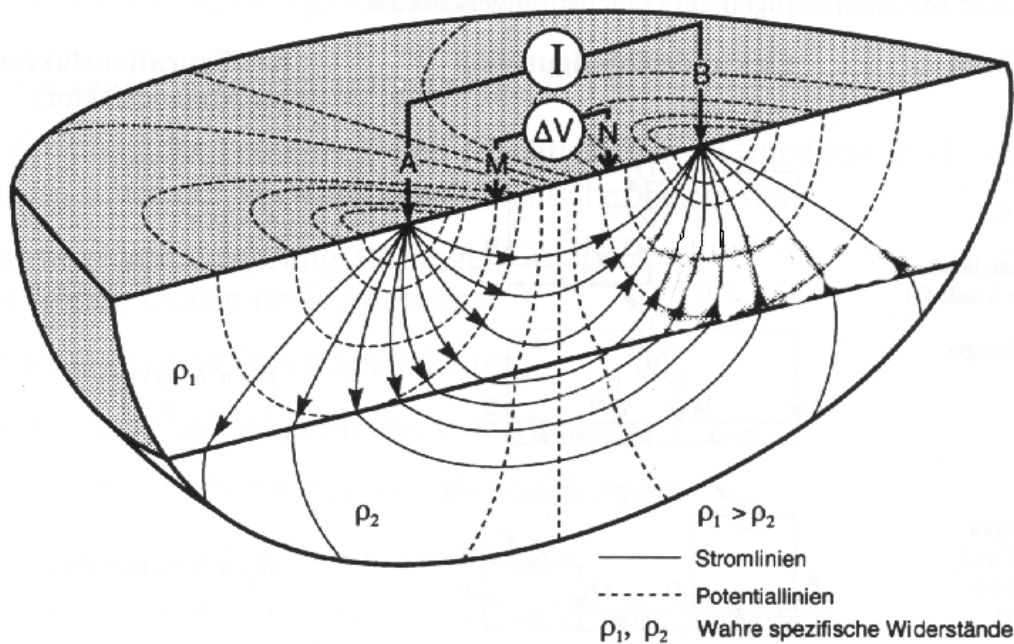


Abbildung 3: Prinzip der Widerstandsmessung mit einer Vierpunktanordnung (Knödel et al., 2005).

Diese Vierpunktanordnung liegt allen Verfahren der Gleichstromgeoelektrik und der Induzierten Polarisation zugrunde. Es gibt eine sehr große Zahl praktikabler Elektroden-Sonden-Anordnungen. Aus logistischen Gründen wird überwiegend mit linearen Konfigurationen gearbeitet. Jede dieser Messordnungen besitzt ihre Vorzüge und Nachteile hinsichtlich Erkundungstiefe, Auflösungsvermögen, Anfälligkeit gegenüber technischen Störungen und lateralen Inhomogenitäten sowie Durchführbarkeit im Gelände. Abbildung 4 zeigt einige der gebräuchlichsten Messordnungen und Abbildung 5 die Sensitivität einiger ausgewählter Konfigurationen. Diese Bewertung, dargestellt in Tabelle 1, wird durch Erfahrungen aus zahlreichen Anwendungen gestützt (Barker, 1989; Ward, 1990; Apparao, 1991).

Verfahren	Elektrodenkonfiguration	Konfigurationsfaktor (n: Abstandsfaktor)
Wenner Wenner α Lee (Mit zusätzlicher zentraler Sonde O)		$K = 2\pi a$
Schlumberger		$K = \pi n(n+1)a$ $n > 3$
Dipol-Dipol axialer Dipol Doppeldipol Wenner β		$K = \pi n(n+1)(n+2)a$
Pol-Dipol Dreipol Halb-Schlumberger Hummel		$K = 2\pi n(n+1)a$ $n > 3$
Pol-Pol Zweipol		$K = 2\pi a$
Gradient Mittlerer Gradient	<p style="text-align: center;">$D > 10 \cdot a$</p>	$K = 2\pi \left[\frac{1-X}{(Y^2 + (1-X)^2)^{3/2}} + \frac{1+X}{(Y^2 + (1+X)^2)^{3/2}} \right]^{-1}$ <p style="text-align: center;">$(X = \frac{x}{\Delta}; Y = \frac{y}{\Delta})$</p>
In Bohrungen Dipol-Dipol Pol-Dipol Pol-Pol		
Dipol-Dipol Pol-Dipol Pol-Pol		

Abbildung 4: Messordnungen der Gleichstromgeoelektrik (Knödel et al., 2005)

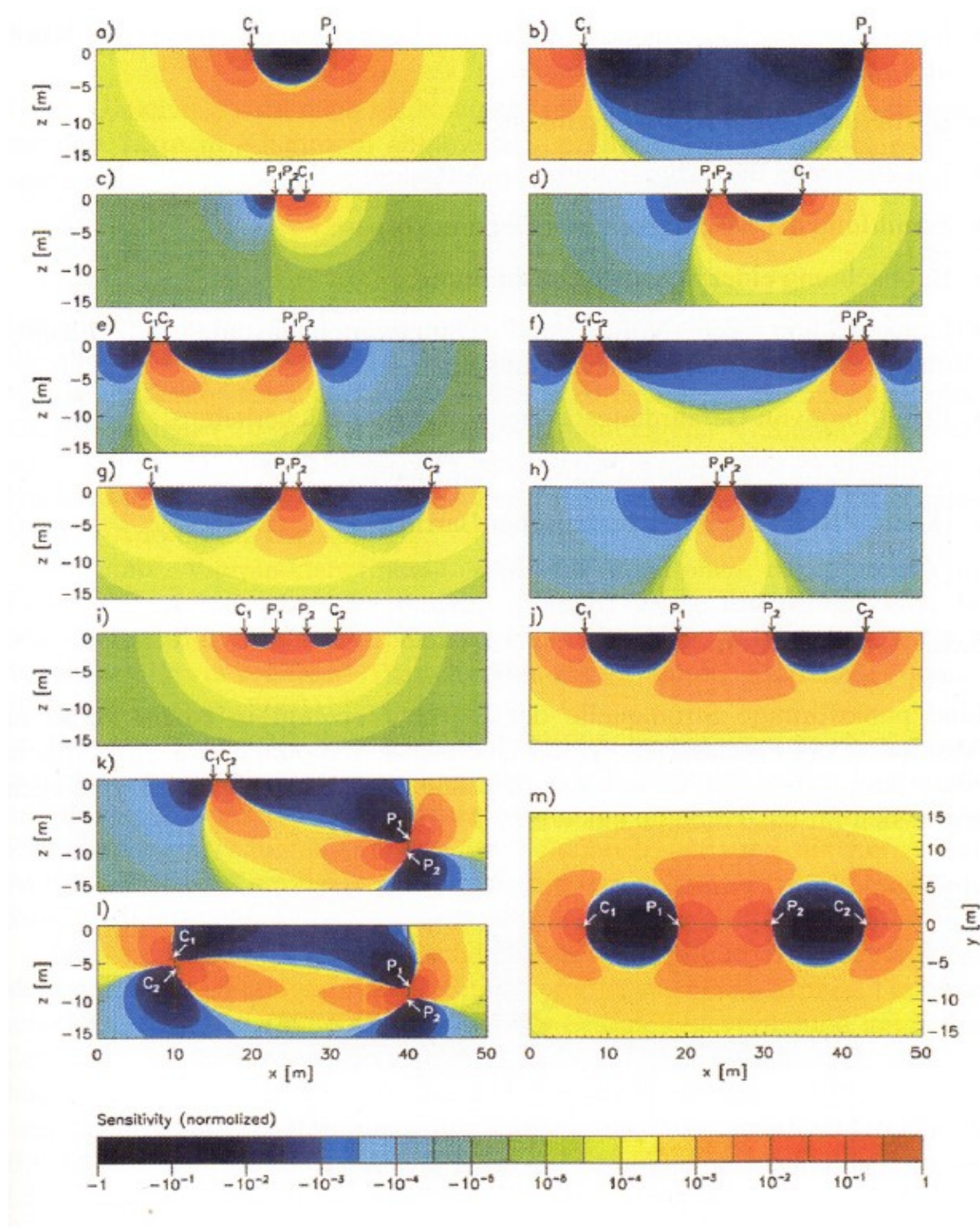


Abbildung 5: Sensitivität ausgewählter Konfigurationen für homogenen Halbraum. (a, b) Pol-Pol, (c, d) Pol-Dipol, (e, f) Dipol-Dipol, (g, h) Schlumberger, (i, j) Wenner, (k, l) Dipol-Dipol, Elektroden in Bohrung, (m) Wenner Sensitivität xy-Ebene. Die Farbskalen der Einzelabbildungen sind normiert auf den jeweiligen Maximalwert nach Friedel (2000) (Knödel et al., 2005).

Tabelle 1: Qualitative Bewertung der gebräuchlichsten widerstandsgeoelektrischen Verfahren nach Ward (1990). Erkundungstiefe: **a-** nach Roy und Apparao (1971) und **b-** nach Barker (1989); (Knödel et al., 2005).

Konfiguration	Wenner	Schlumberger	Dipol-Dipol	Pol-Dipol	Gradient
Nutz-/Störsignal	1	2	5	4	3
Laterale Auflösung	5	4	2	3	1
Schichtauflösung	1	1	2	2	5
Vertikale Störkörperauflösung	1	1	2	3	5
Einfluß der Neigung von Einlagerungen	2	2	4	5	1
Einfluß oberflächennaher Inhomogenitäten					
a: Bei Kartierung	3	3	2	1	5
b: Bei Sondierung	2	1	4	3	-
Einfluß des Reliefs im Untergrund	3	3	1	2	5
Erkundungstiefe für horizontalgeschichteten Untergrund, bezogen auf Abstände in Tab. 5.5					
a:	$0,11 \overline{AB}$	$0,125 \overline{AB}$	$0,195 \overline{AN}$	$0,13 \overline{AB}$	-
b:	$0,17 \overline{AB}$	$0,19 \overline{AB}$	$0,25 \overline{AN}$	$0,19 \overline{AB}$	-

1 : Relativ beste 5 : Relativ schlechteste Bewertung - : Keine Angaben

Für die Erkundungstiefe des Pol-Pol-Verfahrens geben ROY & APPARAO $0,35 \overline{AM}$ an

Aus der Potentialdifferenz zwischen den Sonden M und N und der Stromstärke zwischen den Elektroden A und B ergibt sich nach dem Ohmschen Gesetz, siehe

Gleichung (2), ein scheinbarer elektrischer Widerstand. Gleichung (3) ist der spezifische elektrische Widerstand.

$$R = \frac{U}{I} [\Omega] \quad (2)$$

$$\rho = \frac{R * A}{L} [\Omega/m] \quad (3)$$

Das Produkt dieses scheinbaren elektrischen Widerstandes mit dem Konfigurationsfaktor K, auch Geometriefaktor genannt, (siehe Gleichung (4)) der Elektroden-Sonden-Anordnung, ist bei homogenen Verhältnissen der wahre spezifische Widerstand.

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right]^{-1} \quad (4)$$

Da die Messwerte in der Realität jedoch aus einem nicht homogenen Untergrund stammen, werden die Messwerte von Widerstandsmessungen als „scheinbare spezifische Widerstände“ bezeichnet (Knödel et al., 2005). Dies ist auch der Grund, warum die Gleichstromelektrik oft als Widerstandsmethode bezeichnet wird. Das Ziel ist es nun, unter dem Einsatz von Inversionsverfahren aus diesem scheinbaren spezifischen Widerstand, auf den wahren spezifischen Widerstand des Untergrunds zu schließen. Einen guten Überblick über die verschiedenen Inversionsmethoden liefert Binley und Kemna (2005). Ein Beispiel für einen solchen Inversionvorgang ist in Abbildung 6 gezeigt, wo aus den gemessenen scheinbaren spezifischen Widerständen der Pseudosektion und deren Pseudotiefe, durch Inversion ein sogenanntes elektrisches Tomogram, auch als „Electrical resistivity tomography (ERT)“ bezeichnet, erhalten wird.

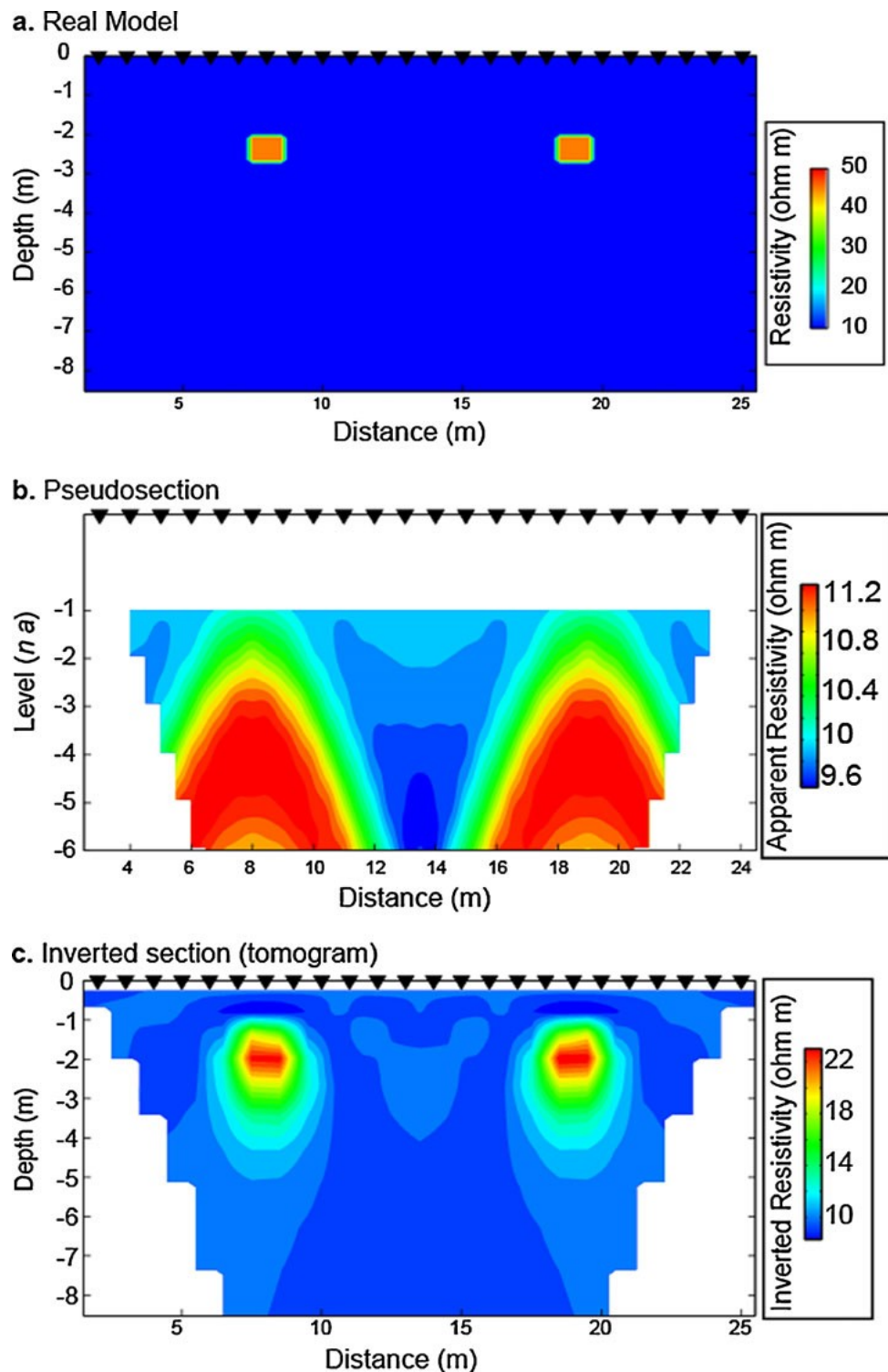


Abbildung 6: Beispiel für eine ERT. **a-** wahre Widerstands Verteilung **b-** Pseudosektion des scheinbaren spezifischen Widerstandes bezogen auf eine Pseudotiefe ($n a$), wobei n ein Vielfaches des Elektrodenabstandes a ist. **c-** Widerstand-Tomogram nach der Inversion. (Revil et al., 2012).

In Sedimentgesteinen ist der Widerstand des Porenfluids von größerer Bedeutung als der Widerstand des Gesteins, beschrieben durch Archie (1942). Gleichung (5) ist die allgemeine Formel für ein teilgesättigtes Gestein (Schön, 1983).

$$\rho = a\phi^{-m} * S^{-n} * \rho_W \quad \text{bzw.} \quad \rho = \rho_W * F * S^{-n} \quad (5)$$

Die Haupteinsatzgebiete der Gleichstromgeoelektrik sind Kartierung (Profilierung), Tiefensondierung, Sondierungskartierung und Widerstandstomographie. Die Ergebnisse sind dabei überwiegend qualitativer Natur und dienen zur Abgrenzung lithologischer Einheiten, der Erfassung von Altlastenflächen und dem Aufspüren von Kontaminationsfahnen. Das Ziel dieser sondierenden Verfahren und der Widerstandstomographie ist immer eine Abbildung der Leitfähigkeitsstrukturen des Untergrundes. Störeinflüsse können durch unterirdische Leitungen, Metallzäune u. ä. ausgelöst werden, wobei deren Auswirkung senkrecht zur Messrichtung in der Regel geringer ausfällt als parallel dazu. Dies kann besonders in hochohmigen (sandiger) Umgebung dazu führen, dass Effekte auftreten die zur Fehlinterpretation führen, wie von Homilius und Flathe (1988) an Beispielen beschrieben wird. Eine wesentliche Rolle spielen auch die Widerstandsverhältnisse der Deckschicht, dargestellt in Abbildung 7.

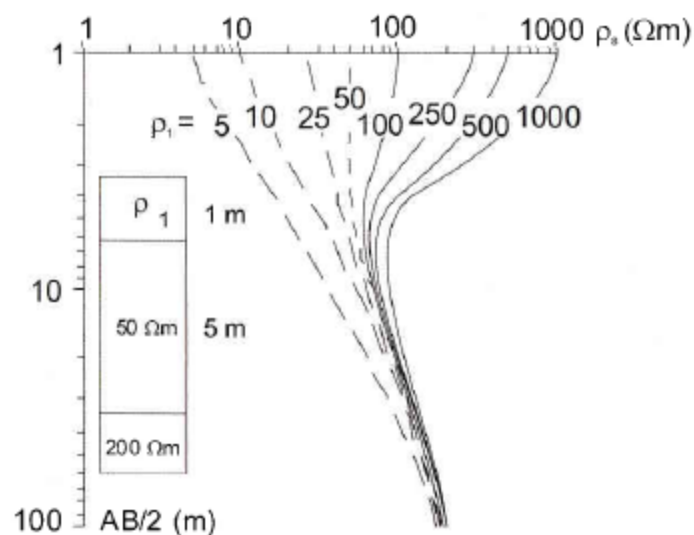


Abbildung 7: Auswirkung der Deckschichtwiderstände auf die Sondierungskurve. (Knödel et al., 2005).

Die Änderungen des Widerstandes der Deckschicht sind dabei im niederohmigen Bereich kritischer als bei hochohmigen Verhältnissen. Die Auswirkungen des Reliefs können vernachlässigt werden, wenn die Neigung im Auslagenbereich $<10^\circ$ ist (Fox et al., 1980; Ward, 1990). Größere Neigungswinkel erfordern Korrekturrechnungen auf der Basis eines Nivellements (Jacobs et al., 1987).

2.2.1.3 Induzierte Polarisation

Bei der Messmethode der Induzierten Polarisationen nutzt man die Frequenzabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes der Gesteine. Somit ist es möglich, über die Messung von zusätzlichen, vom Gleichstromwiderstand unabhängigen, materialspezifischen Parametern, weitergehende Aussagen stofflicher oder struktureller Natur zu treffen (Knödel et al., 2005). Für die Messungen kommt wie bei der Gleichstromgeoelektrik die Vierpunktanordnung zum Einsatz, welche in Abbildung 3 dargestellt ist. Ähnlich den elektromagnetischen Verfahren kann entweder im Zeitbereich oder im Frequenzbereich gemessen werden. Dies stellt auch die Unterscheidung zwischen Zeitbereich-IP und Frequenzbereich-IP dar. Beim Zeitbereichsverfahren wird das Abklingen der Spannung nach dem Abschalten des Quellstromes gemessen. Im Gegensatz dazu werden beim Frequenzbereichsverfahren die Amplituden der gemessenen Spannungen bzw. der Widerstände bei unterschiedlichen Frequenzen detektiert. Beide Methoden liefern die selbe Aussagekraft, sofern die Spektren bzw. die Lade- und Abklingzeitkurve vollständig bekannt sind, und lassen sich ineinander umrechnen. Die Methode der spektralen induzierten Polarisation stellt die allgemeinste Form der Frequenzbereichsmessung dar. In Abbildung 8 ist das Prinzip der beiden Messmethoden der Induzierten Polarisation, nach Revil et al. (2005) dargestellt. Bei der Zeitbereichs-IP im linken Teil der Abbildung ist zu sehen, wie nach dem Einschalten des primären Sendestromes die Spannung zunächst schlagartig ansteigt und sich dann asymptotisch einem Maximalwert nähert. Beim Abschalten wiederholt sich dieser Vorgang mit umgekehrtem Vorzeichen (Knödel et al., 2005).

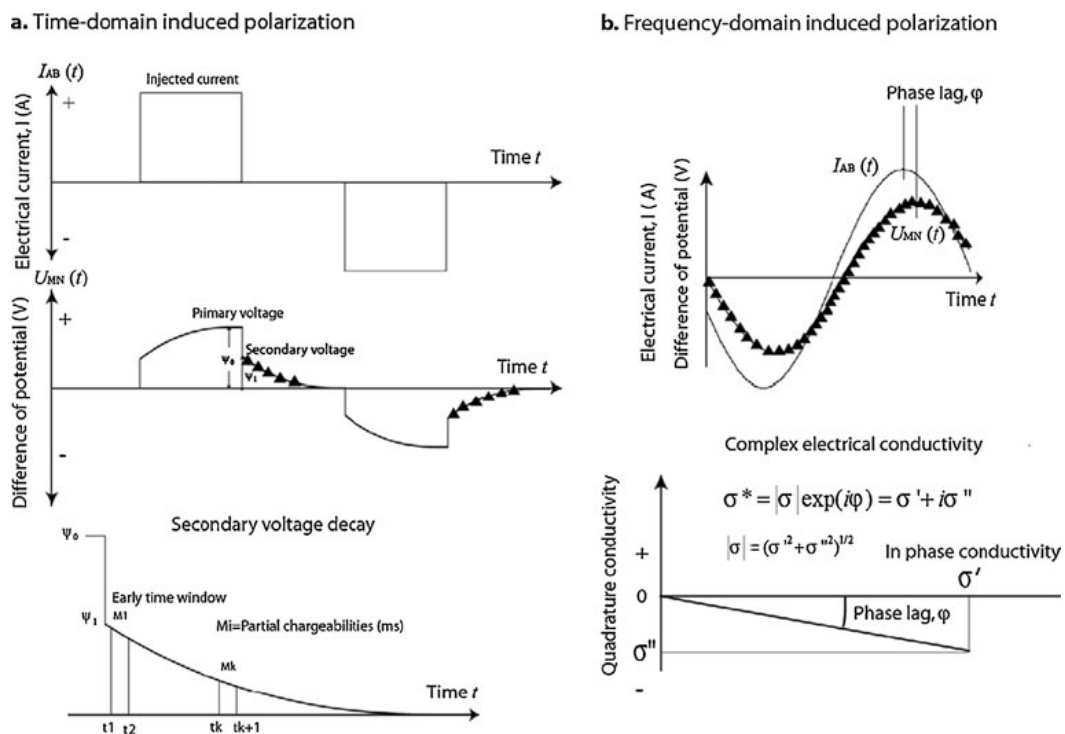
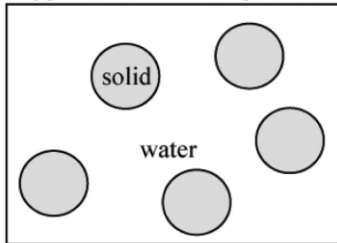


Abbildung 8: Prinzip der Zeitbereichs-IP (Time-domain-IP) und der Frequenzbereich-IP (Frequency-domain-IP). **a-** Zeitbereich-IP, Messung des sekundären Abklinges nach dem Abschalten des Stroms, **b-** Frequenzbereich-IP, der eingespeiste Strom ist harmonisch und die Spannung zwischen M und N wird mittels einer Abtast-Frequenz (diese hat nichts mit der Frequenz des eingespeisten Stromes zu tun), welche hoch genug sein muss um den geringen Phasenunterschied zwischen Strom und Spannung zu messen. Die Amplitude der Leitfähigkeit und die Phase können zur komplexen Leitfähigkeit zusammengefasst werden. Die komplexe Leitfähigkeit wird durch eine In-phase Komponente (realer Teil) und eine Out-of-phase Komponente (imaginärer Teil) charakterisiert und über einen Frequenzbereich gemessen. (Revil et al., 2012).

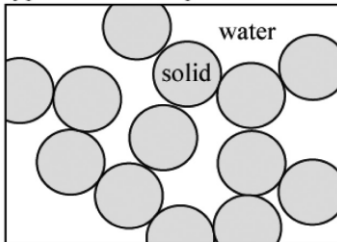
Nach Knödel et al. (2005) sind die Ursachen der induzierten Polarisation elektrochemische Vorgänge, welche auf den Wechsel zwischen elektrolytischer und elektronischer Leitfähigkeit bei erzhaltigen Gesteinen und auf Variationen in der Beweglichkeit der Ionen eines Elektrolyten im Porenraum der Gesteine beruht. Die IP-Messeffekte zeigen die endliche Geschwindigkeit der Ladungstrennung (Dipolbildung), bei dem das polarisierbare Medium einen durch ein von außen

einwirkendes elektrisches Feld verursachten Ungleichzustand wieder auszugleichen versucht. Im Zeitbereich entsteht dadurch eine Auf- und Entladekurve. Im Frequenzbereich zeigt sich ein zusätzlicher Leitungsmechanismus, dieser führt bei hohen Frequenzen zu einer Abnahme des Widerstandes und einer damit verbundenen Phasenverschiebung zwischen Erregerstrom und Spannung. Der Unterschied der gemessenen Abklingzeitkurven und dem Frequenzverhalten des Gesteinsverbandes wird durch die unterschiedliche Fähigkeit der Stoffe Energie zu speichern zurückgeführt. Diese Eigenschaft wird Aufladbarkeit genannt und ist von der Lithologie abhängig. Nach Telford et al (1990) kann die Aufladbarkeit, im Wesentlichen durch 2 Vorgänge erklärt werden, die Elektrodenpolarisation und die Membranpolarisation, welche aufgrund der Häufigkeit ihres Auftretens, die wichtigsten IP-Effekte sind. Nach Kemna et al. (2012) sind fünf Hauptmechanismen für die Polarisation im Bereich kleiner 1 MHz verantwortlich. 1.) Die Maxwell-Wagner Polarisation (Alvarez, 1973; Chelidze und Gueguen, 1999; Lesmes und Morgan, 2001; Chen und Or, 2006); 2.) Die Polarisation der Sternschicht, also dem Inneren Teil der elektrischen Doppelschicht, an der Grenze zwischen Mineral und Wasser (de Lima und Sharma, 1992; Leroy et al., 2008; Vaudelet et al., 2011; Revil, 2012); 3.) Der Polarisation der Diffusionsschicht, dem äußeren Teil der elektrischen Doppelschicht (Dukhin und Shilov, 1974; de Lima und Sharma, 1992); 4.) Die Membranpolarisation (Marshall und Madden, 1959; Vinegar und Waxman, 1984; Titov et al., 2002); und 5.) Die Elektrodenpolarisation (Wong, 1979; Merriam, 2007). Abbildung 9 zeigt die schematische Darstellung dieser Hauptpolarisationsmechanismen anhand von drei verschiedene Arten der Porosität.

Type A. Colloidal suspension



Type B. Granular porous medium



Type C. Continuous solid phase

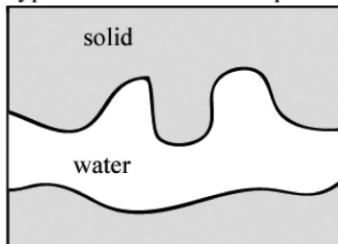


Abbildung 9: **Typ A:** Polarisierung der Stern- und Diffusionsschicht und Membranpolarisation; **Typ B:** Kontinuierliche Diffusionsschicht, daher keine Polarisierung dieser Schicht; **Typ C:** Stern- und Diffusionsschicht sind kontinuierlich und polarisieren daher nicht. Daher nur Membran- und Maxwell-Wagner Polarisierung, diese werden durch die elektrische Leitfähigkeit in der Doppelschicht beeinflusst (dieser Beitrag wird auch Oberflächenleitfähigkeit genannt). (Kemna et al., 2012).

Die Auswirkungen eines äußeren elektrischen Feldes auf den Porenraum zwischen zwei Körnern ist in Abbildung 10 abgebildet.

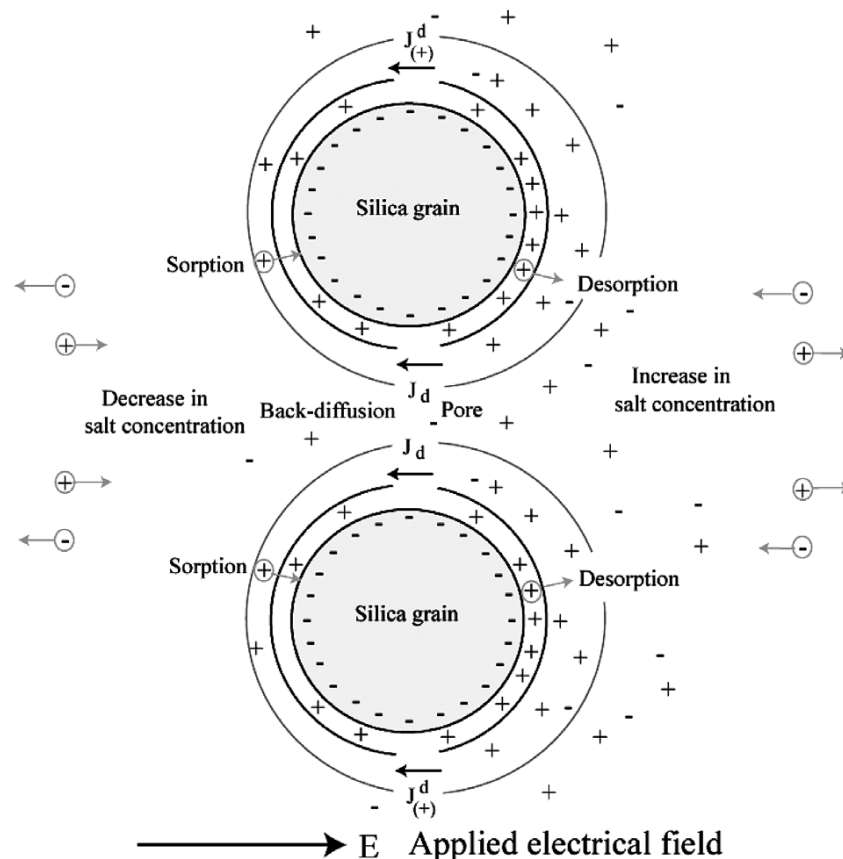


Abbildung 10: Membranpolarisation durch äußeres elektrisches Feld, Revil und Cosenza (2010).

Die Anwendungsmöglichkeiten der Induzierten Polarisation umfassen unter anderem die Lokalisation und Abgrenzung verdeckter Altablagerungen, Abgrenzung von bindigen und rolligen Bereichen, den Nachweis von Störungszonen mit klufftgebundener Mineralisation, die lithologische Gliederung von Festgesteinskomplexen und weitere Anwendungsmöglichkeiten bei denen noch Forschungsbedarf besteht, wie beispielsweise dem Nachweis von Kohlenwasserstoffkontaminationen (Knödel et al., 2005).

2.2.1.4 Elektromagnetische Zweispulen-Systeme

Elektromagnetische Messverfahren können entweder Bodengebunden, aus der Luft mittels Flugzeug oder Helikopter oder in Bohrungen eingesetzt werden. Sie dienen der Untersuchung von Leitfähigkeitsstrukturen im Untergrund. Man unterscheidet in Abhängigkeit von der Quelle des elektromagnetischen Signals zwischen passiven und aktiven Verfahren (Knödel et al., 2005). Passive Verfahren nutzen dabei weit entfernte Radiostationen. Die hier beschriebenen Zweispulen-Systeme gehören zu den aktiven Verfahren. Sie erzeugen das elektromagnetische Feld mittels eines transportablen Senders, aufgrund ihres Einsatzes von sinusförmigem Wechselstrom im Frequenzbereich von ca. 100 Hz – 60 kHz werden sie oft auch als Niederfrequenzmethoden (Militzer und Weber, 1985), Wechselstromverfahren (Greinwald, 1985) oder Frequenzbereichs-Elektromagnetik bezeichnet. Abbildung 11 erläutert das Prinzip der aktiven elektromagnetischen Verfahren auf dem Zweispulen Prinzip.

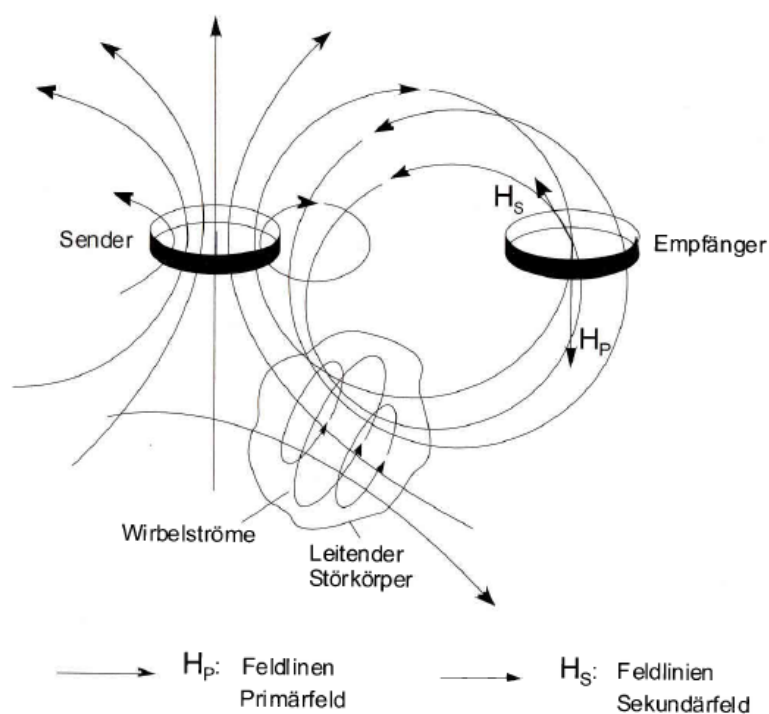


Abbildung 11; Prinzip des elektromagnetischen Induktionsverfahrens nach Militzer und Weber (1985) (Knödel et al., 2005).

Über die Induktionswirkung des Magnetfeldes, durch den in der Spule fließenden Wechselstrom, entsteht im leitfähigen Untergrund ein Wirbelstromsystem. Das daran gekoppelte sekundäre Magnetfeld überlagert das Primärfeld der Spule, das resultierende Gesamtfeld wird dann am Empfänger detektiert. Bei den hier beschriebenen Zweispulen-Verfahren wird das an das Magnetfeld gekoppelte elektrische Feld nicht gemessen. Die Induktive Ankopplung dieser Messmethode ermöglicht die Leitfähigkeitsmessung auch in Bereichen, bei denen der Einsatz der Gleichstromverfahren nur erschwert oder gar unmöglich ist. Solche Bereiche können beispielweise versiegelte Flächen (Beton oder Asphalt) und Gebiete mit abschirmender hochohmiger Bedeckung (trockener Sand, anstehendes Festgestein oder tiefgefrorener Boden) sein. Der Abstand von Sender und Empfänger fällt im Vergleich zu den Gleichstrom-Messsystemen deutlich geringer aus, meist weniger als ein Drittel (Knödel et al., 2005). Zweispulen- Messsysteme können sowohl zur Kartierung als auch zur Sondierung verwendet werden. Bei der Kartierung werden Sender und Empfänger im fixen Abstand (Abstandssondierung, geometrische Sondierung) über das Messgelände bewegt. Die Sondierung, eine vertikale Messung der Leitfähigkeit, kann sowohl über die Änderung des Spulenabstandes, als auch über eine Änderung der Frequenz (Frequenzsondierung, parametrische Sondierung) erfolgen. Dabei ist es unerlässlich, die Spulenabstände und die Frequenz aufeinander abzustimmen.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Elektromagnetischen Zweispulen-Verfahren umfassen ein breites Spektrum, von Lokalisation und Abgrenzung verdeckter Altablagerungen, Verfolgung von Kluft- und Störungszonen im Festgestein, Ermittlung der Mächtigkeit von Deponiekörpern, Erfassung und Beobachtung von Schadstoffausbreitungen (Schadstoff-Fahnen), Monitoring von Schadstoffausbreitungen, Lokalisierung vergrabener metallischer Objekte, der Ortung von oberflächennahen Rohr- und Kabeltrassen bis zur Abgrenzung von Bereichen, die mit Mineralölkohlenwasserstoffen belastet sind (Knödel et al., 2005).

2.2.2 Magnetik

Das Magnetfeld ist ein Vektorfeld und wird durch seine Intensität und Richtung beschrieben. Es besteht aus drei Komponenten: dem Hauptfeld F_0 , einem fluktuierenden Feld F_v und einer lokalen Anomalie Feld ΔF . Das Hauptfeld, welches aus dem Erdinneren stammt und sich nur sehr langsam verändert, in Jahren bis Jahrzehnten. Überlagert wird es durch das fluktuierende Feld, welches sich sehr schnell, in Bruchteilen von Sekunden bis Tagen verändert. Es hat seinen Ursprung außerhalb des Erdkörpers und wird auch Außenfeld oder Variationsfeld genannt. Zusammen ergeben diese beiden Felder den globalen Anteil des erdmagnetischen Feldes, welcher lokal durch ein zeitlich nahezu konstantes Anomalie Feld ergänzt wird. Diese Anomalie Feld hat seinen Ursprung in der unterschiedlichen Magnetisierung des Materials in der oberen Erdkruste. Man unterscheidet eine induzierte und eine remanente Magnetisierung, welche sich vektoriell addieren. Die induzierte Magnetisierung ist proportional zu dem lokal herrschenden Magnetfeld H . Die Ursache des Anomalie Feld sind nicht nur geologische Strukturen, sondern auch durch Einlagerungen von Abfall in Deponien und Altablagerungen verursachte Veränderungen, oder Mineralneubildungen, infolge chemischer Prozesse im Boden. Die magnetische Suszeptibilität κ ist eine einheitslose, physikalische Größe, die die Magnetisierbarkeit von Materie in einem externen Magnetfeld angibt. Abbildung 12 zeigt den Wertebereich der magnetischen Suszeptibilität verschiedener Gesteine, zusammengestellt nach Schön (1983).

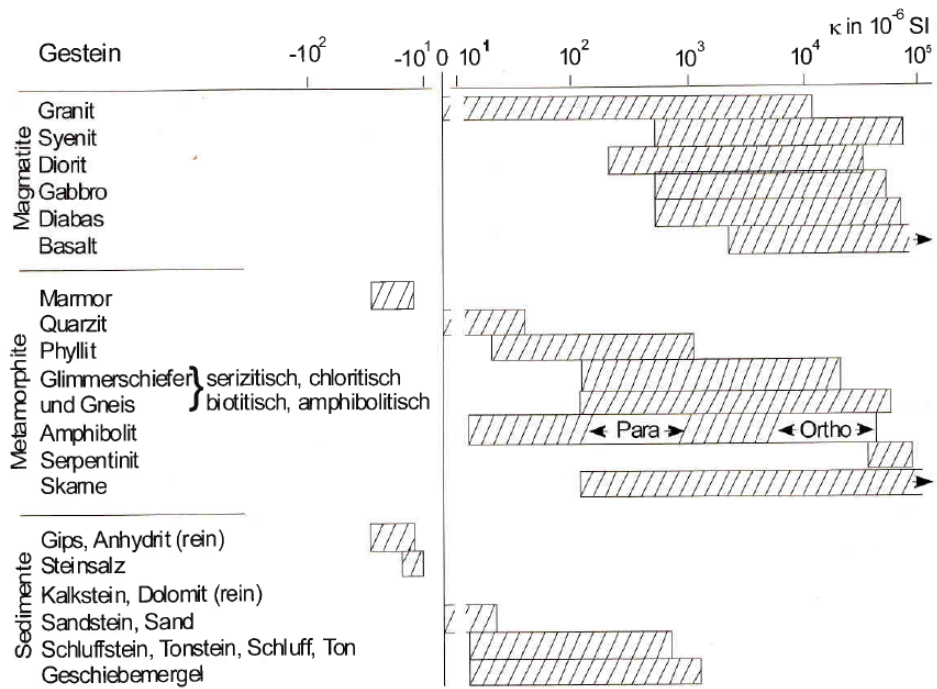


Abbildung 12: Wertebereiche der magnetische Suszeptibilität verschiedener Gesteine (Schön, 1983).

3 Messgelände – EVN- Landesfeuerweherschule in Tulln

Um die verschiedenen geophysikalischen Messmethoden auf ihre Eignung hinsichtlich des Nachweises von Kohlenwasserstoff an verschiedenen Leitungssystemen zu überprüfen, ist es notwendig, die Messungen unter definierten Bedingungen durchzuführen. Das Messgelände der EVN in Tulln stellt dafür den idealen Standort dar, da sowohl der geologische (Verfüllmaterial) und technische Aufbau der beiden Messeinheiten, im folgenden Sandbunker oder Bunker genannt, sehr gut bekannt und dokumentiert sind. Die technische Umsetzung dieser Anlage wurde in Anlehnung an die Versuche von Brötzenberg und Pass (1987) von der TU Wien, Versuchsanstalt für Brennstoffe, Feuerungsanlagen und Gastechnik, durchgeführt. Dafür wurden zwei aneinandergrenzende „Kammern“ mit den Abmessungen 5m * 5m * 2,5m (L*B*T) ohne Boden ausgeführt, siehe Abbildung 13.

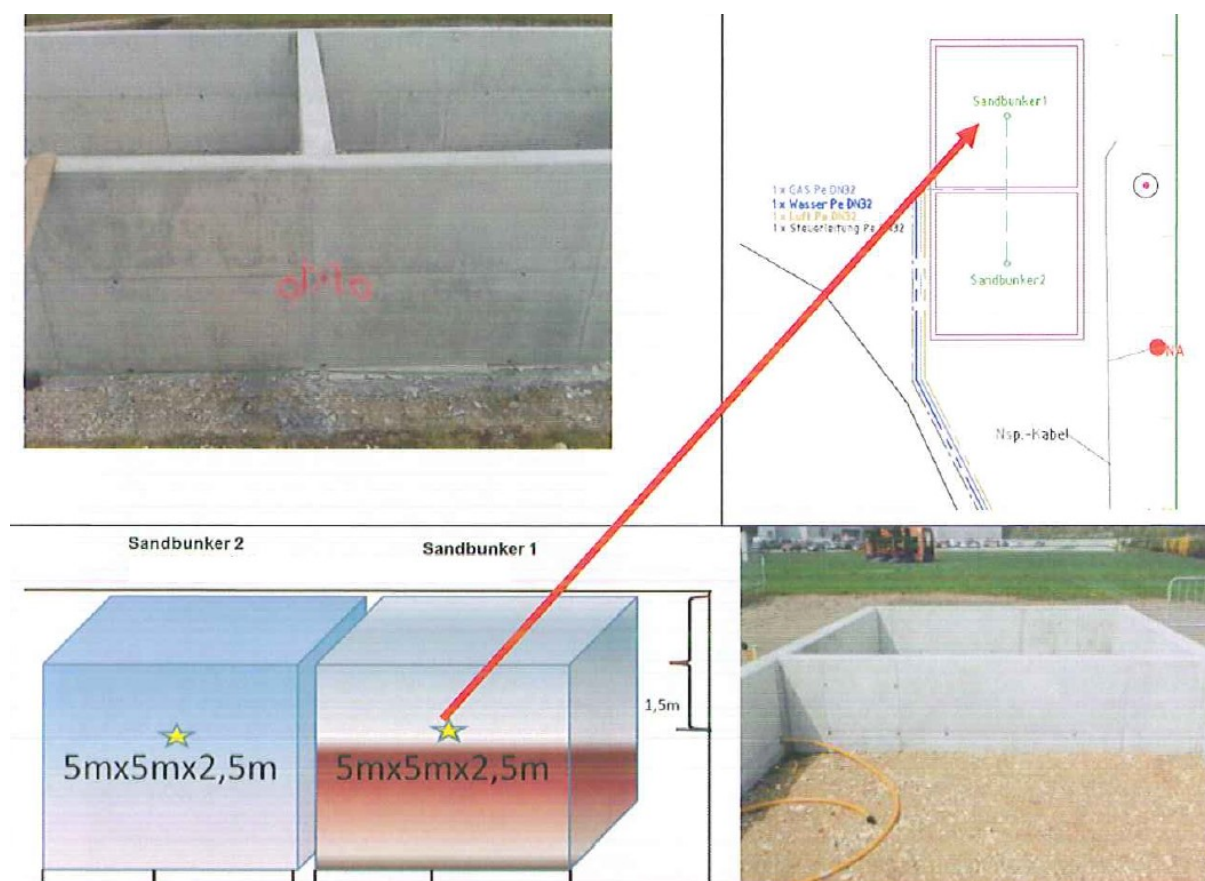


Abbildung 13, rechts-oben: Grundriss der beiden Sandbunker, links-unten: Aufriss: Sandbunker 1 ohne und Sandbunker 2 mit Bewässerung; links-oben und rechts-unten: nicht und teilverfüllte Ansicht der beiden Bunker.

Die Lage dieser beiden Sandbunker in der EVN Schulungsanlage auf dem Gelände der Landesfeuerweherschule Niederösterreich in Tulln ist in Abbildung 14 ersichtlich.

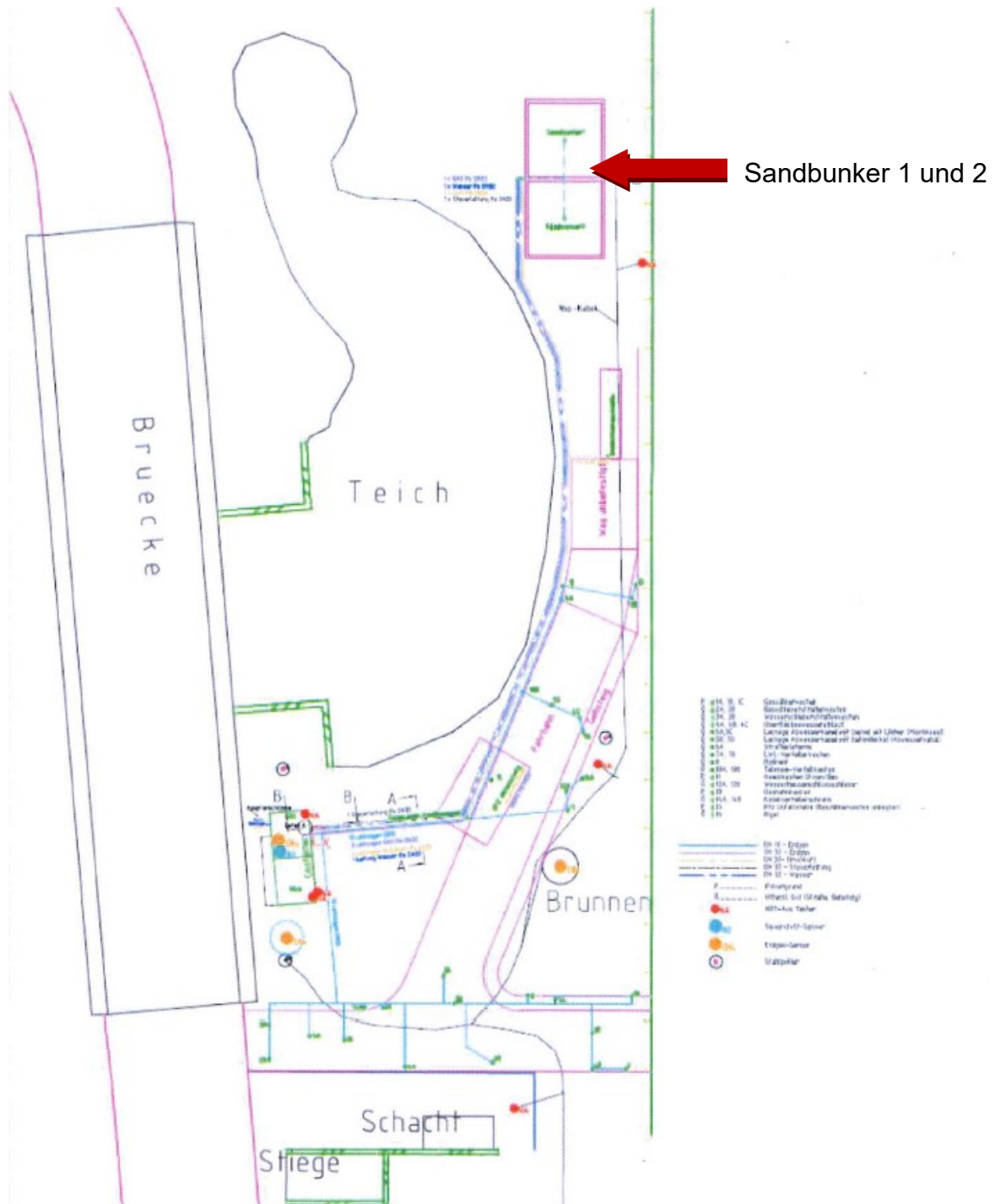


Abbildung 14: Lageplan des Schulungsgeländes.

Die umgebenden Mauern sind aus armiertem Beton. Für die geregelte Gaszufuhr in die beiden Sandbunker wurde jeweils ein DN-32-PE Rohr in der Mitte der Kammer geführt. Die Austrittsstellen liegen mittig in einer Tiefe von ca. 80 cm unter dem Kantenniveau, gemäß den EVN-Vorgaben zur Verlegung von Erdgasrohren. Die Gasaustrittsöffnungen wurden ebenfalls mit einem Sinterabschluss in ein DN-100-PE Abwasserrohr, vertikal in den Boden eingearbeitet, dargestellt in Abbildung 15.



Abbildung 15: Sinterabschluss und dessen Abdeckung.

Rund um die Austritts-Öffnungen wurde eine Sandbettung von ca. 25 cm aufgebracht (Abbildung 16) und anschließend wurde Künetten-Verfüllmaterial bis 80 cm über der schwarzen Kappe eingebracht und 3-mal verdichtet. Die Korngröße des verwendeten Verfüllmaterials liegt zwischen 1 und 16mm und gehört damit in den Bereich grob Sand bis mittel Kies. Die fertigen Sandbunker, ohne Rieselüberdeckung, sind in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 16: Sandbettung um die Gasaustrittsstellen.



Abbildung 17: Vollständig verfüllter Sandbunker ohne Rieselüberdeckung.

Die Ausführung von Sandbunker 2 erfolgte identisch der von Sandbunker 1, mit dem Unterschied, dass zusätzlich an der Kammer eine Berieselungsanlage zur Simulation von Niederschlägen installiert wurde. Abbildung 18 zeigt die Bewässerungsanlage von Sandbunker 2. Die Bewässerung erfolgt von vier Punkten (den Ecken des Sandbunkers). Damit ist es möglich die Ausbreitungscharakteristik von Erdgas im trockenen und als Vergleich dazu auch im feuchten Boden darzustellen.



Abbildung 18: Bewässerungsanlage bei Sandbunker 2.

Um eine zusätzliche Beeinflussung der beiden Sandbunker durch äußere Einflüsse, wie beispielsweise Niederschlag, so gering als möglich zu halten, werden diese mit einer aufrollbaren LKW-Plane abgedeckt. Die Gesamtansicht der beiden Bunker ist abschließend in Abbildung 19 dargestellt.

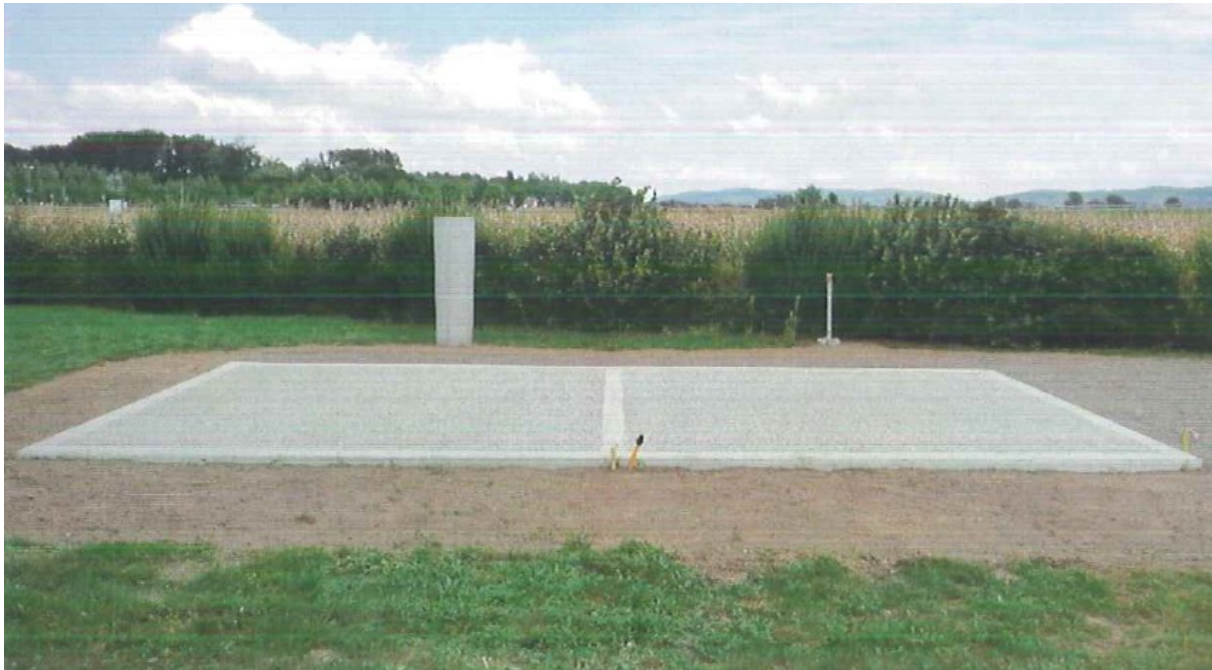


Abbildung 19: Gesamtansicht, Sandbunker 1 und 2.

Die Steuerung der Gasmenge erfolgt grundsätzlich nach dem Aufbau welcher in Abbildung 20 dargestellt ist. Mittels Proportionalventilen, ist eine exakte Anpassung des Gasdurchflusses möglich. Der Durchfluss kann entweder manuell über den Gaszähler oder digital über einen Durchflussmesser abgelesen werden. Damit ist es möglich den Gasdurchfluss zwischen 0,5 und >35 Liter pro Minute Stufenlos zu regeln.

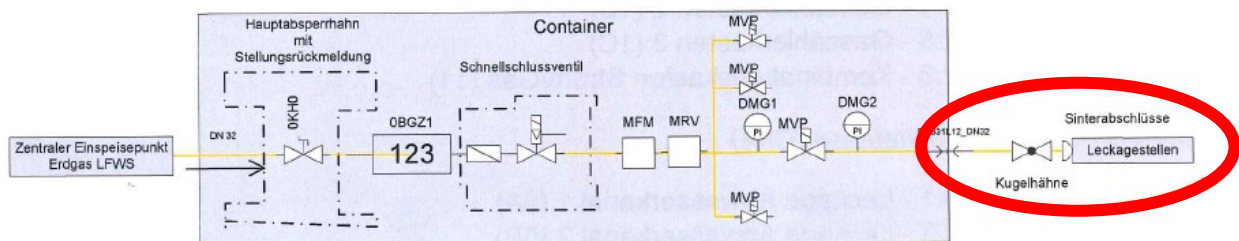


Abbildung 20: Grundsätzlicher Aufbau der Schadensstellendarstellung.

4 Feldmessungen

In diesem Teil der Arbeit werden die aufgenommenen Daten der einzelnen Messsysteme analysiert. Im ersten Teil der Feldarbeit geht es darum, sich einen groben Überblick über den möglichen Einsatz der verschiedenen Messmethoden zu verschaffen. Damit soll entschieden werden, welche Messmethoden in weiterer Folge die besten Chancen haben eine erfolgreiche Erdgasortung zu ermöglichen und/oder zu einem besseren Verständnis zum Verhalten von Gasaustritten unter dem Einfluss von Niederschlag führen können. In der nachfolgenden Abbildung 21 sind die beiden Sandbunker und ein Süd-Nord Profil, vom Beginn im nassen Bunker durch die Mitte der Sandbunker bis zum Laufmeter 15 des Profils dargestellt. Die Basiselektrode der Eigenpotential Messungen befindet sich am nördlichen Ende des Profils bei Laufmeter 15. Die Referenz-Elektrode (SP Außen) liegt bei Laufmeter 13 und 6,5 Meter in Richtung Osten vom Profil aus. Die hier eingezeichnete Eigenpotential Elektrode im Bunker (SP Bunker) wurde wie die Referenz-Elektrode für eine kontinuierliche Aufzeichnung verwendet. Es wurde ebenfalls eine Eigenpotentialmessung über das gesamte Profil mit derselben Basis Elektrode durchgeführt.

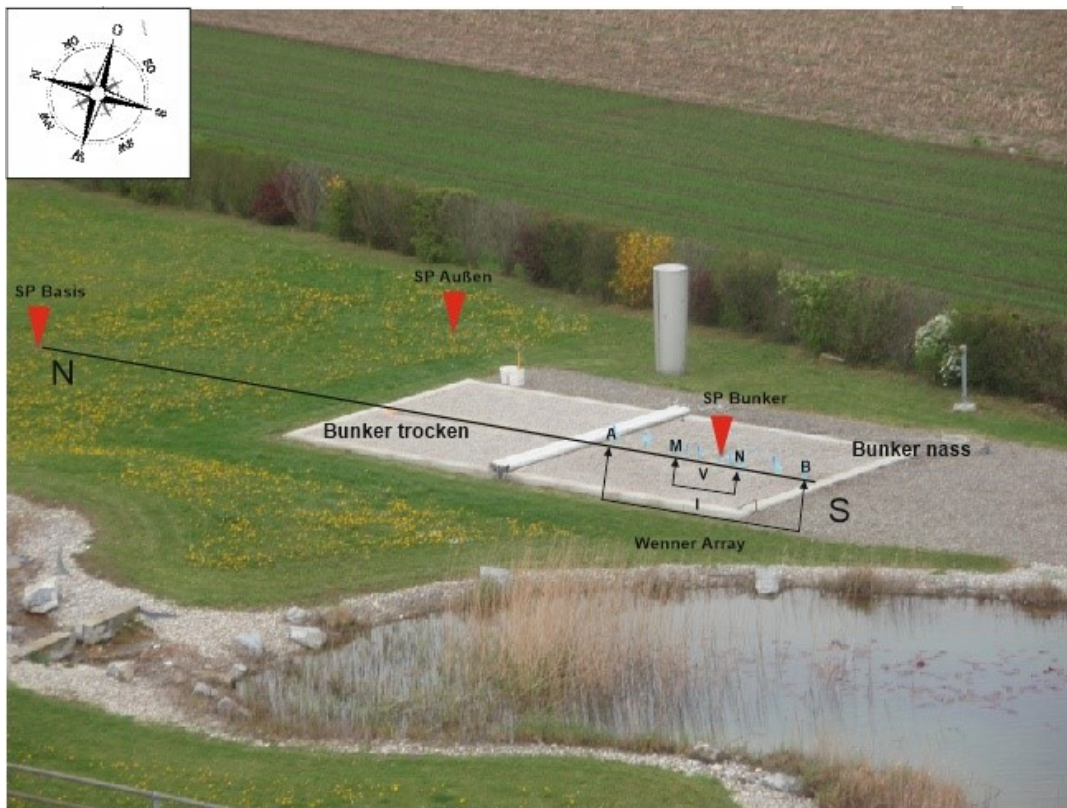


Abbildung 21: Ansicht Messgelände, mit Position der Eigenpotential Elektroden und der Wenner Tiefensondierung.

Das hier schematisch dargestellte Wenner-Array diente zur Tiefensondierung des Bunkers in drei Stufen: 0,5m, 1,0m und 1,5m. Zusätzlich zu allen geophysikalischen Messverfahren wurde mittels Gasdetektor Laser-One geprüft. Damit soll gewährleistet werden das zu jedem Zeitpunkt der Versuche die Oberflächen- und Boden-Gaskonzentration bekannt sind und eine bessere Interpretation der Daten aus der Geophysik ermöglicht wird. Eine Übersicht der Experimente ist in

Tabelle 2 zu sehen.

Tabelle 2: Übersicht über die Experimente.

Datum	Messverfahren	Bewässerung	Begasung
06.04.2016	Magnetik Elektromagnetik Eigenpotential Suszeptibilität	ohne ohne ohne ohne	1l/min nach erster Messung 1l/min nach erster Messung ohne ohne
07.04.2016	Eigenpotential Geoelek. Widerstandsmessung	7:45 bis 8:45 Uhr mit 10 l/m ²	ab 9:00 Uhr durchgehend mit 1l/min
08.04.2016	Eigenpotential Geoelek. Widerstandsmessung	12:00 bis 13:20 Uhr mit 20 l/m ²	ohne
11.04.2016	Geoelek. Tiefensondierung	ohne	ohne
12.04.2016	Geoelek. Tiefensondierung Eigenpotential	12:00 bis 13:00 Uhr mit 40 l/m ²	ohne
13.04.2016	Geoelek. Tiefensondierung Eigenpotential	11:00 bis 12:00 Uhr mit 40 l/m ²	ab 13:00 Uhr durchgehend mit 1l/min
14.04.2016	Geoelek. Tiefensondierung Eigenpotential	13:00 bis 13:30 Uhr mit 10 l/m ²	durchgehend mit 1l/min
15.04.2016	Geoelek. Tiefensondierung	ohne	durchgehend mit 1l/min
18.04.2016	Multielektroden Geolek.	ohne	ohne
19.04.2016	Multielektroden Geolek.	10 l/m ² nach erster Messung	ohne
20.04.2016	Multielektroden Geolek.	20 l/m ² nach erster Messung	durchgehend mit 1l/min
21.04.2016	Multielektroden Geolek.	10 l/m ² nach Messung 24, 25 und 26	durchgehend mit 1l/min

4.1 Magnetik

Die Messungen der magnetischen Totalintensität erfolgten am 06.04.2016. Es wurde Abseits des Messgeländes eine Basisstation aufgestellt und die Messung wurde mit einem GSM 19T Protonenmagnetometer im Gradientenmodus mit 0,5m und 1,5m Sondenhöhe durchgeführt. Der Stationsabstand beträgt 25 cm.

4.1.1 Messungen

Abbildung 22 zeigt den Verlauf des Totalfeldes gemessen an den Magnetometern T1 und T2 über das Profil in Süd-Nord Richtung.

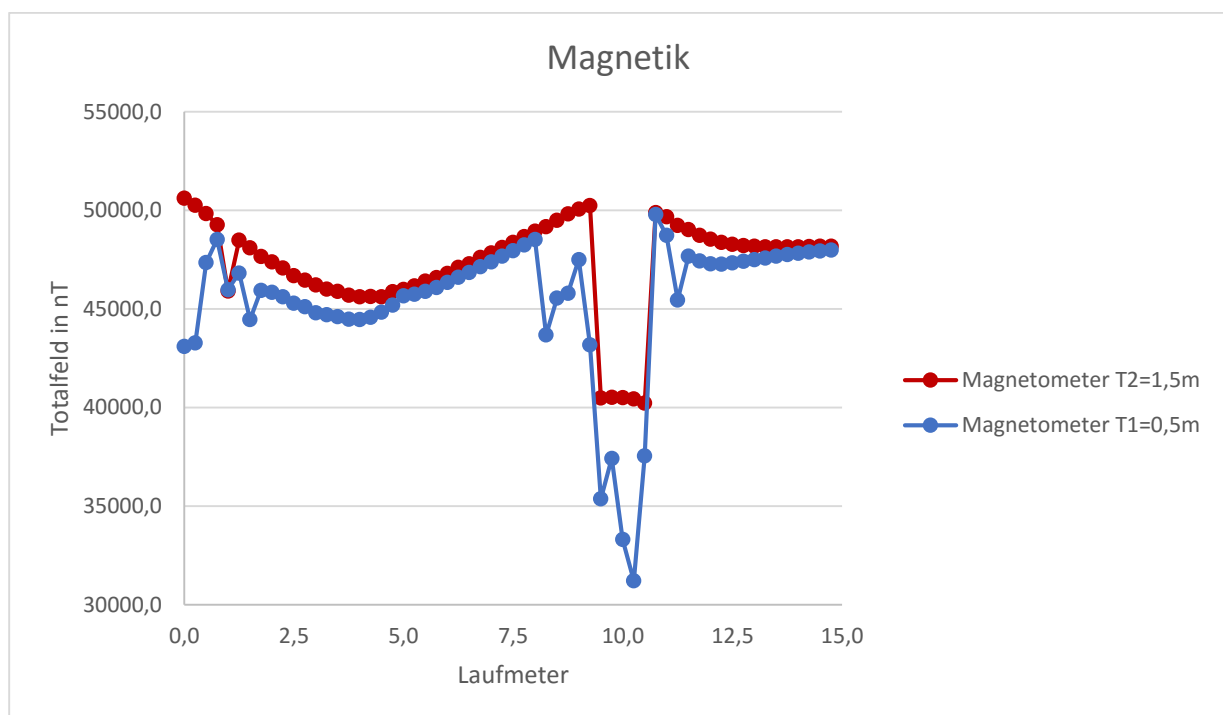


Abbildung 22: Magnetik: Totalfeld T1 und T2 über das SN Profil. Anomalie durch Stahlbeton.

Der magnetische Vertikalgradient (nT/m), für den Sondenabstand von einem Meter ist nachfolgend in Abbildung 23 dargestellt.

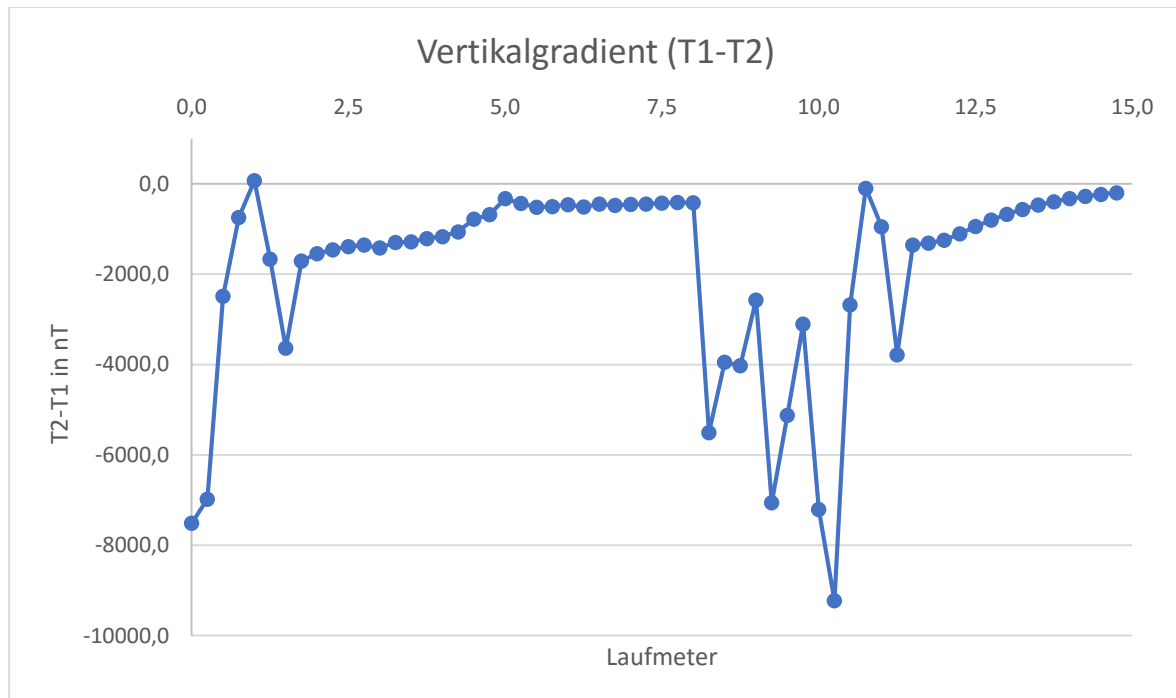


Abbildung 23: Magnetik: Vertikalgradient. Anomalie durch Stahlbeton.

4.1.2 Zusammenfassung

Der Gradient der Messreihe ist durchgehend sehr hoch, was auf einen durchgehend gestörten Messbereich durch vorhandene Störkörper, insbesondere die Armierung, schließen lässt. Auch die Signalqualität die vom Messinstrument ermittelt wurde, lag durchgehend unter den tolerierbaren Grenzwerten. Die Methode ist zwar geeignet, die armierten Betonwände als Störkörper zu identifizieren, erscheint aber nicht erfolgversprechend Veränderungen des Magnetfeldes in der Folge von Mineralumwandlungen durch Gasleckagen zu detektieren. Im hier untersuchten Testgelände würden solche Änderungen in Folge von Mineralumwandlungen durch die starke Anomalie der Armierung verschleiert. Für die Detektion mittels Magnetik müsste sich eine etwaige Leckage also abseits solcher Störeinflüsse befinden. In diesem Zusammenhang wurden keine weiteren Untersuchungen mit der magnetischen Totalintensität durchgeführt.

4.2 Magnetische Suszeptibilität

Die Messung der Suszeptibilität erfolgte wie die Messungen der Magnetik am 06.04.2016. Gemessen wurde mit einem Bartington MS2 Messgerät, mit einem MS2D Sensor mit einer Eindringtiefe von ca. 20cm. Der Messabstand der Messungen beträgt 50 cm.

4.2.1 Messungen

Die gemessenen Werte sind in Abbildung 24 dargestellt.

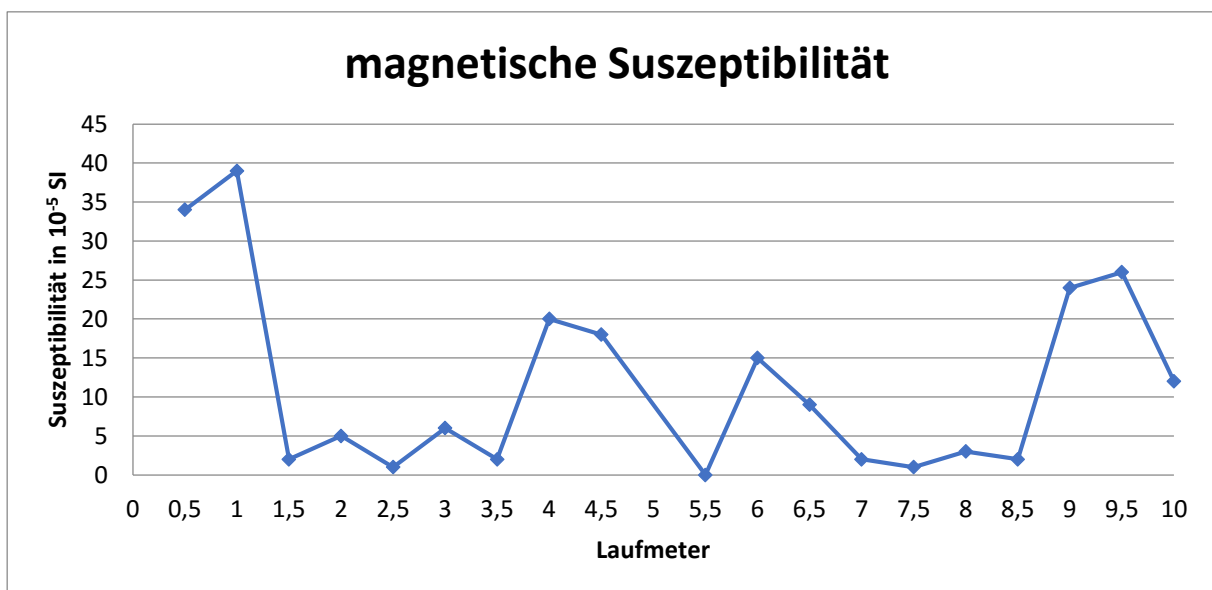


Abbildung 24: magnetische Suszeptibilität über Profil Süd-Nord.
Suszeptibilitätsunterschiede bedingt durch verschiedene Materialien.

4.2.2 Zusammenfassung

Ähnlich den Ergebnissen der magnetischen Totalintensität versprechen auch diese Messungen, unter den technischen Gegebenheiten im Versuchsgelände, keinen Erfolg zur Ortung von Leckagen. Was aber an diesen Daten sehr gut zu erkennen ist, dass es sich beim Materialaufbau des Messbunkers keineswegs um homogenes Material handeln kann, da abgesehen von einem Ausreißer bei Laufmeter 5,5 das Material im Randbereich eine deutlich höhere Suszeptibilität aufweist als im Zentrum des Bunkers. Dass es sich hierbei um unterschiedliches Verfüllmaterial handelt und nicht um oxidierende Bedingungen im Randbereich oder reduzierende im Zentrum die durch die Gasleckage hervorgerufen wurden, konnte später durch Rücksprache mit dem zuständigen Techniker bestätigt werden. Ende des Jahres 2015 wurde das Verfüllmaterial im Zentrum der beiden Bunker ausgetauscht.

4.3 Elektromagnetik

Die Messungen erfolgten am 06. und 07.04.2016 mit der EM-38 der Firma Geonics. Die Messung in 2 verschiedenen Tiefenstufen von 0,75m (bei horizontalem Dipol) und 1,5m (bei vertikalem Dipol), erfolgt in einem Abstand von 25 cm und der gemessene Wert der scheinbaren Leitfähigkeit ist in der Einheit Millisiemens pro Meter (mS/m) angegeben.

4.3.1 Messungen

Am 06.04.2016 wurde zuerst das gesamte Profil mittels EM-38 vermessen, wobei die Messungen in horizontaler und vertikaler Orientierung in zwei verschiedenen Richtungen auf das Profil gemessen wurden. Sie erfolgten in paralleler Richtung und normal auf das Süd-Nord Profil. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 25 dargestellt.

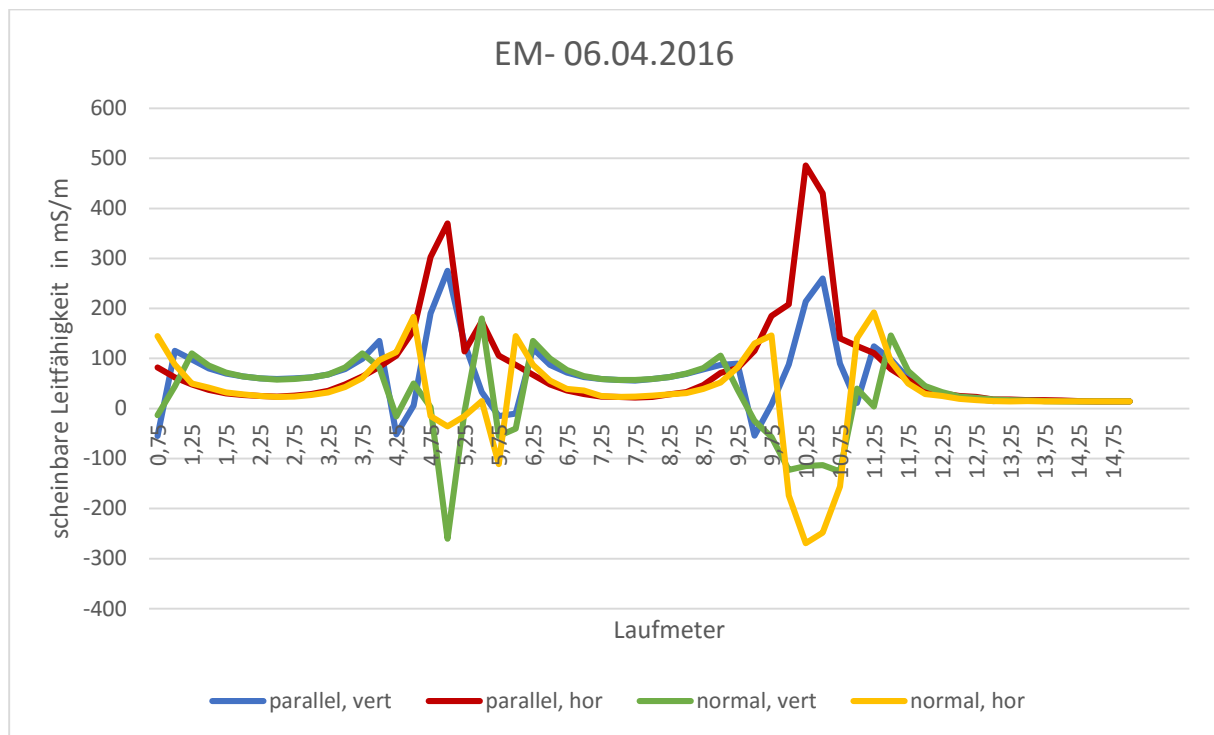


Abbildung 25: Elektromagnetik: EM-38 Profil ohne Gas, Messung parallel und normal auf das Profil. Anomalien durch Stahlbeton.

Abbildung 26 zeigt die Messungen der EM-38 im trockenen Bunker vor und nach dem Auftreten der Gasleckage. Die Durchflussmenge lag bei 1 Liter pro Minute und es konnte bereits nach sehr kurzer Zeit (weniger als 5 Minuten) die Leckage mittels Laser-One nachgewiesen werden.

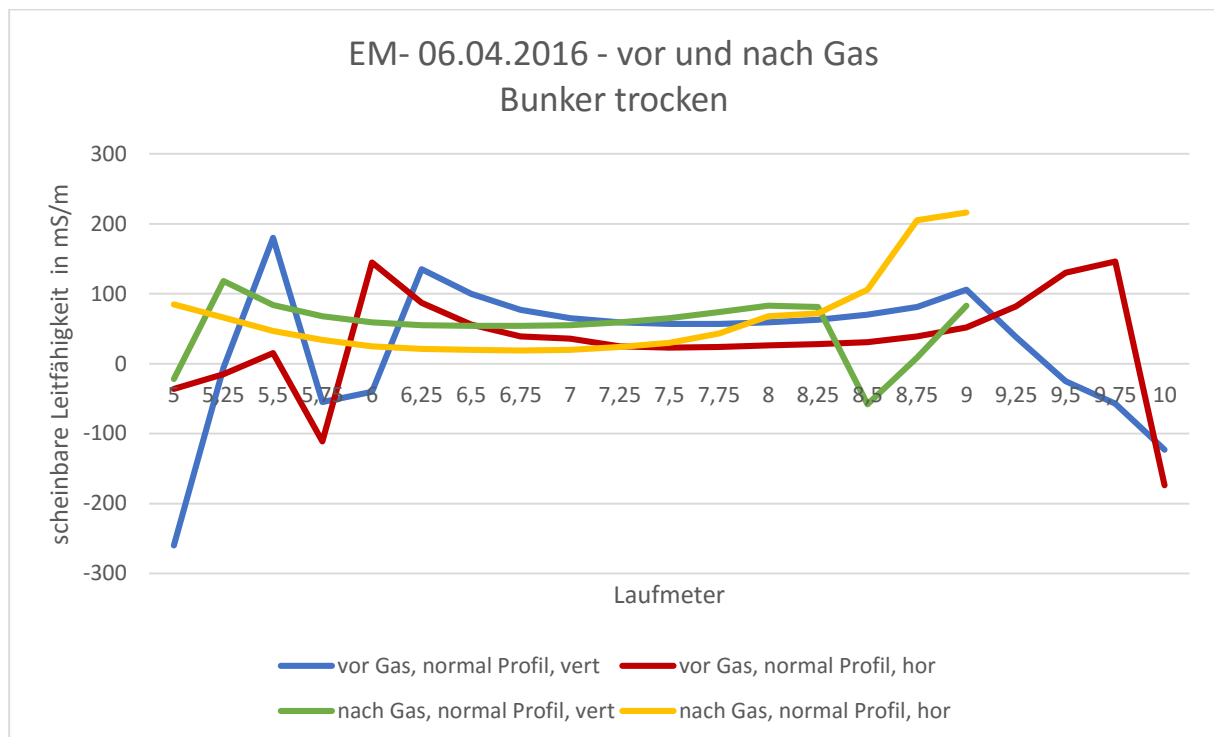


Abbildung 26: Elektromagnetik: EM-38 Profil vor und nach Gas. Messungen normal auf das Profil. Randbereich gestört durch Stahlbeton.

Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen die beiden Bunker am 07.04.2016, wobei der eine Bunker nach einer Beregnung mit ca. 15 Liter pro Quadratmeter dargestellt ist. Als Vergleich ist ebenfalls die Messung des Vortages in trockenem Zustand dargestellt.

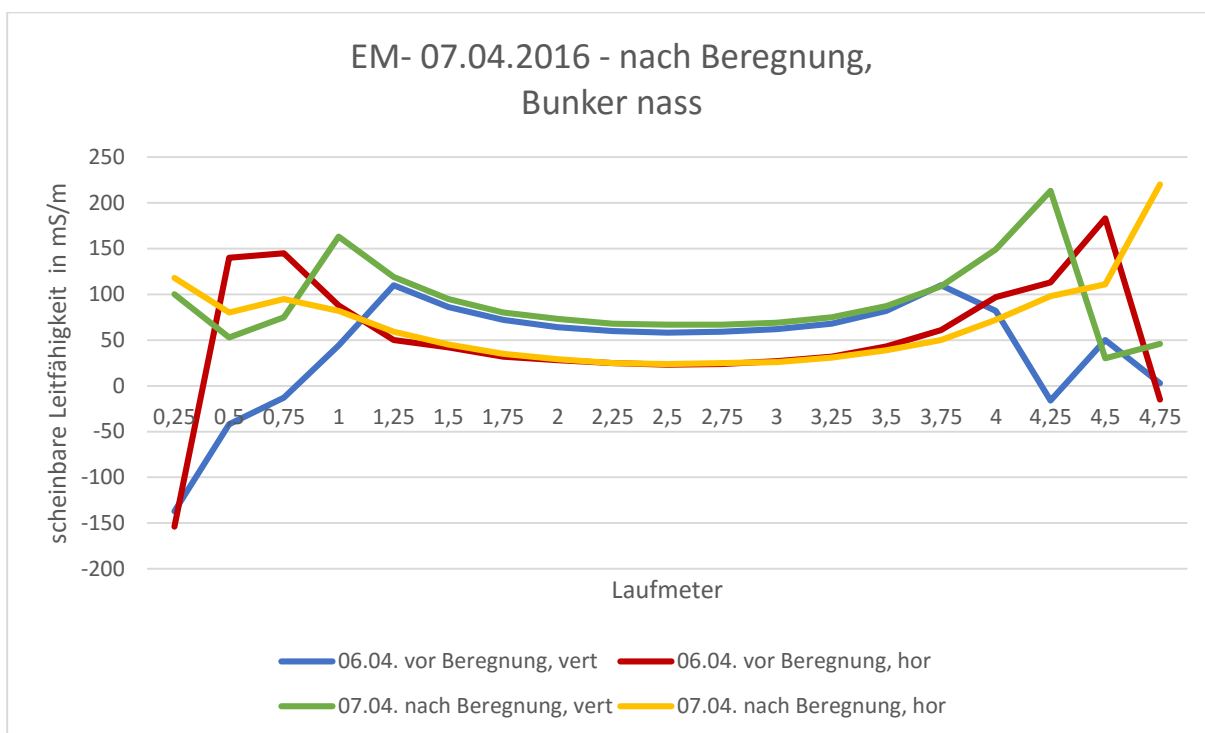


Abbildung 27: Elektromagnetik: EM-38 Bunker nass vor und nach Beregnung mit 15 Liter pro Quadratmeter, Messungen normal auf das Profil. Randbereich gestört durch Stahlbeton.

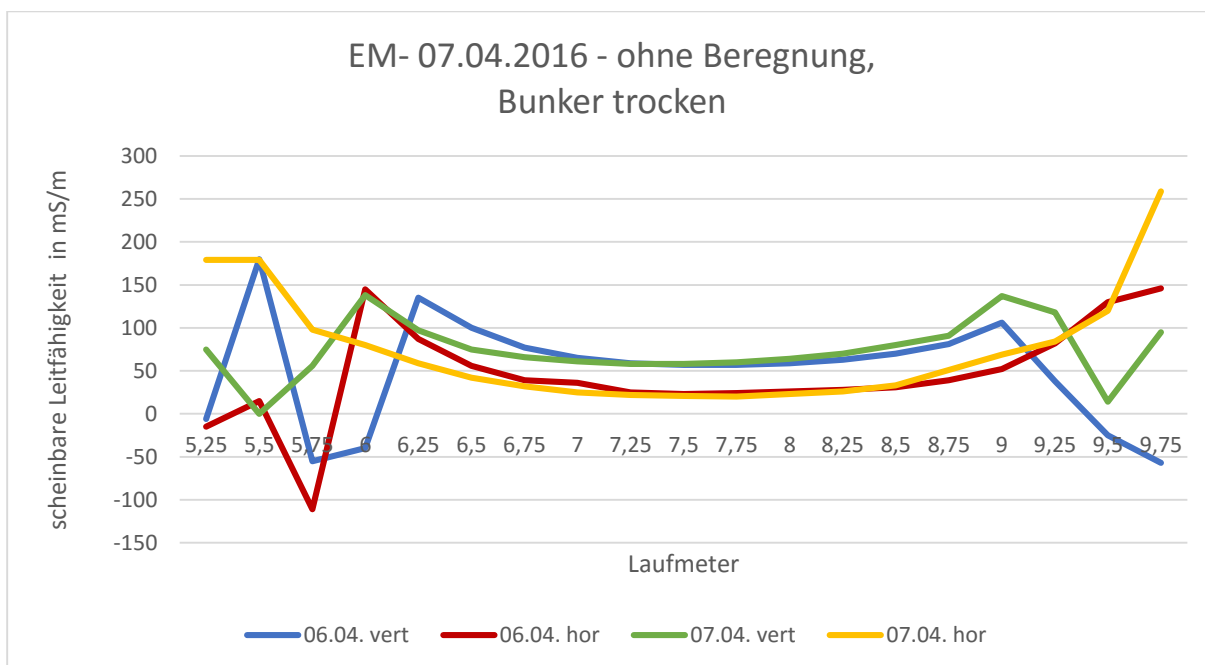


Abbildung 28: Elektromagnetik: EM-38 Bunker trocken Vergleich der beiden Tage, Messungen normal auf das Profil. Randbereich gestört durch Stahlbeton.

4.3.2 Zusammenfassung

Die Messungen der Elektromagnetik zeigen zwar wie genau und präzise Anomalien, verursacht durch metallische Störkörper gemessen werden können, aber eben dieser Störeinfluss, verursacht durch die Bewehrung der Betonwände, macht es auch den Messungen der Elektromagnetik unmöglich, Veränderungen, welche durch Gasaustritte induziert sind, zu erfassen. Der einzige Bereich, wo die Störungen durch diese metallischen Störeinflüsse außer Acht gelassen werden könnten, die Mitte, weist keine verwertbaren Unterschiede der Messwerte auf. Wie in den oben gezeigten Abbildungen gut zu erkennen ist, weisen die Kurven im Bereich der Mitte bei den unterschiedlichen Bedingungen keine Abweichung auf. Aufgrund dieser Umstände wird auch die Methode der Elektromagnetik für die weiteren Versuche am Testgelände als ungeeignet eingestuft und es gilt ebenso als fraglich, ob diese Methode in der Praxis für ungestörte Bereiche geeignet wäre. Diese Art der weiteren Untersuchungen ist jedoch nicht Teil dieser Arbeit und kann bei konkretem Bedarf an die Erkenntnisse dieser Arbeit anknüpfen.

4.4 Eigenpotential

Die Messungen des Eigenpotentials gliedern sich in zwei unterschiedliche Arten der Messung. Der erste Teil der Messungen erfolgte am 06.04.2016 entlang des Messprofils, wobei einmal eine Basis bei Laufmeter 20 und im Vergleich dazu eine andere Basis im NW des trockenen Sandbunkers gemessen wurde. Die Messungen haben einen Abstand von 1,0 m. Für den zweiten Teil der Messungen wurde der zeitliche Verlauf des Eigenpotentials einer Elektrode gemessen. Zum Schutz vor den direkten Einflüssen durch die Beregnung wurde die Eigenpotentialsonde mit einem Plastikbeutel geschützt.

4.4.1 Messungen entlang des Profils

Die Messungen des Eigenpotentials entlang des Profils sind in Abbildung 29 dargestellt. Es zeigt sich derselbe Trend der Messungen für eine Basiselektrode bei Laufmeter 20 und für eine Basiselektrode im NW des trockenen Bunkers.

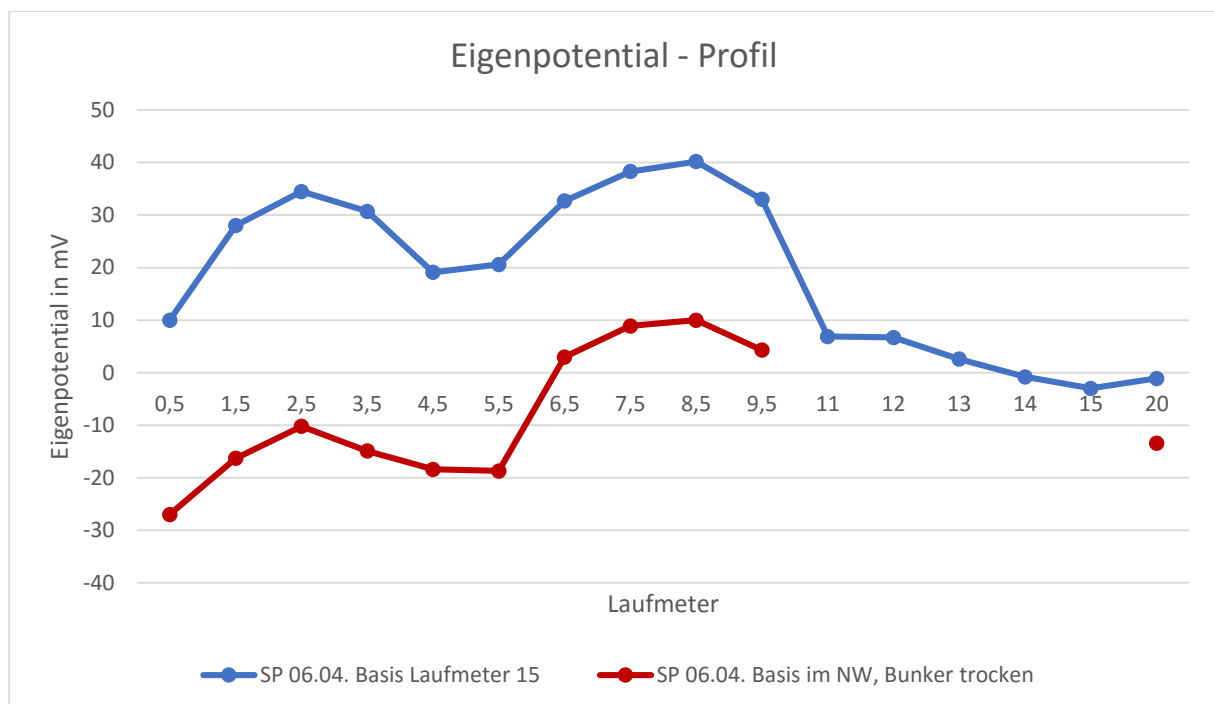


Abbildung 29: Eigenpotential entlang des Süd-Nord Profils. Messabstand 1,0 m, Basiselektrode bei Laufmeter 20 und im NW des trockenen Bunkers. Erhöhte Eigenpotentialwerte in der Mitte der beiden Bunker.

Da sich durch Beregnung oder Begasung bei weiteren Messungen keine Rückschlüsse ziehen ließen, wurden die weiteren Messungen für eine Elektrode im Zentrum des nassen Bunkers über die Zeit durchgeführt.

4.4.2 Messungen über die Zeit

Die Messungen über Zeit erfolgen in zwei verschiedenen Messintervallen.

4.4.2.1 Messintervall im 10 er Minuten Bereich, maximal 30 Minuten.

Dieser Abschnitt zeigt den zeitlichen Verlauf des Eigenpotentials einer Messelektrode im Zentrum des nassen Bunkers. Die Messungen erfolgten am 07.04.2016 und am 08.04.2016. Dafür wurde im Abstand von maximal 30 Minuten das Eigenpotential gemessen. Das Ergebnis dieser Messungen für den 07.04.2016 ist in Abbildung 30 dargestellt

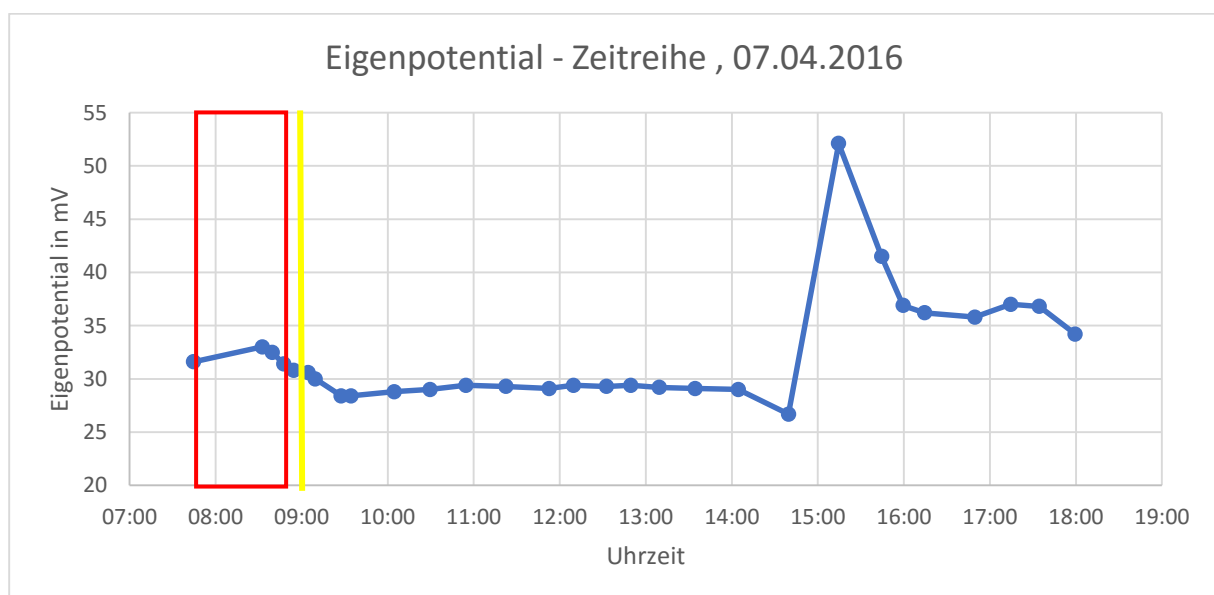


Abbildung 30: Eigenpotential: Zeitreihe 07.04.2016. Der rote Bereich kennzeichnet die Beregnung und die gelbe Linie den Start der Begasung. Erhöhtes Eigenpotential durch Beregnung und rapider Anstieg durch Fehlmessung.

In der Zeit von 7:45 bis 8:50 Uhr erfolgte eine Beregnung mit ca. 10 Liter pro Quadratmeter. Nach dem Ende der Beregnung erfolgte die Begasung mit ca. 1 Liter pro Minute. Über den gesamten Zeitraum wurde parallel zur Eigenpotential Messung

die Oberflächengaskonzentration gemessen. Die Gaskonzentration an der Oberfläche war über den ganzen Zeitraum sehr konstant. Beim Eigenpotential zeigte sich ein fast konstanter Wert, der nur zu Beginn durch die Beregnung gestört schien. Bei der Messung um 15:15 Uhr trat jedoch ein rapider Anstieg des Eigenpotentials auf, welcher zunächst mit der Absaugung des Erdgases aus dem Erdreich an den drei Messpunkten (A, B und C) in Verbindung zu stehen schien. Abbildung 31 zeigt eine Skizze mit der Lage dieser drei Messpunkte. Das hier auftretende Phänomen ließ sich allerdings in keiner der folgenden Messungen auch nur ansatzweise reproduzieren. Es wird daher als Fehlmessung interpretiert, welche vermutlich mit einer undichten Eigenpotential-Sonde in Verbindung steht. Diese Sonde wurde für alle weiteren Messungen durch eine andere ersetzt, da sich zeigte, dass sie einen überdurchschnittlich hohen Kupfersulfatverbrauch aufwies.

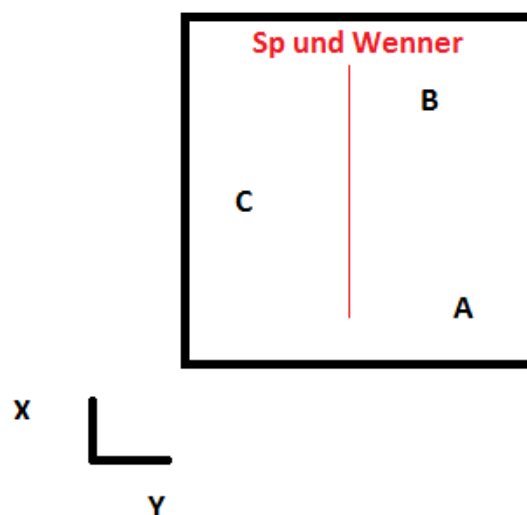


Abbildung 31: Lage der Messpunkte (X /Y): A (1,2 m/4,5 m), B (3,7 m / 3,7 m) und C (2,9 m / 0,9 m)

Abschließend für das lange Messintervall ist die Messung vom 08.04.2016 in Abbildung 32 dargestellt. Hier ebenfalls gut zu erkennen ist der Trend des fast konstanten Messwertes beim Eigenpotential. Dieser wird lediglich durch eine Beregnung von 12:00 bis 13:20 Uhr mit ca. 20 Litern pro Quadratmeter gestört.

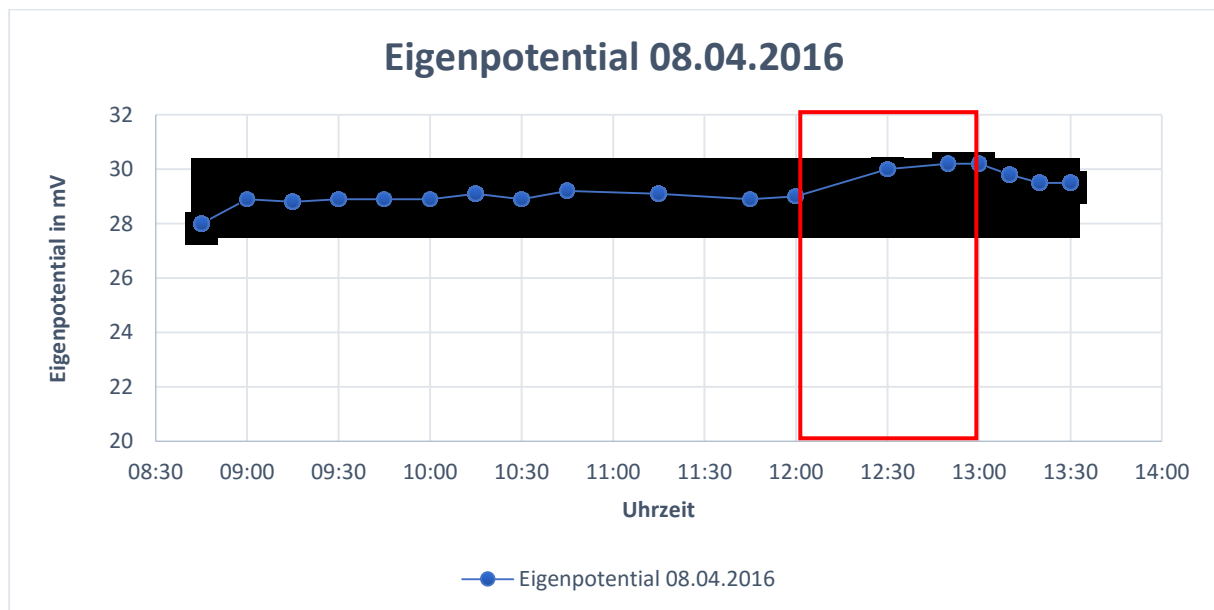


Abbildung 32: Eigenpotential: Zeitreihe 08.04.2016. Der rote Bereich kennzeichnet die Beregnung.

Der Trend, der sich durch eine Beregnung ergab, war in allen Messreihen mit einem Anstieg des Eigenpotentials zu verfolgen. Da aufgrund dieser Diagramme jedoch keine Aussage über das Austreten von Gas getroffen werden konnte, wurde in Anlehnung an das Patent *EP 0212275 A2; Verfahren zur Bestimmung der Grenzen von unterirdischen Erdgas-Lagerstätten*, das Messintervall auf 4 Sekunden reduziert und mittels Datalogger Software am Computer aufgezeichnet.

4.4.2.2 Messintervall 4 Sekunden

Um die Messungen mit dem kurzen Messintervall von 4 Sekunden zu verbessern, wurde eine zusätzliche Eigenpotential-Elektrode außerhalb, im ungestörten Boden, aufgestellt. Diese dient als Referenz für einen unbeeinflussten Messzyklus und zeigt nur die normale Variation des Eigenpotentials. Diese Messungen wurden an drei

aufeinanderfolgenden Tagen, beginnend mit dem 12.04.2016 durchgeführt. Die Bezeichnung „SP Außen“ bezieht sich dabei immer auf die Referenz-Elektrode, deren Lage ebenso wie die der Messelektrode „SP Bunker“ in Abbildung 21 gezeigt wird. Da vor allem bei den Messungen der Referenz-Elektrode, verursacht durch die serielle Schnittstelle mit dem Computer immer wieder Fehlmessungen mit einem Wert von „0“ auftraten, wurden die Messdaten der Referenz-Elektrode zuerst dahingehend gefiltert, dass diese Fehlmessungen eliminiert wurden. Abbildung 33 zeigt einen Ausschnitt vom 12.04.2016 vor und nach der Filterung.

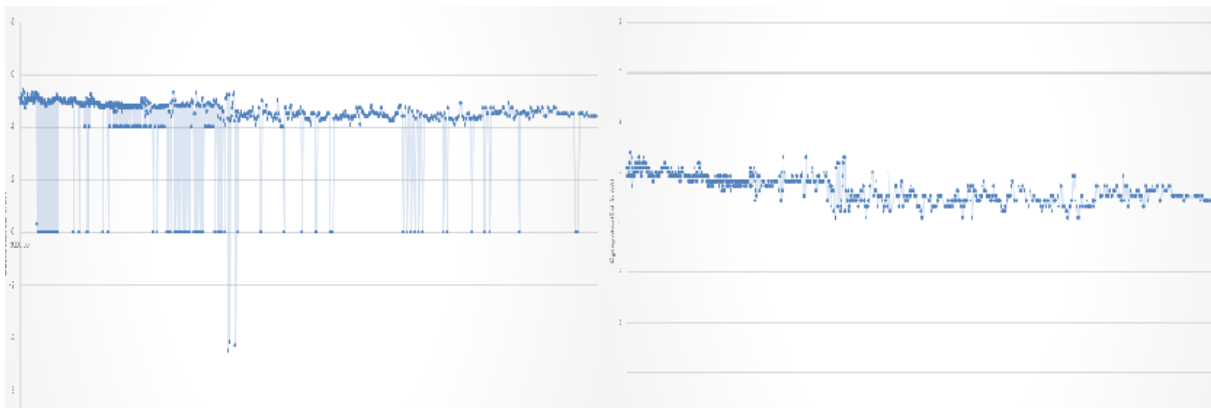


Abbildung 33: Vergleich ungefilterte Daten (links) mit gefilterten Daten (rechts) der Referenz-Elektrode.

12.04.2016

Am 12.04.2016 erfolgte in der Zeit von 12:00 bis 13:00 Uhr eine Bewässerung des Versuchsgeländes mit ca. 40 Litern pro Quadratmeter. Der Versuch wurde ohne Gas durchgeführt. Die Messergebnisse für die Referenz-Elektrode (Abbildung 34) und die Elektrode im Bunker (Abbildung 35) zeigen einen deutlichen Unterschied im Noise-Level der beiden Bereiche. Die Lücke der Messdaten des Bunkers entstand durch einen kurzzeitigen Ausfall der EDV-Anlage. Beim Bunker zeigt sich während der Berechnung wie in den vorangegangenen Messungen ein leichter Anstieg des Eigenpotentials.

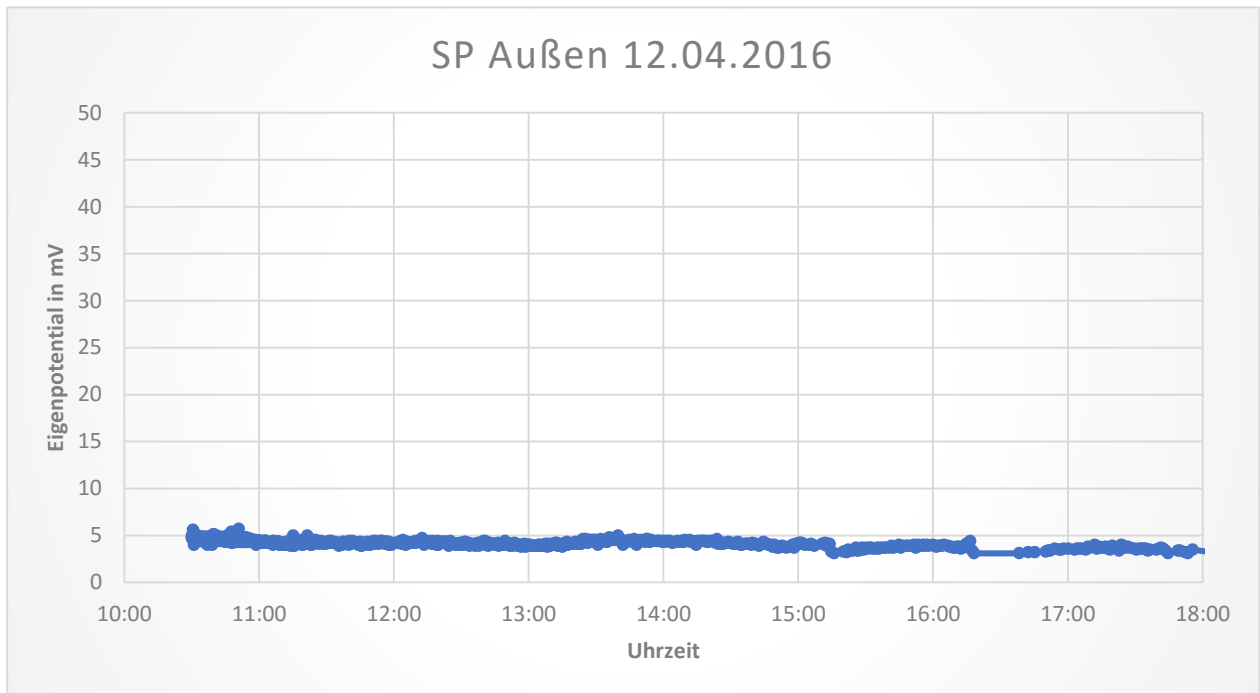


Abbildung 34: Eigenpotential: Referenz-Elektrode am 12.04.2016.

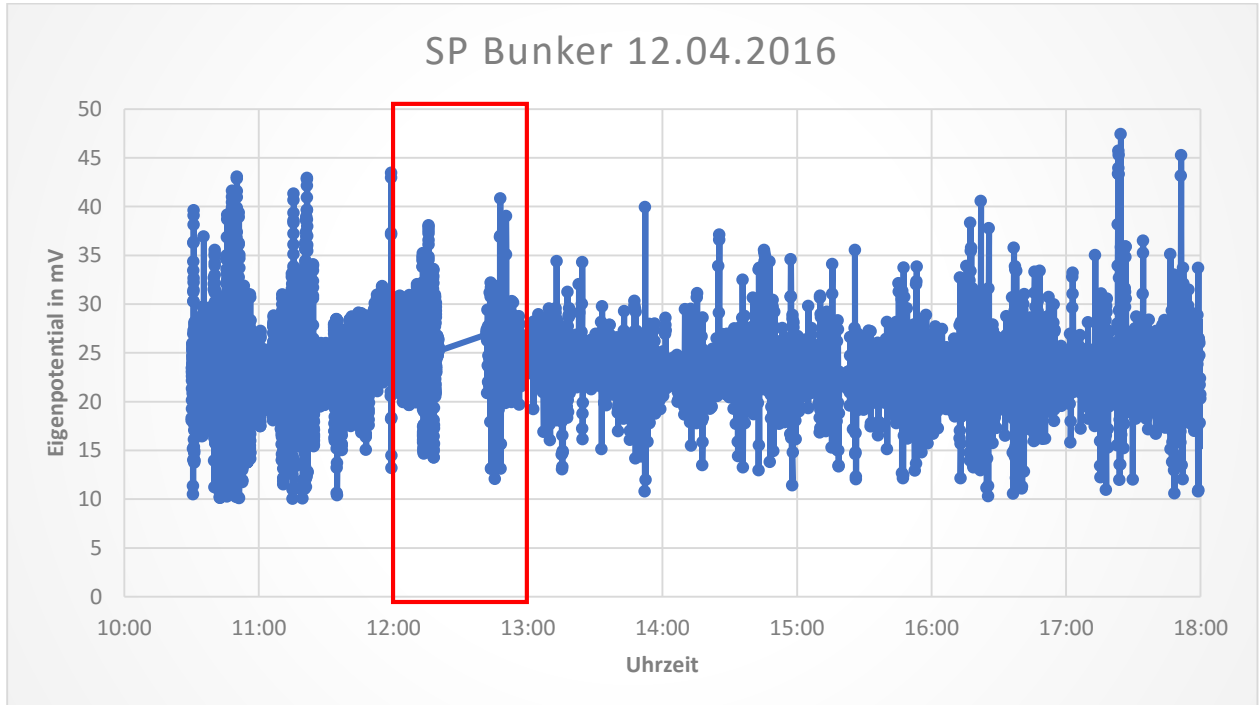


Abbildung 35: Eigenpotential: Bunker Elektrode am 12.04.2016. Der rot markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung mit leichtem Anstieg des Eigenpotentials. Messlücke durch Ausfall der EDV Anlage.

Da eine Identifizierung der gasführenden Bereiche anhand dieser Messwerte nicht möglich war, wurde die Standardabweichung der Messwerte über einen Zeitraum von 60 Sekunden ermittelt. Abbildung 36 zeigt die Standardabweichung der Elektrode im Bunker.

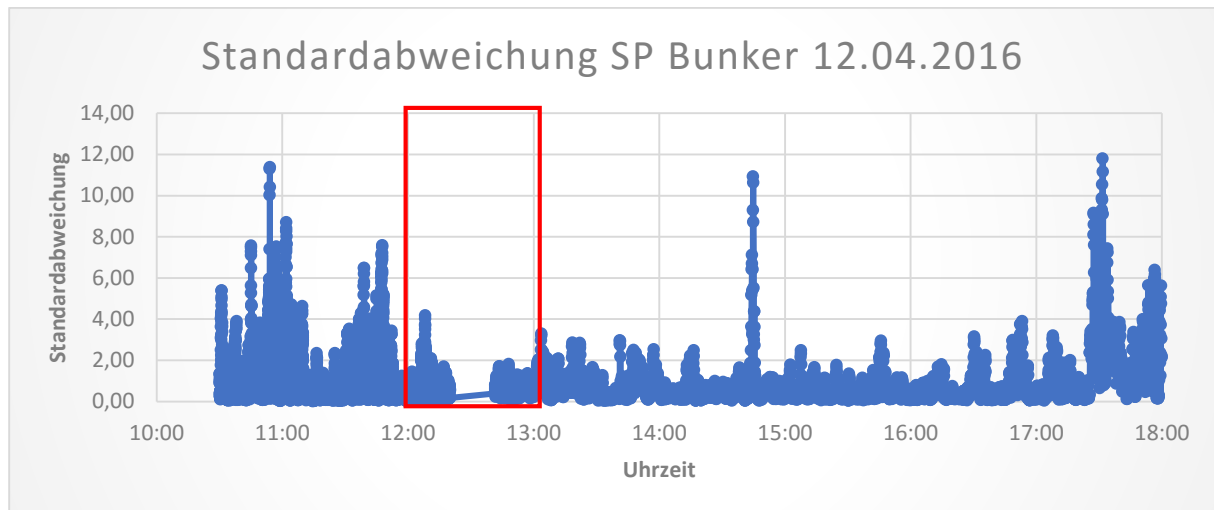


Abbildung 36: Standardabweichung SP Bunker am 12.04.2016. Der rot markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung. Messlücke durch Ausfall der EDV Anlage.

In dieser Darstellung der Standardabweichung ist gut zu erkennen, dass bis auf wenige hohe Werte die Standardabweichung sehr niedrig und ruhig verläuft.

13.04.2016

Für den 13.04.2016 wurde das Versuchsgelände wie am Vortag, mit ca. 40 Litern pro Quadratmeter, in der Zeit von 11:00 bis 12:00 Uhr beregnet. Zusätzlich wurde ab 13:00 Uhr das Auftreten einer Gasleckage mit ca. 1 Liter pro Minute simuliert. Abbildung 37 zeigt die Messungen der Referenz-Elektrode für diesen Tag.

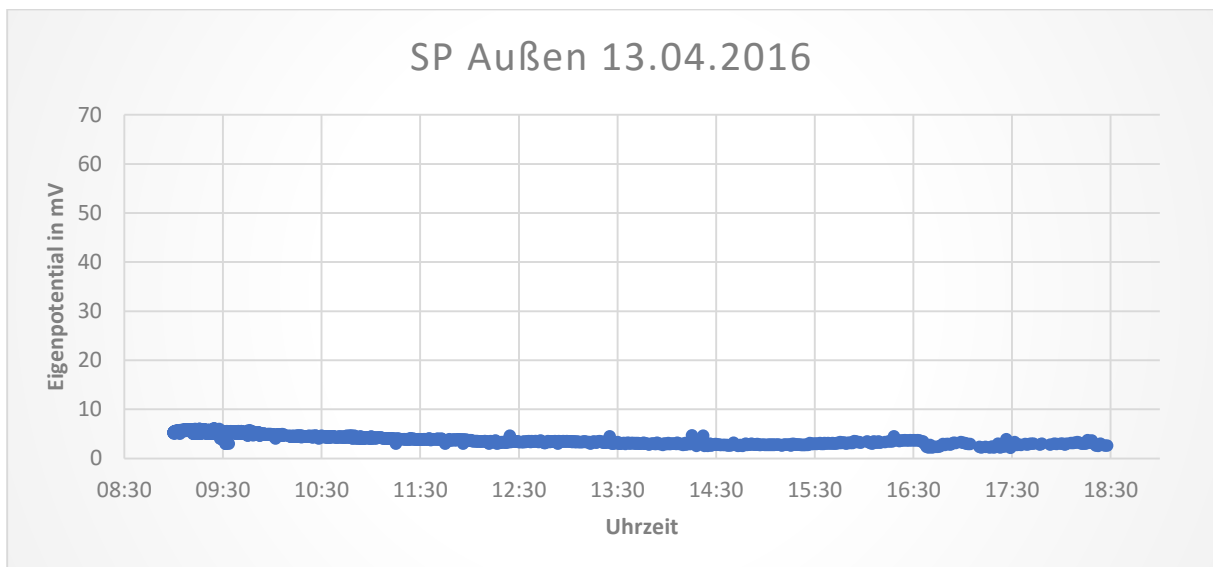


Abbildung 37: Eigenpotential: Referenz-Elektrode am 13.04.2016.

In Abbildung 38 und Abbildung 39 sind zuerst die Rohdaten der Bunkermessungen und dann die Standardabweichung derselben Messung über einen Zeitraum von 60 Sekunden dargestellt. Der leichte Anstieg während der Berechnung war bei genauer Betrachtung wieder zu identifizieren.

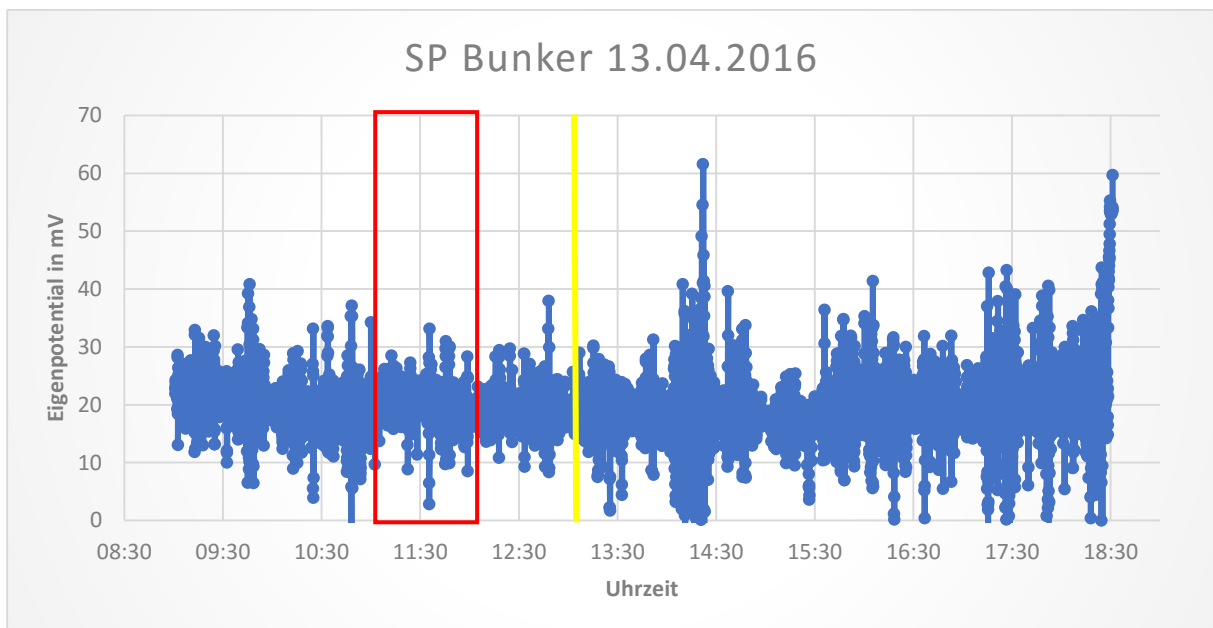


Abbildung 38: Eigenpotential: Bunker Elektrode am 13.04.2016. Der rot markierte Bereich kennzeichnet die Berechnung und die gelbe Linie den Beginn der Begasung.

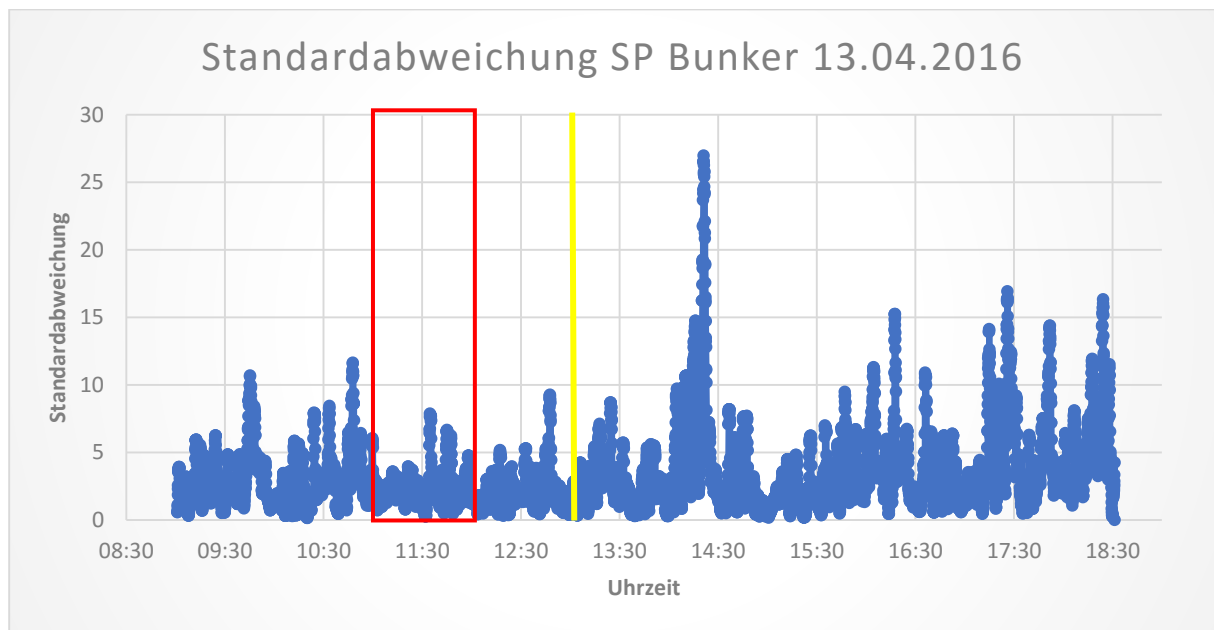


Abbildung 39: Standardabweichung SP Bunker am 13.04.2016. Der rot markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung und die gelbe Linie den Beginn der Begasung. Es ist ein deutlicher Anstieg des Noise Levels kurz nach Beginn der Begasung um 13:00 Uhr zu erkennen.

14.04.2016

Da es in der Nacht zu einem leichten Niederschlag im Gebiet mit etwa 6 mm pro Quadratmeter kam, wurde für diesen Tag entschieden, die Beregnungsmenge zu reduzieren. An diesem Tag sollte es lediglich darum gehen, den Effekt des Gasaustrittes im Noise Level zu bestätigen. Die Begasung des Messbereiches mit ca. 1 Liter pro Minute erfolgte den ganzen Tag und in der Zeit von 13:00 bis 13:30 Uhr wurde mit ca. 10 Litern pro Quadratmeter bewässert. Die Messlücke in der Zeit von 10:20 bis 11:05 Uhr war aufgrund von Mäharbeiten im Bereich der Basis Elektrode notwendig. Abbildung 40 zeigt den Verlauf des Eigenpotentials der Referenz-Elektrode.

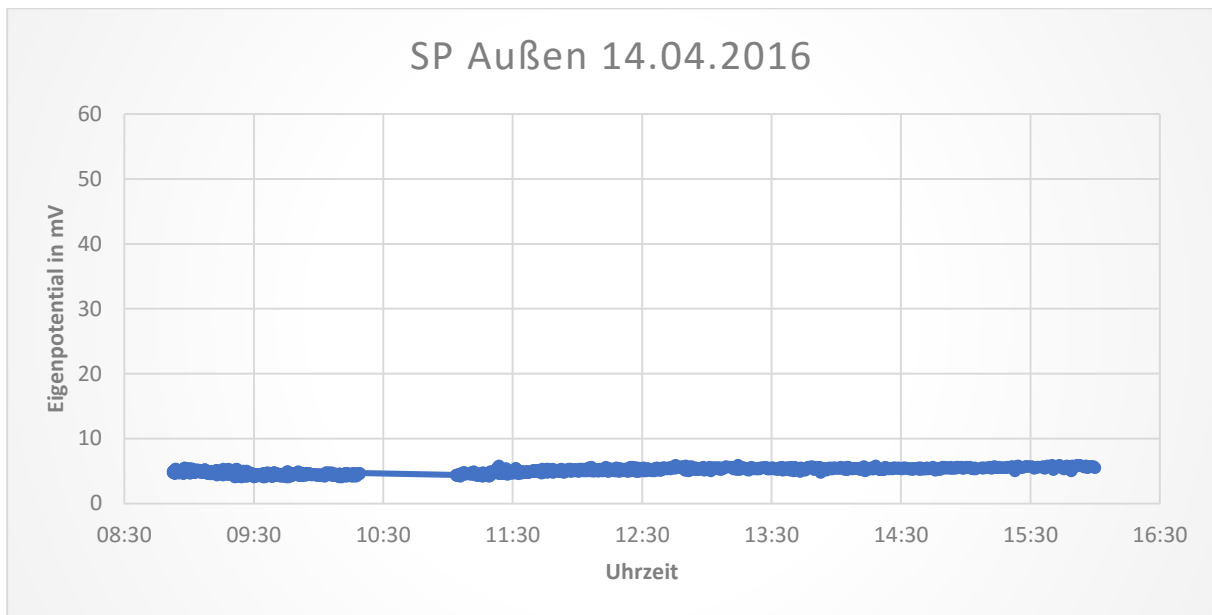


Abbildung 40: Eigenpotential: Referenz-Elektrode am 14.04.2016. Unterbrechung der Messung durch Mäharbeiten im Bereich der Basis Elektrode.

Die Abbildung 41 zeigt die Rohdaten der Messung im Bunker am 14.04.2016 und Abbildung 42 die daraus berechnete Standardabweichung über einen Zeitraum von 60 Sekunden. Bei genauer Betrachtung war auch hier der leichte Anstieg der Messwerte im Verlauf der Beregnung festzustellen.

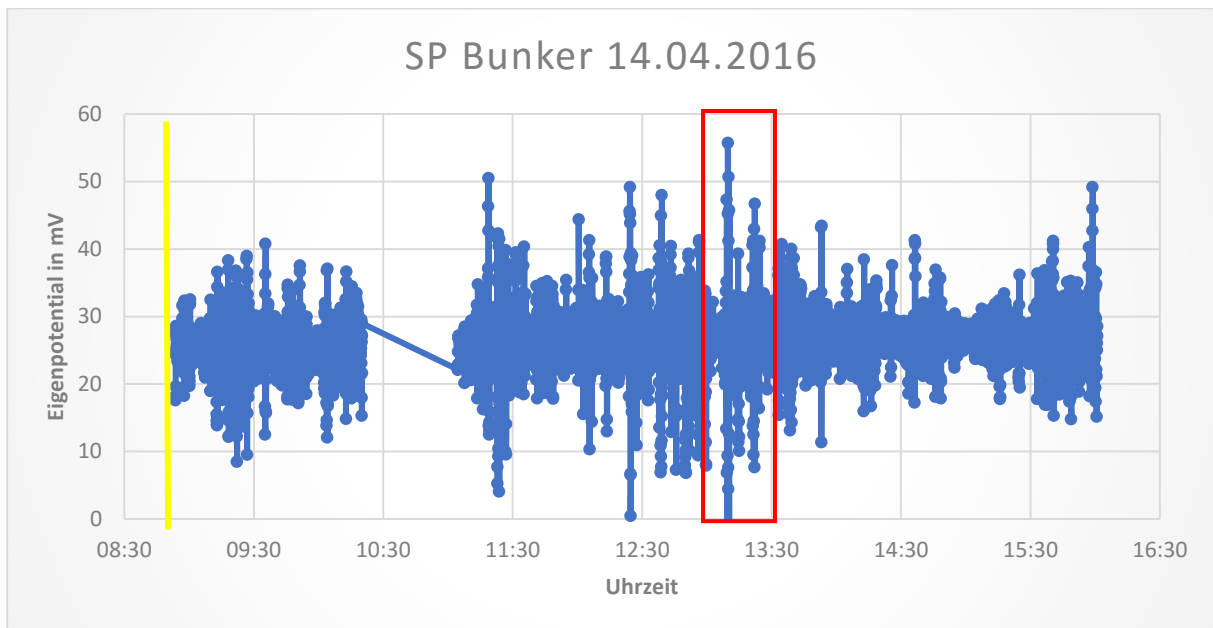


Abbildung 41: Eigenpotential: Bunker Elektrode am 13.04.2016. Der rot markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung und die gelbe Linie den Beginn der Begasung. Unterbrechung der Messung durch Mäharbeiten im Bereich der Basis Elektrode.

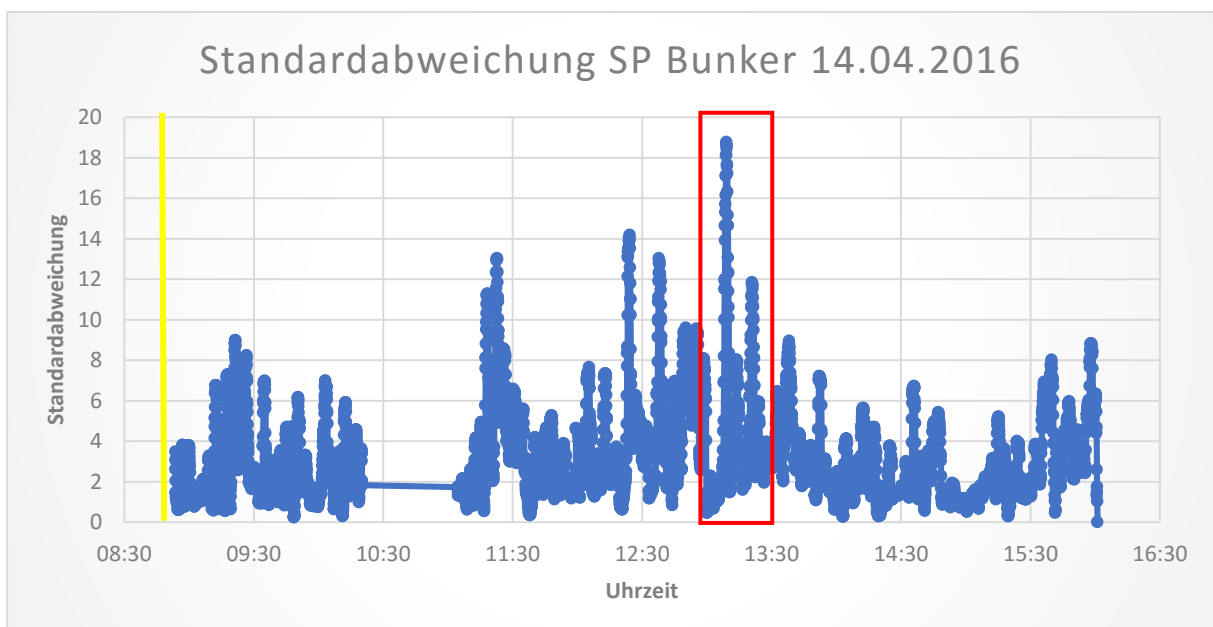


Abbildung 42: Standardabweichung SP Bunker am 14.04.2016. Der rot markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung und die gelbe Linie den Beginn der Begasung. Erhöhtes Noise Level über den ganzen Tag. Unterbrechung der Messung durch Mäharbeiten im Bereich der Basis Elektrode.

4.4.3 Zusammenfassung

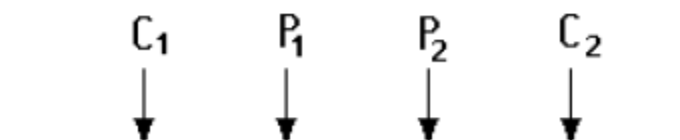
Die Messungen entlang eines Profils sind zwar dazu geeignet, die Armierung als Störkörper im Zuge einer Exploration zu orten, aber erscheinen als ungeeignet um damit Leckagen an Gasleitungssystemen zu finden. Mit dem Einsatz der Eigenpotentialmethode können jedoch bei ausreichendem kleinem Messintervall, hier wurden 4 Sekunden gewählt, Aussagen über ein Vorhandensein von Erdgas im Untergrund getroffen werden. Das Ansprechen der Eigenpotentialmethode, durch einen deutlich höheren Noise Level, erfolgte wie am 13.04.2016 gezeigt, sehr rasch nach dem Auftreten der Leckage. Die Anzeige der Leckage mittels Gasdetektor Laser-One erfolgte zwar etwas schneller, dennoch könnte diese Methode sehr gut für ein längeres Monitoring von Verdachtsflächen oder Bereichen, die besondere Aufmerksamkeit erfordern, geeignet sein. Der kurze Anstieg des Eigenpotentials während eines Niederschlags hätte auf diese Art der Überwachung keinen Einfluss. Somit könnte ein Monitoring mittels Eigenpotential in einigen Fällen eine kostengünstige Art der Überwachung sein.

4.5 Geoelektrik und Multielektroden-Geoelektrik

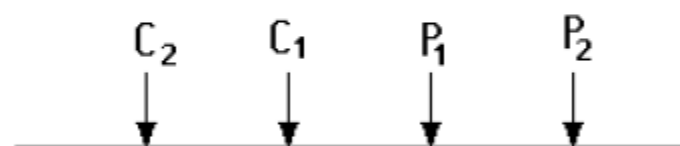
Die geoelektrischen Messungen wurden ab dem 07.04.2016 über den gesamten Zeitraum der Versuche gemessen. Die Messungen gliedern sich in zwei aufeinanderfolgende Teile. So wurde im ersten Teil bis zum 15.04.2016 eine Widerstandsmessung über die Zeit auf den Mittelpunkt des Bunkers durchgeführt. Diese Widerstandsmessung erfolgte mit einem Array des Typs Wenner-Alpha, mit einem Abstand von $a=1\text{m}$ und ab dem 11.04.2016 als Tiefensondierung mit drei Anordnungen: $a=0,5\text{m}$, $a=1,0\text{m}$ und $a=1,5\text{m}$. Als zweiter Ansatz wurde eine Multielektroden-Geoelektrik durchgeführt. Dies war notwendig, da die Messung aus dem ersten Teil in Verbindung mit den Oberflächengasmessungen darauf schließen ließen, dass vor allem nach der Beregnung das Gas an bestimmten Bahnen bevorzugt seinen Weg an die Oberfläche sucht. Gemessen wurde die

Multielektroden-Geoelektrik in den Anordnungen: Wenner-Alpha, -Beta und -Gamma, welche in Abbildung 43 gezeigt sind. Die Messungen mit der Multielektroden-Geoelektrik sollten somit helfen sowohl das Eindringen und Versickern des Niederschlages, als auch dessen Auswirkung auf eine eventuell vorhandene Leckage, besser zu verstehen. Des Weiteren galt es zu untersuchen ob eine Leckage zu einem schnelleren Auftrocknen des Bodens im Bereich der Leckage führen würde. Zum Schutz vor der direkten Beregnung wurde nach dem Aufbau der Wenner Arrays jede Elektrode durch einen Plastikbeutel geschützt.

a) . Alpha



b) . Beta



c) . Gamma

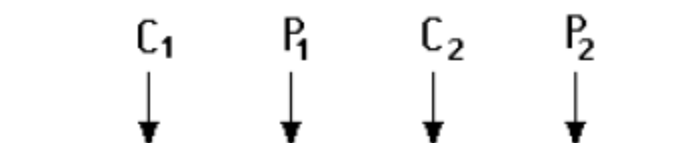


Abbildung 43: Anordnung der Elektroden für Wenner Alpha, Beta und Gamma Arrays. Manual Res2dinv Geotomo Software 2010.

4.5.1 Geoelektrische Widerstandsmessung und Sondierung

Abbildung 44 zeigt den Aufbau für eine und für drei Tiefenstufen, sowie die dafür verwendeten Elektrodenkabel und ein Erdungsmessgerät welches zur Messung verwendet wurde. Gemessen wurde dabei der scheinbare spezifische Widerstand. Da hier noch keine Inversionsverfahren zum Einsatz kamen, ergab sich unter der Annahme eines homogenen Aufbaues im Testgelände der spezifische Widerstand als Produkt des scheinbaren spezifischen Widerstandes mit dem Geometriefaktor (Gleichung(6)).



Abbildung 44: Geoelektrik: links oben: Wenner-Alpha: $a=1,0\text{m}$ und SP; rechts oben: Wenner-Alpha: $a=0,5\text{m}$, $a=1,0\text{m}$ und $a=1,5\text{m}$; links unten: Erdungsmessgerät; rechts unten: Elektroden mit Beschriftung für Wenner-Alpha rechts oben.

07.04.2016

Da vor Beginn dieser Messung das Testgelände für den gesamten Winter mit der LKW-Plane bedeckt war, wird davon ausgegangen, dass keine äußerlichen Einflüsse vorhanden waren und es sich um einen sich im Gleichgewicht befindenden Boden handelt. Nach Beginn der Messung wurde das Gelände für eine Stunde mit ca. 10 Litern pro Quadratmeter bewässert und danach begast. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 45 dargestellt.

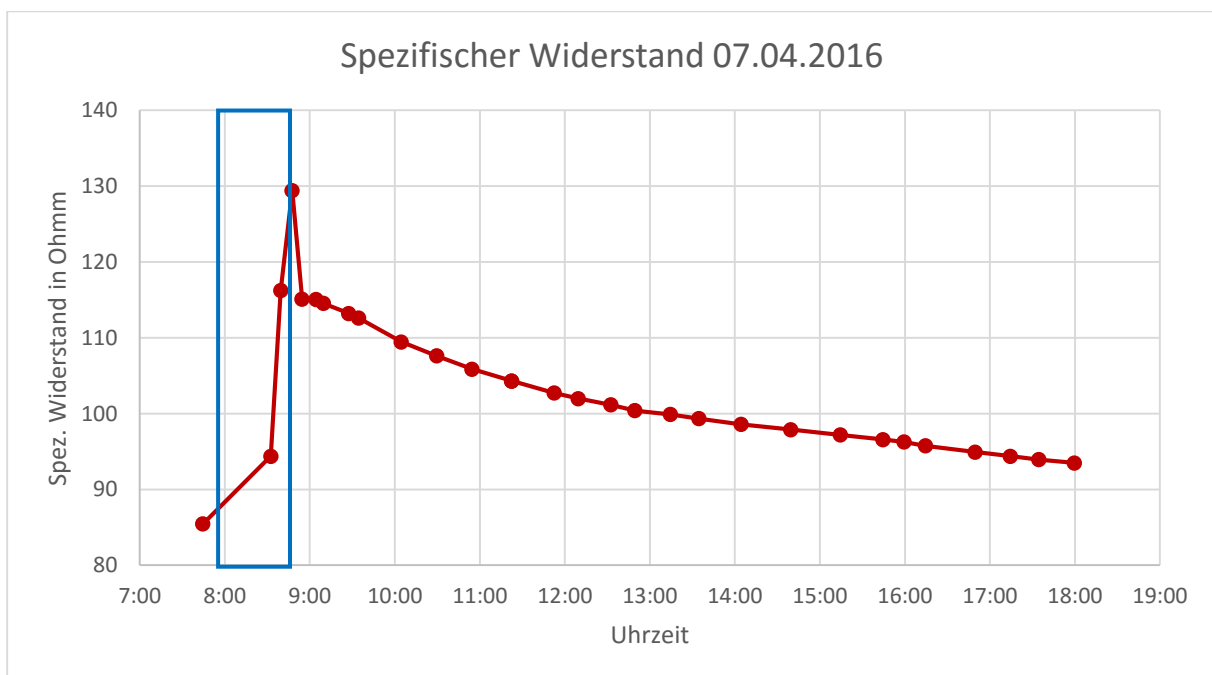


Abbildung 45: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. Wenner-Alpha $a=1,0\text{m}$ am 07.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung mit einem deutlichen Anstieg des Widerstandes.

08.04.2016

Der Ausgangswert zu Beginn der Messung am 08.04.2016 hatte über Nacht beinahe wieder den Basiswert der Messung vom Vortag erreicht, lag aber dennoch trotz Beregnung am Vortag leicht über diesem. Dieser Trend, der sich sehr langsam dem Basiswert näherte, setzte sich weiter fort, bis zur erneuten Beregnung mit ca. 20 Litern pro Quadratmeter, also der doppelten Menge des Vortages. Der Verlauf dieses Tages ist in Abbildung 46 gezeigt. Das Ende der Messungen um 13:30 Uhr war notwendig, da es zu rasch einsetzendem Regen in Verbindung mit einem Gewitter kam.

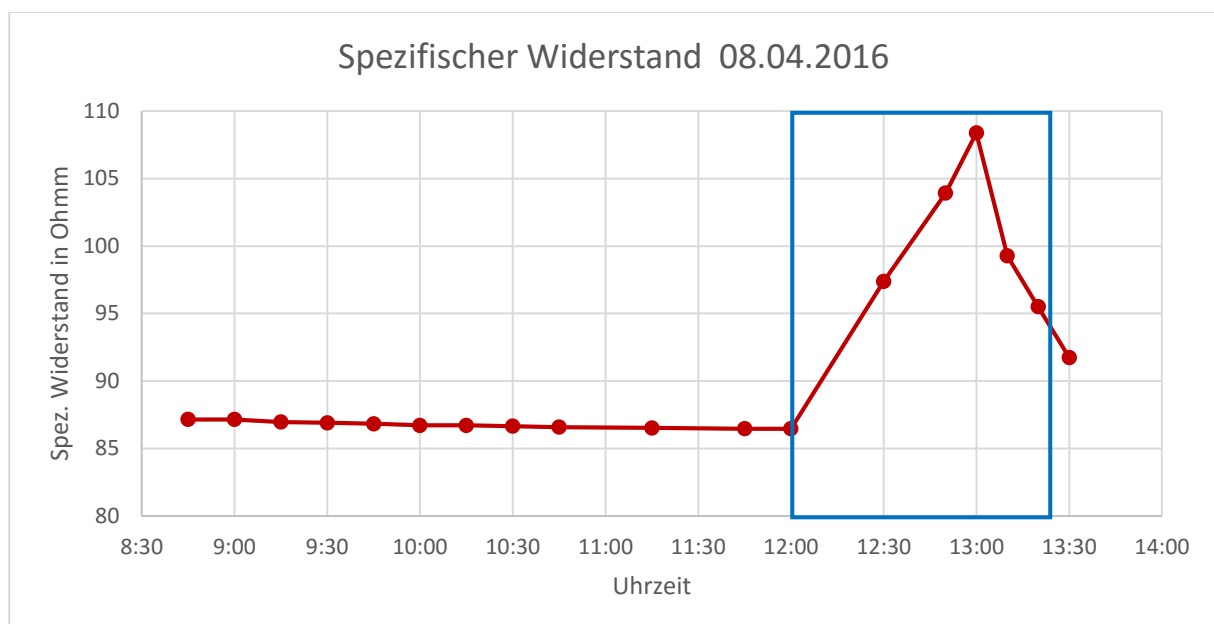


Abbildung 46: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. Wenner-Alpha $a=1,0\text{m}$ am 08.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung, mit Anstieg des Widerstandes zu Beginn der Beregnung und Abfall bei erhöhter Niederschlagsmenge.

Da es an beiden Messtagen zu einem deutlichen Anstieg des Widerstandes durch die Bewässerung kam, was genau gegenläufig zum erhofften Effekt bei der Beregnung war, wurde für die nächsten Messungen zwei zusätzliche Tiefenstufen ($a=0,5\text{ m}$ und $a=1,5\text{ m}$) gemessen. In der Hoffnung, so ein besseres Verständnis für die Vorgänge beim Versickern des Wassers zu bekommen.

11.04.2016

Die Messung erfolgte in drei Tiefenstufen: N=1, N=2 und N=3, wobei N=1 einem $a=0,5$ m, N=2 einem $a=1,0$ m und N=3 einem $a=1,5$ m beim Wenner-Alpha Array entsprechen. An diesem Tag wurde ohne Beregnung und Begasung gearbeitet. Die Messungen erfolgen in einem Abstand von ungefähr 15 Minuten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 47 zu sehen.

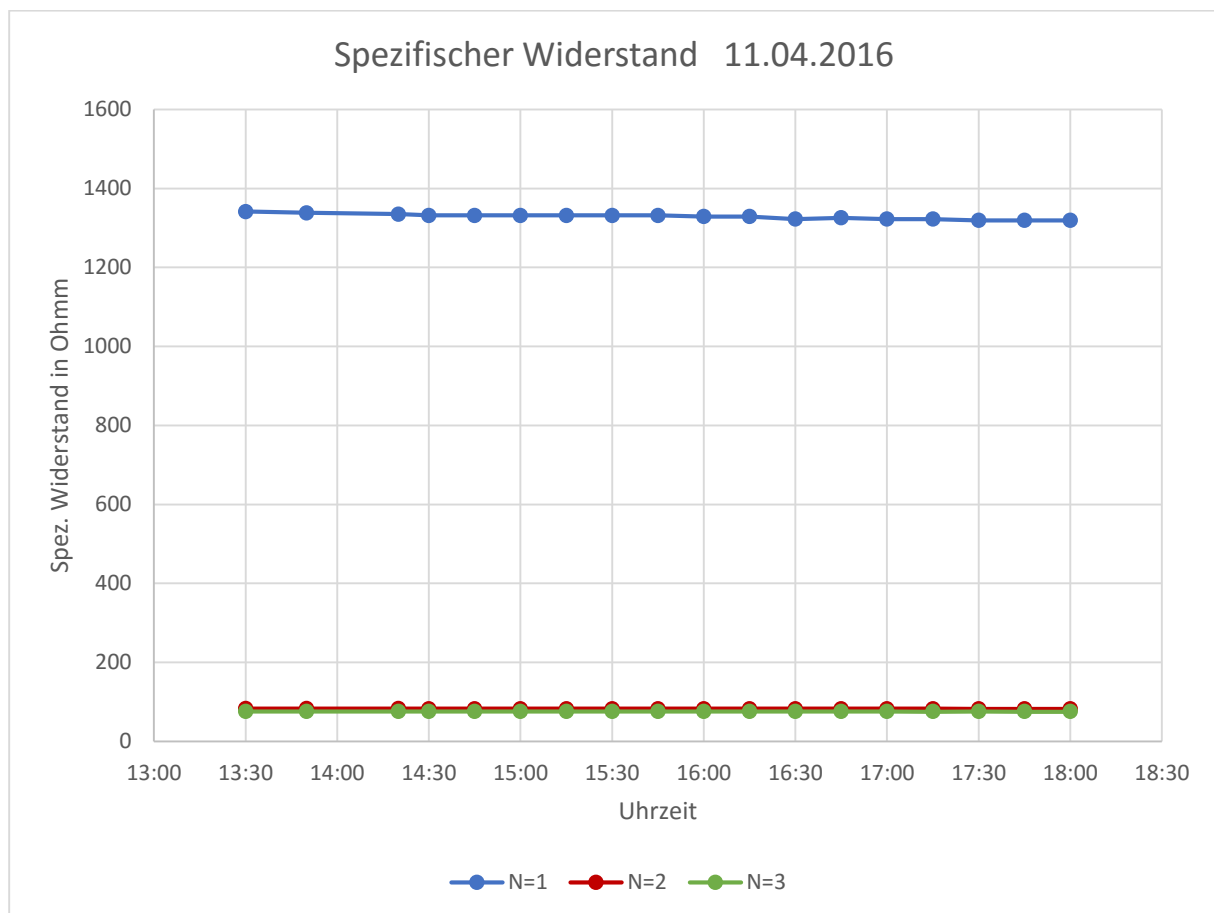


Abbildung 47: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=0,5$ m(N=1), $a=1,0$ m(N=2) und $a=1,5$ m(N=3) gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 11.04.2016.

Der Wert von N=2 ist dabei etwas höher als jener von N=3.

12.04.2016

Am 12.04.2016 wurden die Messungen ohne Begasung, aber mit Beregnung von 40 Litern pro Quadratmeter in der Zeit von 12:00 bis 13:00 Uhr durchgeführt. Zur besseren Veranschaulichung ist in Abbildung 48 der Verlauf aller drei Tiefenstufen und in Abbildung 49 der Verlauf ohne N=1 dargestellt. Da bei den vorangegangenen Messungen die größten Veränderungen während und nach der Beregnung auftraten, wurde für den Zeitraum der Beregnung und kurz danach das Messintervall auf 5 Minuten reduziert und dann wieder auf die 15 Minuten angehoben.

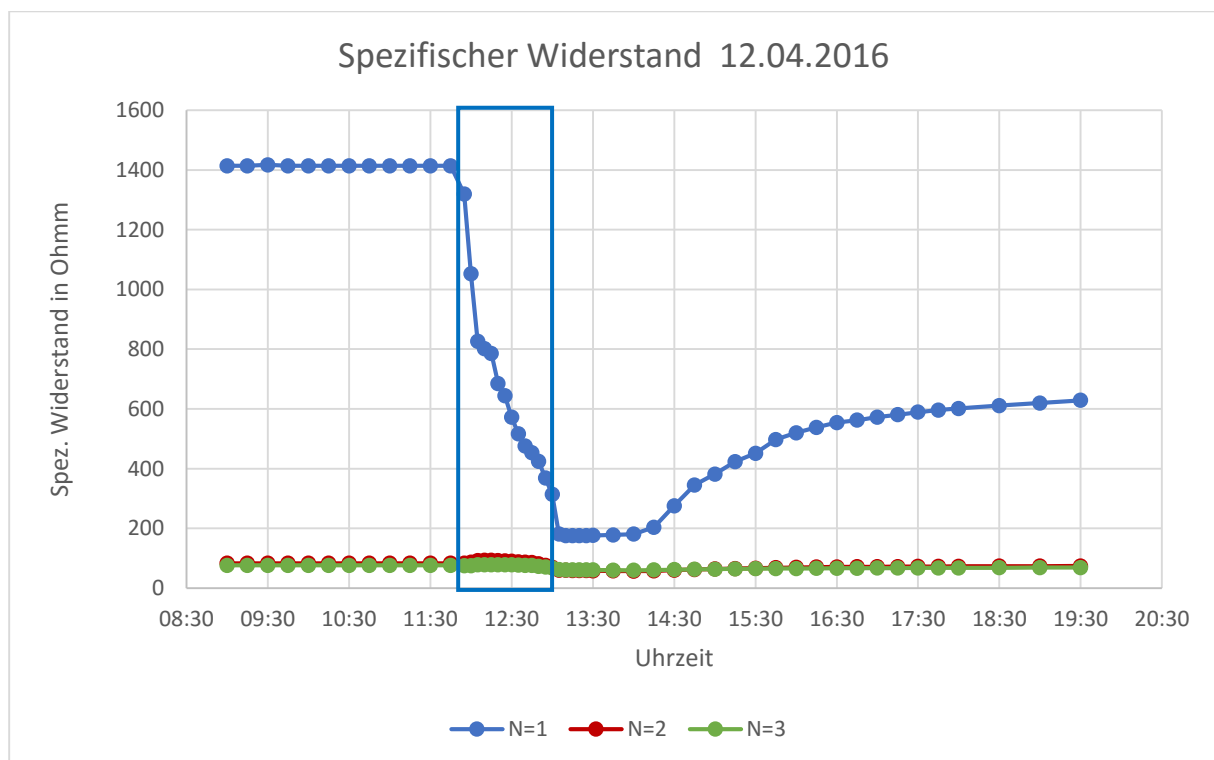


Abbildung 48: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=0,5\text{m}(N=1)$, $a=1,0\text{m}(N=2)$ und $a=1,5\text{m}(N=3)$ gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 12.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung, mit einer Abnahme des Widerstandes für N=1.

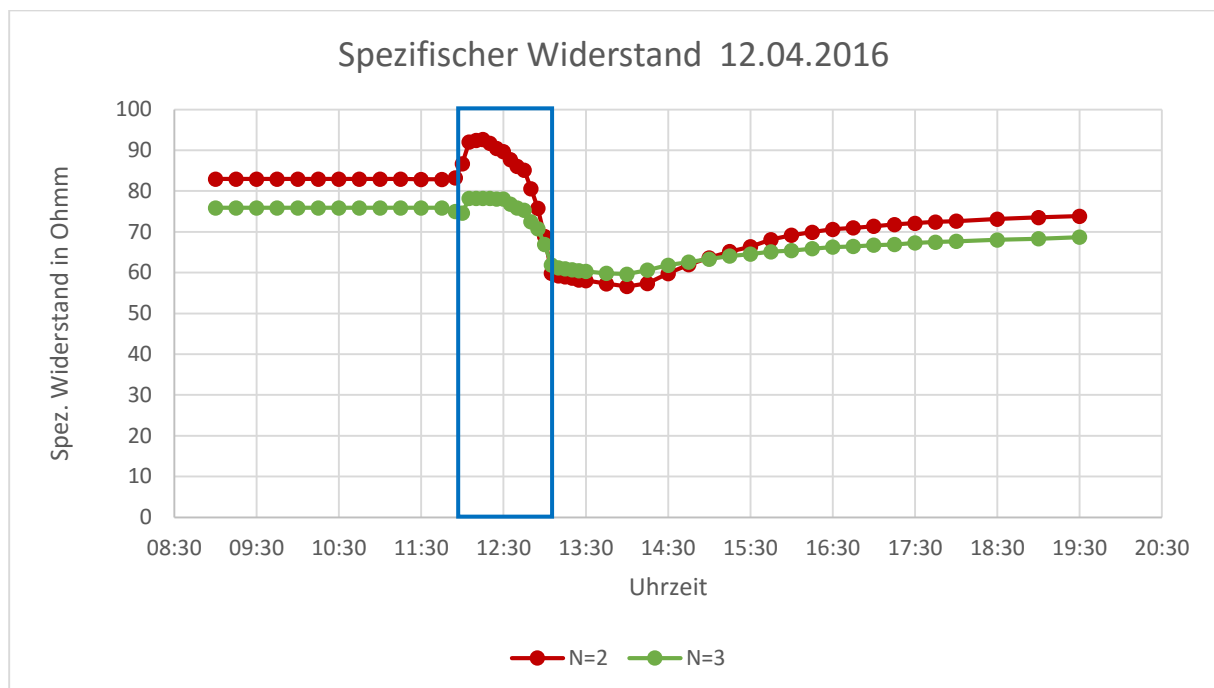


Abbildung 49: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=1,0\text{m}$ ($N=2$) und $a=1,5\text{m}$ ($N=3$) gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 12.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung mit Anstieg, und anschließendem Abfallen des Widerstandes bei erhöhter Niederschlagsmenge.

Dabei war zu erkennen, dass sich die Tiefenlage $N=1$, also mit $a=0,5\text{ m}$, so verhielt, wie man es von einem porösen Boden bei zunehmendem Wassergehalt erwarten würde. Die tieferen Messungen zeigen zuerst auch einen Anstieg des Widerstandes, der bei zunehmender Beregnung dann unter den Ausgangswert abfiel. Interessantes Detail ist das Kreuzen der beiden Tiefenlagen bei andauernder Beregnung und anschließend beim Trocknen.

13.04.2016

Um die Reproduzierbarkeit der Messungen des Vortages zu gewährleisten, wurde mit derselben Menge von 40 Litern pro Quadratmeter über eine Stunde bewässert. Es ist jedoch anzumerken, dass Aufgrund der starken Bewässerung des Vortages alle Widerstände unter jenen des Vortages lagen. Als sich derselbe Trend wie am Vortag abzeichnet, wurde das Gelände ab 13:00 Uhr zusätzlich mit ca. 1 Liter pro Minute begast. Die Messergebnisse mit N=1 und ohne diesem sind in den Abbildung 50 und Abbildung 51 zu sehen.

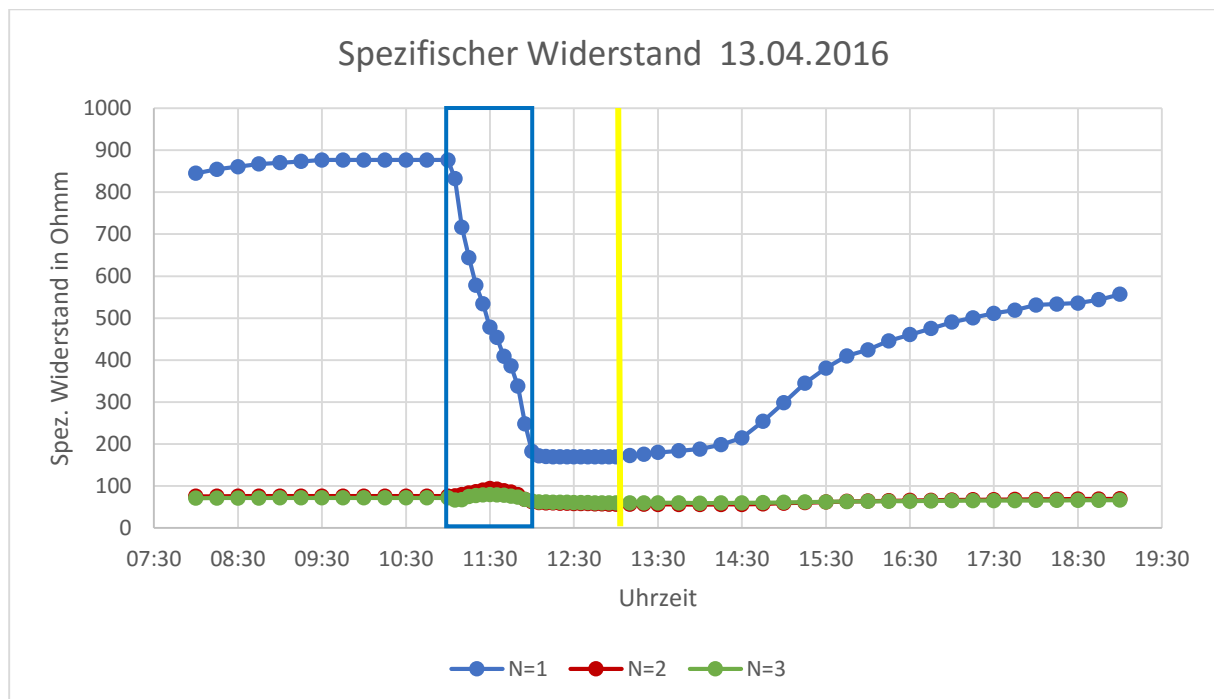


Abbildung 50: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=0,5$ m(N=1), $a=1,0$ m(N=2) und $a=1,5$ m(N=3) gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 13.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung, mit einer Abnahme des Widerstandes für N=1, und die gelbe Linie den Beginn der Begasung.

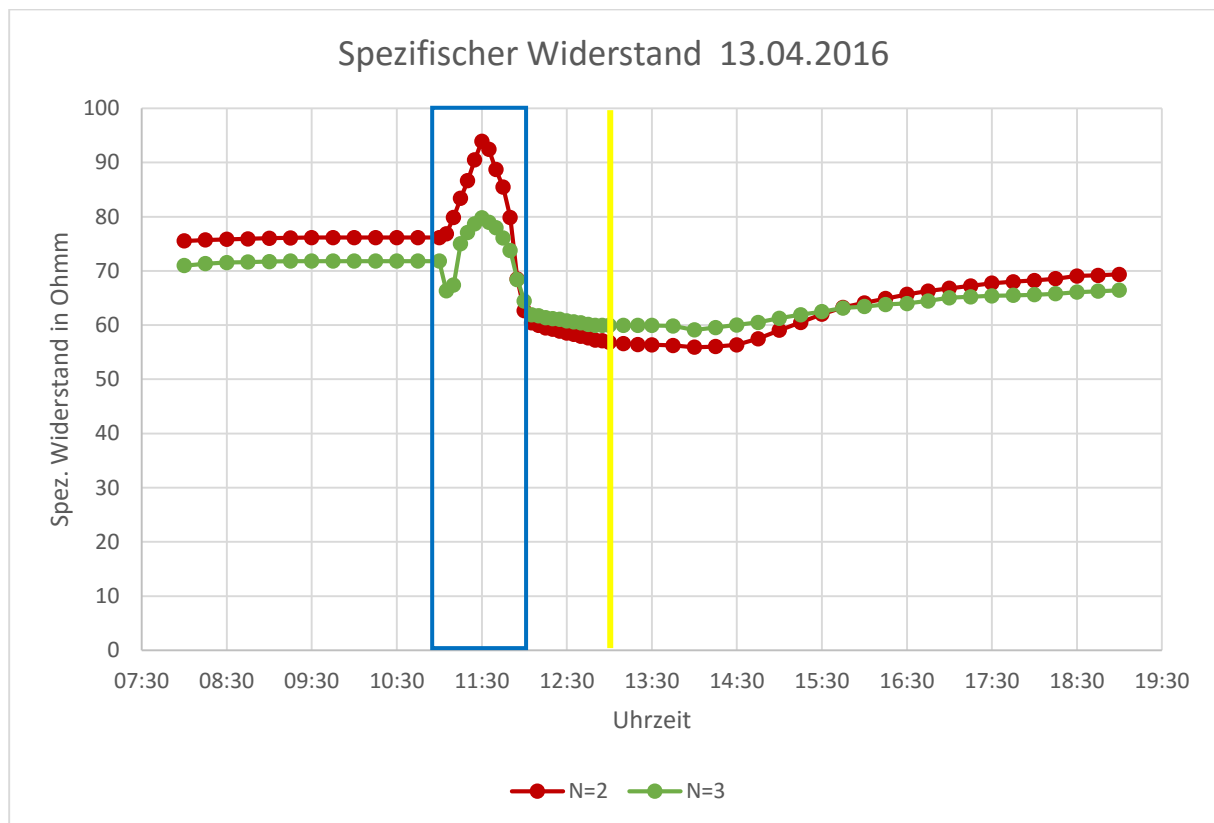


Abbildung 51: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=1,0$ m ($N=2$) und $a=1,5$ m ($N=3$) gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 13.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung und die gelbe Linie den Beginn der Begasung. Widerstandsverhalten wie in Abbildung 49.

Der Einfluss durch die Begasung konnte nicht abgeschätzt werden.

14.04.2016

Für die Messungen an diesem Tag erfolgte eine durchgehende Begasung des Bunkers mit ca. 1 Liter pro Minute. Zusätzlich erfolgte eine Bewässerung mit lediglich 10 Litern pro Quadratmeter, da die bisherigen Ergebnisse die Vermutung nahelegten, dass eine geringe Menge einen positiven Effekt auf den Widerstand in der Tiefe haben sollte. Hier sollte nun untersucht werden, ob dieser Effekt trotz der intensiven Bewässerung der letzten Tage mit ca. 80 Litern pro Quadratmeter, welche sich auch in einem niedrigeren Ausgangswiderstand am 14.04.2016 zeigen. Abbildung 52 und Abbildung 53 zeigen die Ergebnisse dieses Messtages.

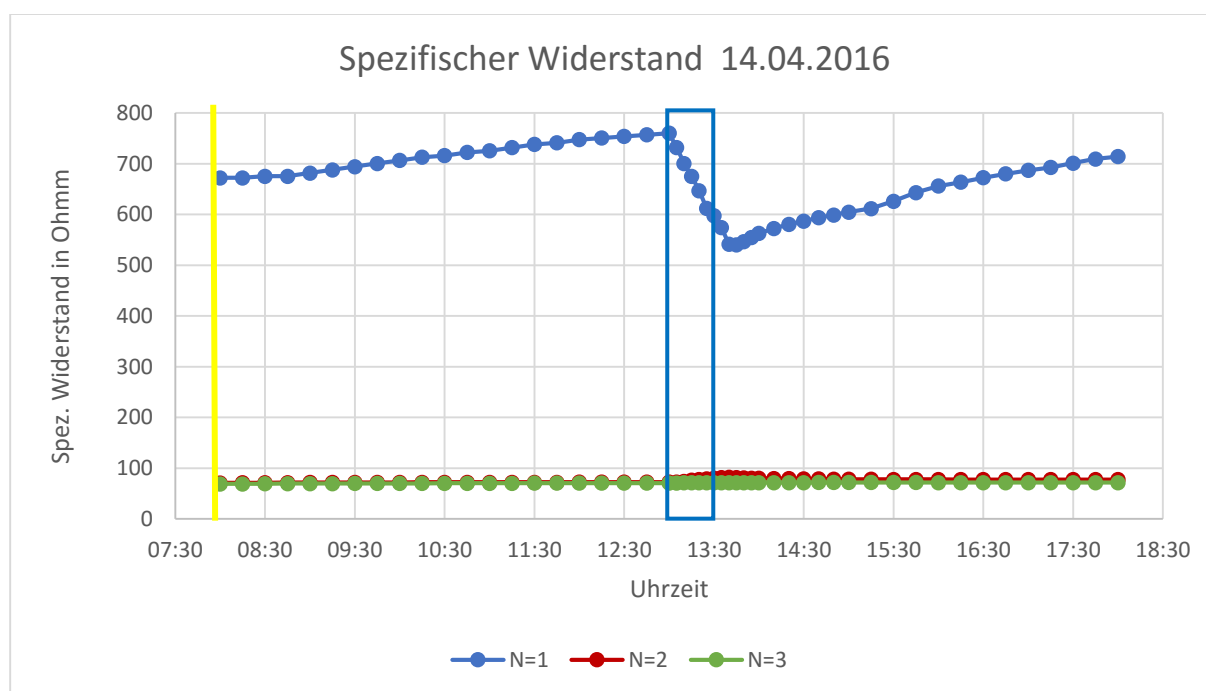


Abbildung 52: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=1,0$ m (N=2) und $a=1,5$ m (N=3) gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 14.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung mit einer Abnahme des Widerstandes für N=1, und die gelbe Linie den Beginn der Begasung.

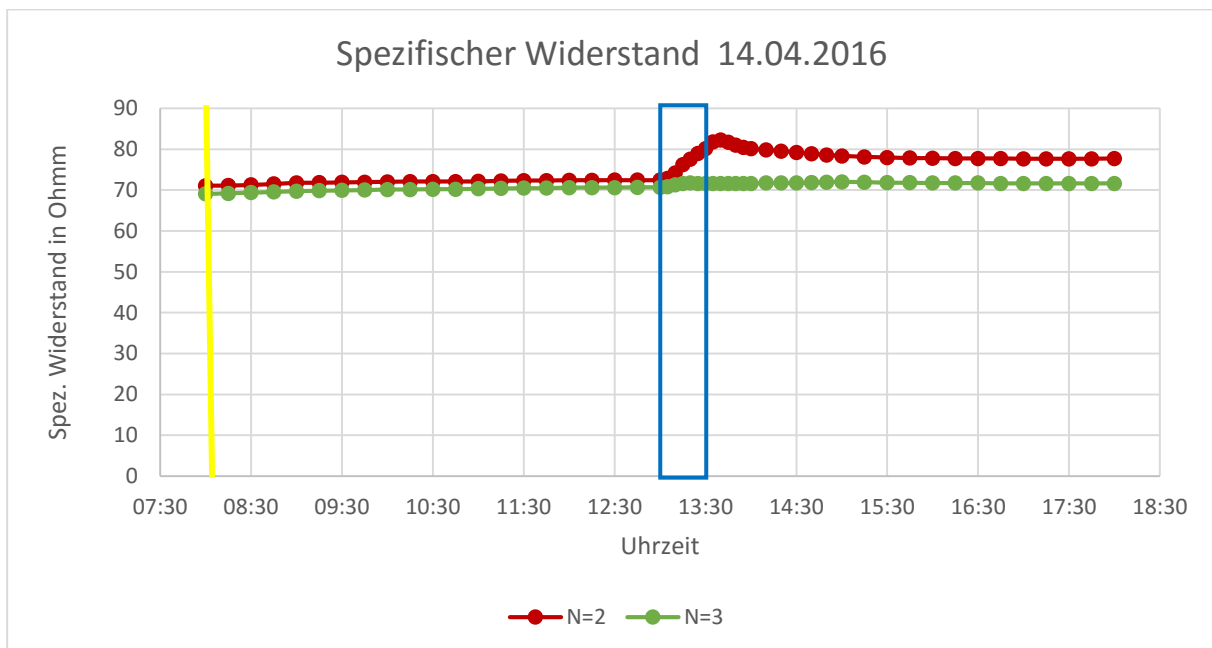


Abbildung 53: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=1,0$ m (N=2) und $a=1,5$ m (N=3) gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 14.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung und die gelbe Linie den Beginn der Begasung. Anstieg des Widerstandes für N=2 und N=3 durch geringe Niederschlagsmenge.

Interessant anzumerken ist, dass es aufgrund der geringeren Niederschlagsmenge nicht zum Effekt des Kreuzens der beiden tieferen Niveaus gekommen ist und sogar eine deutliche Steigerung des Widerstands in der zweiten Tiefenebene (N=2) gekommen ist.

15.05.2016

Der Effekt der Steigerung des Widerstands durch die Bewässerung des Vortages konnte auch am 15.05.2016 weiter gemessen werden. An diesem Tag fand keine Beregnung statt. Es wurde nur Gas mit ca. 1 Liter pro Minute in den Bunker eingespeist. Die Ergebnisse dieses Tages sind zum Zwecke einer durchgehenden Dokumentation in der Abbildung 54 dargestellt, hier wurde darauf verzichtet, eine zusätzliche Abbildung der beiden untersten Tiefenstufen zu zeigen, da diese keine zusätzlichen Informationen liefert.

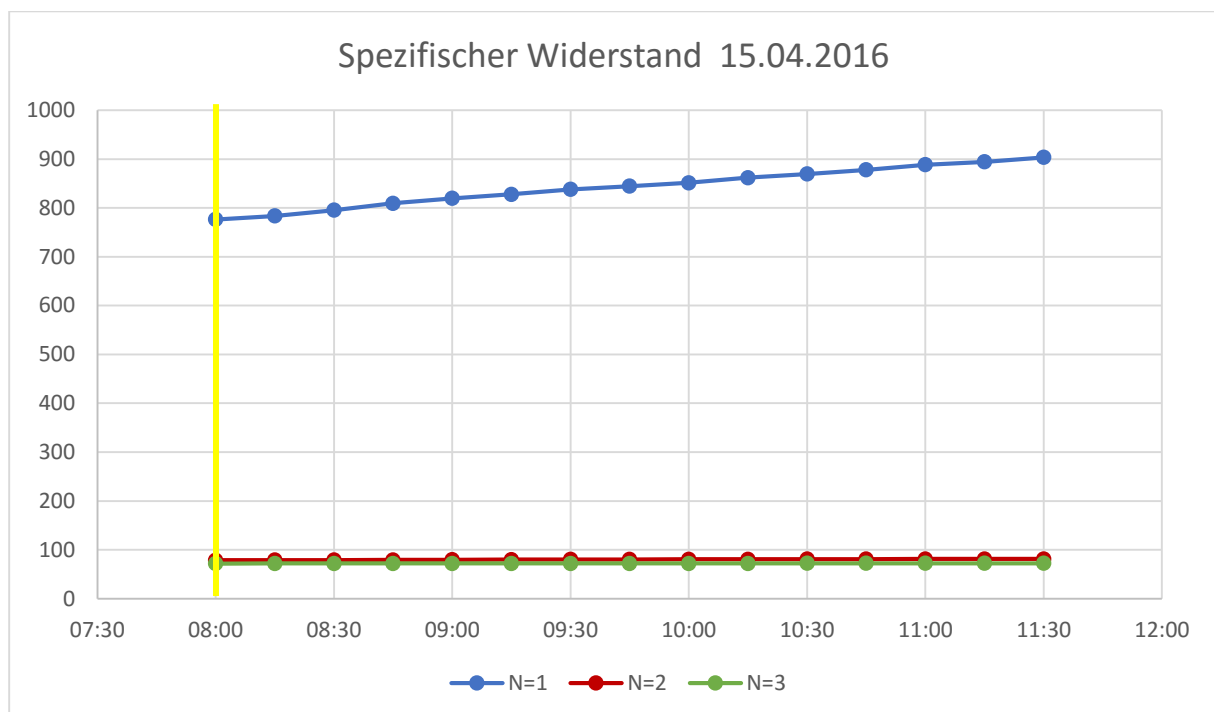


Abbildung 54: Geoelektrik zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=1,0$ m (N=2) und $a=1,5$ m (N=3) gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 15.04.2016. Die gelbe Linie kennzeichnet den Beginn der Begasung. Trend beim Auftrocknen Richtung Ausgangswert.

4.5.2 Zusammenfassung Geoelektrische Sondierung

Die Messungen und Ergebnisse der Sondierung brachten einige überraschende Erkenntnisse. So zeigte sich, dass bei niedrigen Niederschlagsmengen von etwa 10 Litern pro Quadratmeter, der Widerstand nur im oberen Bereich absinkt. In tieferen Bereichen führt eine solche kleine Menge sogar zu einem Ansteigen der Widerstände. Dies kann meiner Meinung nach nur damit erklärt werden, dass sich durch den Niederschlag, der auf die Oberfläche des Bodens trifft, oberflächlich eine weniger durchlässige Schicht aufbaut. Diese bringt zusätzlich eine Kraft auf, durch welche Luft/Gas im Porenraum unterhalb des Wassers nach unten bewegt wird. Diese Kraft sorgt nun dafür, dass Feuchtigkeit, also Wasser, in den tieferen Schichten weiter nach unten gedrückt wird. Dies würde nach Meinung des Autors dazu führen, dass der Widerstand in diesem Bereich ansteigt. Erst bei einer Regenmenge von mehr als 10 Litern pro Quadratmeter, schien das Wasser der Beregnung auch einen Einfluss auf die tieferen Bereiche zu haben. Dieser Prozess wird somit dem Versickern des Niederschlages zugeschrieben. Das würde auch das Kreuzen der zwei Tiefenniveaus erklären, da zuerst das Wasser die obere Tiefenlage beeinflussen würde und später dann die untere. Beim darauffolgenden Trocknen des Bodens wird der Ausgangszustand angestrebt und es kommt zum erneuten Kreuzen der Niveaulinien. Mit der relativ geringen Auflösung von nur drei Messstufen konnte jedoch kein gravierender Einfluss einer Gasleckage nachgewiesen werden. Die Oberflächengasmessungen legten jedoch die Vermutung nahe, dass der Hauptweg des Gases gar nicht direkt über der Mitte war, sondern vielmehr in einem Abstand von 0,5-1,0 m um das Zentrum. Dieser Bereich soll aber keineswegs so verstanden werden, dass dort überall eine ähnliche hohe Gaskonzentration aufgetreten ist. Er soll nur deutlich machen, dass in diesem Bereich eine höhere Anzeige als direkt in der Mitte über der Leckage festzustellen war. Im Besonderen zeigte sich sogar, dass es einige bevorzugte Bahnen für das Erdgas in diesem Bereich zu geben schien. Dies war auch der Grund, eine Multielektroden Geoelektrik zu versuchen, wobei eines der Profile dabei direkt über einen solchen „Hot-Spot“ gelegt wurde.

4.5.3 Multielektroden Geoelektrik

Für die Versuche der Multielektroden Geoelektrik wurden insgesamt drei Profile auf dem Testgelände im nassen Bunker aufgestellt. Ein Profil wurde mittels 19 Elektroden und einem Elektrodenabstand von 25 cm ausgelegt. Dazu wurden Metallspieße in den Boden geschlagen und die Elektroden an diesen Spießen befestigt. Zum Schutz vor dem direkten Einfluss der Beregnung wurden die Elektroden wieder mit Plastikbeuteln geschützt. Gemessen wurde mit den Geräten STING R1 und SWIFT der Firma AGI, und einer kompatiblen PC Software. Die Messgeräte und Software sind in Abbildung 55 dargestellt.



Abbildung 55: Messgeräte STING R1 und SWIFT.

Die Lage der drei Profile ist in der Skizze in Abbildung 56 zu sehen. Die Profile verlaufen normal auf das Süd-Nord Profil. Profil 1 liegt bei $Y=2,0$ m, Profil 2 bei $Y=2,5$ m und Profil 3 bei $Y=2,85$ m.

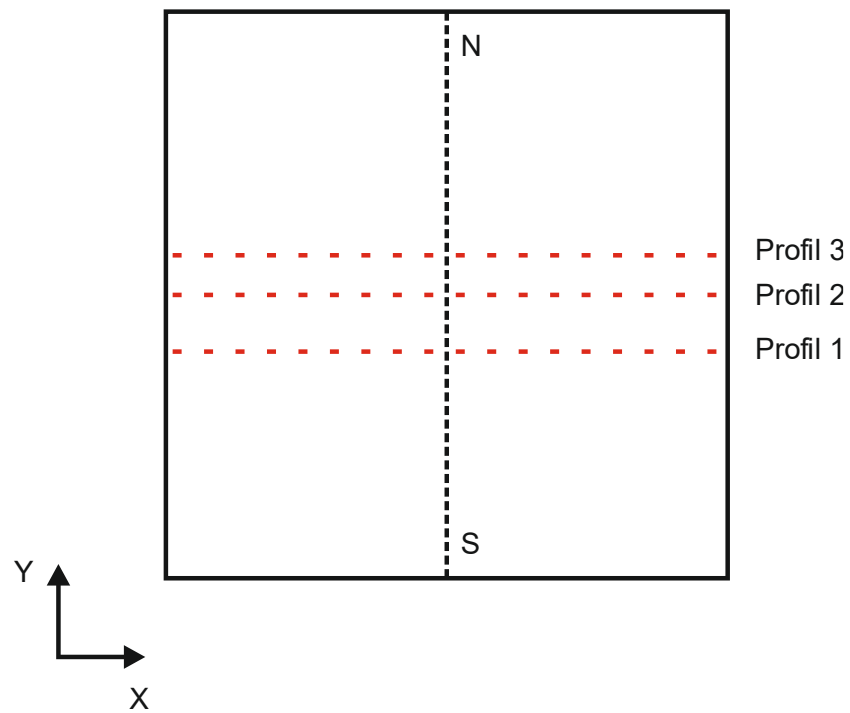


Abbildung 56: Anordnung der Multielektroden Geoelektrik Profile im nassen Bunker.

Der fertige Aufbau der Profile 1 und 2 ist in Abbildung 57 dokumentiert.



Abbildung 57: Multielektroden Geoelektrik: links Profil 1 und rechts Profil 2;
Elektrodenabstand 25 cm.

Die Messungen erfolgen in den Array Anordnungen Wenner-Alpha, -Beta und – Gamma. Die Zeit pro Messung wurde auf 1,2 Sekunden festgelegt und auf 12 Messzyklen zur Ermittlung eines Wertes gesetzt. Die Spannung betrug 200 Volt (V) und die maximale Stromstärke 200 Milliampere (mA). Ein vollständiges Array umfasst bei dieser Anzahl der Elektroden immer 51 Einzelmessungen. Die Messungen erfolgen über vier Tage hinweg in unterschiedlichen Szenarien. Bereits nach dem ersten Tag zeigt sich, dass die Messungen des Wenner-Gamma Arrays eine viel zu große Anzahl an Fehlmessungen aufwiesen, weshalb dieser Array Typ am zweiten Tag aus dem Messzyklus entfernt wurde. Ganz allgemein ist zu erwähnen, dass sich die Datenqualität der einzelnen Profile sehr stark voneinander unterscheidet. Einzig das Profil 1 zeigte über diese vier Tage hinweg eine einigermaßen konstant gute Qualität der Messdaten, vor allem ab dem dritten Tag. Der genaue Grund für die Fehlerhäufigkeit der anderen beiden Profile konnte nicht eruiert werden, da es sich nur in einigen Ausnahmefällen um einen Totalausfall einer Messelektrode handelte, welcher durch mangelnden Kontakt der Sonde zum Spieß entstand und sich daher auch umgehend beheben ließ. Es wurde vermutet, dass die Fehlmessungen durch einen schlechten Kontakt in Folge des Kieses an der Oberfläche auftraten, weshalb Profil 2 am 19.04.2016 abgebaut wurde. Profil 3 wurde so aufgebaut, dass zuerst der

Kies und Schotter vom Verlauf des Profils entfernt wurden, um diesen Störeinfluss zu entfernen. Die Lage von Profil 3 ist in Abbildung 58 zu sehen. Leider brachte auch das Entfernen des Schotters keinen Erfolg und Profil 3 zeigte sich als Totalausfall hinsichtlich der Qualität.



Abbildung 58: Multielektroden Geoelektrik: links Profil 1 und rechts Profil 3 mit entferntem Schotter. Anmerkung: Foto gespiegelt für besseren Vergleich mit Abbildung 57.

Zur besseren Übersicht über jene Messungen mit guter und schlechter Qualität der einzelnen Profile, wurde eine einfache Tabelle angefertigt. Die Einteilung der Qualität erfolgte nach diesem Schema: gute Qualität bis maximal 5 von 51 Fehlmessungen, mittlere Qualität von 6 bis 10 Fehlmessungen und schlechte Qualität bei mehr als 10 Fehlmessungen. Tabelle 3 zeigt die Qualität der einzelnen Arrays an den Messtagen.

Tabelle 3: Qualität der Mess-Arrays an den vier Messtagen: gute Qualität (grün) bis zu 5 von 51 Fehlmessungen; mittlere Qualität (gelb) bei 6-10 Fehlmessungen und schlechte Qualität (rot) bei mehr als 10 Fehlmessungen.

Profil 1

Datum	Anordnung	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Messung 6							
18.04.2016	α	gut	gut	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht							
	β	gut	gut	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht							
	γ	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht							
		Messung 7	Messung 8	Messung 9	Messung 10	Messung 11	Messung 12	Messung 13	Messung 14	Messung 15	Messung 16			
19.04.2016	α	gut	gut	mittel	mittel	mittel	mittel	gut	mittel	schlecht	schlecht			
	β	mittel	schlecht	mittel	mittel	schlecht	schlecht	mittel	schlecht	schlecht	schlecht			
	γ	schlecht												
		Messung 17	Messung 18	Messung 19	Messung 20	Messung 21	Messung 22	Messung 23	Nacht 1	Nacht 2	Nacht 3	Nacht 4		
20.04.2016	α	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut		
	β	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut		
		Messung 24	Messung 25	Messung 26	Messung 27	Messung 28	Messung 29	Messung 30	Messung 31	Messung 32				
21.04.2016	α	gut	gut	gut	gut	gut	mittel	mittel	gut	gut				
	β	gut	gut	gut	gut	gut	gut	mittel	gut	gut				

Profil 2

Datum	Anordnung	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Messung 6	Messung 7
18.04.2016	α	gut	gut					
	β	gut	gut					
	γ	schlecht	schlecht					
19.04.2016	α	gut	gut	gut	gut	gut	schlecht	
	β	gut	schlecht	schlecht	gut	schlecht		
	γ	schlecht						

Profil 3

Datum	Anordnung	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Messung 6	Messung 7	Messung 8	Nacht 1	Nacht 2	Nacht 3	Nacht 4
19.04.2016	α	schlecht											
	β	schlecht											
20.04.2016	α	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht
	β	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht
21.04.2016	α	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht								
	β	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht								

Die Inversion der Messungen erfolgte zuerst mit der Software DC2DInvRes – Direct Current 2D Inversion and Resolution von Thomas Günther. Es wurde hier sowohl der Versuch unternommen die Daten der einzelnen Arrays gesondert, als auch zusammen, Alpha, Beta und Gamma Messung kombiniert, der Inversion zu unterziehen. Die Inversionsergebnisse dieser Software führten zu sehr unterschiedlichen Modellen für vergleichbare Messungen, obwohl anhand der Daten aus allen vorangegangenen Messungen ein Basismodell für die Inversion vorgegeben wurde. Dieses Modell ist in Abbildung 59 dargestellt.

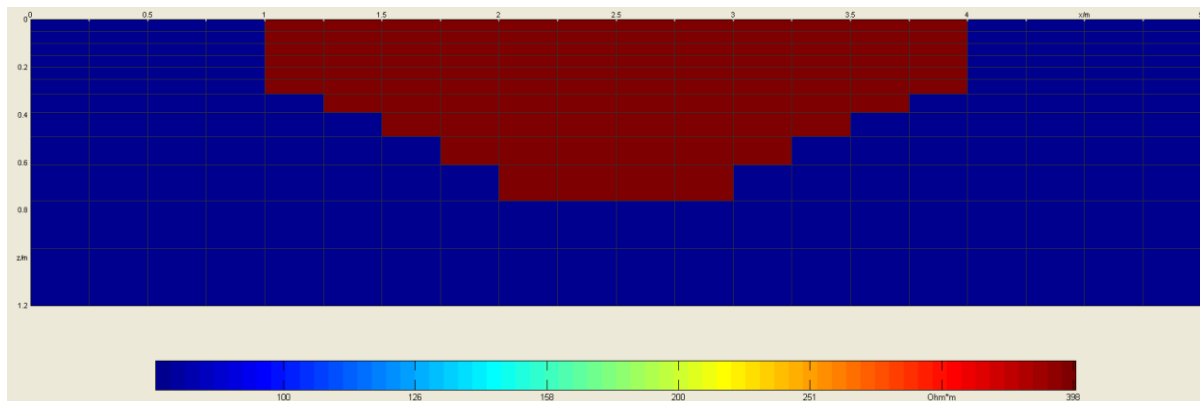


Abbildung 59: Basismodell für die Inversion mit DC2DInvRes: Außenbereich (blau) mit einem Widerstand von 70 Ωm und Innenbereich (rot) mit 300 Ωm .

Anhand der Ergebnisse der Inversion war es nicht möglich, mehr als allgemeine Aussagen über den Zustand im Messgelände zu treffen. Ein Vergleich der einzelnen Profile über die Zeit war wegen der großen Unterschiede im Endergebnis gar nicht möglich. Die beste Qualität mit dieser Software konnte nur unter Verwendung von Wenner Alpha und Beta erzielt werden, da Gamma ohnehin zu viele Messfehler aufwies. Abbildung 60 zeigt den 20.04.2016 als repräsentatives Beispiel für die extremen Unterschiede der Ergebnisse bei der Verwendung dieser Software.

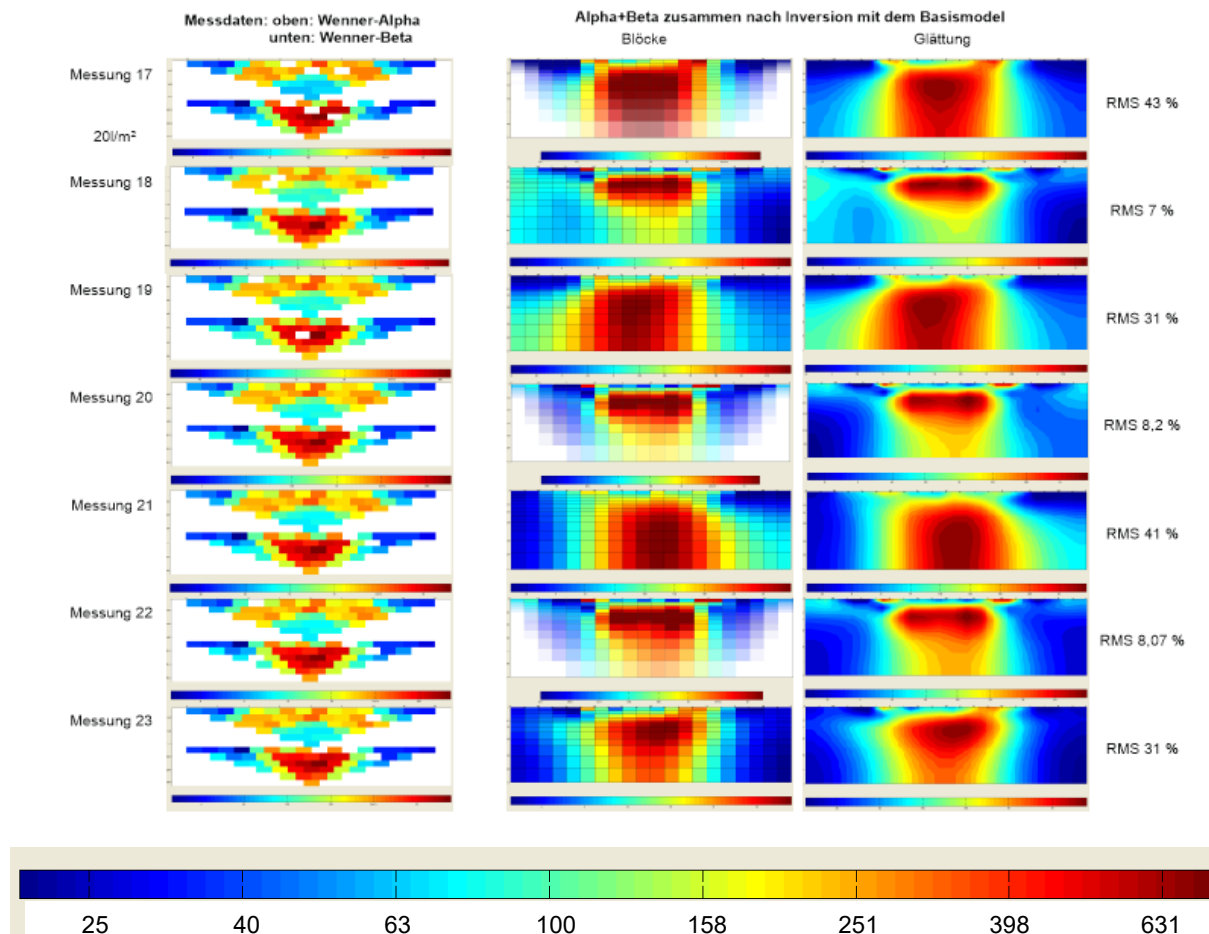


Abbildung 60: DC2DInvRes-Software: Messungen 17 bis 23; linker Teil Rohdaten: oben: Wenner-Alpha, unten: Wenner-Beta; rechter Teil: Ergebnis nach dem Ende der Inversion dargestellt in Blöcken (links) und mit geglätteter Oberfläche (rechts); Qualität der Inversionsergebnisse als RMS. Unten: logarithmische Farbskala in Ωm .

Die Inversionsergebnisse der Software DC2DInvRes waren bei den vorhandenen Datensätzen hier wenig zufriedenstellend und auch eine Anpassung der Zellengröße brachte nicht den gewünschten Erfolg. Die Software Res2DINV der Firma Geotomo wurde ebenfalls zur Inversion verwendet. Diese umfasst zusätzlich zur normalen Inversion auch einen Time-lapse Modus, bei dem die Inversionsschritte möglichst identisch zwischen den unterschiedlichen Messungen verlaufen. Dies gewährleistet, dass sich Abweichungen welche sich potenzieren würden, auf ein Minimum reduziert werden. Selbst ohne so genau definiertes Basismodell wie in Abbildung 59 oben gezeigt, kam es zu Ergebnissen die klar den Unterschied der beiden Verfüllmaterialien widerspiegeln und das Basismodell bestätigen. Der Nachteil in dieser Software lag lediglich darin, dass die einzelnen Prozesse der Inversion nicht

so gut nachverfolgt werden konnten, wie bei der Software DC2DInvRes. Der allgemeine Inversionsvorgang der Software RES2DINV basiert auf dem Glättungsverfahren der kleinsten eingeschränkten Quadrate von deGroot-Hedlin und Constable (1990) und Sasaki (1992). Das Glättungsverfahren der kleinsten eingeschränkten Quadrate basiert auf Gleichung (6).

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{F}) \mathbf{d} = \mathbf{J}^T \mathbf{g} \quad (6)$$

mit
$$\mathbf{F} = \mathbf{f}_x \mathbf{f}_x^T + \mathbf{f}_z \mathbf{f}_z^T$$

Ein Vorteil dieser Methode ist es, dass sowohl der Dämpfungsfaktor (engl. damping Faktor), als auch der Flachheitsfilter (engl. flatness Filter), an die Daten angepasst werden können (Loke, 2001). Nachfolgend sind die Ergebnisse der einzelnen Tage für die verschiedenen Messprofile inklusive einer Beschreibung des Ablaufs angeführt. Es werden lediglich Daten mit guter bis mittlerer Qualität gezeigt. Das Profil 3 ist hier gar nicht vertreten und für das Profil 1 konnte zusätzlich auch Time-lapse Abfolgen für den 19.-21.04.2016 erstellt werden, die sich immer am Ausgangszustand des jeweiligen Tages orientiert. Aufgrund der großen Widerstandsunterschiede an der Oberfläche wurde für die Berechnung mit halben Sonden Abstand, also mit 12,5 cm gearbeitet. Die Zeit zwischen den Messungen des jeweiligen Tages betragen dabei in der Regel 60 Minuten, die genauen Uhrzeiten sind den digitalen Messdaten zu entnehmen.

18.04.2016

Am 18.04.2016 gab es während des Aufbaues der Multielektrodengeoelektrik einen leichten Nieselregen bis 13:00 Uhr. Für diesen Tag wurde keine zusätzliche Beregnung oder Begasung vorgenommen. Für die Profile 1 und 2 sind jeweils die Messungen in guter Qualität, dies sind die Messungen 1 und 2 des jeweiligen Profils in Abbildung 61 bis Abbildung 64 dargestellt.

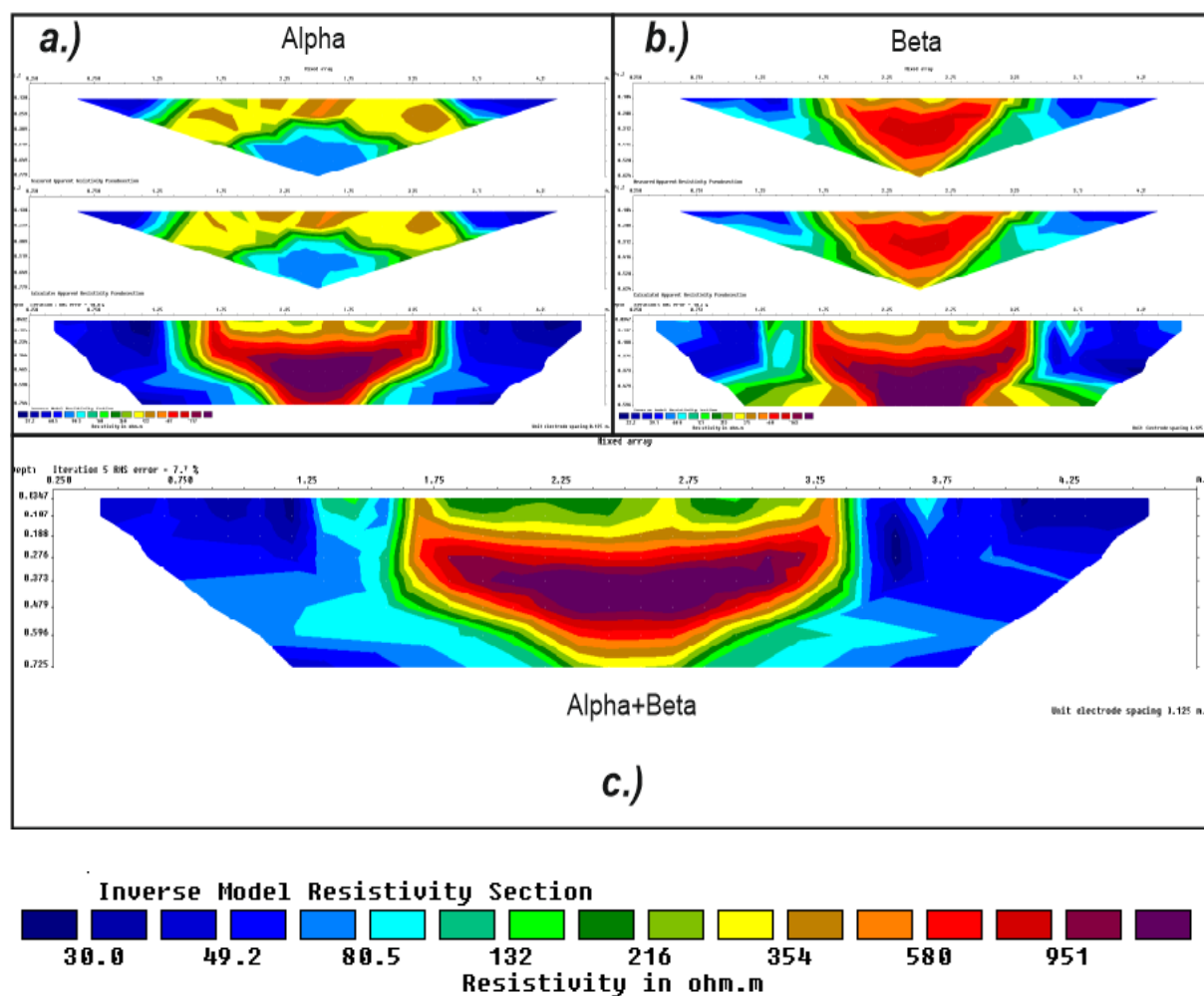


Abbildung 61: Profil 1: Messung 1: a.) Wenner-Alpha-Array und b.) Wenner-Beta-Array von oben nach unten: Pseudosektion des gemessenen scheinbaren Widerstands, Pseudosektion des berechneten scheinbaren Widerstands und Inversionsmodell Widerstandssektion mit RMS. c.) Wenner-Alpha+Beta-Array Inversionsmodell Widerstandssektion.

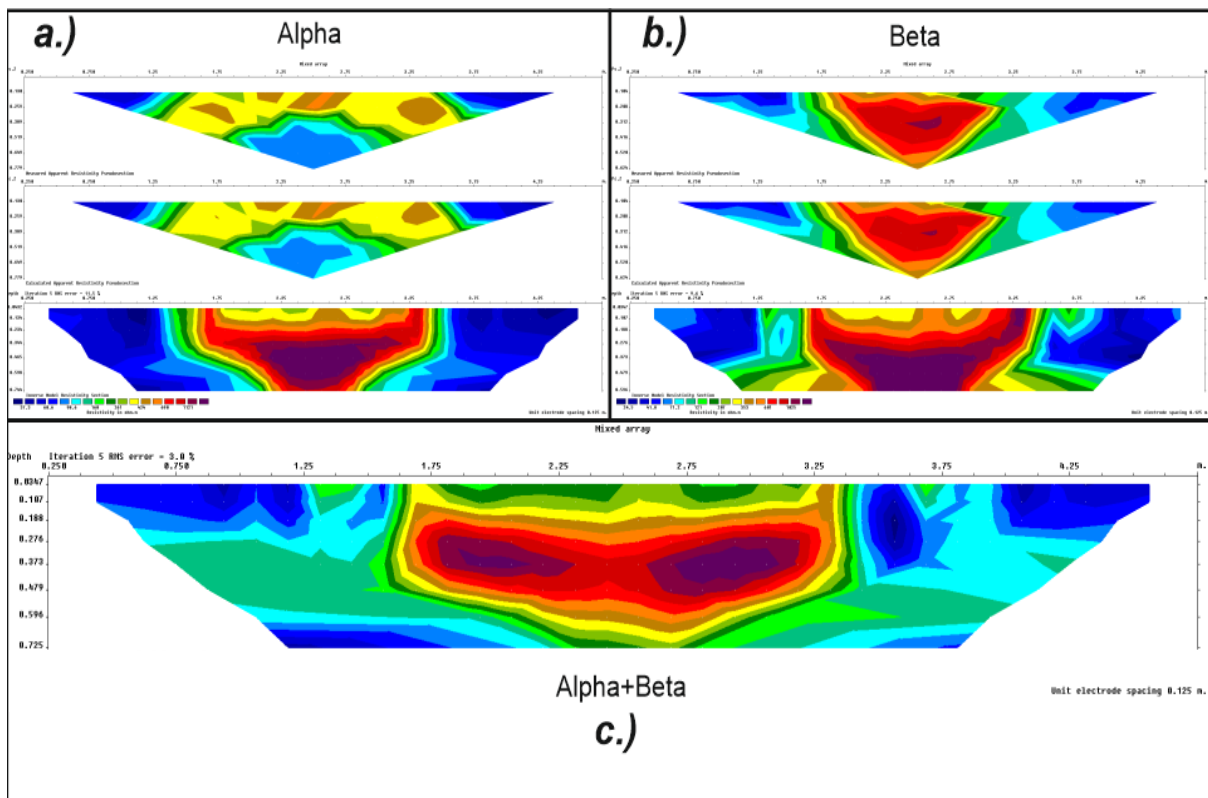


Abbildung 62: Profil 1: Messung 2: **a.)** Wenner-Alpha-Array und **b.)** Wenner-Beta-Array von oben nach unten: Pseudosektion des gemessenen scheinbaren Widerstands, Pseudosektion des berechneten scheinbaren Widerstands und Inversionsmodel Widerstandssektion mit RMS. **c.)** Wenner-Alpha+Beta-Array Inversionsmodel Widerstandssektion.

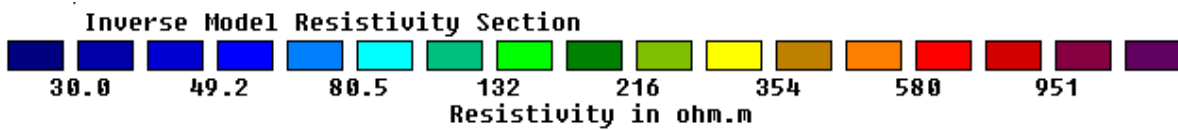
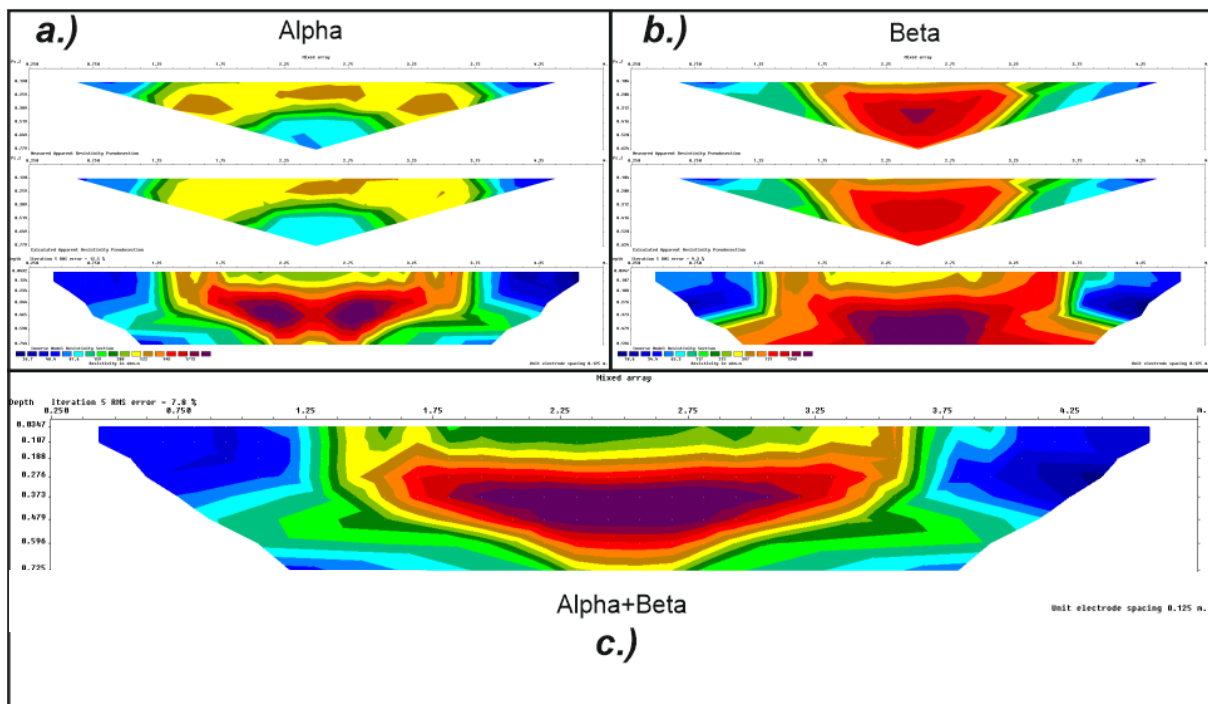


Abbildung 63: Profil 2: Messung 1: **a.)** Wenner-Alpha-Array und **b.)** Wenner-Beta-Array von oben nach unten: Pseudosektion des gemessenen scheinbaren Widerstands, Pseudosektion des berechneten scheinbaren Widerstands und Inversionsmodel Widerstandssektion mit RMS. **c.)** Wenner-Alpha+Beta-Array Inversionsmodel Widerstandssektion.

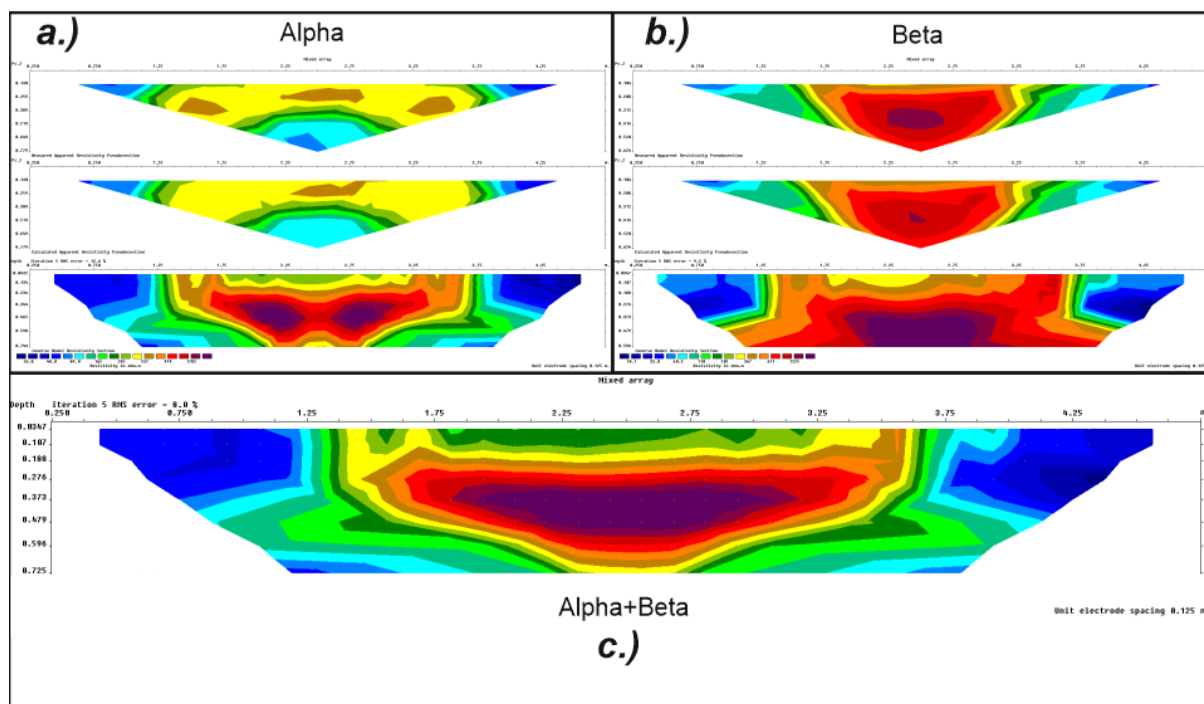


Abbildung 64: Profil 2: Messung 2: **a.)** Wenner-Alpha-Array und **b.)** Wenner-Beta-Array von oben nach unten: Pseudosektion des gemessenen scheinbaren Widerstands, Pseudosektion des berechneten scheinbaren Widerstands und Inversionsmodell Widerstandssektion mit RMS. **c.)** Wenner-Alpha+Beta-Array Inversionsmodell Widerstandssektion.

Für alle Messungen dieses Tages gilt, dass das Ergebnis der Daten von Alpha und Beta gemeinsam immer bessere RMS Werte liefert, als eine Inversion mit nur Alpha oder Beta. Das ist auch logisch, weil sich durch das Zusammenfassen der Daten eine Verdoppelung der Messwerte für den gleichen Bereich ergibt. Es ist gut zu erkennen, dass es sich um einen niedrig ohmigen Bereich am Rand und einen viel höher ohmigen in der Mitte handelt. Auch die Form des hochohmigen Bereichs, welcher sehr einem Kegel gleicht deckt sich ausgezeichnet mit dem zu erwartenden Model. Die Grenze dieser beiden Widerstandszonen lässt sich an der Oberfläche sehr gut durch den Wechsel von normalem bindigen Boden zu Sand verfolgen und deckt sich auch mit den anderen Messungen, wie beispielsweise der Suszeptibilität.

Dieser Bereich des Wechsels scheint auch das Auftrocknen zu beschleunigen, was sich durch die beiden „Fahnen“ mit höherem Widerstand zeigt. In Profil 1 zeigt sich zusätzlich zu den zwei „Fahnen“ im Randbereich eine dritte, diese könnte womöglich durch die zuvor bereits erwähnten bevorzugten Bahnen des Erdgases stammen.

19.04.2016

Über Nacht gab es leichte Niederschläge mit ca. 5 Litern pro Quadratmeter. Die Messungen dieses Tages wurden ohne Begasung mit einer Bewässerung von ca. 10 Litern pro Quadratmeter im Anschluss an die Messung 7 des Profils 1 und die Messung 3 des Profils 2 durchgeführt. Aufgrund der deutlich besseren Ergebnisse bei der Verwendung von Alpha und Beta zusammen, sind hier nur mehr die Ergebnisse der Inversion dieser beiden zusammen dargestellt. Als Vergleich ist hier der Unterschied zwischen den Messungen 7, 9, 10 und 13 des Profils 1 nach eigenständiger Inversion in Abbildung 66 und Inversion über die Time-lapse Funktion in Abbildung 65 zu sehen. Die Berechnung fand nach der Messung 7 am Profil 1 bzw. nach der Messung 3 am Profil 2 statt.

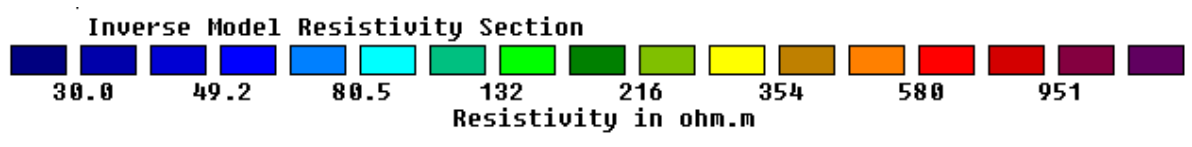
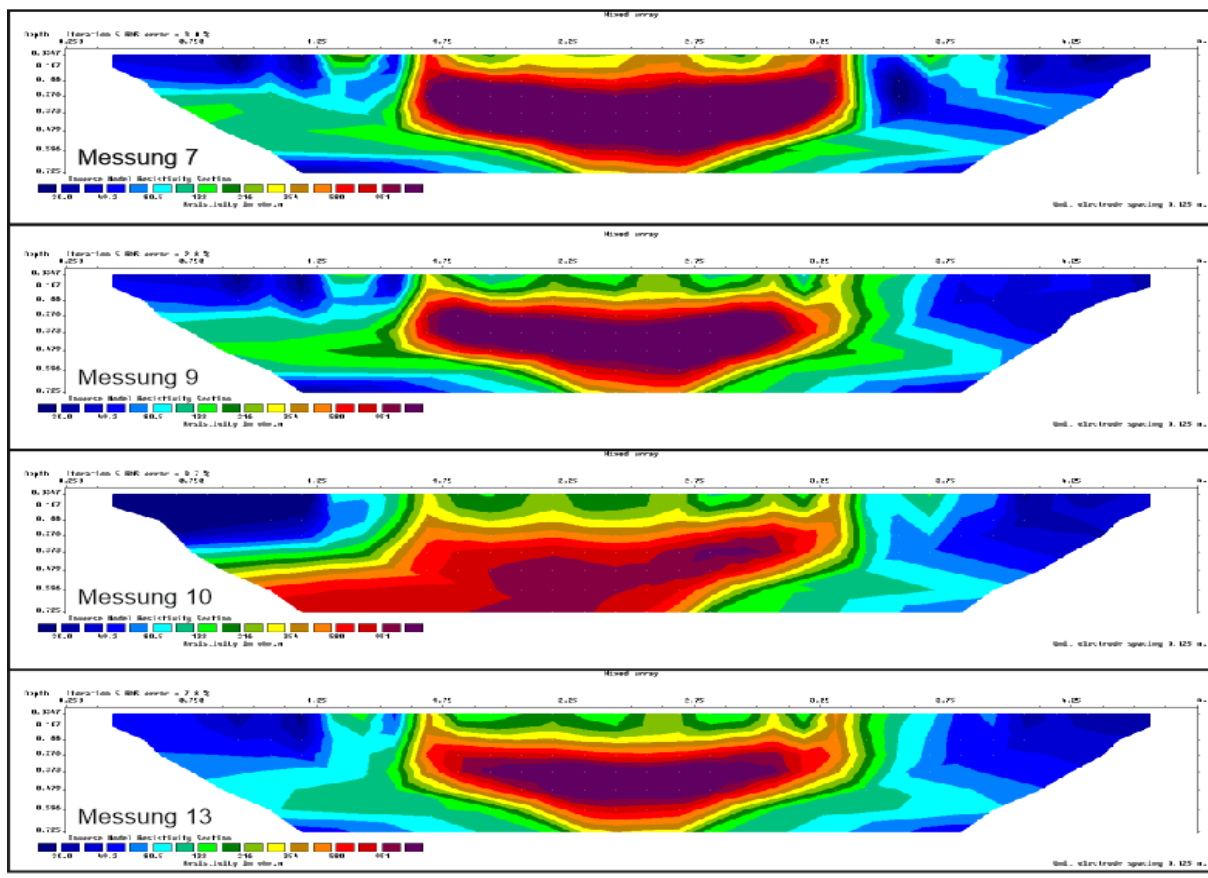


Abbildung 65: Profil 1: Ergebnisse der eigenständigen Inversion der Messungen 7, 9, 10 und 13. Abbildung zeigt die Widerstandssection aus Wenner-Alpha und-Beta Daten. Bewässerung nach Messung 7. Absinken des Widerstandes an der Oberfläche durch Bewässerung.

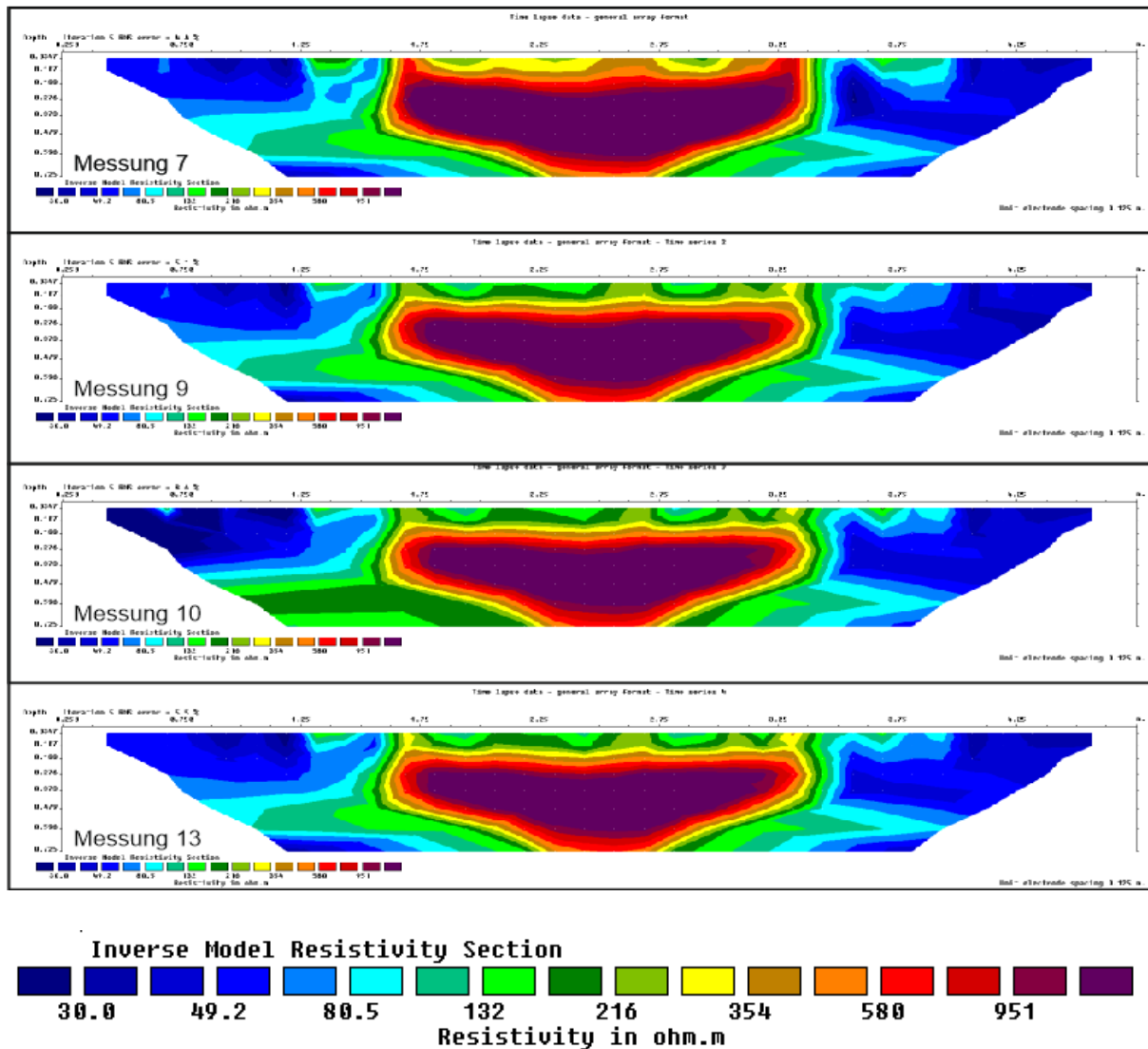


Abbildung 66: Profil 1: Ergebnisse der Time-lapse Inversion der Messungen 7, 9, 10 und 13. Abbildung zeigt die Widerstandssektion aus Wenner-Alpha und-Beta Daten. Bewässerung nach Messung 7. Absinken des Widerstandes an der Oberfläche durch Bewässerung.

Beide Abbildungen zeigen eine Verlagerung des höher ohmigen Bereiches in die Tiefe in Folge der Beregnung und ein Absinken des Widerstandes nahe der Oberfläche durch das zugeführte Wasser. Anschließend kann man gut das Auftrocknen in den späteren Messungen (10 und 13) verfolgen. Auch ohne Begasung zeichnet sich der Randbereich als ein Bereich ab, der etwas schneller trocknet. Da für das Profil 2 zu wenige Messungen mit ausreichend guter Qualität vorhanden waren, konnte hier keine Time-lapse Serie erstellt werden und es sind lediglich die Ergebnisse der Inversion von Wenner-Alpha und -Beta der Messungen 3 und 6 in Abbildung 67 dargestellt.

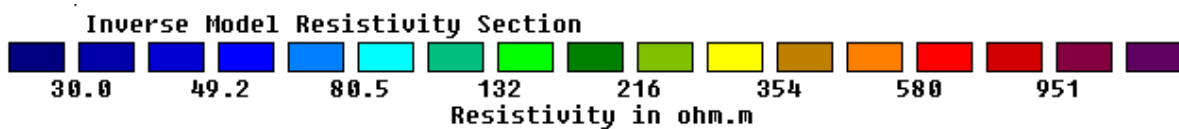
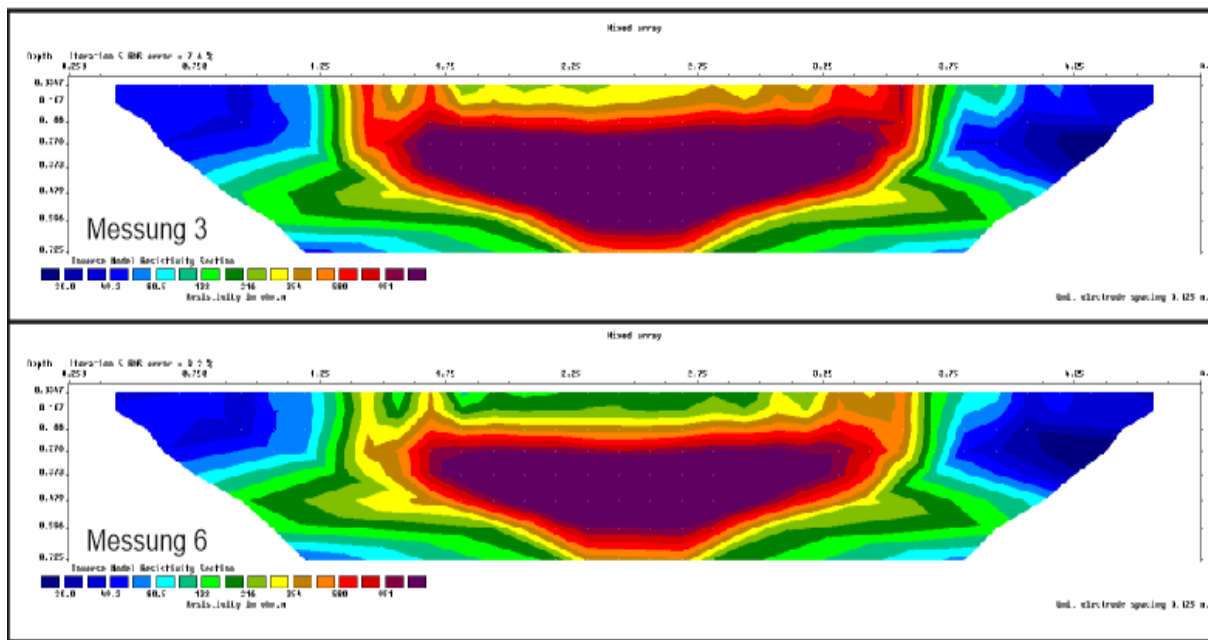


Abbildung 67: Profil 2: Ergebnisse der eigenständigen Inversion der Messungen 3 und 6. Abbildung zeigt die Widerstandssektion aus Wenner-Alpha und-Beta Daten.

Auch das Profil 2 zeigt, dass der Randbereich zuerst aufzutrocknen beginnt.

20.04.2016

An diesem Tag erfolgte eine durchgehende Begasung mit ca. 1 Liter pro Minute. Es wurde zusätzlich nach der ersten Messung dieses Tages (Messung 17) mit 20 Litern pro Quadratmeter beregnet. Zum Vergleich sind wieder die Ergebnisse der eigenständigen Inversion der Wenner-Alpha und-Beta Daten in Abbildung 68 und die der Time-lapse Auswertung in Abbildung 69 dargestellt.

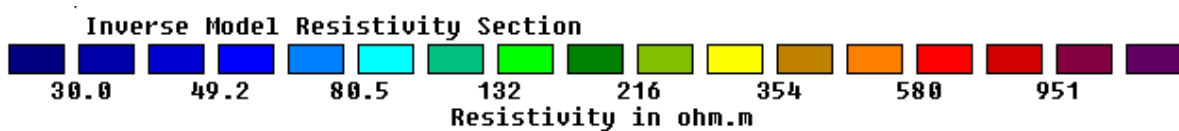
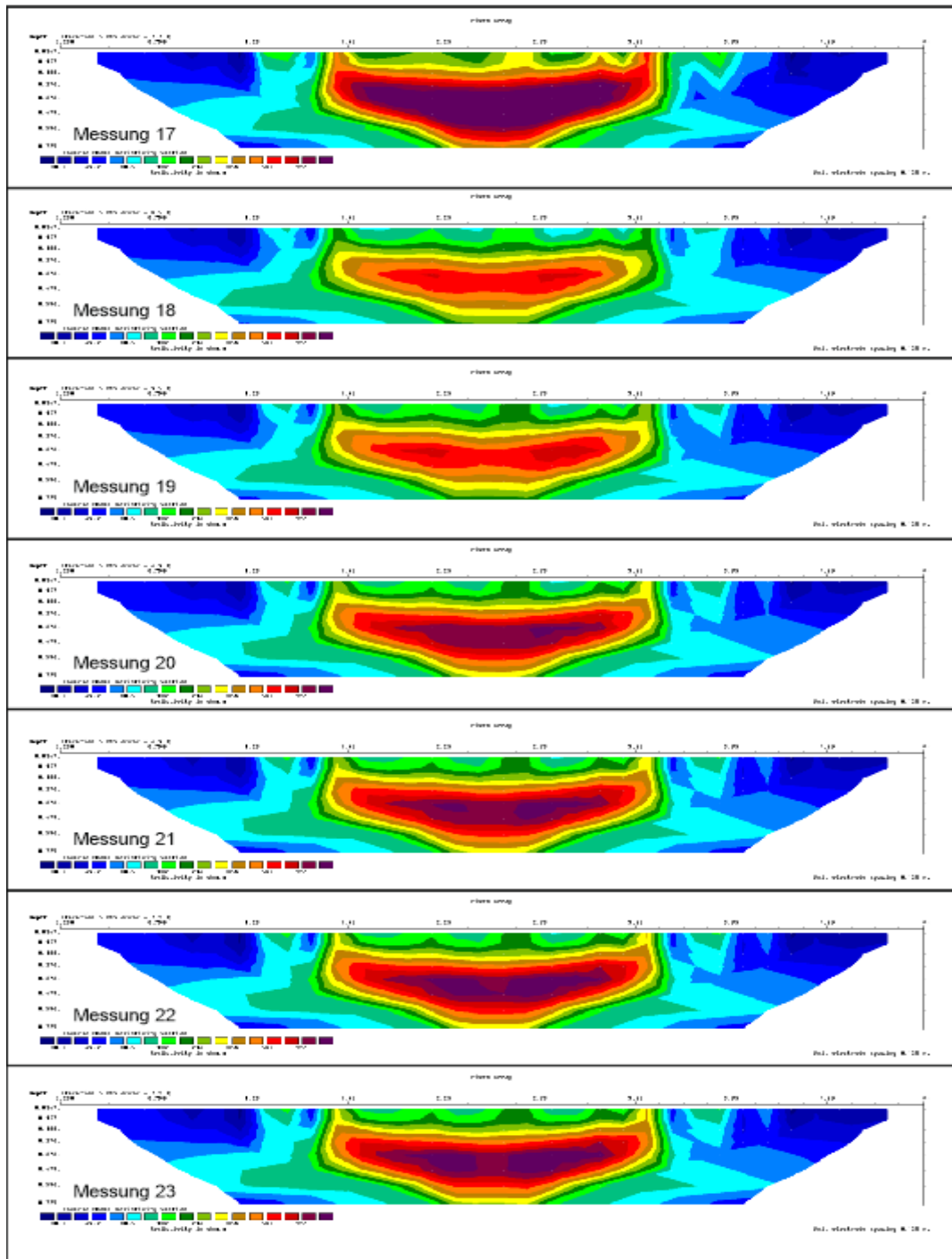


Abbildung 68: Profil1: Ergebnisse der eigenständigen Inversion der Messungen 17 bis 23. Berechnung nach Messung 17. Abbildung zeigt die Widerstandssektion aus Wenner-Alpha und-Beta Daten. Deutliche Abnahme des Widerstandes in Folge der Bewässerung. Beim Auftrocknen wieder Anstieg des Widerstandes.

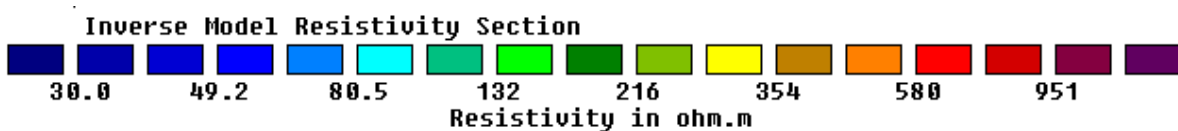
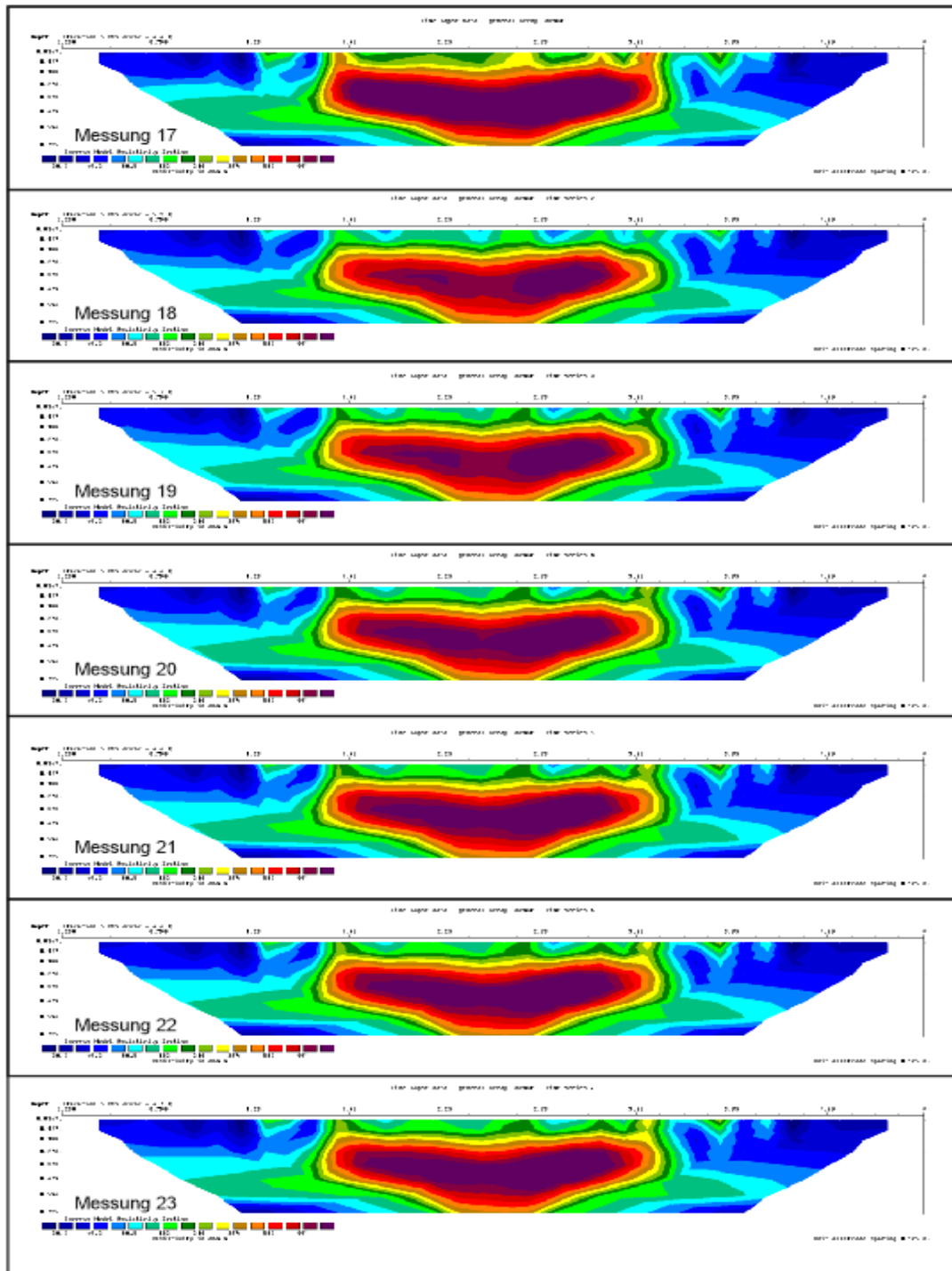


Abbildung 69: Profil1: Ergebnisse der Time-lapse Inversion der Messungen 17 bis 23. Berechnung nach Messung 17. Abbildung zeigt die Widerstandssektion aus Wenner-Alpha und-Beta Daten. Deutliche Abnahme des Widerstandes in Folge der Bewässerung. Beim Auftrocknen wieder Anstieg des Widerstandes.

Aufgrund der guten Datenqualität konnte für diese Time-lapse Daten auch ein Plot der Entwässerung erstellt werden. Die Plots beziehen sich dabei auf den Ausgangszustand der Messung 17, wie sie in Abbildung 69 zu sehen ist, und zeigen die prozentuelle Veränderung der Widerstände durch die Bewässerung und das Auftrocknen. Negative Werte zeigen also eine Zunahme des Wassergehaltes und positive eine Abnahme an. Die Berechnung erfolgte durch einen in der Software implementierten Vorgang, bei dem es lediglich nötig war, den Zementationsfaktor nach Archie anzugeben. Da es sich hier um einen Sand mit keiner bis minimaler Zementation handelt, wurde ein Faktor $m=1,8$ angenommen. Der Verlauf der Bewässerung bzw. der Entwässerung ist in Abbildung 70 zu sehen.

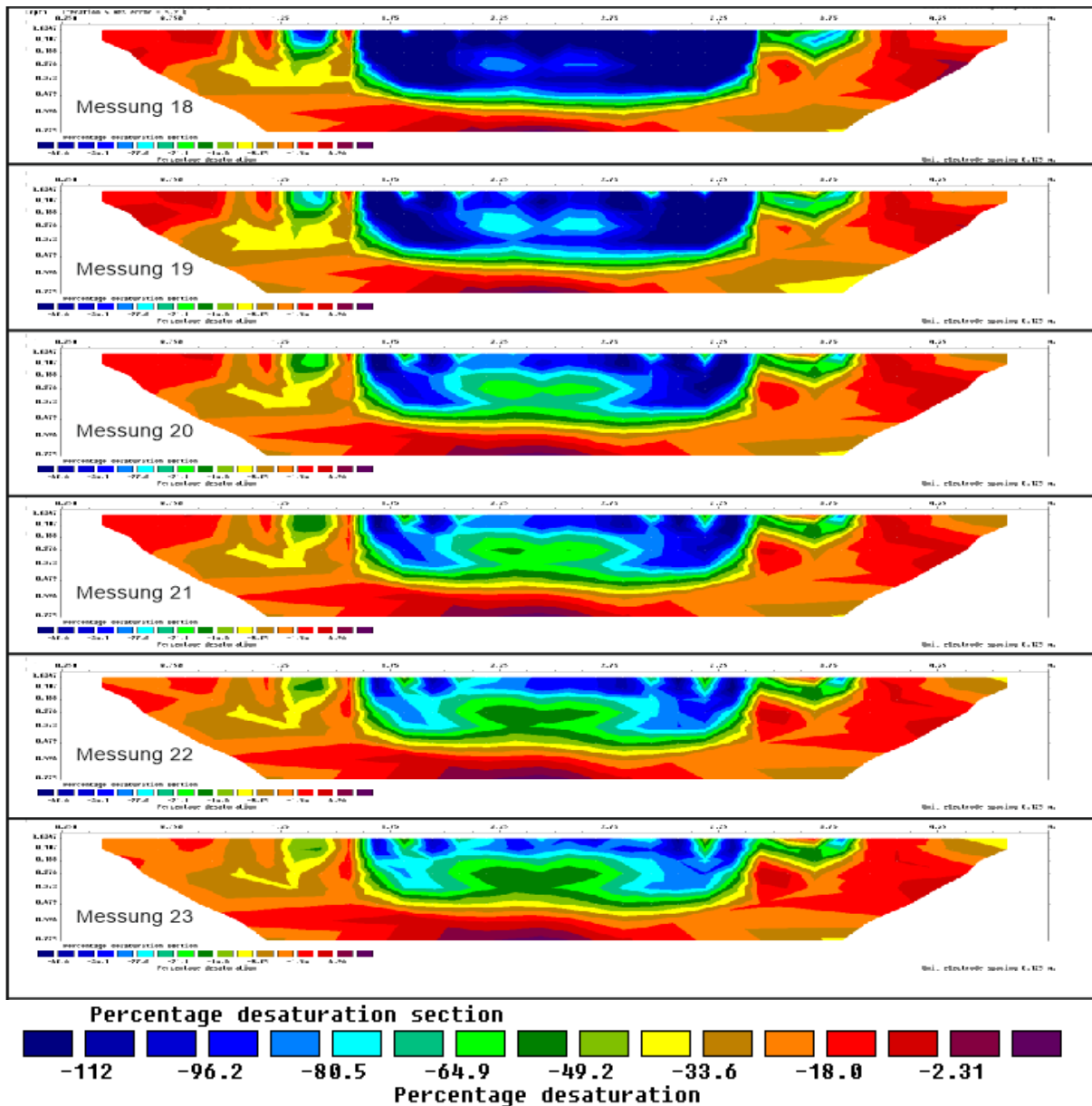


Abbildung 70: Profil 1: Veränderung Entwässerung in Prozent bezogen auf Messung 17; negative Werte entsprechen dabei Wasserzufuhr und positive einer Entwässerung. Abnahme des Widerstandes durch Bewässerung (blau) und anschließendes Auftrocknen (grün). Auftrocknen vor allem im Zentralen Bereich um die Leckage und am Rand.

Bei der Darstellung ist zu erkennen, wie durch die Bewässerung der Widerstand zuerst abnimmt, zu sehen durch die blaue Farbe, und dann nach dem Ende der Bewässerung wieder zunimmt. Interessant hier vor allem der zentrale Bereich um die Gasleckage, wo man anhand dieser Abbildungen gut erkennt, dass sich im Bereich

der Leckage der Wassergehalt deutlich schneller reduziert. Auch die generelle Abnahme des Wassergehaltes weiter unten bestätigt die Ergebnisse aus der Sondierung.

21.04.2016

An diesem Tag wurde durchgehend mit einer Menge von ca. 1 Liter pro Minute begast und nach der ersten Messung des Tages (Messung 24) wurde mit ca. 10 Litern pro Quadratmeter bewässert. Dann folgte Messung 25 und eine weitere Bewässerung mit derselben Menge, gefolgt von Messung 26 und abermaliger Bewässerung mit dieser Menge. Ab Messung 27 bis zum Ende (Messung 32) wurde nicht weiter beregnet. Auf die Abbildung der Messungen 29 und 30 wurde aufgrund schlechterer Datenqualität verursacht durch den fehlenden Kontakt einer Elektrode zum Spieß verzichtet. Dieses Problem wurde behoben und die letzten beiden Messungen verliefen wieder sehr gut. Es sind wieder die Daten der eigenständigen Inversion von Wenner-Alpha und-Beta in Abbildung 71 und die der Time-lapse Auswertung in Abbildung 72 dargestellt.

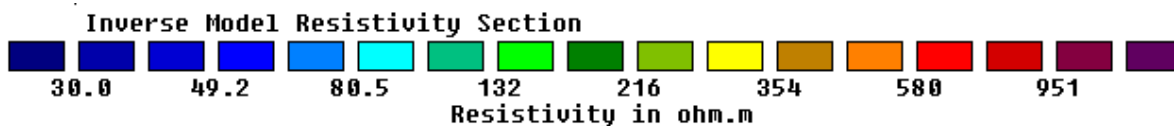
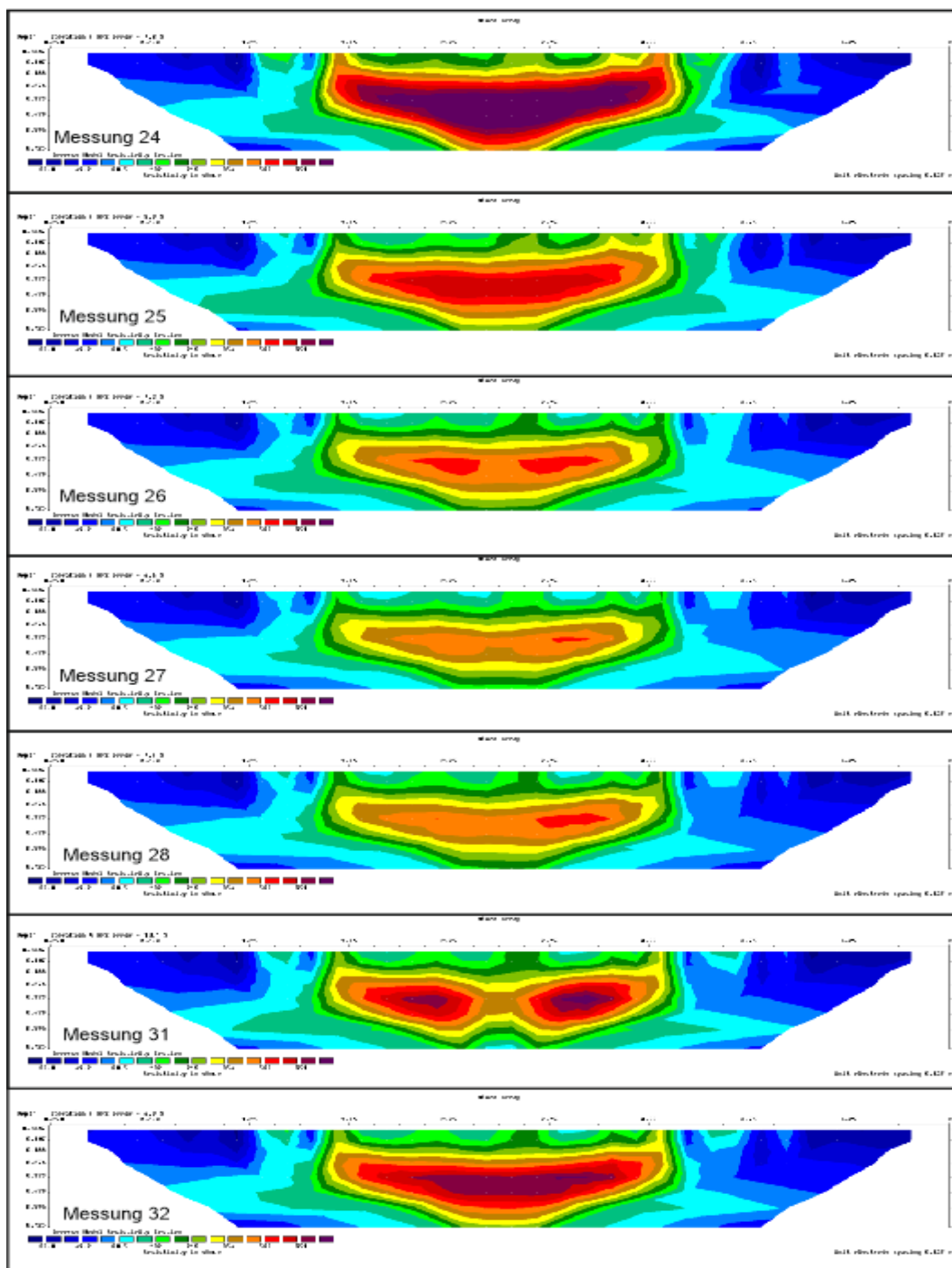


Abbildung 71: Profil1: Ergebnisse der eigenständigen Inversion der Messungen 24 bis 32, ohne die Messungen 29 und 30. Berechnung nach Messung 24. Abbildung zeigt die Widerstandssektion aus Wenner-Alpha und-Beta Daten. Deutliche Abnahme des Widerstandes in Folge der Bewässerung. Beim Auftrocknen wieder Anstieg des Widerstandes.

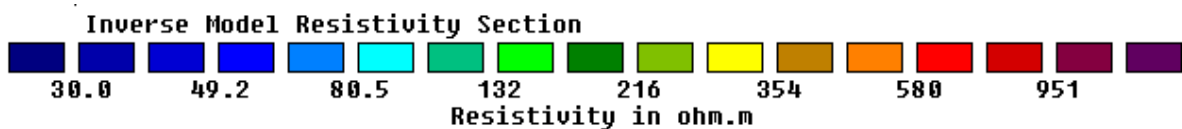
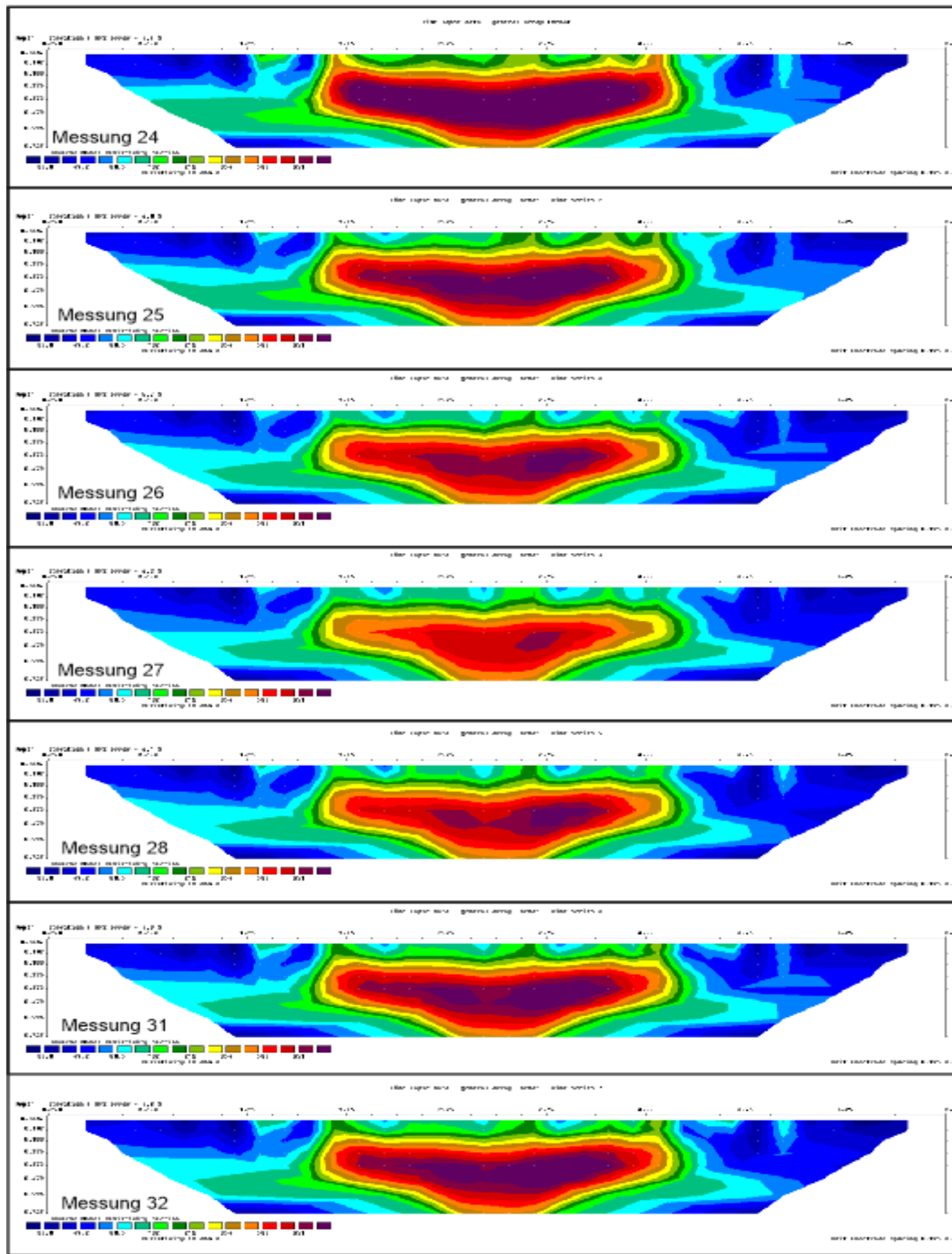


Abbildung 72: Profil1: Ergebnisse der Time-lapse Inversion der Messungen 24 bis 32, ohne die Messungen 29 und 30. Berechnung nach Messung 24. Abbildung zeigt die Widerstandssection aus Wenner-Alpha und-Beta Daten. Deutliche Abnahme des Widerstandes in Folge der Bewässerung. Beim Auftrocknen wieder Anstieg des Widerstandes.

Der Trend bei der Bewässerung gleicht zwar jedem des Vortages, was hier jedoch beim Vergleich der eigenständigen Messungen und jener mittels Time-lapse Inversion schnell deutlich wird ist, dass die eigenständige Inversion hier den Einfluss des Niederschlages stark überzeichnet. So zeigt sich nach der Bewässerung am Beispiel von Messung 27 nur mehr ein Bereich in der Mitte, welcher ca. 500 Ωm entspricht, während sich bei der Time-lapse Inversion in derselben Messung noch ein Bereich zeigt, der einer Größenordnung von etwa 850 Ωm entspricht. Abbildung 73 zeigt abschließend noch den Verlauf der Bewässerung bzw. der Entwässerung bezogen auf Messung 24. Wobei negative Werte wieder einer Wasserzunahme und positive einer Abnahme entsprechen.

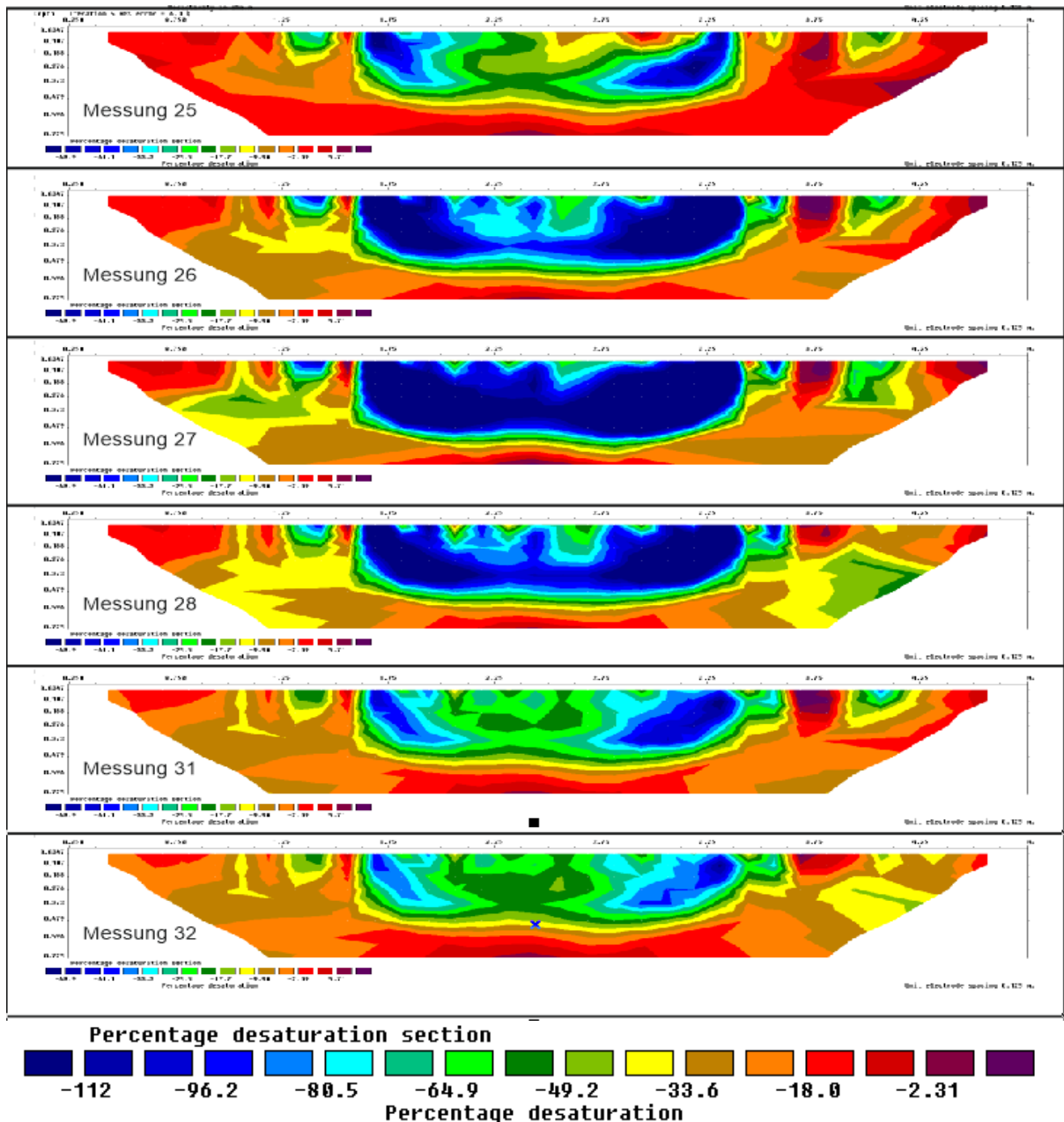


Abbildung 73: Profil 1: Veränderung Entwässerung in Prozent bezogen auf Messung 24; negative Werte entsprechen dabei Wasserzufuhr und positive einer Entwässerung. Abnahme des Widerstandes durch Bewässerung (blau) und anschließendes Auftrocknen (grün). Auftrocknen vor allem im zentralen Bereich um die Leckage und am Rand.

Auch hier ist wieder gut zu erkennen, dass durch die Bewässerung der Widerstand zuerst abnimmt, wobei man hier sehr gut sieht, dass erst bei höheren Wassermengen eine Versickerung stattfindet. Der zentrale Bereich um die

Gasleckage zeigt hier noch deutlicher, dass es in diesem Bereich zum schnelleren Auftrocknen kommt. Die Zunahme des Widerstandes in größerer Tiefe, welche mit einer Abnahme des Wassergehaltes einher geht, ist auch hier wieder zu beobachten.

4.5.4 Zusammenfassung Multielektroden Geoelektrik

Die Ergebnisse der Multielektroden Geoelektrik bestätigten die Vermutungen der vorangegangenen Untersuchungen, betreffend der bevorzugten Wege des Gases an die Oberfläche. Auch der Anstieg des Widerstandes in der Tiefe, am Beginn einer Berechnung, konnte durch dieses Verfahren bestätigt werden. Hier konnte auch erstmals der Einfluss der Leckage auf das Auftrocknen des Bodens gezeigt werden, da im Bereich der Undichtheit der Wassergehalt deutlich schneller sank als weiter Außen. Die Ergebnisse der Multielektroden Geoelektrik decken sich dabei sehr gut mit den parallel dazu durchgeführten Messungen der Gaskonzentration an der Oberfläche. Diese zeigte ebenfalls erhöhte Gaskonzentrationen an jenen Stellen, die schneller auftröckneten.

5 Ergebnisse / Diskussion

Die Versuche auf dem EVN Testgelände unter den verschiedenen Bedingungen haben gezeigt, dass nur einige der geophysikalischen Messverfahren überhaupt eine Aussicht auf Erfolg haben. Die Messungen der Magnetik und Elektromagnetik waren zu sehr durch den enormen Störeinfluss der Armierung und anderer metallischer Objekte in der Umgebung der beiden Messbunker beeinflusst. Da der Einfluss einer möglichen Gasleckage auf die Messdaten dieser beiden Verfahren, wenn überhaupt sehr gering ausfallen würde, ist es fraglich ob unter realen Voraussetzungen damit eine Leckage gefunden werden könnte. Die Probleme stellen dabei vor allem jegliche Arten von unbekanntem Störkörpern im Untergrund dar. Diese Störkörper können vergrabene Metallboxen bis hin zu nicht im Plan verzeichneten Stromleitungen oder ähnliches sein. Die Messung der Suszeptibilität lieferte zusätzliche Informationen, z.B.: die Abgrenzung der beiden Materialbereiche, die bei den anderen Verfahren genutzt wurden.

Die Messungen des Eigenpotentials brachten hinsichtlich der Gasortung die besten Ergebnisse aller geophysikalischen Messverfahren. Nur mittels Eigenpotential war eine direkte Identifizierung der Gasaustritte möglich. Es konnte gezeigt werden, dass diese Methode auch in der oberflächennahen Gasortung funktioniert. Die Ansprechzeit dieses Verfahrens lag dabei zwar über jenem der direkten Gasmessung, aber aufgrund der geringen Kosten dieser Methode ergeben sich durchaus Einsatzmöglichkeiten für Fälle, in denen eine konventionelle Überwachung mittels Gasdetektoren nicht notwendig oder zu teuer ist. Eine solche Einsatzmöglichkeit könnte beispielsweise im Bereich von Altlastenstandorten sein.

Die Multielektroden Geoelektrik konnte viele der Fragen, welche im Verlauf der anderen Messungen auftraten klären. So bestätigte sich durch diese Messungen, dass es bevorzugte Bahnen für das Erdgas, von der Leckstelle an die Oberfläche gegeben hat. Eine direkte Ortung war mit ihr zwar nicht möglich, da ohne den äußeren Einfluss eines Niederschlages der Widerstandscontrast, verursacht durch die Leckage, nicht messbar war. Im Anschluss an die Bewässerungen konnte der Weg des Gases an die Oberfläche mit diesem Verfahren aber sehr gut dokumentiert werden. Die Ergebnisse die hier erzielt wurden zeigen, dass die Multielektroden Geoelektrik zwar eher unbrauchbar für die Gaslecksuche oder ein Monitoring ist, da sie einen Boden mit hoher Wassersättigung benötigt, damit sich ein Contrast durch das Erdgas zeigt. Aber die Erkenntnisse die aus diesen Messungen gezogen werden können, werden helfen, die Gaslecksuche wie sie derzeit durchgeführt wird, zu

verbessern und den Einfluss von Niederschlag besser abzuschätzen und zu verstehen.

Nach Meinung des Autors wird der Einfluss von Niederschlag auf die Lecksuche momentan viel zu groß bemessen. Bei den Messungen im Bunker war kein Oberflächenabfluss vorhanden, daher musste die gesamte Wassermenge entweder versickern oder verdunsten. Wenn man nun den Faktor des Oberflächenabflusses dazu nimmt, erkennt man sehr schnell, dass bei normalen Verhältnissen eine noch viel größere Menge notwendig wäre um den Boden zu beeinflussen. Dabei gilt es zwischen zwei Arten des Oberflächenabflusses zu unterscheiden. Der Sättigungsabfluss setzt ein, wenn alle Poren eines Bodens vollständig mit Wasser gefüllt sind und damit kein neues Wasser mehr aufgenommen werden kann. Der Horton-Abfluss tritt ein wenn die Niederschlagsintensität größer ist als die Infiltrationsrate des Bodens (Horton, 1933). Er ist damit sehr stark von der Art des Niederschlages, Starkregen oder leichter Nieselregen abhängig. Damit kann das bestehende Wissen bei der Gaslecksuche, wonach ein Starkregen zu einer kürzeren Unterbrechung als dieselbe Menge Niederschlag über einen längeren Zeitraum führt bestätigt werden. Die Dauer der Unterbrechung ist aber oft viel zu hoch bemessen, da bei befestigten Oberflächen aufgrund der fehlenden Infiltrationsmöglichkeit so gut wie kein Wasser in den Boden gelangt und damit die Gasausbreitung im Boden nicht gestört wird. Die Messungen im Testgelände haben gezeigt, dass selbst bei extremer Bewässerung mit 100 Litern pro Quadratmeter über wenige Tage hinweg, also mehr als dem durchschnittlichen Monatsniederschlag in den Sommermonaten, die Gasleckage an der Oberfläche bereits wenige Minuten nach dem Ende des Regens wieder messbar war. Diese Aussage gilt unabhängig vom verwendeten Messsystem, wobei der Laser leichte Vorteile gegenüber den anderen Messsystemen aufwies. Diese Vorteile sind jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit und aus diesem Grund wird nicht näher auf sie eingegangen.

Die Einschränkung der Messtätigkeit bei Regen besteht also fast ausschließlich darin, dass die Messgeräte nicht auf direkten Wasserkontakt ausgelegt sind und Wasser im Sondensystem die Messzellen zerstört. Eine Wiederaufnahme der Messtätigkeit erst nach dem Abtrocknen der Oberfläche ist also vom Standpunkt der Gerätetechnik durchaus sinnvoll, um Schäden an den Messgeräten und damit verbundene Kosten zu vermeiden. Dies stellt nun doch einen deutlichen Unterschied zum derzeitig gängigen Umgang mit Niederschlägen und der Dauer der Unterbrechung dar. Ich bin der Meinung, dass es mit den Erkenntnissen dieser Arbeit möglich sein wird, die effektiven Messtage im Vergleich zum Status quo leicht zu erhöhen, ohne dabei die Qualität oder gar den Erfolg der Messungen zu senken.

6 Verzeichnisse

6.1 Literatur

Alvarez R., 1973. Complex dielectric permittivity in rocks: A method for its measurement and analysis. *Geophysics* 38, 920–940.

Antelman, MS., 1989. *The encyclopedia of chemical electrode potentials*. Plenum, New York

Apparao, A., 1991. Geoelectric profiling. *Geoexploration*, 27, 351-389

Archie, G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid to determining some reservoir characteristics, *Trans A.I.M.E.*, 146, 389-409.

Beblo, M., 1982: Elektrische Eigenschaften. In: Angenheimer, G. (Hrsg.): *Landolt – Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik, Neuer Serie V, Bd. 1b*, 254-261, Springer Berlin Heidelberg NewYork Tokyo.

Binley A., Kemna A., 2005. DC resistivity and induced polarization methods. In: Rubin Y, Hubbard SS (eds) *Hydrogeophysics*. Springer, Heidelberg, pp 129–156.

Brewster, M. L., Annan, A. P., 1994. Ground-penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200 MHz radar, *Geophysics*, 59, 1211-1221.

Brewster, M. L., Annan, A. P., Redman, J. D., 1992. GPR Monitoring of DNAPL migration in a sandy aquifer. In: *Fourth international conference on ground penetrating radar*. Geological Survey of Finland, Special Paper 16, 185-190.

Brötzenberger, H., Pass, F. 1987. Untersuchungen zur Ausbreitung von Erdgas im Boden, *gwf Das Gas- und Wasserfach, Gas – Erdgas*, vol. 128 nr. 2 pp. 69-77.

Byrdina, S., Revil, A., Pant, S.R., Koirala, B.P., Shrestha, P.L., Tiwari, D.R., Gautman, U.P., Shrestha, K., Sapkota, S.N., Contraires, S. and Perrier, F., 2009: Dipolar self-potential anomaly associated with carbon dioxide and radon flux at Syabru-Bensi hot springs in central Nepal. – *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 114, B10101, doi: 10.1029/2008JB006154.

Chelidze T.L., Gueguen Y., 1999. Electrical spectroscopy of porous rocks: A review – I. Theoretical models. *Geophysical Journal International* 137, 1–15.

Chen Y., Or D., 2006. Geometrical factors and interfacial processes affecting complex dielectric permittivity of partially saturated porous media. *Water Resources Research* 42, W06423, doi:10.1029/ 2005WR004744.

Corwin, R.F. and Hoover, D.B.,1979. The self-potential method in geothermal exploration. *Geophysics*, 44(2): 226-245.

Davis, J. J., Annan, A. P., 1989 Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, *Geophys. Prosp.*, 37, 531-551.

de Lima O.A.L., Sharma M.M., 1992. A generalized Maxwell-Wagner theory for membrane polarization in shaly sands. *Geophysics* 57(3), 431–440.

deGroot-Hedlin, C., Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.

Dukhin S.S., Shilov P., 1974. *Dielectric Phenomena and the Double Layer in Disperse Systems and Polyelectrolytes*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Fournier, C., 1989. Spontaneous potentials and resistivity surveys applied to hydrogeology in a volcanic area: case history of the Chaîne des Puys (Puy-de-Dôme, France). *Geophysical Prospecting*, 37(6): 647-668.

Fox, R.C., Hohmann, G.W., Killpack, T.J., Rijo, L., 1980. Topographic effects in resistivity and induced-polarisation surveys, *Geophysics*, 45, 75-93.

Friedel, S., 2000. Über die Abbildungseigenschaften der geoelektrischen Impedanztomographie unter Berücksichtigung von endlicher Anzahl und endlicher Genauigkeit der Meßdaten. Dissertation Universität Leipzig, Shaker, Aachen.

Greinwald, S., 1985. Wechselstromverfahren. In: Bender, F. (Hrsg.): *Angewandte Geowissenschaften, II: Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften*, Enke, Stuttgart, 352-387.

Haalick, H., 1958. *Lehrbuch der angewandten Geophysik, teil II*. Bornträger, Berlin.

Hahn, A., 1978. Die Einheiten des internationalen Systems in der Geomagnetik, *J. Geophys.*, 44, 189-202.

Hatzsch, P., 1994. *Bohrlochmessungen*. Enke, Stuttgart

Hoeks, J., 1972. Effect of leaking natural gas on soil and vegetation in urban areas, Centre for agric publishing and documentaion, Wageningen

Homilius, J., Flathe, H., 1988. Geoelektrik in der Wassererschließung. In SCNEIDER, H. (Hrsg.): Die Wassererschließung: Erkundung, Bewirtschaftung und erschließung von Grundwasservorkommen in Theorie und Praxis, 3. Aufl., Vulkan-Verlag Essen, 203-280.

Horton, R.E., 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. EOS Trans. AGU, 14, 460-466.

Jacobs, F., Petzold, H., Nitsch, K.-H., 1987. Geoelektrischer Erkundungen von Lagerungsstörungen in Lockergesteinen, Geophysik und Geologie, Geophys. Veröff. D. KMU Leipzig. III, H. 4, Akademie Berlin, 161-195.

Johari, G. P., Charlette, P. A., 1975. The permittivity and attenuation in polycrystalline and single-crystal ice ICH at 35 and 60 MHz, J.Glac., 14, 293-203.

Knödel, K., Krummel, H., Lange, G., 2005. Geophysik: Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. 2. Überarbeitete Auflage, Springer, Berlin

Leroy P., Revil A., Kemna A., Cosenza P., Ghorbani A., 2008. Complex conductivity of water-saturated packs of glass beads. *Journal of Colloid and Interface Science* 321(1), 103–117.

Lesmes D.P., Morgan F.D., 2001. Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks. *Journal of Geophysical Research* 106, 13329–13346.

Lindner, H., Scheibe, R., 1978. Die Berechnung von δg - und δT - Anomalien für regelmäßige homogene Störkörper, *Gerlands Beitr. Geophys.*, 87, 29-45.

Loke, M.H., 2001. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo Software, Malaysia.

Marshall D.J., Madden T.R., 1959. Induced polarization, a study of its causes. *Geophysics* 24(4), 790–816.

Merriam J.B., 2007. Induced polarization and surface electrochemistry. *Geophysics* 72(4), F157–F166.

Militzer, H., Weber, F., 1985. Angewandte Geophysik, 2: Geoelektrische-Geothermik-Radiometrie-Aerogeophysik, Springer, Wien, Akademie Berlin.

Moreau, F., Gibert, D., Saracco, G., 1996. Filtering non-stationary geophysical data with orthogonal wavelets. *Geophys Res Lett* 23:407–410

Ortiz, I., Vongonten, W.D., Osoba, J.S., 1972. Relationship of the electrochemical potential of porous media with hydrocarbon saturation. Proc. SPWLA 13th Annual Logging Symposium, May 7-10

ÖVGW Richtlinie G B350, Überprüfung von Erdgasleitungen auf Dichtheit (Gasspüren), Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach, 2014

ÖVGW Richtlinie G O241, Gasspür- und Gaskonzentrationsmessgeräte, Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach, 2014

Parasins, D.s., 1986. Principles of applied geophysics, 4th edn. Chapman and Hall, London

Petiau, G., 2000. Second generation of lead-lead chloride electrodes for geophysical applications. *Pure Appl Geophys* 157:357–382

Revil A., Karaoulis M., Johnson T., Kemna A., 2012. Review: Some low-frequency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology. *Hydrogeology Journal* (2012) 20: 617–658.

Reynolds, John M., 1997. An introduction to applied and environmental geophysics, 796, *John Wiley*, New York

Roy, A., Apparao, A., 1971. Depth of Investigation in direct current methods. *Geophysics*, 36, 943-959.

Sasaki, Y., 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.

Schön, J., 1983. Petrophysik: physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen, F. Enke.

Schütze C., Sauer U., Lamert H., Dietrich P., 2012. Geophysical and soil gas monitoring methods for the characterization of CO₂ degassing sites – What can we learn from natural analogues?, *Berichte Geol. B. A.*, 93, ISSN 1017-8880

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., 1990. Applied geophysics, 2nd. Edn. Cambridge University Press, Cambridge.

Titov K., Komarov V., Tarasov V., Levitski A., 2002. Theoretical and experimental study of time domain-induced polarization in water-saturated sands. *Journal of Applied Geophysics* 50(4), 417–433.

Ulbrich M., Jänchen, H., 2008. Grundlagen und Praxis der Gasrohrnetzüberprüfung, 3.Auflage, Hessen

Vaudelet P., Revil A., Schmutz M., Franceschi M., Bégassat P., 2011. Induced polarization signatures of cations exhibiting differential sorption behaviors in saturated sands. *Water Resources Research* 47(2), W02526, doi:10.1029/2010WR009310.

Vinegar H.J., Waxman M.H., 1984. Induced polarization of shaly sands. *Geophysics* 49(8), 1267–1287.

Ward, S.H., 1990. Resistivity and induced polarisation methods. In: Ward, S.H. (ed.): Geotechnical and environmental geophysics, I: Review and tutorial. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 147-189.

Wienberg, R., 1990. Zum Einfluß organischer Schadstoffe auf Deponietone, teil 1: Unspezifische Interaktionen. *AbfallwirtschaftsJournal* 2, 222-230. Teil 2: Spezifische Interaktionen. *AbfallwirtschaftsJournal* , 393-403.

Wong J., 1979. An electrochemical model of the induced polarization phenomenon in disseminated sulfide ores. *Geophysics* 44(7), 1245–1265.

Yaramanci, U., Kulenkampff, J., Konsemüller, S., Latuske, K., 1995. Untersuchung von Durchlässigkeits- und Speichereigenschaften von Fest- und Lockgesteinen für Kontaminanten in Hinblick auf petrophysikalische Struktureigenschaften. TU Clausthal, Inst. F. Geophysik. Im Auftrag der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

<http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v031/v031.htm>

Laurent M., Electrical surveying Part III: Self-potential method, ETH Zürich

Patent EP 0212275 A2: Verfahren zur Bestimmung der Grenzen von unterirdischen Erdgas-Lagerstätten.

6.2 Gleichungen Abkürzungsverzeichnis

Nernst-Potential

R	Universelle Gaskonstante
T	Absolute Temperatur in Kelvin
n	Ionische Valenz
F	Faraday Konstante
C ₁ und C ₂	Lösungs Konzentration

Ohmsches Gesetz

R	Elektrischer Widerstand
U	Spannung
I	Stromstärke
ρ	Spezifischer elektrischer Widerstand
A	Querschnitt
L	Länge

Archie Gleichung

ρ	effektiver Gesteinswiderstand
ρ_w	Widerstand Porenwasser
ϕ	Porosität
S	Wassersättigung
a	Konstante
m	Zementations-Konstante
n	Sättigungskoeffizient-Konstante
F	Formationsfaktor

Gleichung (6)

f_x	Horizontaler Flachheitsfilter
f_z	Vertikaler Flachheitsfilter
J	Matrix der partiellen Ableitungen
u	Dämpfungsfaktor
d	Störungsvektor des Models
g	Diskrepanz Vektor

6.3 Tabellen

Tabelle 1: Qualitative Bewertung der gebräuchlichsten widerstandsgeoelektrischen Verfahren nach Ward (1990). Erkundungstiefe: a- nach Roy und Apparao (1971) und b- nach Barker (1989); (Knödel et al., 2005).....	15
Tabelle 2: Übersicht über die Experimente.....	36
Tabelle 3: Qualität der Mess-Arrays an den vier Messtagen: gute Qualität (grün) bis zu 5 von 51 Fehlmessungen; mittlere Qualität (gelb) bei 6-10 Fehlmessungen und schlechte Qualität (rot) bei mehr als 10 Fehlmessungen.	74

6.4 Abbildungen

Abbildung 1: Mineral/Wasser Grenze um ein Korn im Porenraum, modifiziert durch Revil and Florsch (2010).	9
Abbildung 2: Nicht polarisierbare Elektrode, Laurent ETH	10
Abbildung 3: Prinzip der Widerstandsmessung mit einer Vierpunktanordnung (Knödel et al., 2005).....	12
Abbildung 4: Messordnungen der Gleichstromgeoelektrik (Knödel et al., 2005)	13
Abbildung 5: Sensitivität ausgewählter Konfigurationen für homogenen Halbraum. (a, b) Pol-Pol, (c, d) Pol-Dipol, (e, f) Dipol-Dipol, (g, h) Schlumberger, (i, j) Wenner, (k, l) Dipol-Dipol, Elektroden in Bohrung, (m) Wenner Sensitivität xy-Ebene. Die Farbskalen der Einzelabbildungen sind normiert auf den jeweiligen Maximalwert nach Friedel (2000) (Knödel et al., 2005).....	14
Abbildung 6: Beispiel für eine ERT. a- wahre Widerstands Verteilung b- Pseudosektion des scheinbaren spezifischen Widerstandes bezogen auf eine Pseudotiefe ($n a$), wobei n ein Vielfaches des Elektrodenabstandes a ist. c- Widerstand-Tomogram nach der Inversion. (Revil et al., 2012).	17
Abbildung 7: Auswirkung der Deckschichtwiderstände auf die Sondierungskurve. (Knödel et al., 2005).....	18
Abbildung 8: Prinzip der Zeitbereichs-IP (Time-domain-IP) und der Frequenzbereich-IP (Frequency-domain-IP). a- Zeitbereich-IP, Messung des sekundären Abklinges nach dem Abschalten des Stroms, b- Frequenzbereich-IP, der eingespeiste Strom ist harmonisch und die Spannung zwischen M und N wird mittels einer Abtast-Frequenz (diese hat nichts mit der Frequenz des eingespeisten Stromes zu tun), welche hoch genug sein muss um den geringen Phasenunterschied zwischen Strom und Spannung zu messen. Die Amplitude der Leitfähigkeit und die Phase können zur komplexen Leitfähigkeit	

zusammengefasst werden. Die komplexe Leitfähigkeit wird durch eine In-phase Komponente (realer Teil) und eine Out-of-phase Komponente (imaginärer Teil) charakterisiert und über einen Frequenzbereich gemessen. (Revil et al., 2012).	20
Abbildung 9: Typ A: Polarisierung der Stern- und Diffusionsschicht und Membranpolarisation; Typ B: Kontinuierliche Diffusionsschicht, daher keine Polarisierung dieser Schicht; Typ C: Stern- und Diffusionsschicht sind kontinuierlich und polarisieren daher nicht. Daher nur Membran- und Maxwell-Wagner Polarisierung, diese werden durch die elektrische Leitfähigkeit in der Doppelschicht beeinflusst (dieser Beitrag wird auch Oberflächenleitfähigkeit genannt). (Kemna et al., 2012).	22
Abbildung 10: Membranpolarisation durch äußeres elektrisches Feld, Revil und Cosenza (2010).	23
Abbildung 11; Prinzip des elektromagnetischen Induktionsverfahrens nach Militzer und Weber (1985) (Knödel et al., 2005).	24
Abbildung 12: Wertebereiche der magnetische Suszeptibilität verschiedener Gesteine (Schön, 1983).	27
Abbildung 13, rechts-oben: Grundriss der beiden Sandbunker, links-unten: Aufriss: Sandbunker 1 ohne und Sandbunker 2 mit Bewässerung; links-oben und rechts-unten: nicht und teilverfüllte Ansicht der beiden Bunker.	28
Abbildung 14: Lageplan des Schulungsgeländes.	29
Abbildung 15: Sinterabschluss und dessen Abdeckung.	30
Abbildung 16: Sandbettung um die Gasaustrittsstellen.	31
Abbildung 17: Vollständig verfüllter Sandbunker ohne Rieselüberdeckung.....	31
Abbildung 18: Bewässerungsanlage bei Sandbunker 2.	32
Abbildung 19: Gesamtansicht, Sandbunker 1 und 2.....	33
Abbildung 20: Grundsätzlicher Aufbau der Schadensstellendarstellung.	33
Abbildung 21: Ansicht Messgelände, mit Position der Eigenpotential Elektroden und der Wenner Tiefensondierung.....	35
Abbildung 22: Magnetik: Totalfeld T1 und T2 über das SN Profil. Anomalie durch Stahlbeton.....	37
Abbildung 23: Magnetik: Vertikalgradient. Anomalie durch Stahlbeton.	38

Abbildung 24: magnetische Suszeptibilität: über Profil Süd-Nord. Suszeptibilitätsunterschiede bedingt durch verschiedene Materialien.	39
Abbildung 25: Elektromagnetik: EM-38 Profil ohne Gas, Messung parallel und normal auf das Profil. Anomalien durch Stahlbeton.	41
Abbildung 26: Elektromagnetik: EM-38 Profil vor und nach Gas. Messungen normal auf das Profil. Randbereich gestört durch Stahlbeton.	42
Abbildung 27: Elektromagnetik: EM-38 Bunker nass vor und nach Beregnung mit 15 Liter pro Quadratmeter, Messungen normal auf das Profil. Randbereich gestört durch Stahlbeton.	43
Abbildung 28: Elektromagnetik: EM-38 Bunker trocken Vergleich der beiden Tage, Messungen normal auf das Profil. Randbereich gestört durch Stahlbeton.	43
Abbildung 29: Eigenpotential: entlang des Süd-Nord Profils. Messabstand 1,0 m, Basiselektrode bei Laufmeter 20 und im NW des trockenen Bunkers. Erhöhte Eigenpotentialwerte in der Mitte der beiden Bunker.	45
Abbildung 30: Eigenpotential: Zeitreihe 07.04.2016. Der rote Bereich kennzeichnet die Beregnung und die gelbe Linie den Start der Begasung. Erhöhtes Eigenpotential durch Beregnung und rapider Anstieg durch Gasabsaugung.	46
Abbildung 31: Lage der Messpunkte (X /Y): A (1,2 m/4,5 m), B (3,7 m / 3,7 m) und C (2,9 m / 0,9 m).	47
Abbildung 32: Eigenpotential: Zeitreihe 08.04.2016. Der rote Bereich kennzeichnet die Beregnung.	48
Abbildung 33: Vergleich ungefilterte Daten (links) mit gefilterten Daten (rechts) der Referenz-Elektrode.	49
Abbildung 34: Eigenpotential: Referenz-Elektrode am 12.04.2016.	50
Abbildung 35: Eigenpotential: Bunker Elektrode am 12.04.2016. Der rot markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung mit leichtem Anstieg des Eigenpotentials. Messlücke durch Ausfall der EDV Anlage.	50
Abbildung 36: Standardabweichung SP Bunker am 12.04.2016. Der rot markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung. Messlücke durch Ausfall der EDV Anlage.	51
Abbildung 37: Eigenpotential: Referenz-Elektrode am 13.04.2016.	52
Abbildung 38: Eigenpotential: Bunker Elektrode am 13.04.2016. Der rot markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung und die gelbe Linie den Beginn der Begasung.	52

- Abbildung 39: Standardabweichung SP Bunker am 13.04.2016. Der rot markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung und die gelbe Linie den Beginn der Begasung. Es ist ein deutlicher Anstieg des Noise Levels kurz nach Beginn der Begasung um 13:00 Uhr zu erkennen. 53
- Abbildung 40: Eigenpotential: Referenz-Elektrode am 14.04.2016. Unterbrechung der Messung durch Mäharbeiten im Bereich der Basis Elektrode..... 54
- Abbildung 41: Eigenpotential: Bunker Elektrode am 13.04.2016. Der rot markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung und die gelbe Linie den Beginn der Begasung. Unterbrechung der Messung durch Mäharbeiten im Bereich der Basis Elektrode..... 55
- Abbildung 42: Standardabweichung SP Bunker am 14.04.2016. Der rot markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung und die gelbe Linie den Beginn der Begasung. Erhöhtes Noise Level über den ganzen Tag. Unterbrechung der Messung durch Mäharbeiten im Bereich der Basis Elektrode..... 55
- Abbildung 43: Anordnung der Elektroden für Wenner Alpha, Beta und Gamma Arrays. Manual Res2dinv Geotomo Software 2010. 57
- Abbildung 44: Geoelektrik: links oben: Wenner-Alpha: $a=1,0m$ und SP; rechts oben: Wenner-Alpha: $a=0,5m$, $a=1,0m$ und $a=1,5m$; links unten: Erdungsmessgerät; rechts unten: Elektroden mit Beschriftung für Wenner-Alpha rechts oben..... 58
- Abbildung 45: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. Wenner-Alpha $a=1,0m$ am 07.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung mit einem deutlichen Anstieg des Widerstandes. 59
- Abbildung 46: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. Wenner-Alpha $a=1,0m$ am 08.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung, mit Anstieg des Widerstandes zu Beginn der Beregnung und Abfall bei erhöhter Niederschlagsmenge. 60
- Abbildung 47: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=0,5m(N=1)$, $a=1,0m(N=2)$ und $a=1,5m(N=3)$ gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 11.04.2016..... 61
- Abbildung 48: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=0,5m(N=1)$, $a=1,0m(N=2)$ und $a=1,5m(N=3)$ gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 12.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung, mit einer Abnahme des Widerstandes für $N=1$ 62
- Abbildung 49: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=1,0m(N=2)$ und $a=1,5m(N=3)$ gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am

12.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung mit Anstieg, und anschließendem Abfallen des Widerstandes bei erhöhter Niederschlagsmenge.	63
Abbildung 50: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=0,5$ m(N=1), $a=1,0$ m(N=2) und $a=1,5$ m(N=3) gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 13.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung, mit einer Abnahme des Widerstandes für N=1, und die gelbe Linie den Beginn der Begasung.....	64
Abbildung 51: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=1,0$ m(N=2) und $a=1,5$ m (N=3) gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 13.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung und die gelbe Linie den Beginn der Begasung. Widerstandsverhalten wie in Abbildung 49.....	65
Abbildung 52: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=1,0$ m(N=2) und $a=1,5$ m (N=3) gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 14.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung mit einer Abnahme des Widerstandes für N=1, und die gelbe Linie den Beginn der Begasung.....	66
Abbildung 53: Geoelektrik: zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=1,0$ m(N=2) und $a=1,5$ m (N=3) gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 14.04.2016. Der blau markierte Bereich kennzeichnet die Beregnung und die gelbe Linie den Beginn der Begasung. Anstieg des Widerstandes für N=2 und N=3 durch geringe Niederschlagsmenge.	67
Abbildung 54: Geoelektrik zeitliche Variation des spezifischen Widerstandes. $a=1,0$ m(N=2) und $a=1,5$ m (N=3) gemessen in Wenner-Alpha Anordnung am 15.04.2016. Die gelbe Linie kennzeichnet den Beginn der Begasung. Trend beim Auftrocknen Richtung Ausgangswert.	68
Abbildung 55: Messgeräte STING R1 und SWIFT.	70
Abbildung 56: Anordnung der Multielektroden Geoelektrik Profile im nassen Bunker.	71
Abbildung 57: Multielektroden Geoelektrik: links Profil 1 und rechts Profil 2; Elektrodenabstand 25 cm.	72
Abbildung 58: Multielektroden Geoelektrik: links Profil 1 und rechts Profil 3 mit entferntem Schotter. Anmerkung: Foto gespiegelt für besseren Vergleich mit Abbildung 57.....	73

- Abbildung 59: Basismodell für die Inversion mit DC2DInvRes: Außenbereich (blau) mit einem Widerstand von 70 Ωm und Innenbereich (rot) mit 300 Ωm 76
- Abbildung 60: DC2DInvRes-Software: Messungen 17 bis 23; linker Teil Rohdaten: oben: Wenner-Alpha, unten: Wenner-Beta; rechter Teil: Ergebniss nach dem Ende der Inversion dargestellt in Blöcken (links) und mit geglätteter Oberfläche (rechts); Qualität der Inversionsergebnisse als RMS. Unten: logarithmische Farbskala. 77
- Abbildung 61: Profil 1: Messung 1: **a.)** Wenner-Alpha-Array und **b.)** Wenner-Beta-Array von oben nach unten: Pseudosektion des gemessenen scheinbaren Widerstands, Pseudosektion des berechneten scheinbaren Widerstands und Inversionsmodell Widerstandssketion mit RMS. **c.)** Wenner-Alpha+Beta-Array Inversionsmodell Widerstandssektion..... 79
- Abbildung 62: Profil 1: Messung 2: **a.)** Wenner-Alpha-Array und **b.)** Wenner-Beta-Array von oben nach unten: Pseudosektion des gemessenen scheinbaren Widerstands, Pseudosektion des berechneten scheinbaren Widerstands und Inversionsmodell Widerstandssketion mit RMS. **c.)** Wenner-Alpha+Beta-Array Inversionsmodell Widerstandssektion..... 80
- Abbildung 63: Profil 2: Messung 1: **a.)** Wenner-Alpha-Array und **b.)** Wenner-Beta-Array von oben nach unten: Pseudosektion des gemessenen scheinbaren Widerstands, Pseudosektion des berechneten scheinbaren Widerstands und Inversionsmodell Widerstandssketion mit RMS. **c.)** Wenner-Alpha+Beta-Array Inversionsmodell Widerstandssektion..... 81
- Abbildung 64: Profil 2: Messung 2: **a.)** Wenner-Alpha-Array und **b.)** Wenner-Beta-Array von oben nach unten: Pseudosektion des gemessenen scheinbaren Widerstands, Pseudosektion des berechneten scheinbaren Widerstands und Inversionsmodell Widerstandssketion mit RMS. **c.)** Wenner-Alpha+Beta-Array Inversionsmodell Widerstandssektion..... 82
- Abbildung 65: Profil 1: Ergebnisse der eigenständigen Inversion der Messungen 7, 9, 10 und 13. Abbildung zeigt die Widerstandssektion aus Wenner-Alpha und-Beta Daten. Bewässerung nach Messung 7. Absinken des Widerstandes an der Oberfläche durch Bewässerung..... 84
- Abbildung 66: Profil 1: Ergebnisse der Time-lapse Inversion der Messungen 7, 9, 10 und 13. Abbildung zeigt die Widerstandssektion aus Wenner-Alpha und-Beta Daten. Bewässerung nach Messung 7. Absinken des Widerstandes an der Oberfläche durch Bewässerung..... 85

- Abbildung 67: Profil 2: Ergebnisse der eigenständigen Inversion der Messungen 3 und 6. Abbildung zeigt die Widerstandssektion aus Wenner-Alpha und-Beta Daten. 86
- Abbildung 68: Profil1: Ergebnisse der eigenständigen Inversion der Messungen 17 bis 23. Berechnung nach Messung 17. Abbildung zeigt die Widerstandssektion aus Wenner-Alpha und-Beta Daten. Deutliche Abnahme des Widerstandes in Folge der Bewässerung. Beim Auftrocknen wieder Anstieg des Widerstandes. 87
- Abbildung 69: Profil1: Ergebnisse der Time-lapse Inversion der Messungen 17 bis 23. Berechnung nach Messung 17. Abbildung zeigt die Widerstandssektion aus Wenner-Alpha und-Beta Daten. Deutliche Abnahme des Widerstandes in Folge der Bewässerung. Beim Auftrocknen wieder Anstieg des Widerstandes. 88
- Abbildung 70: Profil 1: Veränderung Entwässerung in Prozent bezogen auf Messung 17; negative Werte entsprechen dabei Wasserzufuhr und positive einer Entwässerung. Abnahme des Widerstandes durch Bewässerung (blau) und anschließendes Auftrocknen (grün). Auftrocknen vor allem im Zentralen Bereich um die Leckage und am Rand. 90
- Abbildung 71: Profil1: Ergebnisse der eigenständigen Inversion der Messungen 24 bis 32, ohne die Messungen 29 und 30. Berechnung nach Messung 24. Abbildung zeigt die Widerstandssektion aus Wenner-Alpha und-Beta Daten. Deutliche Abnahme des Widerstandes in Folge der Bewässerung. Beim Auftrocknen wieder Anstieg des Widerstandes. 92
- Abbildung 72: Profil1: Ergebnisse der Time-lapse Inversion der Messungen 24 bis 32, ohne die Messungen 29 und 30. Berechnung nach Messung 24. Abbildung zeigt die Widerstandssektion aus Wenner-Alpha und-Beta Daten. Deutliche Abnahme des Widerstandes in Folge der Bewässerung. Beim Auftrocknen wieder Anstieg des Widerstandes. 93
- Abbildung 73: Profil 1: Veränderung Entwässerung in Prozent bezogen auf Messung 24; negative Werte entsprechen dabei Wasserzufuhr und positive einer Entwässerung. Abnahme des Widerstandes durch Bewässerung (blau) und anschließendes Auftrocknen (grün). Auftrocknen vor allem im Zentralen Bereich um die Leckage und am Rand. 95

Anhang

Digitale Messdaten auf USB-Drive.