




Lehrstuhl für Angewandte Geophysik

Masterarbeit



Entwicklung und Testung
geophysikalischer Prognosemodelle für
die Abfallzusammensetzung in Deponien

Roman Stiegler, BSc

November 2019

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.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 01.11.2019



Unterschrift Verfasser/in
Roman, Stiegler

Vorgelegt von:

Roman Stiegler

00935206

Betreuer:

Ao.Univ.-Prof. Dr.phil. Robert Scholger
Lehrstuhl für Angewandte Geophysik

Ass.Prof. Dipl.-Min. Dr.rer.nat. Daniel Vollprecht
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während dieser Abschlussarbeit und während des gesamten Studiums an der Montanuniversität Leoben unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt meinen Betreuern, Ao.Univ.-Prof. Dr.phil. Robert Scholger und Ass.Prof. Dipl.-Min. Dr.rer.nat. Daniel Vollprecht, die meine Arbeit betreut und begutachtet haben. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Angewandte Geophysik für die Unterstützung bei der Bearbeitung dieser Masterarbeit.

Ebenso gilt mein Dank Frau Christin Bobe, MSc für interessante Anregungen zum Thema dieser Arbeit und Herrn Bastian Küppers, MSc für die Beschaffung und Bereitstellung einiger Abfallfraktionen.

Mein größter Dank gebührt meiner Mama, Helmuth, Karina und Felix für die Unterstützung während des Studiums. Sie sind mir nicht nur mit Geduld und Verständnis stets beigestanden, sondern haben mir auch viel Kraft gegeben den erfolgreichen Universitätsabschluss zu erreichen.

Kurzfassung

Entwicklung und Testung geophysikalischer Prognosemodelle für die Abfallzusammensetzung in Deponien

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Charakterisierung von Deponieinhaltsstoffen durch nichtinvasive Methoden der Geophysik, um auf die Volumenanteile einzelner Abfallfraktionen in Deponien rückschließen zu können. Besonders heizwertreiche Fraktionen und Metalle stehen bei der Rückgewinnung von Ressourcen aus Deponien im Vordergrund. Anhand unterschiedlicher synthetischer Proben, die zum Teil aus Deponien stammen, werden magnetische Parameter durch Messungen der magnetischen Suszeptibilität und der natürlichen remanenten Magnetisierung im Labor untersucht. Dabei zeigen Eisen-Granalien eine vergleichsweise hohe magnetische Suszeptibilität. Die Intensität der natürlichen remanenten Magnetisierung ist bei Eisen-Granalien am höchsten. Die meisten Proben werden außerdem in Laborversuchen mittels geoelektrischer Messungen auf ihre elektrische Leitfähigkeit in gesättigten und erdfeuchten Zustand untersucht. Kunststofffraktionen weisen im erdfeuchten Zustand eine deutlich geringere elektrische Leitfähigkeit auf als bei vollständiger Sättigung. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen fließen in Modellberechnungen ein, die der Überprüfung der Machbarkeit geophysikalischer Erkundung dienen. Die rechnerische Überprüfung bestätigt die Skalierbarkeit zwischen Deponie- und Labormaßstab. In einem Technikums-Versuch werden einzelne Fraktionen in eine Versuchskammer eingebaut und eine geoelektrische Tomographie durchgeführt. Die Ergebnisse daraus werden mit Vorwärtsmodellberechnungen verglichen.

Abstract

Development and testing of geophysical models to characterize landfill compounds

This master's thesis is intended to characterize landfill compounds by non-invasive methods of geophysics in order to infer the volume fractions of individual waste fractions in landfills. Particularly calorific fractions and metals are in the foreground in the recovery of resources from landfills. Using a variety of synthetic samples, some of which originate from landfills, magnetic parameters are studied by measuring magnetic susceptibility and the natural remanent magnetization in the laboratory. Granulated pig iron shows comparatively high values of magnetic susceptibility. The intensity of natural remanent magnetization is strongest in granulated pig iron. Most of the samples are also examined in laboratory tests by means of geoelectric measurements for their electrical conductivity in a saturated and earth-moist state. Plastic fractions have a significantly lower electrical conductivity in the earth-moist state than at full saturation. The results of the investigations are incorporated in model calculations that serve to verify the feasibility of geophysical exploration. The computational verification confirms the scalability between landfill and laboratory scale. In a pilot-scale experiment, individual fractions are installed in a test chamber and a geoelectric tomography is performed. The results are compared with forward model calculations.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	3
1.1 Landfill Mining	3
1.2 Einsatz der Geophysik	4
1.3 Ziel dieser Arbeit	5
2 GRUNDLAGEN	6
2.1 Magnetisierung und magnetische Suszeptibilität	6
2.2 Geoelektrische Gleichstromverfahren	6
3 MATERIAL UND METHODEN	8
3.1 Probenübersicht	8
3.2 Messung der magnetischen Suszeptibilität	10
3.3 Messung der remanenten Magnetisierung	12
3.4 Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit in Laborversuchen	13
3.4.1 Leitfähigkeitsmessungen Zylinder 1	13
3.4.2 Leitfähigkeitsmessung Vlies	14
3.4.3 Leitfähigkeitsmessungen an Zylinder 2	14
3.4.4 Bestimmung der Leitfähigkeit für Sand und Kunststoff schwarz	17
3.5 Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit im Versuchsaufbau „Tank“	18
3.5.1 Zusammenstellung des Inhalts und Elektrodenanordnung	18
3.5.2 Bestimmung des Geometriefaktors der Versuchskammer	22
3.6 Versuchsdurchführung „Tank“	23
3.7 Vorwärtsmodellentwicklung	24
4 ERGEBNISSE	25
4.1 Magnetische Suszeptibilität der Fraktionen	25
4.2 Remanente Magnetisierung	32
4.2.1 Natürliche remanente Magnetisierung	32
4.2.2 Viskose remanente Magnetisierung	32
4.2.3 Königsberger Quotient	34
4.3 Elektrische Leitfähigkeit der Fraktionen in Laborversuchen	35
4.4 Ergebnisse der Machbarkeitsprüfung	39

4.4.1	Vergleichbarkeit von Labor- und Deponiemaßstab.....	39
4.4.2	Beispiele von Vorwärts-Modellberechnungen im Deponiemaßstab bei Dipol-Dipol- und Wenner-Elektrodenkonfiguration.....	40
4.5	Vorwärtsmodelle und geoelektrische Tomographie „Tank“	47
5	DISKUSSION.....	63
5.1	Magnetische Parameter.....	63
5.2	Elektrische Leitfähigkeit	67
5.3	Skalierbarkeit	68
5.4	Machbarkeit geophysikalischer Erkundung.....	69
6	ZUSAMMENFASSUNG	71
7	LITERATURVERZEICHNIS.....	73
7.1	Abbildungen	77
7.2	Tabellen	84
ANHANG.....		I
	Vergleichende Daten von Labor- und Deponiemaßstab.....	I

1 Einleitung

Die Rückgewinnung von Ressourcen aus Deponien durch Landfill Mining (Krook et al. 2012) und neuerdings auch Enhanced Landfill Mining (Jones et al. 2013) hat in den letzten Jahrzehnten zunehmend an Bedeutung gewonnen. Vor allem heizwertreiche Fraktionen, die der Energierückgewinnung dienen und Metalle, die der direkten stofflichen Verwertung zugeführt werden können, stehen dabei im Vordergrund (Krook et al. 2012).

Bei der Bestimmung der Materialzusammensetzung einer Siedlungsabfalldeponie kommen zumeist invasive Methoden zur Anwendung. Dazu zählen vor allem teure und zeitaufwändige Verfahren wie Bohren, Graben und händische Sortierung (Mor et al. 2006), durch die Deponien oftmals nur in geringen Umfängen erkundet werden können (McCann 1994).

Durch den Einsatz geophysikalischer Methoden können größere Abschnitte von Deponieabfällen nichtinvasiv bei relativ geringen Kosten untersucht werden. Diese Methoden werden seit Jahrzehnten in der Rohstoffexploration eingesetzt, um Erz- und Erdölvorkommen zu untersuchen (Dobrin und Savit 1960) und haben sich auch bei der Untersuchung von Deponien bewährt. Jedoch liegt der Schwerpunkt der meisten geophysikalischen Studien zu Deponien auf dem Thema der Umweltprobleme, die sich durch Deponiestoffe ergeben (Orlando und Marchesi 2001; Hermozilha et al. 2010; Porsani et al. 2004).

Im Rahmen der vorliegenden Studie kommen Messinstrumente der Geophysik zur Anwendung, mit denen magnetische und elektrische Parameter unterschiedlicher Fraktionen bestimmt werden. Zu den magnetischen Ergebnissen dieser Arbeit gibt es auch eine wissenschaftliche Publikation in der Zeitschrift *Detritus Journal* (Vollprecht et al. 2019). Die Ergebnisse aus der Bestimmung elektrischer Leitfähigkeit mittels Geoelektrik werden für Modellberechnungen herangezogen, um unter anderem die Vergleichbarkeit geoelektrischer Messungen im Labor- und Deponiemaßstab zu prüfen. Es erfolgt eine Gegenüberstellung von Ergebnissen einer geoelektrischen Tomographie aus einem Technikums-Versuch mit Modellberechnungen, die die Überstimmung der Modelle bestätigen soll.

1.1 Landfill Mining

Eine Form des Deponierückbaues, bei der die Wertstoffgewinnung aus Abfällen im Vordergrund steht, wird als „Landfill Mining“ bezeichnet (Fricke 2009). Zunehmend

hohe Preise am Markt für Sekundärrohstoffe begünstigen diese Form des Rückbaus (Bockreis und Knapp 2011; Dumont et al. 2017).

Vor einem geplanten Deponierückbau sind Flächenausmaß und Abfallvolumen zu ermitteln (Di Maio et al. 2018). Geht es um die Bewertung der Durchführbarkeit eines Landfill Mining Projektes, ist neben der Qualität der verschiedenen Stoffe, die fraktionelle Zusammensetzung deponierter Abfälle (Burnley 2007; Raga und Cossu 2018) ein wichtiger Punkt für die Rückgewinnung von Rohstoffen (Hölzle 2010). Abfälle unterscheiden sich maßgeblich durch den Energiegehalt (Heizwert) und Anteilen an Metallen (Rettenberger et al. 2011). Erkenntnisse über die stoffliche Zusammensetzung einer Deponie können deshalb dazu beitragen einen geordneten Deponierückbau oder Landfill Mining zu optimieren und das Wertstoffpotenzial (Winterstetter und Laner 2015) abzuschätzen. Es werden Voruntersuchungen zur Charakterisierung von Deponien und Abfällen (Cardarelli und Di Filippo 2004; Raga und Cossu 2018) notwendig, die zum Einsatz von schnellen und nichtinvasiven Methoden der Geophysik führen (Di Maio et al. 2018).

1.2 Einsatz der Geophysik

Fast alle Methoden der angewandten Geophysik sind für bestimmte Einsatzbereiche der Deponieflächenerkundung geeignet: Geoelektrik, Elektromagnetik, Georadar, Eigenpotential, Refraktionsseismik, Geomagnetik, Gravimetrie, Geothermie, Radiometrie und Bohrlochmessungen sind Verfahren der Lagerstättenexploration, die auch zur Deponieflächenerkundung eingesetzt werden können.

Geophysikalische Methoden gelten als schnell, kostengünstig, nichtinvasiv und dienen zur Bewertung des Ausmaßes des von Kontamination betroffenen Volumens. Zusätzliche Störeinflüsse werden durch diese Methode weitgehend vermieden (Bavusi et al. 2006; Chambers et al. 2006; Di Maio et al. 2018). Die Anwendung der Methoden ist nicht nur in der Entstehungsphase einer Deponie bei der Planung möglich, sondern kann auch während dem Betrieb, sowie in der Deponienachsorge erfolgen (Soupios und Ntarlagiannis 2017).

Das Anwendungsgebiet umfasst Ortung und Kartierung, Struktur- und Volumenanalysen, Deponieinhaltsanalysen, sowie Untersuchungen, die mit der Beeinflussung des Umlandes durch Schadstoffe zusammenhängen (Walach 1990).

Untersuchungen mittels geoelektrischer Tomographie (ERT) können wertvolle Informationen zur Zusammensetzung einer Deponie und Rückschlüsse auf die

Volumenanteile einzelner Deponiestoffe liefern. 3D ERT Untersuchungen an einer alten unregulierten Bauschuttdeponie ergaben eine deutliche Abgrenzung des schlecht leitenden Bauschutts zur gut leitfähigen darunterliegenden Tonschicht (Vargemezis et al. 2015). Dadurch konnte das Gesamtvolumen des festen Abfalls berechnet und für eine Sanierungsplanung herangezogen werden. Mit Magnetometrie, elektrischer Widerstandstomographie und Elektromagnetik konnten vergrabene Stahlfässer in tonig-sandigem Boden lokalisiert werden (Marchetti und Settimi 2011).

Bernstone et al. (2000) konnten die Eignung der Widerstandsmessungen als Methode zur Vorbeurteilung des Deponieinhaltes nur teilweise bestätigen. Der Feuchtigkeitsgehalt schien die Widerstandverteilung zu dominieren, sodass die Abfallart nicht mit den Widerstandsmodellen in direkte Beziehung gesetzt werden konnte, jedoch konnten diskrete Anomalien identifiziert werden.

1.3 Ziel dieser Arbeit

Vorrangiges Ziel dieser Arbeit war es ein Prognosemodell zu entwickeln, mit dem sich die Abfallzusammensetzung durch geophysikalische Verfahren bewerten lässt. Diese Arbeit befasst sich damit, Stoffe mittels geophysikalischer Methoden zu charakterisieren, um bestimmte Fraktionen des Abfalls unterscheiden zu können. In Laborversuchen wurden dazu physikalische Parameter wie die magnetische Suszeptibilität und die elektrische Leitfähigkeit mehrerer synthetischer Fraktionen ermittelt.

2 Grundlagen

2.1 Magnetisierung und magnetische Suszeptibilität

Bei induzierter Magnetisierung J_i , wird diese durch ein äußeres Feld H_a erzeugt. Die magnetische Volumenssuszeptibilität k stellt die dimensionslose Proportionalitätskonstante zwischen der induzierten Magnetisierung J_i und dem äußeren Feld H_a dar (Soffel 1991, 19f).

$$J_i = k \cdot H_a$$

Die spezifische Suszeptibilität in m^3kg^{-1} erhält man aus der Division der Volumenssuszeptibilität durch die Dichte der Probe (Soffel 1991, 19f).

$Q = M_r/M_i$ bezeichnet den Königsberger-Quotienten. M_i , die induzierte Magnetisierung, verhält sich proportional zu einem am Ort herrschenden Magnetfeld H . M_r , die remanente Magnetisierung, wird als jener Teil der Magnetisierung eines Materials verstanden, der in einem feldfreien Raum nicht verschwindet und vom Gehalt an ferrimagnetischen Stoffen abhängt (Knödel et al. 2005, S. 19). Zur Berechnung der induzierten Magnetisierung für das am Ort herrschende Erdmagnetfeld mit $50 \mu\text{T}$ angenommen.

2.2 Geoelektrische Gleichstromverfahren

Das Ohm'sche Gesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung bezogen auf einen von Gleichstrom durchflossenen Leiter bekannter Dimension. Bei Annahme eines quaderförmigen Leiters mit dem Querschnitt q und der Länge b , der in Längsrichtung von einem Gleichstrom durchflossen wird, beträgt die Spannung U zwischen den Enden des Quaders

$$U = I \cdot R.$$

Der Ohm'sche Widerstand R ist proportional der Länge b und umgekehrt proportional dem Querschnitt q und enthält den spezifischen Widerstand ρ .

Daher gilt:

$$R = \frac{b}{q} \cdot \rho.$$

Die Zufuhr des Gleichstroms erfolgt über zwei geerdeten Metallelektroden, wodurch sich ein von der Verteilung des spezifischen Widerstandes im Untergrund abhängiges

Potentialfeld ausbildet. Mit zunehmendem Abstand der Elektroden steigt der Einfluss tiefer liegender Strukturen. Der Potentialunterschied wird mit zwei weiteren Elektroden gemessen und lässt eine Ableitung der Verteilung spezifischer Widerstände und zugehöriger Strukturen im Untergrund zu.

Um den für einen homogenen Halbraum geltenden scheinbaren spezifischen Widerstand ρ_s zu ermitteln, wird der spezifische Widerstand mit einem Geometriefaktor multipliziert, der Elektrodenabstände berücksichtigt (Vogelsang 1993, S. 15ff).

Formeln und Parameter zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit

Ohm'scher Widerstand:

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

Volumen eines Zylinders:

$$V = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h$$

Geometriefaktor Zylinder 1:

$$k = \frac{\frac{d^2 \cdot \pi}{4}}{l}$$

Spezifischer Widerstand:

$$\rho_0 = k \cdot R$$

Spezifische Leitfähigkeit:

$$\sigma_0 = \frac{1}{\rho_0}$$

Spezifischer Widerstand des Wassers:

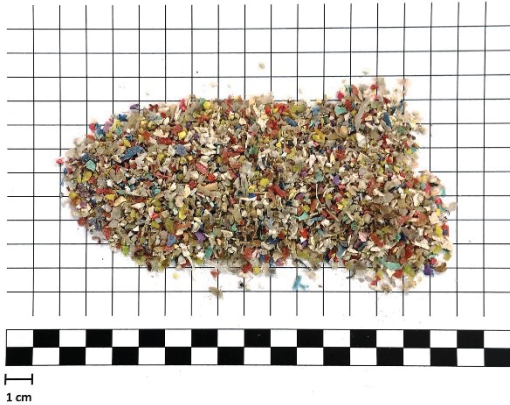
$$\rho_W = \frac{1}{\sigma_W}$$

3 Material und Methoden

3.1 Probenübersicht

Insgesamt wurden die magnetischen und elektrischen Eigenschaften von 12 Referenzproben (Tab. 1 und Abb. 1) aus Materialien, die für Enhanced Landfill Mining Projekte relevant sind, untersucht.

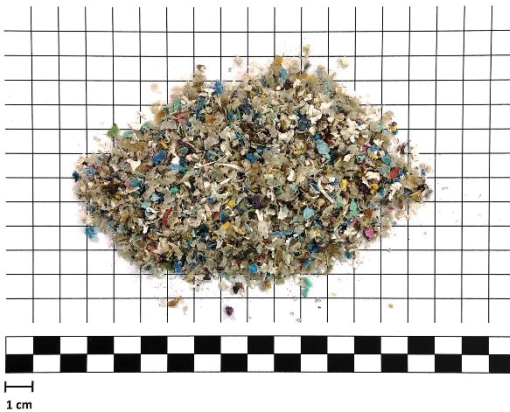
01-PP



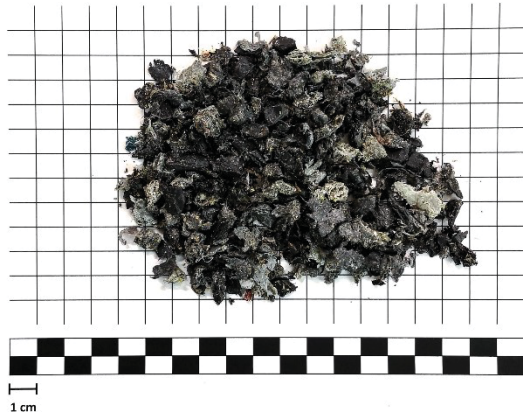
02-LG



03-PE



04-KS



05-PET



06-K



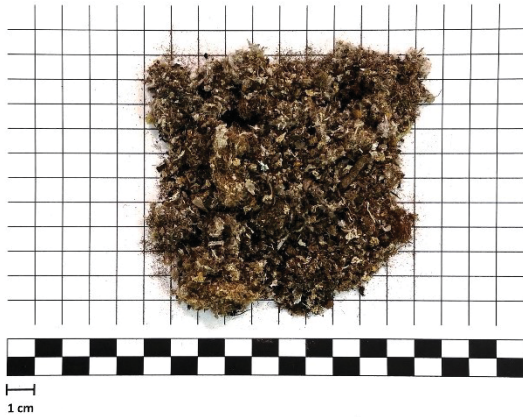
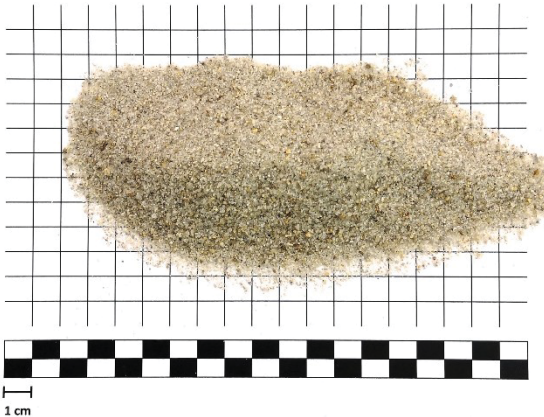
07-TX**08-H****09-S****10-BE****11-CU****12-FE**

Abb. 1: Referenzproben: 01-PP; 02-LG; 03-PE; 04-KS; 05- PET; 06-K; 07- TX; 08-H; 09-S; 10-BE; 11-CU; 12-FE

Sechs Abfallfraktionen kommen aus einem Landfill Mining Projekt (Muras et al. 2018), wobei fünf davon einer händischen Sortierung (Polypropylen (PP), Polyethylen (PE), Papier & Karton (K), Textilien (TX) und Holz (H)) und eine aus mechanisch-biologischer Behandlung (Leichtfraktion (LG) eines Windsichters) entstammen. Geschredderte Flaschenverschlüsse (PE + PP + Polyethylenterephthalat, PET) und schwarze Kunststoffe (KS) kommen aus einem Kunststoffrecyclingunternehmen. Zwei weitere Proben, Kupferschrott (CU) und Eisen-Granalien (FE, $d = 5 \text{ mm}$) wurden von

Industriepartnern bereitgestellt. Sand (S) und Blumenerde (BE) sind handelsübliche Produkte. Somit sind zehn der 12 Proben Abfallproben und können Verunreinigungen durch andere Materialien, wie beispielsweise Eisenteile aufweisen.

Tab. 1: Referenzproben

ID	Bezeichnung	Laborbezeichnung	Original-Probenbezeichnung	Herkunft
01	Polypropylen (PP)	PP-1 bis PP-6	0302-19	Deponie Halbenrain
02	Leichtfraktion Windsichter	LG-1 bis LG-6	0300-19	Deponie Halbenrain
03	Polyethylen (PE)	PE-1 bis PE-6	0303-19	Deponie Halbenrain
04	Schwarze Kunststoffe (PE, PP)	KS-1 bis KS-6	-	Recyclingunternehmen
05	Geschredderte Flaschenverschlüsse	PET-1 bis PET-6	-	Recyclingunternehmen
06	Papier & Karton	K-1 bis K-6	0299-19	Deponie Halbenrain
07	Textilien	TX-1 bis TX-6	0298-19	Deponie Halbenrain
08	Holz	H-1 bis H-6	0304-19	Deponie Halbenrain
09	Quarzsand, 0,3 – 1 mm	S-1 bis S-6	-	Quester Bauprofi Quarzsand, kalkfrei, feuergetrocknet
10	Blumenerde	BE-1 bis BE-6	-	Hornbach Universalblumenerde
11	Kupfer	CU-1 bis CU-6	-	Lehrstuhl für Nichteisen- metallurgie, MUL
12	Eisen	FE-1 bis FE-6	-	Eisen-Granalien (GPI), Stahlwerk

3.2 Messung der magnetischen Suszeptibilität

Die magnetische Suszeptibilität aller vorliegenden Probenmaterialien wurde mit den Messgeräten *Exploranium KT-9* (Messbereich: 0,01 bis 999 x 10⁻³ SI, Messfrequenz: 10 kHz, Empfindlichkeit: 1 x 10⁻⁵ SI (Exploranium Radiation Detection Systems 1997, S. 47)) und *Bartington MS2* (Messbereich 1 bis 9999 x 10⁻⁵ SI, Empfindlichkeit: 2 x 10⁻⁶ SI) bestimmt. Der Sensor MS2E dieses Systems mit einem aktiven Durchmesser von 25 mm hat eine Messfrequenz von 2 kHz. Die Eindringtiefe wird vom Hersteller mit 50 % Signalstärke bei 1 mm und 10 % bei 3,5 mm angegeben (Bartington Instruments Ltd. 2008, S. 29). Diese Messgeräte könnten bei nachfolgenden Untersuchungen auch im Gelände eingesetzt werden. Im Verlauf der Untersuchungen wurden auch Messungen an einer Kappabridge des Typs AGICO MFK1-FA durchgeführt.

Die Bulk-Messungen wurden an Teilmengen der zu untersuchenden Materialien in einem Kunststoffzylinder ausgeführt. Der Exploranium KT-9 Sensor wurde während der Messung (Abb. 2) auf die Oberfläche des Probenmaterials gehalten. Um die Verdichtung des Materials zu vermeiden, wurde nach einem aus sechs

Einzelmessungen bestehenden Messdurchgang der Zylinder kurzzeitig überkopf gestellt. Die Messungen mit dem Bartington MS2 System erfolgten mit einem hochauflösenden MS2EI Sensor (Abb. 3) in zwei Messreihen an unterschiedlichen Stellen im selben Kunststoffzylinder (Range 1, Messdauer 1 Sekunde).



Abb. 2: Bulk-Messungen zur Bestimmung der magnetischen Suszeptibilität mittels Exploranium KT-9.



Abb. 3: Bartington MS2 System mit MS2EI Sensor.

Zur genaueren Untersuchung der magnetischen Suszeptibilität wurden Labormessungen an einer Multifunktions-Kappabridge *AGICO MFK1-FA* (Abb. 4) durchgeführt. Das zuvor verwendete Bulk-Material wurde dazu in jeweils sechs

Kunststoffwürfel, die jeweils ein Raumvolumen von 8 cm^3 aufnehmen können, gefüllt. Die Proben wurden dreimal in Serie gemessen, um den Einfluss von Messfehlern zu verringern. Zur Erkennung der Frequenzabhängigkeit der Materialien, wurden alle Proben mit zwei Frequenzen (976 Hz, 3904 Hz) untersucht. FE-Proben wurden wegen Überschreiten des Messbereichs als Teilproben gemessen und über das Verhältnis der Massen auf das normierte Volumen von 8 cm^3 einer Gesamtprobe umgerechnet (neue Probenbezeichnung „FEn“). Die magnetische Suszeptibilität der beiden Referenzproben FE und CU wurde zu Vergleichszwecken außerdem an einer *KLF-3 Minikappa* gemessen.

Da das Probenmaterial bereits bei Anlieferung teilweise magnetische Bestandteile enthielt, die als Kontaminationen betrachtet werden, erfolgte eine Abtrennung dieser Bestandteile mittels Hand-Magnetseparator aus vereinzelt Proben (KS-3, TX-2, PP-5).



Abb. 4: AGICO MFK1-FA Kappabridge.

3.3 Messung der remanenten Magnetisierung

Die Messung der natürlichen remanenten Magnetisierung (NRM) der Proben erfolgte an einem Kryogenmagnetometer der Marke *2G Enterprises*. Die Proben wurden für die computergestützte Messung orientiert (Pfeilrichtung des Behälters zeigt zum Gerät, Deckel oben) in einem Probenhalter im Magnetometer positioniert.

Die Probengruppen FE und CU konnten aufgrund der starken magnetischen Eigenschaften nicht mit diesem Gerät untersucht werden. Stattdessen wurde mittels *Bartington Mag-01H Fluxgate Magnetometer* in zwei Messreihen die remanente Magnetisierung für FE und CU in allen drei Raumrichtungen an der Oberfläche im

magnetfeldfreien Raum im Paläomagnetiklabor Gams gemessen. Aus den Mittelwerten in drei Raumrichtungen wurden resultierende Vektoren berechnet.

Zur Bestimmung der viskosen remanenten Magnetisierung (VRM) wurde die natürliche remanente Magnetisierung der Proben nach mehrwöchiger unveränderter Lagerung, bei der diese dem Erdmagnetfeld ausgesetzt waren, erneut am Kryogenmagnetometer gemessen. Mit dem Programm *Remasoft 3.0* wurden aus den beobachteten Änderungen Richtungsvektoren errechnet, die den Einfluss der viskosen remanenten Magnetisierung darstellen.

3.4 Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit in Laborversuchen

3.4.1 Leitfähigkeitsmessungen Zylinder 1

Für die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit der Materialproben wird eine Flüssigkeit (Salzwasserlösung) mit bekannter elektrischer Leitfähigkeit eingesetzt. Diese Flüssigkeit entspricht Leitungswasser, das durch Zugabe von 1 g NaCl / l eine Leitfähigkeit von 2,33 mS/cm bei 18,7 °C aufweist. Für die Messung kam ein Leitfähigkeitsmessgerät des Typs *WTW Cond 3110* zum Einsatz.

Die elektrische Leitfähigkeit aller Materialien wurde im Laborversuch mit dem Geoelektrik-Messgerät *Lippmann 4point light* in einem Zylinder mit bekannter Geometrie (Tab. 2) bestimmt.

Tab. 2: Geometrieangaben zu Zylinder 1.

Abmessungen des Zylinders	
Höhe	180 mm
Innendurchmesser	60 mm
Anordnung der Elektroden	
Abstand der Elektroden A-B	180 mm
Abstand der Elektroden M-N	60 mm
Elektrodenkonfiguration	Wenner

Die Elektrodenanordnung von oben nach unten entspricht der Konfiguration nach Wenner: A-M-N-B. Der Zylinder (Abb. 5) wurde mit dem zu untersuchenden Material gänzlich aufgefüllt.



Abb. 5: Zylinder 1 mit Probenmaterial befüllt und vollständig gesättigt.

Für die erste Messreihe („gesättigt“) wurde der Porenraum im Zylinder mit obiger Salzwasserlösung durch Öffnungen im Zylinderdeckel aufgefüllt. Eine weitere Messreihe („erdfeucht“) wurde nach Ablassen der Flüssigkeit über ein Ventil am Zylinderboden durchgeführt. Geoelektrische Messungen an Eisen-Granalien (FE) und Kupferschrott (CU) wurden nicht durchgeführt.

3.4.2 Leitfähigkeitsmessung Vlies

Das zum Zwecke der Trennung einzelner Abfallfraktionen vorgesehene handelsübliche Trenn-, Bau- und Filtervlies wurde für den Versuch vollständig mit Leitungswasser durchtränkt (Wasserzugabe: 460 ml, $\sigma_w = 415 \mu\text{S}/\text{cm}$ bei 19 °C) in den Versuchszylinder (Zylinder 1) eingebaut. Die Ergebnisse wurden mit jenen eines vollständig mit Leitungswasser gefüllten und identen Zylinders verglichen.

3.4.3 Leitfähigkeitsmessungen an Zylinder 2

An einem größeren Behälter (Zylinder 2, Abb. 6) wurden mit den Materialien Wasser, Sand (S) und Kunststoff schwarz (KS) ebenso geoelektrische Messungen durchgeführt.

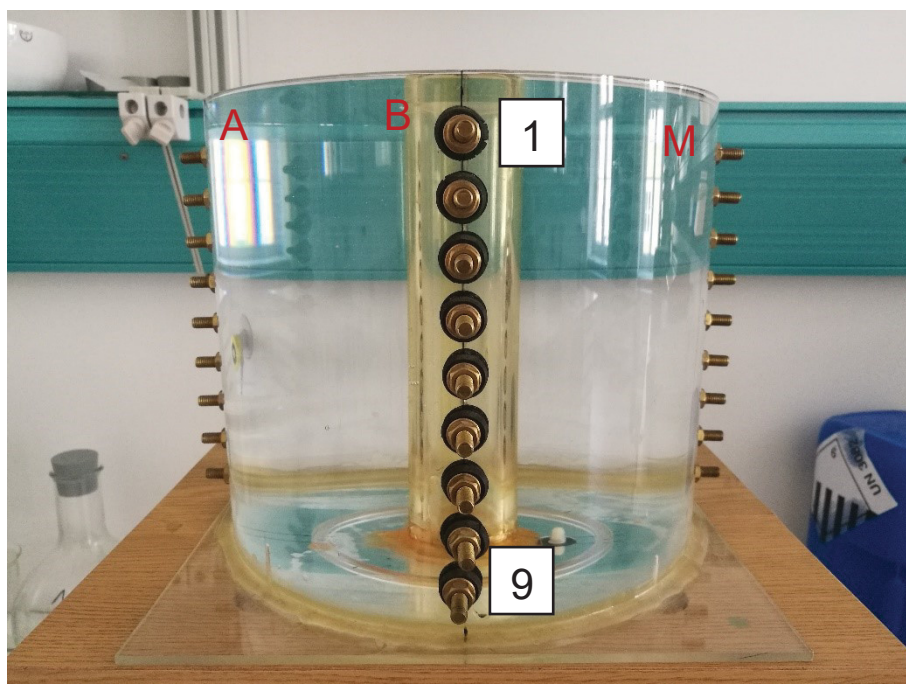


Abb. 6: Frontalansicht Zylinder 2.

Tab. 3: Geometrieangaben zu Zylinder 2.

Abmessungen des Zylinders	
Höhe	200 mm
Innendurchmesser	218 mm
Innenrohrdurchmesser	40 mm
Anordnung der Elektroden	
Abstand der Elektroden A-B	180 mm
Abstand der Elektroden M-N	60 mm
Elektrodenkonfiguration	Dipol-Dipol

Der zylindrische Behälter ist mit vier vertikal angeordneten Elektrodenreihen (Abb. 7) zu je neun Elektroden ausgestattet. Der vertikale Mittenabstand der einzelnen Elektroden zueinander beträgt 20 mm. Horizontal betragen die Entfernungen zwischen den Elektroden A und B sowie M und N 154 mm, die Entfernungen zwischen A und M sowie B und N entsprechen dem Durchmesser des dünnwandigen Zylinders von 218 mm (Tab. 3).

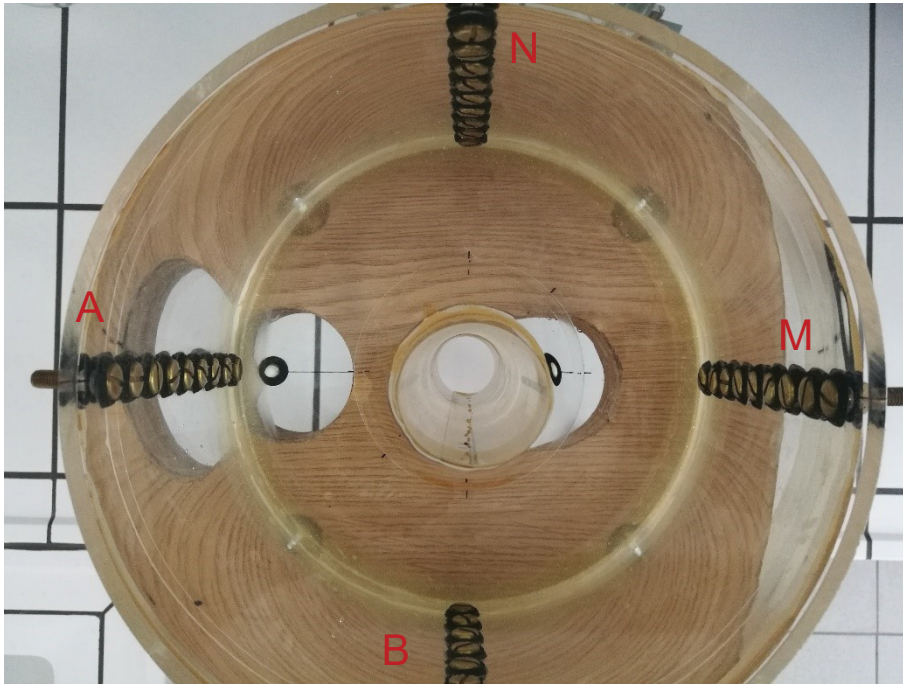


Abb. 7: Draufsicht Zylinder 2 mit Elektrodenanordnung.

Zur empirischen Bestimmung des Geometriefaktors wurde der Zylinder vollständig mit Wasser bekannter Leitfähigkeit ($\sigma_w = 405 \mu\text{S}/\text{cm}$ bei $17,8 \text{ }^\circ\text{C}$) befüllt und elektrische Messungen in Dipol-Dipol-Elektrodenkonfiguration (Abb. 8) in allen neun Ebenen durchgeführt.

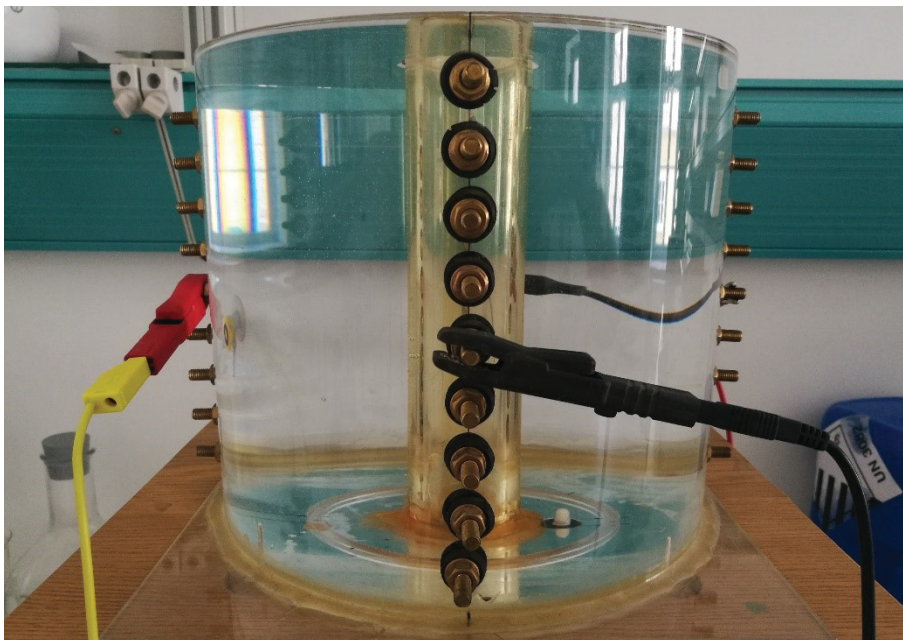


Abb. 8: Zylinder 2 mit Dipol-Dipol Elektrodenanordnung. Zur Bestimmung des Geometriefaktors vollständig mit Leitungswasser befüllt.

Aus dem Zusammenhang zwischen dem spezifischen Widerstand ρ und dem elektrischen Widerstand R ergibt sich der empirisch bestimmte Geometriefaktor k für diesen Behälter (Abb. 9).

Geometriefaktor k :

$$k = \frac{\rho}{R}$$

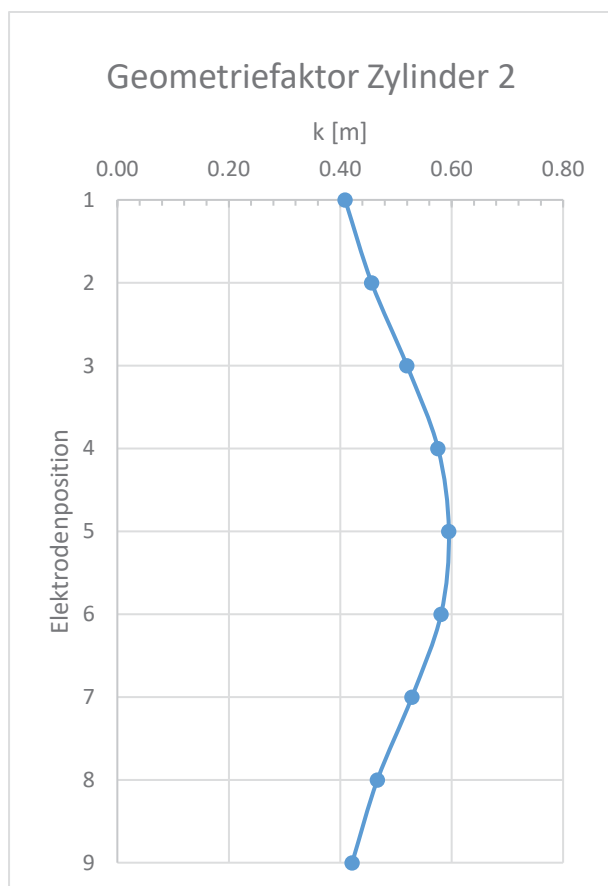


Abb. 9: Geometriefaktor Zylinder 2.

3.4.4 Bestimmung der Leitfähigkeit für Sand und Kunststoff schwarz

In einem ersten Versuch („gesättigt“) wurden Messungen an einer mit Leitungswasser ($\sigma_w = 405 \mu\text{S}/\text{cm}$ bei $17,8 \text{ }^\circ\text{C}$) gesättigten Sandprobe (Abb. 10) durchgeführt. In einem weiteren Versuch („erdfeucht“) wurde das Wasser der nassen Sandprobe durch Öffnungen am Zylinderboden abgelassen und die Messung wiederholt. Aus den Messwerten der beiden Versuche und dem zuvor ermittelten Geometriefaktor konnte die elektrische Leitfähigkeit des Sandes bestimmt werden. In gleicher Vorgangsweise wurde die Leitfähigkeit für Kunststoff schwarz ermittelt (Leitungswasser, $\sigma_w = 414 \mu\text{S}/\text{cm}$ bei $19,7 \text{ }^\circ\text{C}$).

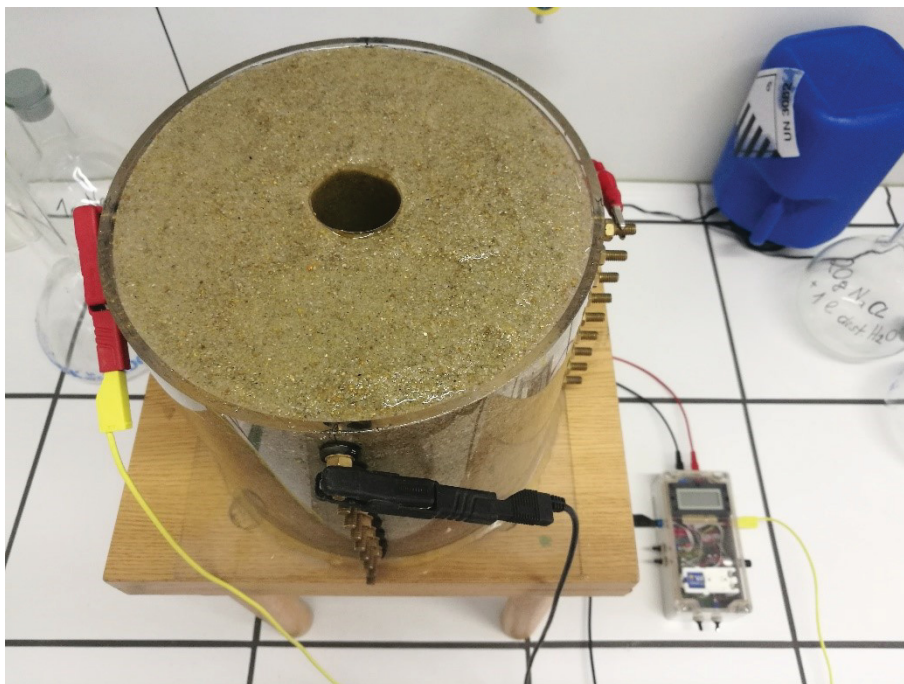


Abb. 10: Leitfähigkeitsmessung des vollständig wassergesättigten Referenzmaterialies Sand an Zylinder 2; Dipol-Dipol-Elektrodenanordnung.

3.5 Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit im Versuchsaufbau „Tank“

Im Technikums-Maßstab wird eine von drei Kammern eines offenen 2.000 l Kunststofftanks für den Versuch genutzt. Die Abmessungen einer Versuchskammer liegen bei etwa 650 x 670 mm in der Grundfläche und die für den Versuch genutzte Höhe beträgt 500 mm (Volumen entspricht somit etwa 218 l). Es sind insgesamt sechs Elektrodenreihen zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit vorgesehen. Vier Reihen (A, B, C, D) sind einzeln an den Seitenwänden des Tanks gegenüberliegend und vertikal verlaufend angeordnet. Diese Ausführung beinhaltet je Reihe 25 Elektroden bei einem Mittenabstand von 20 mm und einer Auslage von 480 mm. Zwei weitere Elektrodenreihen, die aus je 31 Elektroden bestehen (Mittenabstand der Elektroden 20 mm), sind horizontal im Tank angeordnet. Eine Reihe (U) ist ca. 45° verdreht am Boden über dem Kies platziert. Die zweite Reihe (O) wird nach dem Einbau des zu untersuchenden Materials horizontal auf die Oberfläche aufgelegt und ist so orientiert, dass sie genau auf einer gedachten Verbindungslinie der beiden Elektrodenreihen A und C verläuft.

3.5.1 Zusammenstellung des Inhalts und Elektrodenanordnung

Für den Versuch wurde der Tank zunächst mit einer Kiesschicht ($d = 470 \text{ mm}$) befüllt, deren Oberkante die Basis einer Versuchskammer bildet. Der Kies reicht bis unter die

ersten Elektroden der vertikal angeordneten Elektrodenreihen und ist mit einem Trennvlies bedeckt. Auf dem Vlies liegt Elektrodenreihe U (Abb. 11). Es folgt Sand, der den Raum bis zu den obersten Elektroden der vertikal angeordneten Reihen einnimmt und Materialeinbauten aus Kunststoff sowie Eisen-Granalien enthält.

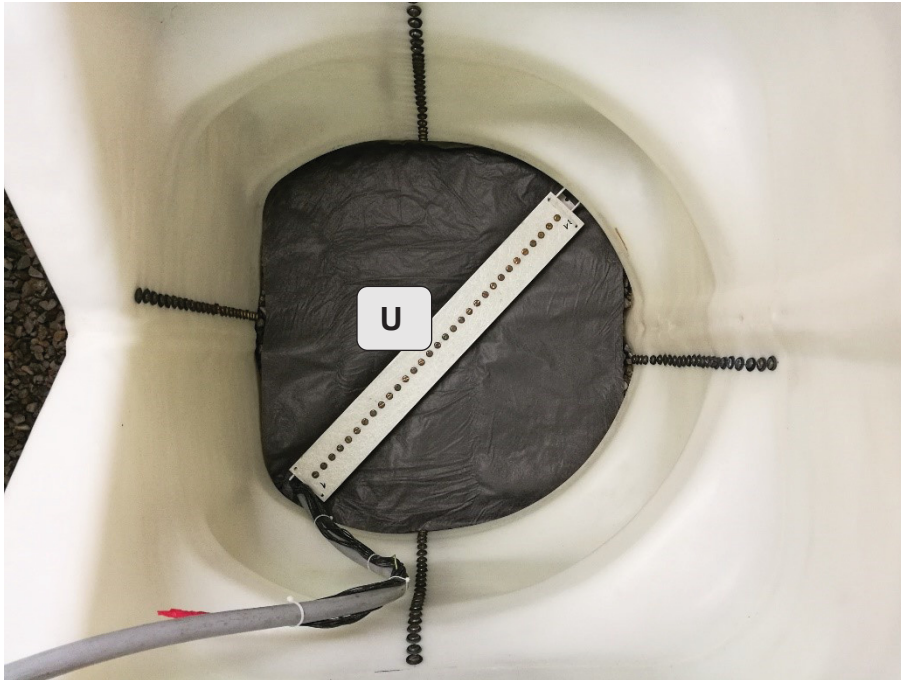


Abb. 11: Versuchskammer mit eingebautem Kies überdeckt durch Trennvlies und Elektrodenreihe U.

Die Elektrodenreihe O an der Oberseite ist für ERT-Messungen des in den Sand eingebauten Kunststoffs vorgesehen. Die 600 mm lange Auslage ermöglicht Messungen bis in eine Tiefe von ca. 160 mm. Ausgehend von der Oberkante des Sandes, folgen darunter Kunststoffeinbauten (Abb. 12). Eine Hälfte der Elektrodenreihe O liegt über einer einzelnen horizontalen Schicht schwarzer Kunststoffe ($d = 3,2 \text{ cm}$), die unter einer Schicht Sand ($d = 61,5 \text{ mm}$) liegt. Unter der zweiten Hälfte dieser Reihe befinden sich unter einer Sandschicht ($d = 18 \text{ mm}$) vier horizontale Kunststoffschichten ($d = 16 \text{ mm}$), die durch weitere Sandschichten ($d = 18 \text{ mm}$) voneinander getrennt sind.

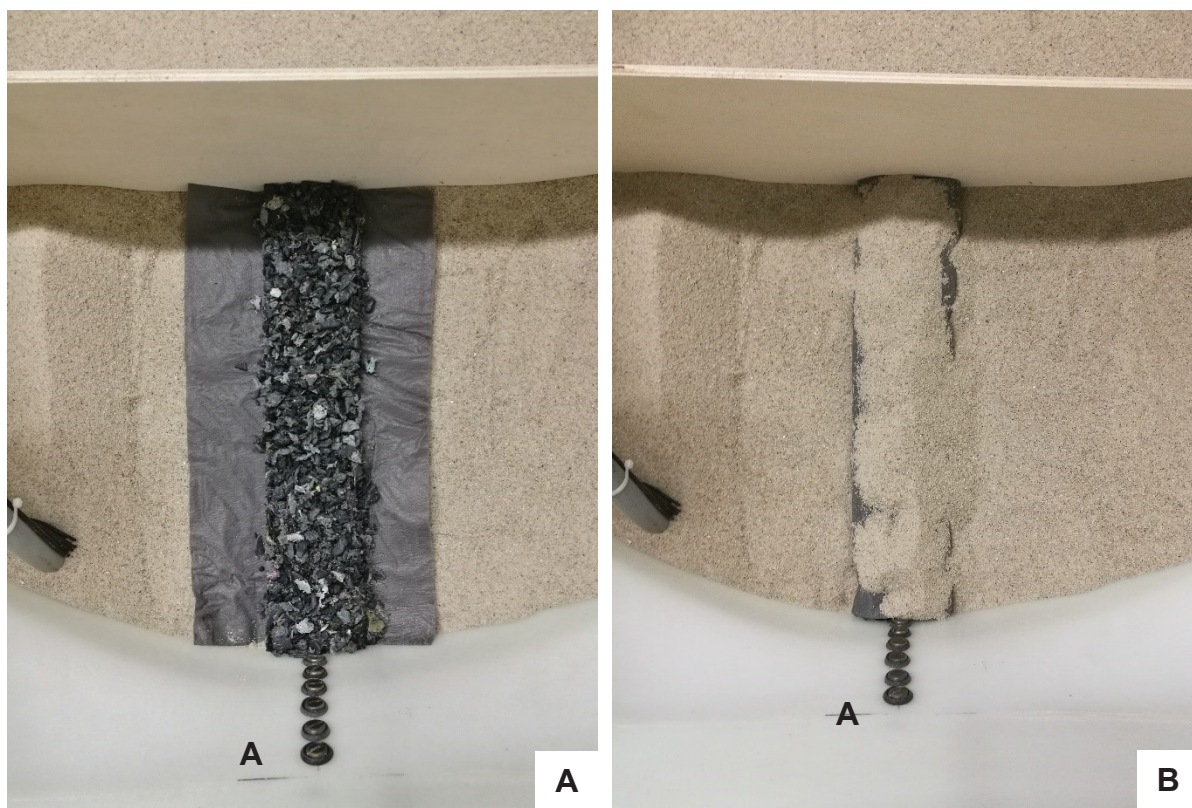


Abb. 12: A) Einbau einer Kunststoffschicht ($d = 16 \text{ mm}$) mit Abgrenzung zum Sand durch ein Trennvlies. B) Vollständige Einhüllung des Kunststoffes mit Vlies auch an der Oberseite und Überdeckung mit Sand. Die abgebildete Sperrholzplatte diente dem Einbau der Materialien und wurde nach Fertigstellung entfernt.

Die Elektrodenreihe U am Boden der Kammer diente für Messungen zur Beurteilung der Wassersättigung. Von den vertikal angeordneten Elektrodenreihen A bis D erfassen zumindest zwei Reihen (A, C) die Kunststoffeinbauten unter Elektrodenreihe O in ihren oberen Bereichen. Elektrodenreihe B wurde für Referenzmessungen des Sandes genutzt. Elektrodenreihe D wurde eingesetzt, um Material mit besonders hoher Leitfähigkeit in Form von Eisen-Granalien zu erfassen. Eisen-Granalien wurden in Form eines Quaders ($B70 \times H20 \times T8 \text{ mm}$) in einem Horizontalabstand von 50 mm zur Elektrodenreihe D zwischen den Elektroden 12 und 13 positioniert (Abb. 13).

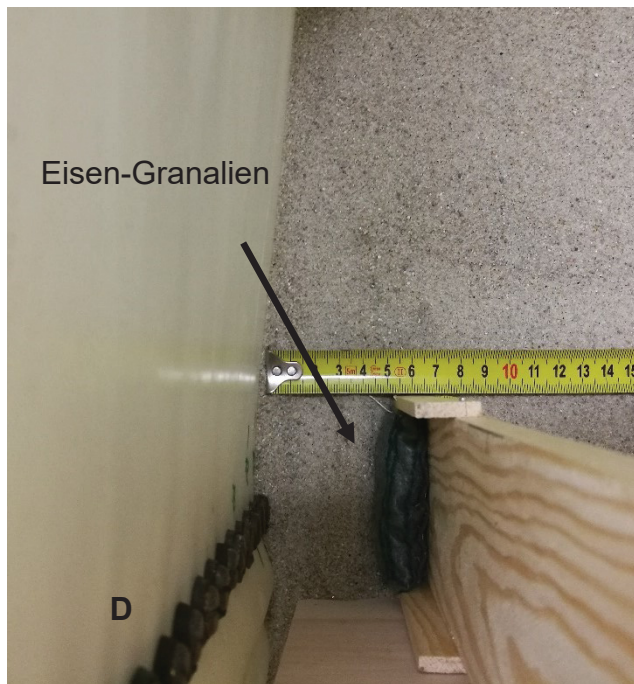


Abb. 13: Platzierung der Eisen-Granalien in einem Abstand von 50 mm zur Elektrodenreihe D. Abgebildete Holzmaterialien dienen der korrekten Positionierung und wurden wieder entfernt.

Der Aufbau wird in beiden Teilen der Kammer mit einer geringmächtigen Schicht (5 mm) Blumenerde überdeckt, auf der sich die Elektrodenreihe O befindet (Abb. 14).



Abb. 14: Versuchskammer mit geringmächtiger Überdeckung durch Blumenerde und Elektrodenreihe O.

3.5.2 Bestimmung des Geometriefaktors der Versuchskammer

Zur empirischen Bestimmung des Geometriefaktors wurde der Tank mit Wasser bekannter Leitfähigkeit (Leitungswasser, $\sigma_w = 421 \mu\text{S/cm}$ bei $18,0 \text{ }^\circ\text{C}$) befüllt und elektrische Messungen an den vertikalen Elektrodenreihen A bis D in Dipol-Dipol-Elektrodenkonfiguration in allen 25 Ebenen (Position 1 - 25) durchgeführt (Abb. 15).

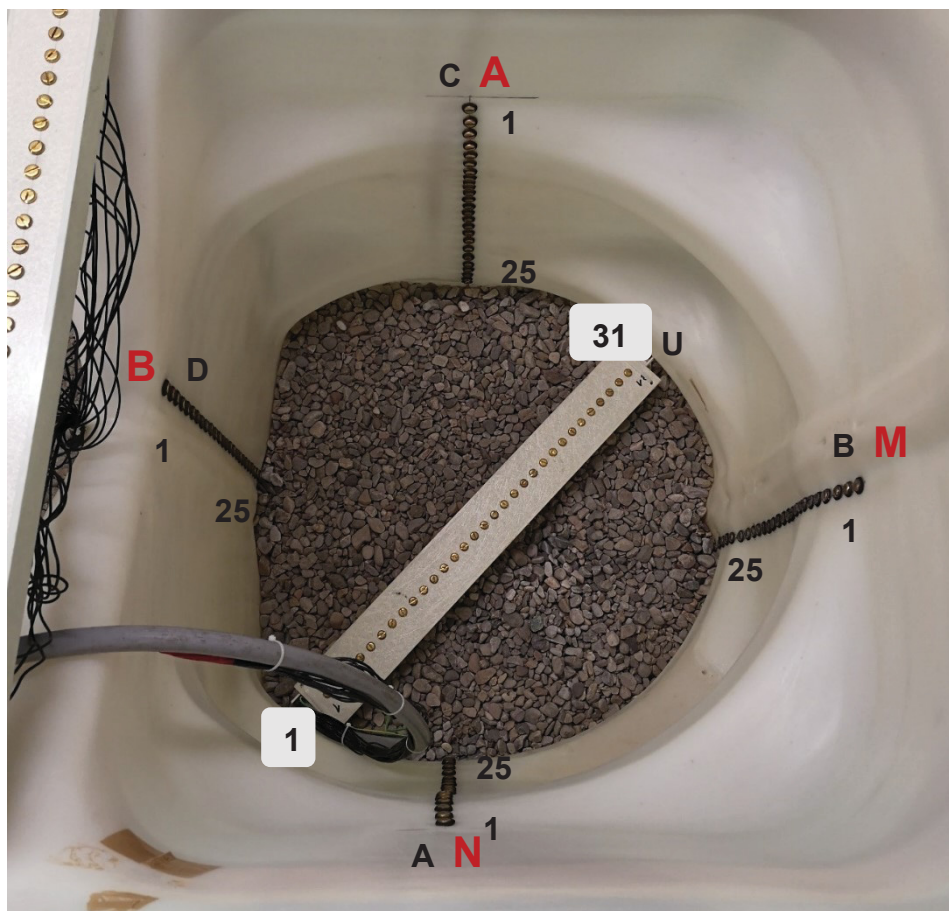


Abb. 15: Versuchskammer mit Anordnung der Elektrodenreihen (A, B, C, D, U). Die Konfiguration der Dipole (A-B-M-N) ist rot dargestellt.

Aus dem Zusammenhang zwischen dem spezifischen Widerstand ρ und dem elektrischen Widerstand R ergibt sich der empirisch bestimmte Geometriefaktor k für diesen Behälter (Abb. 16).

Geometriefaktor k :

$$k = \frac{\rho}{R}$$

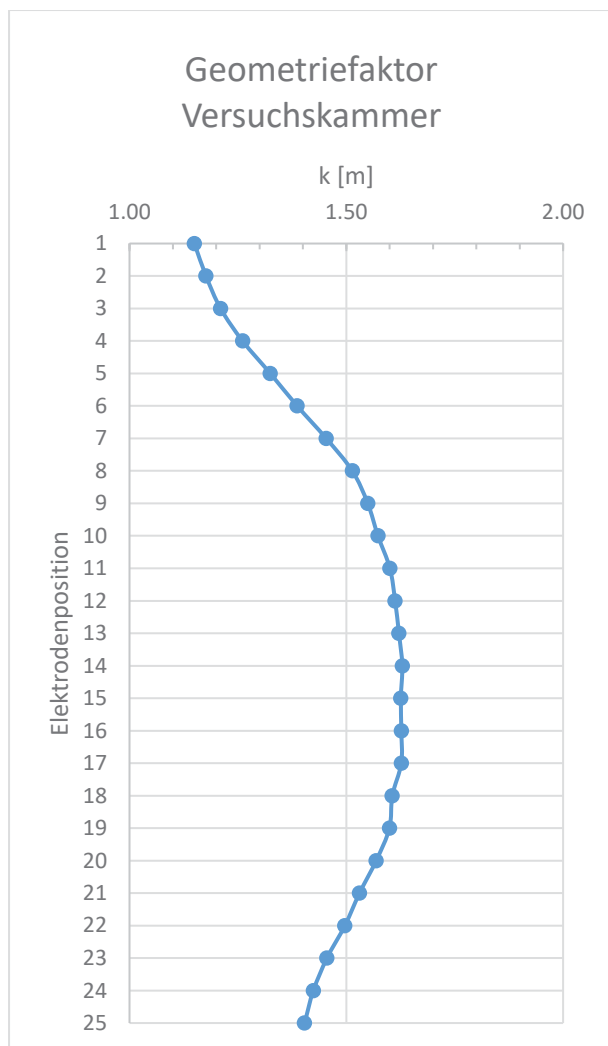


Abb. 16: Geometriefaktor der Versuchskammer bei vertikaler Elektrodenanordnung.

3.6 Versuchsdurchführung „Tank“

Mit allen Elektrodenreihen wurden Blindmessungen mit Wiederholungsmessungen in Dipol-Dipol- und Wenner-Elektrodenkonfiguration am wassergefüllten Tank vorgenommen. Die Leitfähigkeit σ_w des verwendeten Leitungswassers lag bei $= 421 \mu\text{S}/\text{cm}$ bei $18,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Nach Ablassen des Wassers erfolgte der Einbau der Materialien in die Versuchskammer nach den in Kapitel 3.5.1 erwähnten Vorgaben. Dieser Aufbau wurde durch Beregnung von oben mit Leitungswasser gesättigt und eine geoelektrische Tomographie an allen Elektrodenreihen (A, B, C, D, U, O) durchgeführt. Weitere Messungen mittels geoelektrischer Tomographie wurden nach Ablassen des zugesetzten Wassers über einen Absperrhahn an der Tankunterseite an erdfeuchtem Material durchgeführt.

3.7 Vorwärtsmodellentwicklung

Modellberechnungen wurden durchgeführt, um einige mögliche Szenarien auf ihre Machbarkeit hin zu prüfen. Das Programm *DC2DInvRes* von Thomas Günther ermöglicht es Vorwärtsmodelle zu berechnen und zweidimensionale Inversionen durchzuführen (Günther). Es wurden außerdem unterschiedliche Modellszenarien jeweils im Deponie- und im Labormaßstab untersucht, um die Skalierbarkeit zu gewährleisten. Die zugrunde liegende Frage, die sich hier stellte, war, ob durch die geringeren Abmessungen im Labor im Vergleich zu den wesentlich größeren Abmessungen einer Deponie, eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse gegeben ist. Die Anordnung der Elektroden entsprach einer Dipol-Dipol-Konfiguration beziehungsweise einer Wenner-Konfiguration.

In *DC2DInvRes* wurden lineare Datenmodelle erstellt, bei denen Parameter wie die Anordnung, der Abstand und die Anzahl der Elektroden festgelegt wurden. Durch Zuweisen unterschiedlicher spezifischer Widerstandswerte für einzelne Zellen konnten Startmodelle erstellt werden, aus denen *DC2DInvRes* Vorwärtsmodelle errechnet. Ergebnisse geoelektrischer Tomographie wurden diesen Vorwärtsmodellen zur Ermittlung einer Abweichung gegenübergestellt. Diese Abweichung wird als Data Misfit ausgedrückt und errechnet sich wie folgt:

$$\text{Data Misfit [\%]} = 100 - \frac{\text{Calculated Data } [\Omega\text{m}] * 100}{\text{Measured Data } [\Omega\text{m}]}$$

4 Ergebnisse

4.1 Magnetische Suszeptibilität der Fraktionen

Die Ergebnisse der Messungen mit Exploranium KT-9, Bartington MS2 und AGICO MFK1-FA sind in Abb. 17 bis Abb. 19 in logarithmierter Form dargestellt, da die Werte einer Normalverteilung entsprechen.

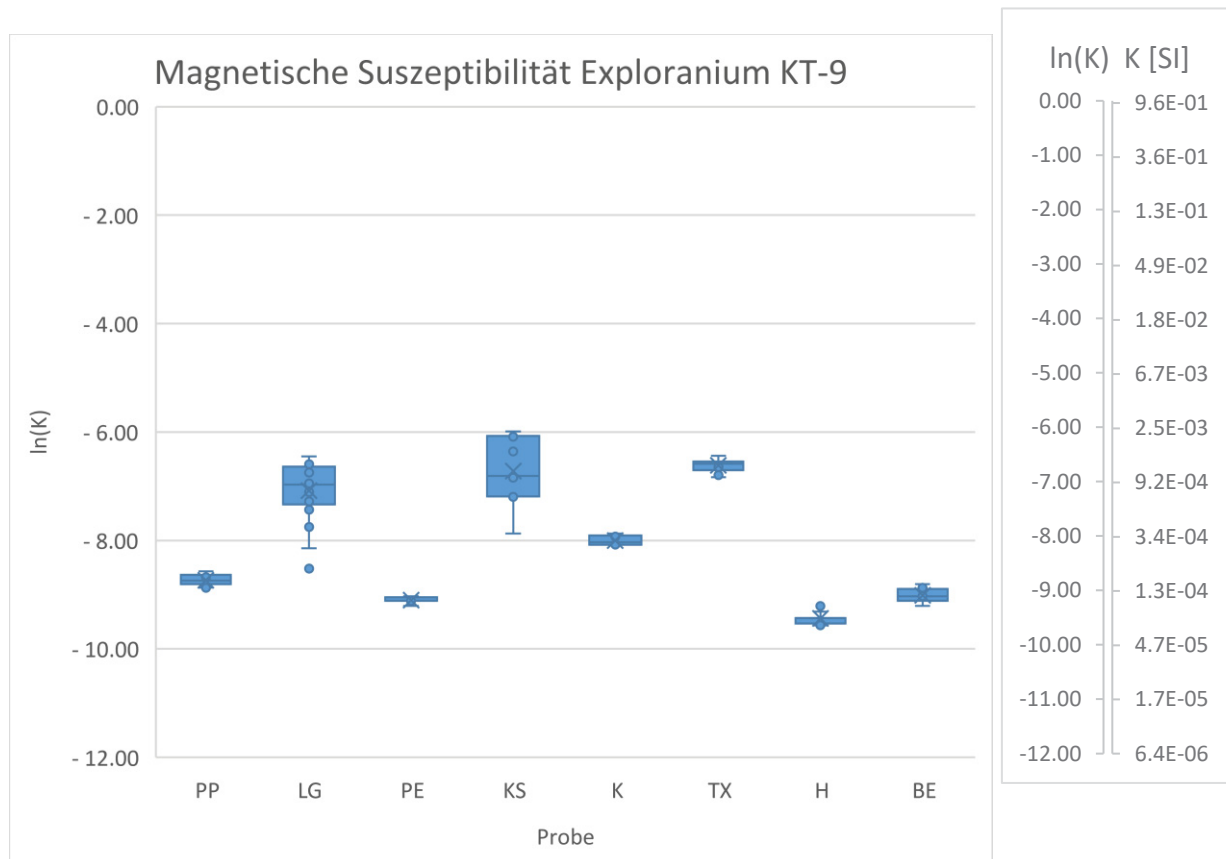


Abb. 17: Natürlicher Logarithmus der magnetischen Suszeptibilität, gemessen mit dem Exploranium KT-9. Jede Bulk-Probe wurde sechsmal in zwei Durchgängen (12x), außer LG (24x), gemessen.

PET und Sand: Die Messungen ergaben Werte von 0,0 SI - dieses Material hat eine zu geringe Suszeptibilität, um sie mit dem Exploranium KT-9 zu bestimmen.

CU: Err5 – da die Suszeptibilität dieses Materials über dem Messbereich des Gerätes liegt, war eine Messung dieses Materials nicht möglich.

FE: Err6 – da die Suszeptibilität dieses Materials über dem Messbereich des Gerätes liegt, war eine Messung dieses Materials nicht möglich.

Jene Proben, an denen Messungen der magnetischen Suszeptibilität mit dem Exploranium KT-9 erfolgreich durchgeführt werden konnten, sind in Abb. 17

dargestellt. Die mittlere magnetische Suszeptibilität von PP, PE, H und BE liegt in einem Bereich von $0,08E-03$ SI (H) bis $0,16E-03$ SI (PP). Etwas höher liegt die magnetische Suszeptibilität bei Karton (K) mit einem Mittelwert von $0,335E-03$ SI. Von den Proben LG, KS und TX, die bei diesen Messungen die höchsten Werte (Mittelwerte: LG, $0,93E-03$ SI; KS, $1,41E-03$ SI; TX, $1,35E-03$ SI) aufweisen, zeigen vor allem LG und KS eine größere Streuung.

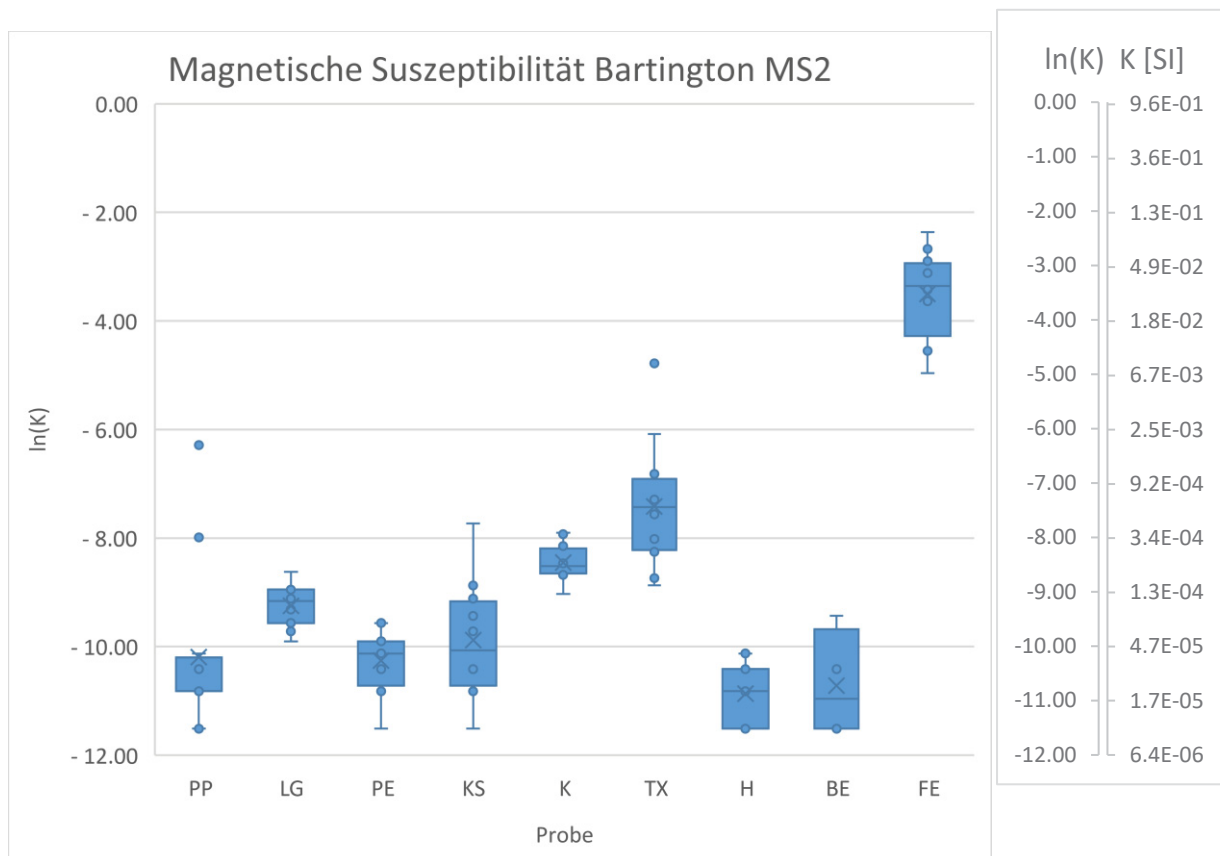


Abb. 18: Natürlicher Logarithmus der magnetischen Suszeptibilität, gemessen mit dem Bartington MS2. Jede Bulk-Probe wurde sechsmal in zwei Durchgängen (12x), außer LG (24x), gemessen.

PET: Die Messungen ergaben Werte von $0,0$ SI - dieses Material hatte eine zu geringe Suszeptibilität, um sie mit dem Bartington MS2 zu bestimmen.

S: Die Messwerte dieses Materials lagen im Bereich von $-2E-05$ bis 0 und damit innerhalb der Anzeigegenauigkeit des Gerätes. Diese Gruppe wird daher nicht dargestellt.

BE: Von insgesamt 12 Messungen lagen nur zwei Messwerte außerhalb der Anzeigegenauigkeit des Gerätes. Zwei weitere lagen innerhalb der Anzeigegenauigkeit und alle anderen Werte dieser Messreihe liegen nahe bei null.

CU: Die Messwerte für dieses Material liegen im Bereich von $-5,12\text{E-}03$ bis $-1,28\text{E-}03$ SI und sind nicht dargestellt.

Die FE-Fraktion weist eine hohe magnetische Suszeptibilität mit Werten um $3,86\text{E-}02$ SI auf. Die Messergebnisse aller übrigen dargestellten Fraktionen liegen mit Ausnahmen bei PP, KS und TX im Bereich von $1,00\text{E-}05$ SI (PP, PE, KS, H) bis $1,09\text{E-}03$ SI (TX).

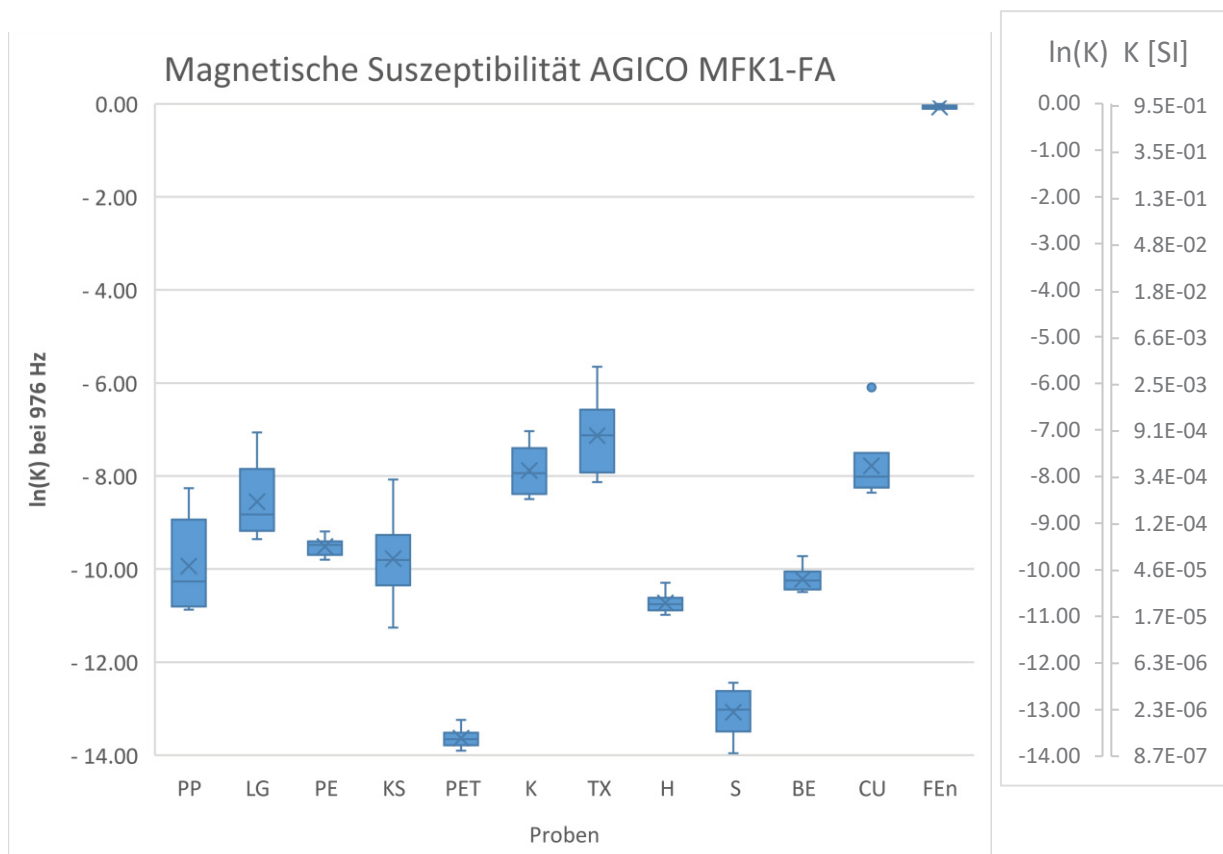


Abb. 19: Natürlicher Logarithmus der magnetischen Suszeptibilität K bei einer Frequenz von 976 Hz und einer Anzahl von sechs Proben. Bei der diamagnetischen Probengruppe PET wurden die negativen Messwerte zum Vergleich als Absolutwerte dargestellt.

FEn entspricht dem Probenmaterial FE, das als Teilprobe gemessen und über das Verhältnis der Massen auf das normierte Volumen von 8 cm^3 umgerechnet wurde.

Für die an der AGICO MFK1-FA bei Niederfrequenz (F1) gemessenen Werte wurden aus einer Anzahl von jeweils sechs Proben Minimum, 1. Quartil, Median, Mittelwert, 3. Quartil, Maximum, Interquartilsabstand, sowie die Standardabweichung berechnet (Abb. 19, Tab. 4). Bei den Kunststoffproben PP, LG, PE, KS ergeben die Messungen Werte in einem Bereich von $1,29\text{E-}05$ SI (Minimum KS) bis $8,56\text{E-}04$ SI (Maximum LG). Für die K-Fraktion ergibt sich ein Mittelwert von $3,78\text{E-}04$ SI und liegt damit in

einem ähnlichen Bereich wie die CU-Fraktion mit Mittelwert $4,19E-04$ SI. Die mittlere magnetische Suszeptibilität der PET-Fraktion liegt im Unterschied zu den anderen Kunststofffraktionen bei $-1,20E-06$ SI. Diese Fraktion weist im Vergleich außerdem eine deutlich geringere Standardabweichung ($2,9E-07$ SI) auf. Sand zeigt mit $8,69E-07$ bis $3,94E-06$ relativ geringe Suszeptibilitätswerte. Die Fraktion Holz hat eine mittlere Suszeptibilität von $2,19E-05$ SI bei einer Standardabweichung von $5,84E-06$ SI. Höher liegen die Werte der BE-Fraktion mit durchschnittlich $3,66E-05$ SI. Für Textilien (TX) ergeben sich Werte im Bereich von $2,93E-04$ SI bis $3,51E-03$ SI. Die Untersuchung der metallischen Probenfraktion FEn führte zu einer mittleren magnetischen Suszeptibilität von $9,33E-01$ SI und ergab somit die höchsten Werte im Vergleich zu den übrigen Fraktionen.

Tab. 4: Statistische Parameter zur Untersuchung der Referenzproben mittels Kappabridge; Quartilsberechnungen erfolgten exklusive Median; Für PET wurden aufgrund negativer Messwerte Absolutwerte zur Berechnung verwendet.

	Probe	Probenanzahl	Minimum	Q1	Median	Mittelwert	Q3	Maximum	IQA	STABW
ln(K)	PP	6	-10,87	-10,80	-10,26	-9,93	-8,94	-8,26	1,87	1,04
K (SI)	PP	6	1,89E-05	2,03E-05	3,48E-05	4,85E-05	1,32E-04	2,58E-04	1,11E-04	9,33E-05
ln(K)	LG	6	-9,36	-9,18	-8,83	-8,55	-7,85	-7,06	1,33	0,84
K (SI)	LG	6	8,62E-05	1,03E-04	1,46E-04	1,93E-04	3,89E-04	8,56E-04	2,86E-04	2,95E-04
ln(K)	PE	6	-9,80	-9,69	-9,48	-9,51	-9,41	-9,19	0,29	0,20
K (SI)	PE	6	5,57E-05	6,17E-05	7,65E-05	7,39E-05	8,23E-05	1,02E-04	2,06E-05	1,56E-05
ln(K)	KS	6	-11,26	-10,35	-9,81	-9,78	-9,27	-8,07	1,08	1,02
K (SI)	KS	6	1,29E-05	3,20E-05	5,52E-05	5,68E-05	9,46E-05	3,12E-04	6,26E-05	1,10E-04
ln(K)	PET	6	-13,90	-13,79	-13,66	-13,64	-13,52	-13,24	0,27	0,22
K (SI)	PET	6	9,18E-07	1,03E-06	1,17E-06	1,20E-06	1,34E-06	1,77E-06	3,14E-07	2,90E-07
ln(K)	K	6	-8,49	-8,38	-7,94	-7,88	-7,40	-7,03	0,98	0,54
K (SI)	K	6	2,04E-04	2,28E-04	3,56E-04	3,78E-04	6,10E-04	8,82E-04	3,82E-04	2,51E-04
ln(K)	TX	6	-8,13	-7,92	-7,13	-7,13	-6,57	-5,65	1,35	0,88

K (SI)	TX	6	2,93E-04	3,62E-04	8,04E-04	8,02E-04	1,40E-03	3,51E-03	1,04E-03	1,20E-03
ln(K)	H	6	-10,98	-10,89	-10,76	-10,73	-10,61	-10,30	0,27	0,23
K (SI)	H	6	1,70E-05	1,87E-05	2,13E-05	2,19E-05	2,46E-05	3,37E-05	5,84E-06	5,84E-06
ln(K)	S	6	-13,96	-13,49	-13,02	-13,08	-12,62	-12,44	0,87	0,53
K (SI)	S	6	8,69E-07	1,38E-06	2,21E-06	2,09E-06	3,30E-06	3,94E-06	1,92E-06	1,09E-06
ln(K)	BE	6	-10,49	-10,44	-10,25	-10,22	-10,05	-9,72	0,39	0,27
K (SI)	BE	6	2,78E-05	2,93E-05	3,54E-05	3,66E-05	4,31E-05	5,99E-05	1,38E-05	1,16E-05
ln(K)	CU	6	-8,36	-8,25	-8,01	-7,78	-7,50	-6,10	0,75	0,84
K (SI)	CU	6	2,35E-04	2,62E-04	3,31E-04	4,19E-04	5,52E-04	2,25E-03	2,90E-04	7,95E-04
ln(K)	FE _n	6	-0,12	-0,11	-0,07	-0,07	-0,04	-0,003	0,07	0,04
K (SI)	FE _n	6	8,90E-01	8,99E-01	9,31E-01	9,33E-01	9,61E-01	9,97E-01	6,23E-02	3,87E-02

Die Ergebnisse aus der Messung der magnetischen Suszeptibilität mittels KLF-3 Minikappa (Tab. 5) liegen bei den Proben der FE-Fraktion im Bereich von 1,06 bis 1,16 SI. Die Proben der CU-Fraktion besitzen teilweise eine negative Suszeptibilität von bis zu $-1,85E-03$ (CU-5). Positive Werte ergeben sich für Probe CU-2 ($1,82E-04$ SI) und CU-3 ($1,64E-03$ SI). Für Vergleichszwecke wurde der Messwert auf das tatsächliche Probenvolumen von 8 cm^3 angepasst.

Tab. 5: Magnetischen Suszeptibilität für FE- und CU-Proben; Messgerät KLF-3 Minikappa.

Probe	1. Messung K [SI]	2. Messung K [SI]	Mittelwert K [SI]	Mittelwert K [SI] bezogen auf 8 cm^3
FE-1	1,07E+00	1,07E+00	1,07E+00	1,34E+00
FE-2	1,08E+00	1,09E+00	1,09E+00	1,36E+00
FE-3	1,15E+00	1,14E+00	1,15E+00	1,43E+00
FE-4	1,16E+00	1,15E+00	1,16E+00	1,44E+00
FE-5	1,06E+00	1,06E+00	1,06E+00	1,33E+00
FE-6	1,14E+00	1,14E+00	1,14E+00	1,43E+00
CU-1	-1,12E-03	-1,10E-03	-1,11E-03	-1,39E-03
CU-2	1,78E-04	1,86E-04	1,82E-04	2,28E-04

CU-3	1,63E-03	1,65E-03	1,64E-03	2,05E-03
CU-4	-1,40E-03	-1,38E-03	-1,39E-03	-1,74E-03
CU-5	-1,85E-03	-1,84E-03	-1,85E-03	-2,31E-03
CU-6	-1,11E-03	-1,11E-03	-1,11E-03	-1,39E-03

Die Ergebnisse neuerlicher Messungen der magnetischen Suszeptibilität vereinzelter Proben aufgrund von Kontaminationen sind Tab. 6 den Messungen verunreinigter Proben gegenübergestellt. Nach Abtrennung magnetischer Bestandteile ergaben Messungen dekontaminierter Proben, die mit PP-5u, TX-2u sowie KS-3u bezeichnet werden, erwartungsgemäß geringere Messwerte an der AGICO MFK1-FA Kappabridge bei beiden Frequenzen.

Tab. 6: Magnetische Suszeptibilität vereinzelter Proben vor und nach dem Entfernen von Kontaminationen; Messgerät AGICO MFK1-FA.

Probe	K [SI]	Probe	K [SI]	Frequenz [Hz]
PP_5	2,58E-04	PP_5U	1,18E-04	976
KS_3	3,12E-04	KS_3U	2,95E-05	976
TX_2	3,51E-03	TX_2U	1,05E-03	976
PP_5	2,48E-04	PP_5U	1,13E-04	3904
KS_3	3,02E-04	KS_3U	2,86E-05	3904
TX_2	3,42E-03	TX_2U	1,02E-03	3904

Für die durch Kontaminationen beeinflusste Probe PP_5 der Probenserie PP beispielsweise ergab sich ein Messwert von 2,58E-04 SI bei einer Frequenz von 976 Hz. Die Entfernung kleinster magnetisierbarer Partikel bewirkte eine Verringerung der gemessenen magnetischen Suszeptibilität der Probe PP_5U auf 1,18E-04 SI.

Die Abhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität von der verwendeten Messfrequenz ist in Abb. 20 dargestellt. Von allen dargestellten Werten liegt die Frequenzabhängigkeit in einem Bereich von 1 bis 7 %, außer bei Probe PE-4, deren Frequenzabhängigkeit nahe bei null liegt. Für CU-Proben konnten zwar Werte mit

beiden Frequenzen gemessen werden, jedoch liegt die ermittelte Frequenzabhängigkeit im Bereich von -140 bis -1163 %. FEn-Proben zeigen eine Frequenzabhängigkeit im Bereich von -6 bis +5 % und werden nicht dargestellt.

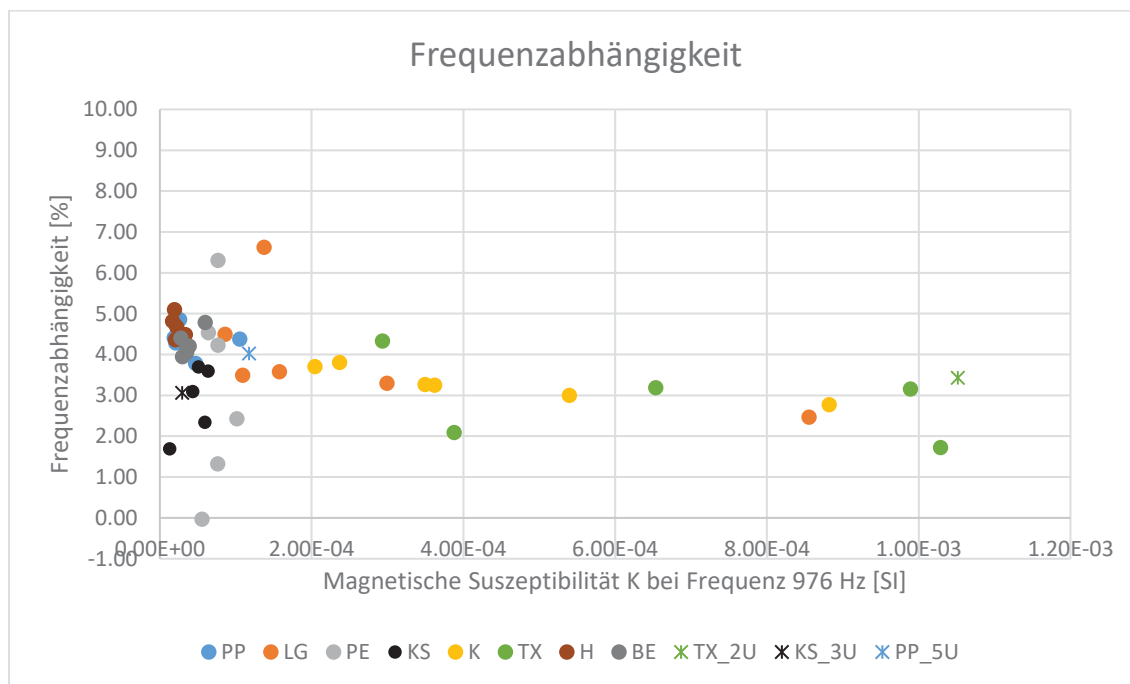


Abb. 20: Frequenzabhängigkeit der unterschiedlichen Materialien gegen die magnetische Suszeptibilität K bei einer Frequenz von 976 Hz.

Werte der diamagnetischen Proben­gruppe PET werden nicht dargestellt. Werte der Proben­gruppe S wurden aufgrund der geringen Suszeptibilität nicht dargestellt. Die Werte der Proben TX-2, KS-3 und PP-5 wurden durch Messwerte der dekontaminierten Proben TX-2u, KS-3u, und PP-5u ersetzt und sind mit einem Stern-Symbol gekennzeichnet. Der Messwert von H-2 wird nicht dargestellt (berechnete FD liegt bei -38,69).

4.2 Remanente Magnetisierung

4.2.1 Natürliche remanente Magnetisierung

Nachfolgend ist in Abb. 21 die Intensität der natürlichen remanenten Magnetisierung in logarithmierter Form dargestellt.

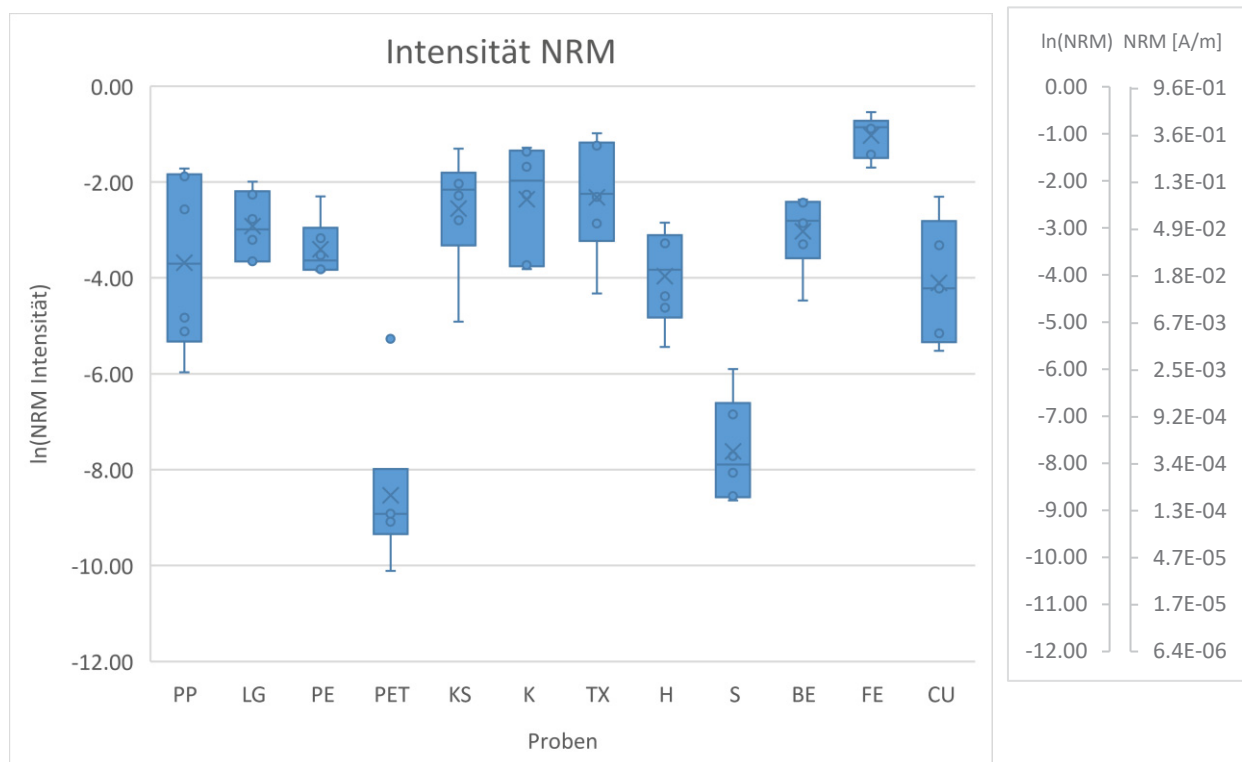


Abb. 21: Natürlicher Logarithmus der Intensität der NRM. Werte für FE und CU wurden mit dem Bartington Mag-01H Fluxgate Magnetometer gemessen, alle weiteren Probenmesswerte entstammen dem 2G Enterprises Kryogenmagnetometer. Probengruppe CU exklusive Probe CU-2.

Die Fraktion PET hat mit einem Mittelwert von $9,50E-04$ A/m die geringste Intensität der NRM. Es gibt einen Ausreißer nach oben mit $5,14E-03$ A/m. Der Mittelwert von Sand beträgt $8,20E-04$ A/m. Alle übrigen Proben liegen in einem Wertebereich von $2,50E-03$ bis $5,82E-01$ A/m, wobei die FE-Fraktion die höchsten Intensitätswerte aufweist.

4.2.2 Viskose remanente Magnetisierung

Ausschließlich Probengruppe K (Karton) zeigt bei der Untersuchung der viskosen remanenten Magnetisierung eine deutliche Gruppierung in der Großkreisdarstellung (Abb. 22) und weist auf den Erwerb einer Remanenz hin. Probengruppe TX (Abb. 23) ist schwach viskos. Bei allen anderen untersuchten Materialien kann keine signifikante Gruppierung festgestellt werden.

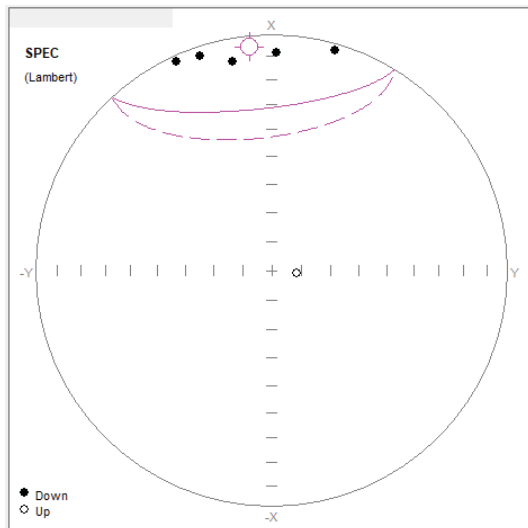


Abb. 22: Viskose remanente Magnetisierung der Probengruppe K.

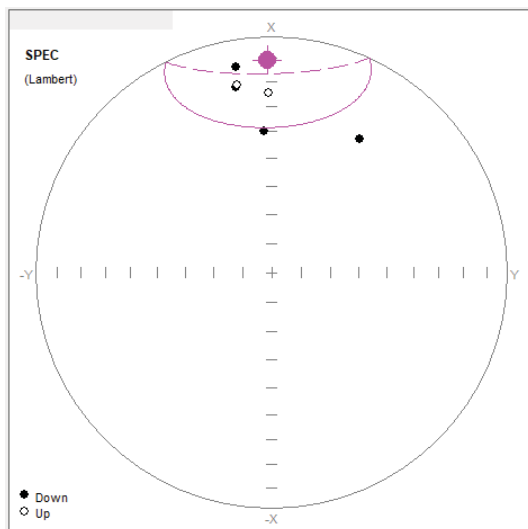


Abb. 23: Viskose remanente Magnetisierung der Probengruppe TX.

4.2.3 Königsberger Quotient

Bei den meisten Materialien trifft die Annahme der hauptsächlich remanenten Magnetisierung zu. Der Königsberger Quotient liegt mehrheitlich bei relativ geringen Werten (Tab. 7). Medianwerte des Königsberger Quotienten sind bei den Fraktionen BE (37,2), KS (36,5) und H (22,4) am höchsten. Alle übrigen Fraktionen weisen mit Ausnahme der diamagnetischen PET-Fraktion Quotienten im Bereich zwischen 14,0 und 0,01 auf.

Tab. 7: Mediane der induzierten und remanenten Magnetisierung, sowie des Königsberger Quotienten aller 12 Referenzmaterialien.

Probe	Median Magnetisierung [A/m]	Induzierte Magnetisierung [A/m]	Median Magnetisierung [A/m]	Remanente Magnetisierung [A/m]	Median Königsberger Quotient Q
K	1,42E-02		1,45E-01		6,3
LG	5,84E-03		5,16E-02		6,2
PE	3,04E-03		2,65E-02		10,7
PP	1,45E-03		4,23E-02		14,0
S	8,83E-05		4,05E-04		6,1
TX	3,27E-02		1,06E-01		3,2
BE	1,41E-03		6,03E-02		37,2
H	8,48E-04		2,50E-02		22,4
KS	2,20E-03		1,16E-01		36,5
PET	-4,66E-05		1,56E-04		-3,5
CU	1,32E-02		2,55E-02		2,48
FE	3,17E+01		4,23E-01		0,01

Die Werte zur Ermittlung der induzierten Magnetisierung stammen aus Messungen mit der AGICO MFK1-FA Kappabridge. Bei FE wurden die Ergebnisse der hochgerechneten Teilproben herangezogen. Zur Ermittlung der remanenten Magnetisierung wurden mit Ausnahmen (CU, FE) Ergebnisse der Untersuchung mittels Kryogenmagnetometer herangezogen. Für CU und FE wurden Werte aus Untersuchungen mittels Bartington Mag-01H Fluxgate Magnetometer eingesetzt.

4.3 Elektrische Leitfähigkeit der Fraktionen in Laborversuchen

Ergebnisse der Untersuchungen elektrischer Leitfähigkeit der Fraktionen sind in den Abb. 24 bis Abb. 27 dargestellt.

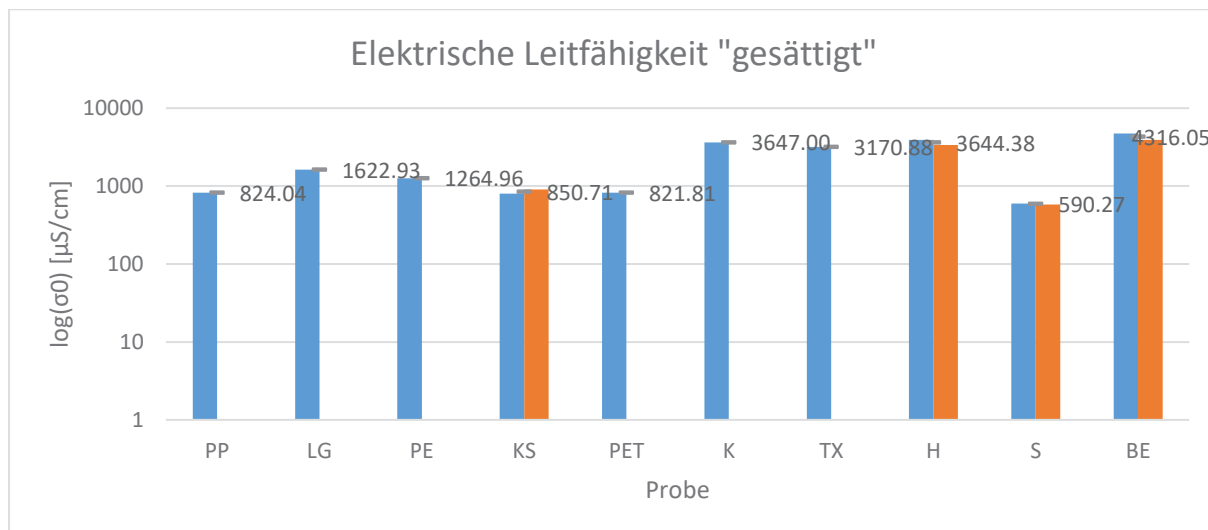


Abb. 24: Logarithmierte Leitfähigkeitswerte aus Laborversuch mittels Lippmann 4point light an Zylinder 1 bei vollständig gesättigten Materialien. Wiederholungsmessungen (orange).

Im Zustand vollständiger Sättigung durch die Salzwasserlösung liegen die berechneten Leitfähigkeitswerte (Abb. 24, Tab. 8) zwischen 590,27 $\mu\text{S/cm}$ (S) und 4316,05 $\mu\text{S/cm}$ (BE). Für die Fraktionen PP, LG, PE, LS und PET ergeben sich Werte im Bereich von 821,81 $\mu\text{S/cm}$ bis 1622,93 $\mu\text{S/cm}$. Wesentlich höhere Werte zeigen die Fraktionen K (3647,00 $\mu\text{S/cm}$), TX (3170,88 $\mu\text{S/cm}$), und H (3644,38 $\mu\text{S/cm}$).

Tab. 8: Ergebnisse der elektrischen Leitfähigkeit der Materialien in vollständig wassergesättigtem (Salzwasserlösung) Zustand.

Probe	U [mV]	I [nA]	k [m]	R [Ω]	ρ_0 [Ωm]	σ_0 [$\mu\text{S/cm}$]
PP	2,582	10000	0,047	258,20	12,14	824,04
LG	1,311	10000	0,047	131,10	6,16	1622,93
PE	1,682	10000	0,047	168,20	7,91	1264,96
KS	0,266	1000	0,047	266,00	12,50	799,87
KS Wh.	2,36	10000	0,047	236,00	11,09	901,55
PET	2,589	10000	0,047	258,90	12,17	821,81
K	5,834	100000	0,047	58,34	2,74	3647,00
TX	0,671	10000	0,047	67,10	3,15	3170,88
H	0,541	10000	0,047	54,10	2,54	3932,83

H Wh.	0,634	10000	0,047	63,40	2,98	3355,93
S	3,548	10000	0,047	354,80	16,68	599,68
S Wh.	3,663	10000	0,047	366,30	17,22	580,85
BE	0,45	10000	0,047	45,00	2,12	4728,13
BE Wh.	0,545	10000	0,047	54,50	2,56	3903,96

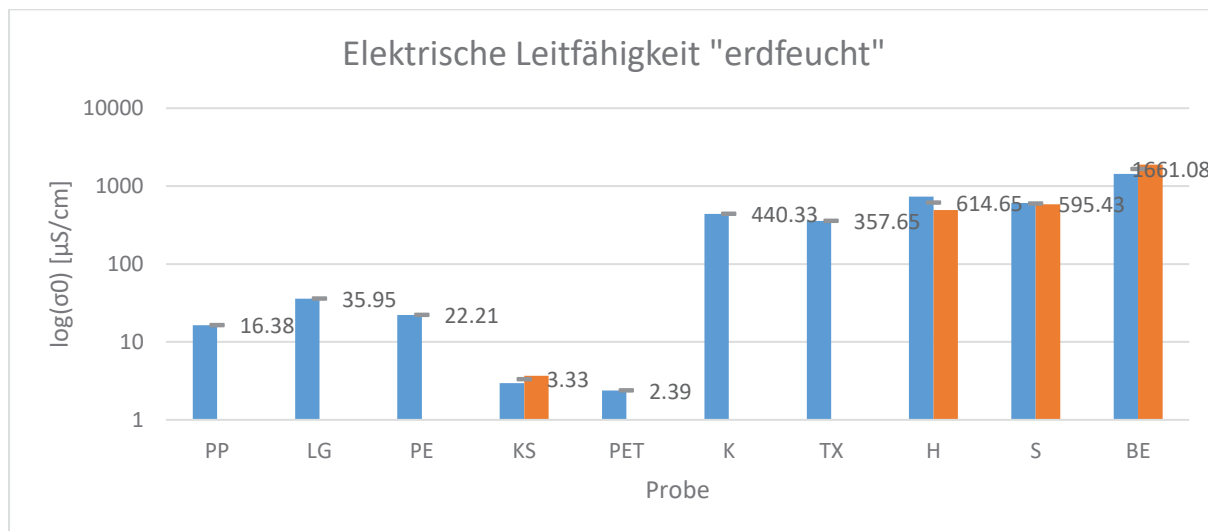


Abb. 25: Logarithmierte Leitfähigkeitswerte aus Laborversuchen mittels Lippmann 4point light an Zylinder 1 bei erdfeuchten Materialien. Wiederholungsmessungen (orange).

Nach dem Ablassen der Salzwasserlösung liegen die Leitfähigkeitswerte (Abb. 25, Tab. 9) bei den erdfeuchten Fraktionen K, TX, H, S im Bereich von 357,65 μS/cm (TX) bis 614,65 μS/cm (H). Einzig Blumenerde (BE) erweist sich mit 1661,08 μS/cm als noch besser leitfähig. Alle übrigen Fraktionen sind Kunststoffe und weisen vergleichsweise geringe Leitfähigkeiten mit Werten unter 36 μS/cm auf. Besonders die Fraktionen KS und PET zeigen mit 3,33 μS/cm und 2,39 μS/cm die geringste Leitfähigkeit in erdfeuchtem Zustand.

Tab. 9: Ergebnisse der elektrischen Leitfähigkeit der Materialien in erfeuchtem Zustand nach Abfließen der Salzwasserlösung.

Probe	U [mV]	I [nA]	k [m]	R [Ω]	ρ₀ [Ωm]	σ₀ [μS/cm]
PP	12,993	1000	0,047	12993,00	610,67	16,38
LG	5,919	1000	0,047	5919,00	278,19	35,95
PE	9,58	1000	0,047	9580,00	450,26	22,21
KS	71,84	1000	0,047	71840,00	3376,48	2,96
KS Wh.	57,59	1000	0,047	57590,00	2706,73	3,69

PET	88,9	1000	0,047	88900,00	4178,30	2,39
K	4,832	10000	0,047	483,20	22,71	440,33
TX	5,949	10000	0,047	594,90	27,96	357,65
H	2,899	10000	0,047	289,90	13,63	733,93
H Wh.	4,295	10000	0,047	429,50	20,19	495,38
S	3,497	10000	0,047	349,70	16,44	608,42
S Wh.	3,653	10000	0,047	365,30	17,17	582,44
BE	1,48	10000	0,047	148,00	6,96	1437,61
BE Wh.	1,129	10000	0,047	112,90	5,31	1884,55

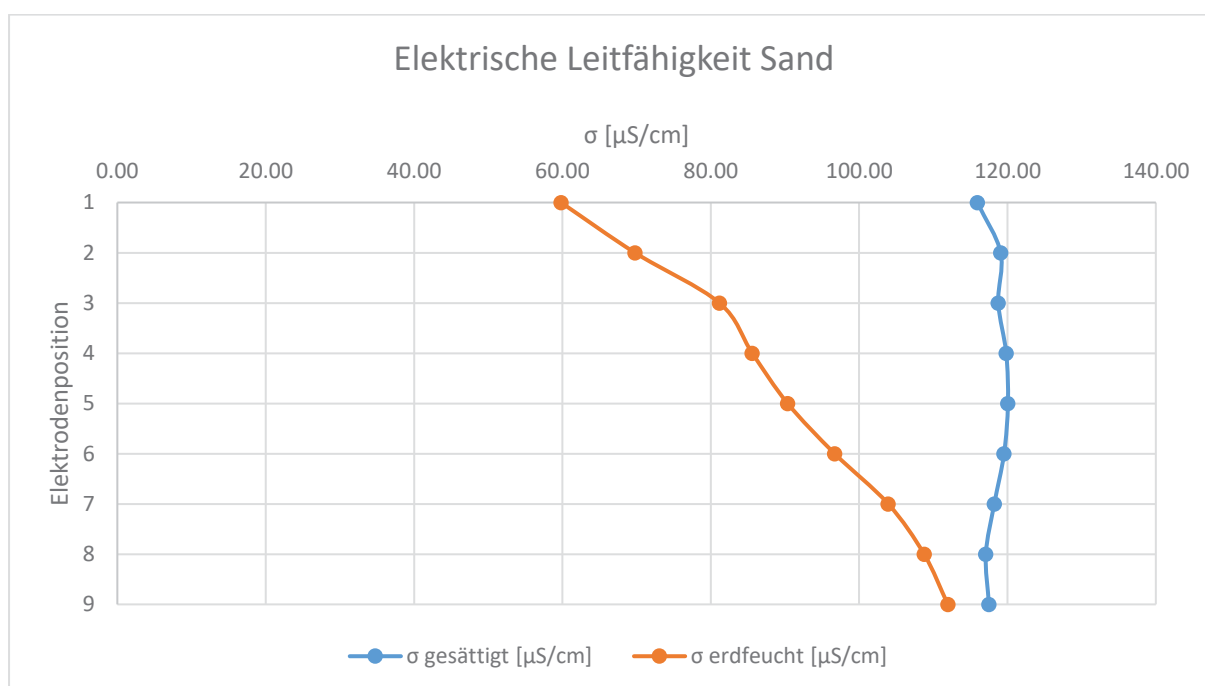


Abb. 26: Elektrische Leitfähigkeit des Referenzmaterials Sand (S) in vollständig wassergesättigtem (blau) und erdfeuchtem Zustand (orange); Zylinder 2.

Unter Berücksichtigung des Geometriefaktors ergeben sich für der elektrische Leitfähigkeit eines vollständig mit Leitungswasser ($\sigma_w = 405 \mu\text{S/cm}$ bei $18,8 \text{ }^\circ\text{C}$) gesättigten Sandes Werte zwischen $115,94 \mu\text{S/cm}$ (Elektrodenposition 1) und $120,06 \mu\text{S/cm}$ (Elektrodenposition 5). Die neuerliche Messung des erdfeuchten Zustandes nach Ablassen des Wassers zeigt grundsätzlich verminderte Werte von beispielsweise $59,81 \mu\text{S/cm}$ an der obersten Elektrodenposition 1 sowie einen erkennbaren Anstieg der Leitfähigkeit nach unten hin ($111,95 \mu\text{S/cm}$, Elektrodenposition 9) aufgrund des durch Sand zurückgehaltenen Wassers. An den Ergebnissen (Abb. 26) zeigt sich, dass gebundenes Haftwasser die Leitfähigkeit des Materials maßgeblich beeinflusst.

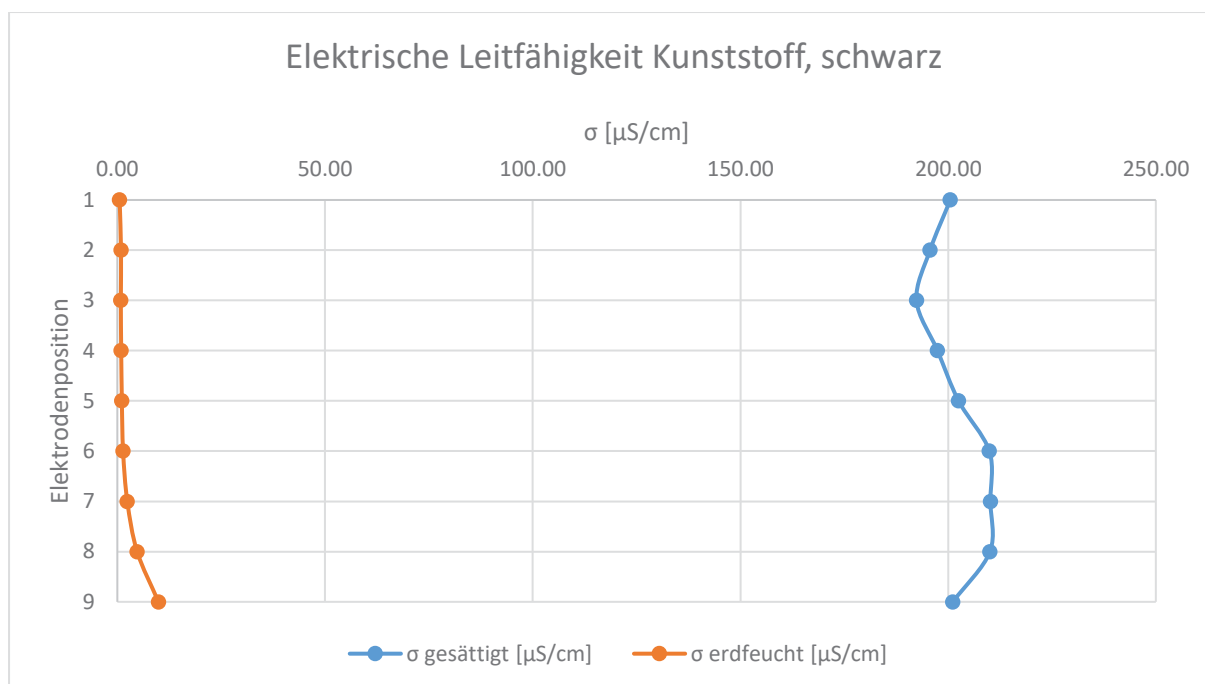


Abb. 27: Elektrische Leitfähigkeit des Referenzmaterials Kunststoff, schwarz (KS) in vollständig wassergesättigtem (blau) und erdfeuchtem Zustand (orange); Zylinder 2.

Untersuchungen an Kunststoff schwarz ergeben eine mittlere Leitfähigkeit um 202,20 $\mu\text{S/cm}$ in vollständig mit Leitungswasser ($\sigma_w = 414 \mu\text{S/cm}$ bei 19,7 °C) gesättigtem Zustand (Abb. 27). Nach dem Abfließen des zugefügten Wassers führen neuerliche Messungen zu Leitfähigkeitswerten um 1 $\mu\text{S/cm}$ an den Elektrodenpositionen 1 bis 6 und zu einem geringen Anstieg nach unten auf bis zu 9,89 $\mu\text{S/cm}$. Kunststoff schwarz hat in erdfeuchten Zustand eine deutlich niedrige Leitfähigkeit als im gesättigten, begründet durch das geringe Wasserrückhaltevermögen dieses Materials.

Der aus den Ergebnissen geoelektrischer Messungen errechnete ohmsche Widerstand von leitungswasserdurchtränktem Trenn-, Bau- und Filtervlies in Tab. 8 liegt bei 605,7 Ω . Reines Leitungswasser weist einen Widerstand von 570,7 Ω auf.

Tab. 10: Ergebnisse aus elektrischen Messungen des Vlieses.

	U [mV]	I [nA]	R [Ω] (berechnet)
Mit Leitungswasser durchtränktes Vlies	60,57	100000	605,7
Leitungswasser	57,07	100000	570,7

4.4 Ergebnisse der Machbarkeitsprüfung

4.4.1 Vergleichbarkeit von Labor- und Deponiemaßstab

Die rechnerische Überprüfung der Vergleichbarkeit im Maßstabsverhältnis von 1:200 ergab in mehreren Beispielfällen grundsätzlich reproduzierbare Verhältnisse. Die Differenz der Widerstandswerte aus den Daten im Deponiemaßstab und den Daten im Labormaßstab wurde auf den Labormaßstab normiert. In einem Vergleich kommt es zu geringen Unterschieden, die auf Rundungsfehler zurückgeführt werden. Differenzwerte der ermittelten spezifischen Widerstände zwischen Labor- und Deponiemaßstab sind in Wenner- und Dipol-Dipol-Konfiguration im Anhang dargestellt. Die Vergleichbarkeit ist gewährleistet.

Tab. 11: Maximale Abweichung der Messwerte des Deponiemaßstabes aus der Gegenüberstellung von Vorwärtsmodellen im Deponie- und Labormaßstab bei Dipol-Dipol- und Wenner-Elektrodenkonfiguration.

Modell	Elektrodenanordnung	Anzahl Messungen	Maximale Abweichung vom Labormaßstab [Ωm]
1	Dipol-Dipol	253	0,14
2	Dipol-Dipol	253	-3,14
3	Dipol-Dipol	253	8,34
4	Dipol-Dipol	253	-4,13
5	Dipol-Dipol	253	-26,47
6	Dipol-Dipol	253	1,70
1	Wenner	92	0,09
2	Wenner	92	-1,97
3	Wenner	92	10,16
4	Wenner	92	-5,13
5	Wenner	92	-4,76
6	Wenner	92	0,08

Die Modelle in Kapitel 4.4.2 zeigen Unterschiede in den Messergebnissen, deren maximale Abweichung der Messwerte des Deponiemaßstabes zu jenen des Labormaßstabes in Tab. 9 gegeben ist.

4.4.2 Beispiele von Vorwärts-Modellberechnungen im Deponiemaßstab bei Dipol-Dipol- und Wenner-Elektrodenkonfiguration

In den Abbildungen Abb. 28 bis Abb. 45 sind verschiedene Modellszenarien dargestellt, bei denen jeweils idente Startmodelle Ausgangspunkt der Vorwärtsberechnungen sind. Der Unterschied liegt lediglich in der Skalierung. So beträgt die Auslage der Elektroden im Deponiemaßstab 96 m, bei einer Anzahl von 25 Elektroden und einem Elektrodenabstand von 4 m. Die im Verhältnis 1:200 skalierte Auslage im Labormaßstab beträgt 0,48 m bei einem Elektrodenabstand von 0,02 m und identer Elektrodenanzahl.

Die Differenz zwischen den Maßstäben, die sowohl in Dipol-Dipol- (Abb. 35) als auch in Wenner-Konfiguration (Abb. 36) bei Modell 3 systematisch auftritt, wird verstärkt sobald Elektrode A den ersten Punkt der Auslage erreicht und dieser Teil der Messung ist. So wird die Abweichung in Wenner-Anordnung (A-B-M-N: 1-25-9-17) bei der letzten Messung (92) mit 10,16 Ωm maximal. Im Falle der Dipol-Dipol-Anordnung (A-B-M-N: 1-2-24-25) wird die Abweichung in der letzten Messung (253) mit 8,34 Ωm maximal.

In Modell 4 (Abb. 37) kommt es ebenfalls zu differierenden Ergebnissen zwischen Labor- und Deponiemaßstab. In Wenner-Anordnung treten die größten Abweichungen mit -5,13 Ωm bei den Messungen 81 bis 87 auf. Bei Dipol-Dipol-Anordnung sind es die Messungen von 176 bis 187, die mit -4,13 Ωm eine maximale Abweichung vom Labormaßstab zeigen.

Zu hohen Abweichungen kommt es bei Modell 5 (Abb. 40) in Dipol-Dipol-Anordnung. Hier verstärkt sich die Abweichung mit zunehmender Tiefe immer dann, wenn die beiden Elektroden A und B die Elektrodenposition 4 und 5 besetzten. Zwischen diesen beiden Positionen sind im Startmodell Zellen mit hohem spezifischen Widerstandswert (4170 Ωm) definiert. So kommt es zu Abweichungen von bis zu -26,47 Ωm . In Wenner-Anordnung tritt die maximale Abweichung von -4,76 Ωm bei Messung 42 auf. Die Elektroden sind bei dieser Messung folgendermaßen positioniert: A-B-M-N: 1-10-4-7. Der hohe spezifische Widerstand ist auch hier im Startmodell zwischen Position 4 und 5 festgelegt.

Modell 1

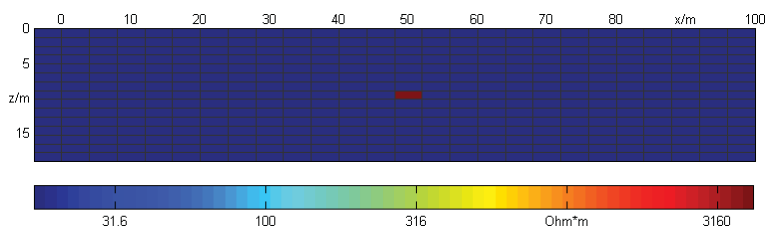


Abb. 28: Modell 1, Deponiemaßstab; Einzelne Zelle, mittig angeordnet mit hohem spezifischen Widerstandswert (4170 Ωm) in einer Umgebung mit geringerem spezifischen Widerstandswert (17 Ωm).

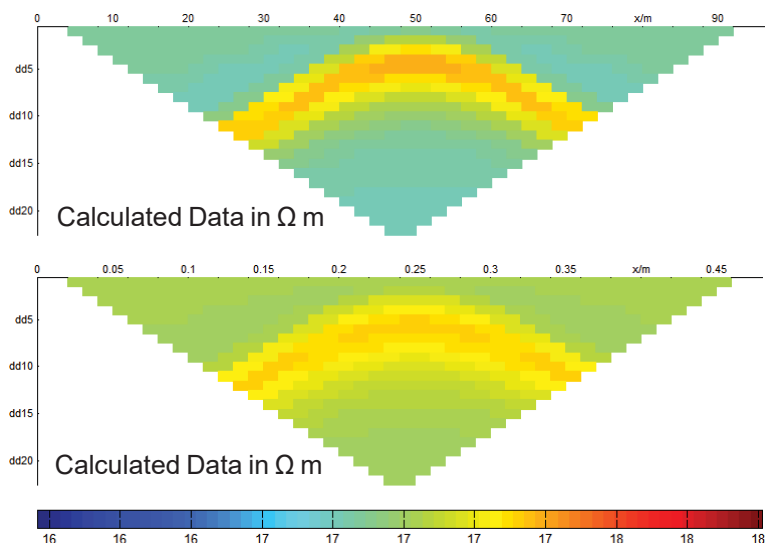


Abb. 29: Vorwärtsmodell 1 mit Dipol-Dipol-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

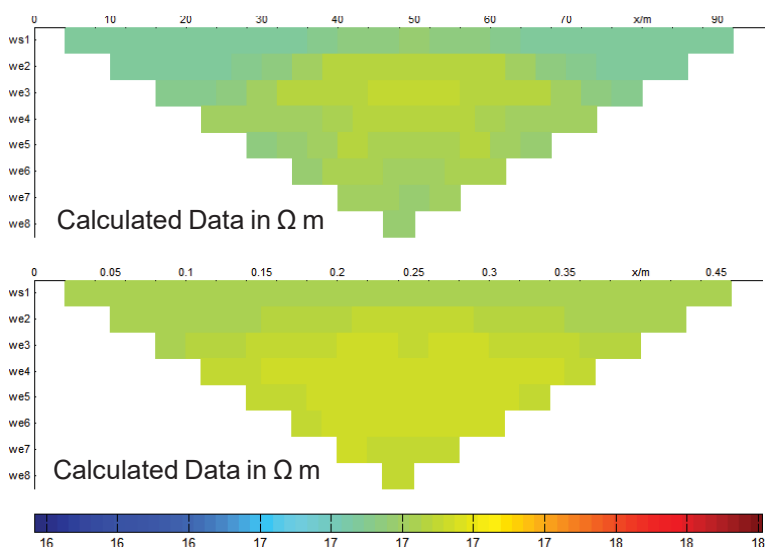


Abb. 30: Vorwärtsmodell 1 mit Wenner-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

Modell 2

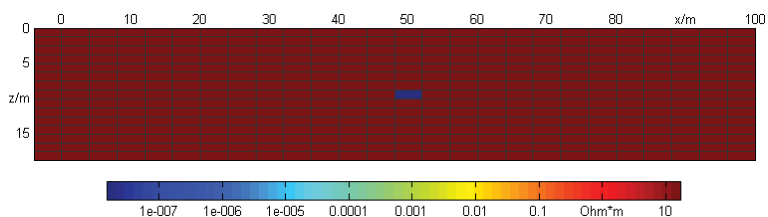


Abb. 31: Modell 2, Deponiemaßstab; Einzelne Zelle, mittig angeordnet mit niedrigem spezifischen Widerstandswert ($1,5E-08 \Omega m$) in einer Umgebung mit höherem spezifischen Widerstandswert ($17 \Omega m$).

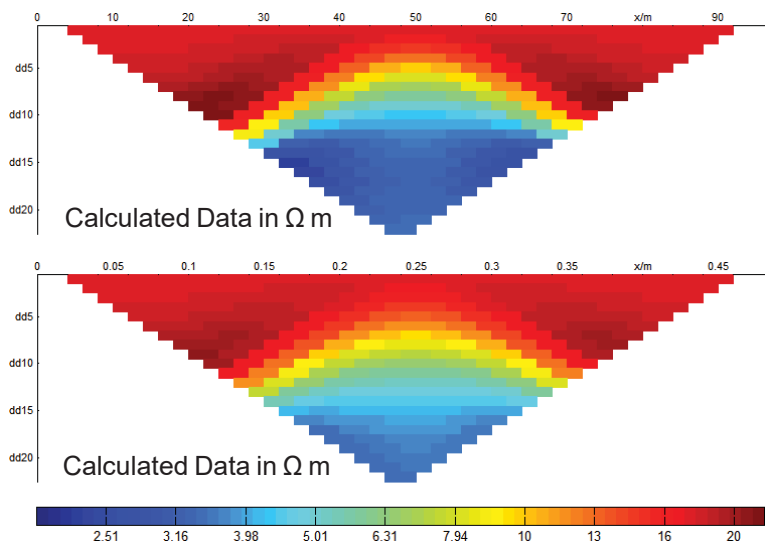


Abb. 32: Vorwärtsmodell 2 mit Dipol-Dipol-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

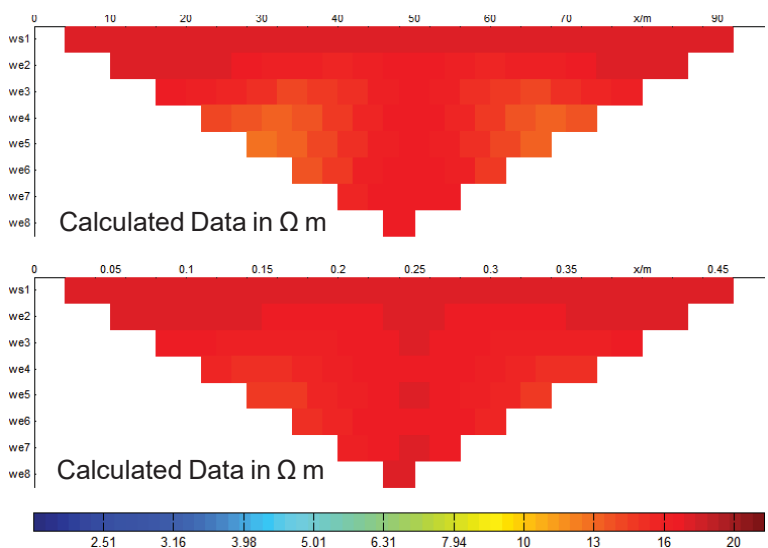


Abb. 33: Vorwärtsmodell 2 mit Wenner-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

Modell 3

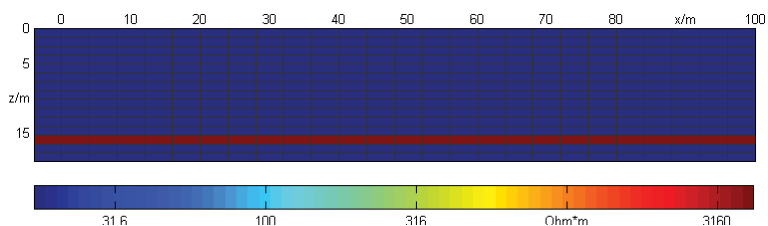


Abb. 34: Modell 3, Deponiemaßstab; Einzelne Lage in horizontaler Anordnung im unteren Bereich mit hohem spezifischen Widerstandswert (4170 Ωm) in einer Umgebung mit geringerem spezifischen Widerstandswert (17 Ωm).

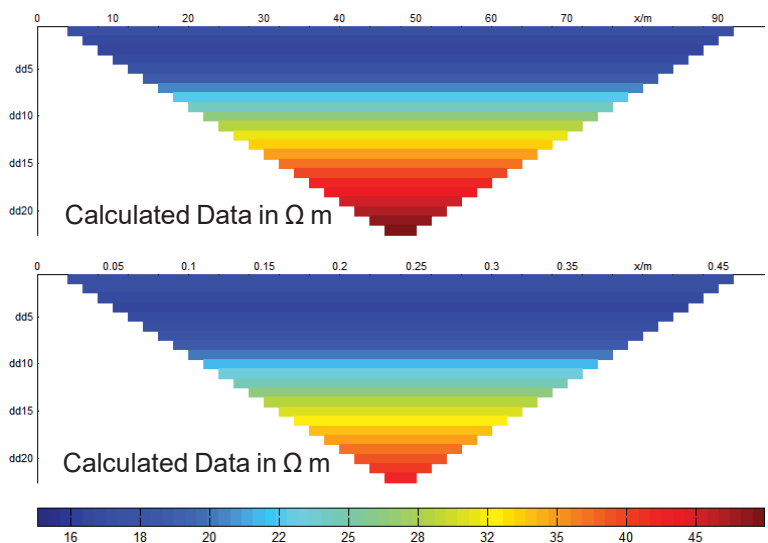


Abb. 35: Vorwärtsmodell 3 mit Dipol-Dipol-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

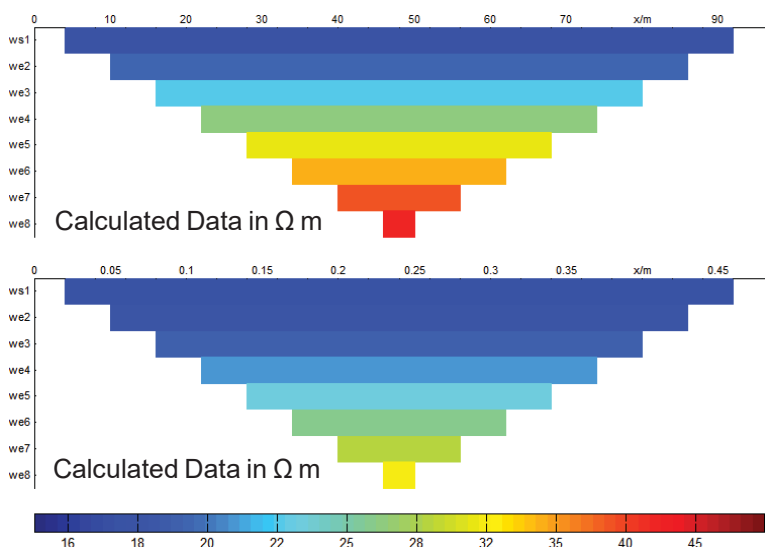


Abb. 36: Vorwärtsmodell 3 mit Wenner-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

Modell 4

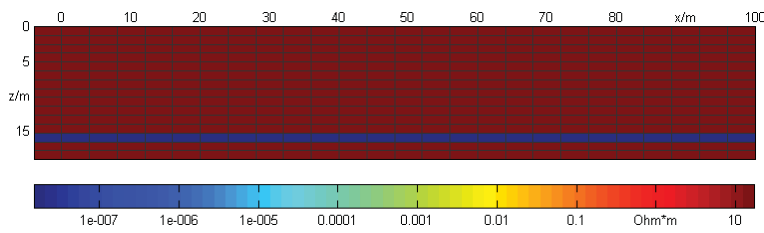


Abb. 37: Modell 4, Deponiemaßstab; Einzelne Lage in horizontaler Anordnung im unteren Bereich mit niedrigem spezifischen Widerstandswert ($1,5E-08 \Omega m$) in einer Umgebung mit höherem spezifischen Widerstandswert ($17 \Omega m$).

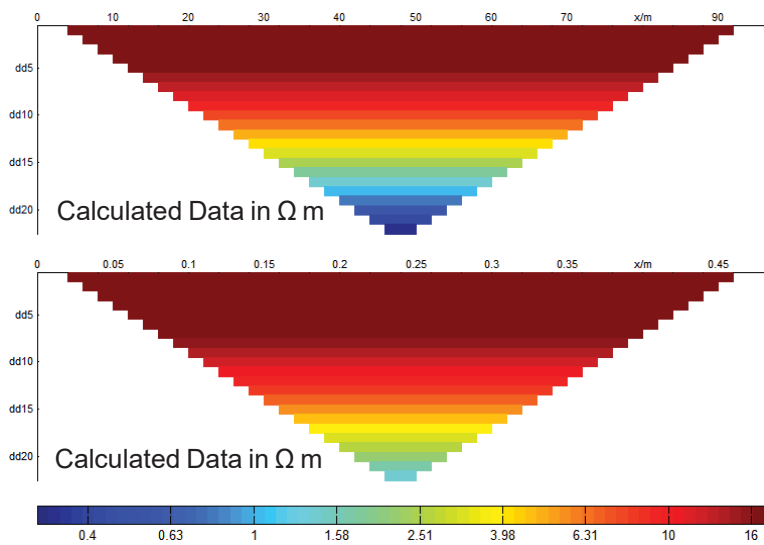


Abb. 38: Vorwärtsmodell 4 mit Dipol-Dipol-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

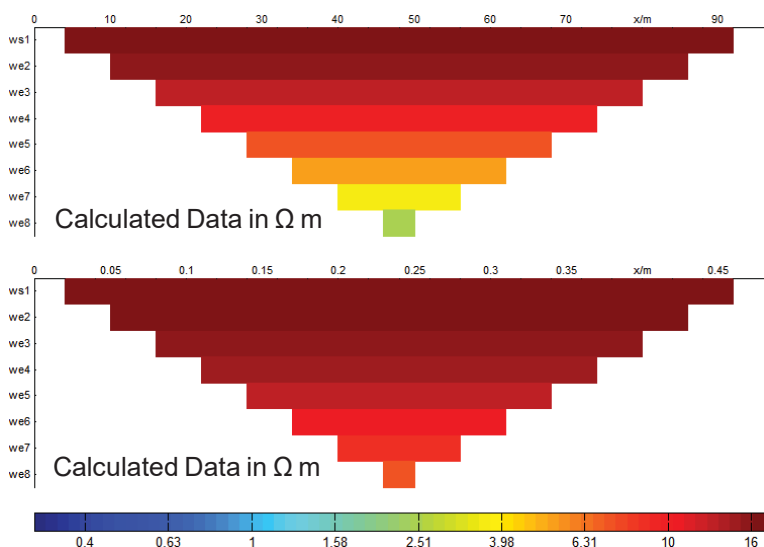


Abb. 39: Vorwärtsmodell 4 mit Wenner-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

Modell 5

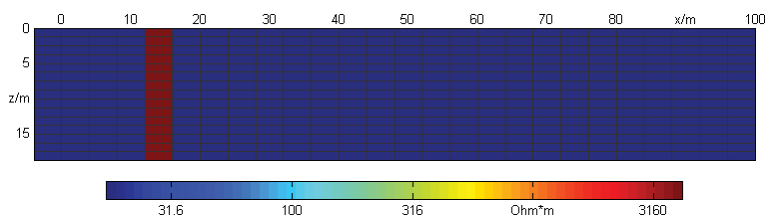


Abb. 40: Modell 5, Deponiemaßstab; Einzelne Lage in vertikaler Anordnung im linken Bereich mit hohem spezifischen Widerstand ($4170 \Omega\text{m}$) in einer Umgebung mit geringerem spezifischen Widerstandswert ($17 \Omega\text{m}$).

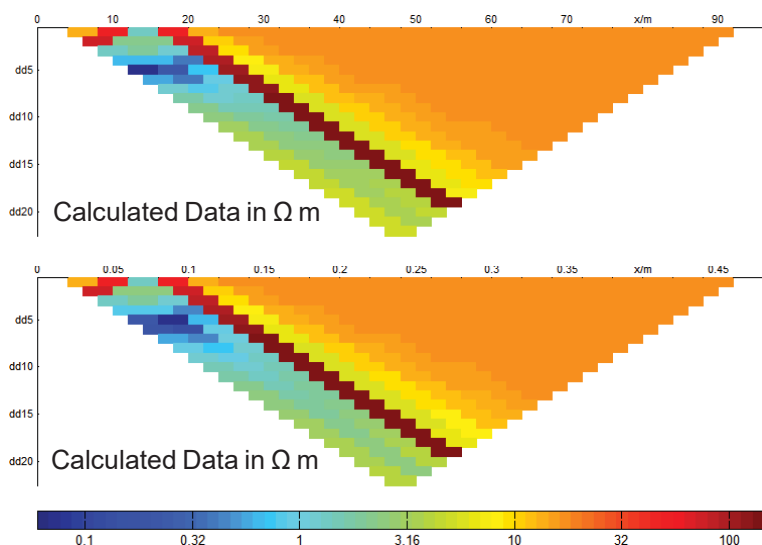


Abb. 41: Vorwärtsmodell 5 mit Dipol-Dipol-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

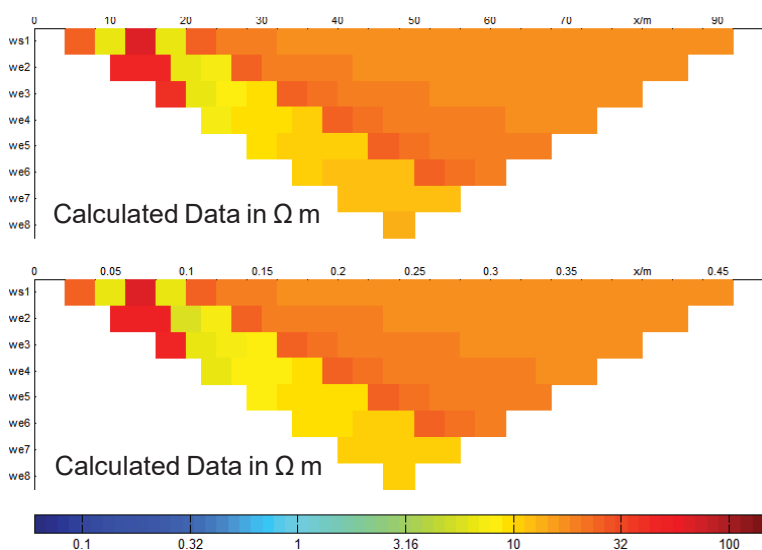


Abb. 42: Vorwärtsmodell 5 mit Wenner-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

Modell 6

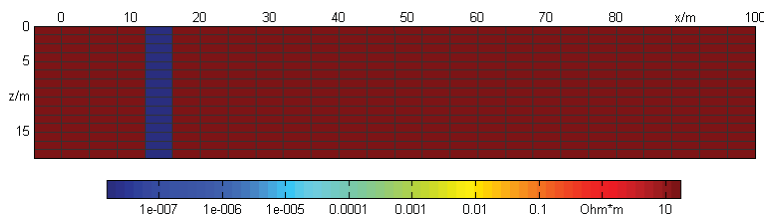


Abb. 43: Modell 6, Deponiemaßstab; Einzelne Lage in vertikaler Anordnung im linken Bereich mit niedrigem spezifischen Widerstandswert ($1,5E-08 \Omega m$) in einer Umgebung mit höherem spezifischen Widerstandswert ($17 \Omega m$).

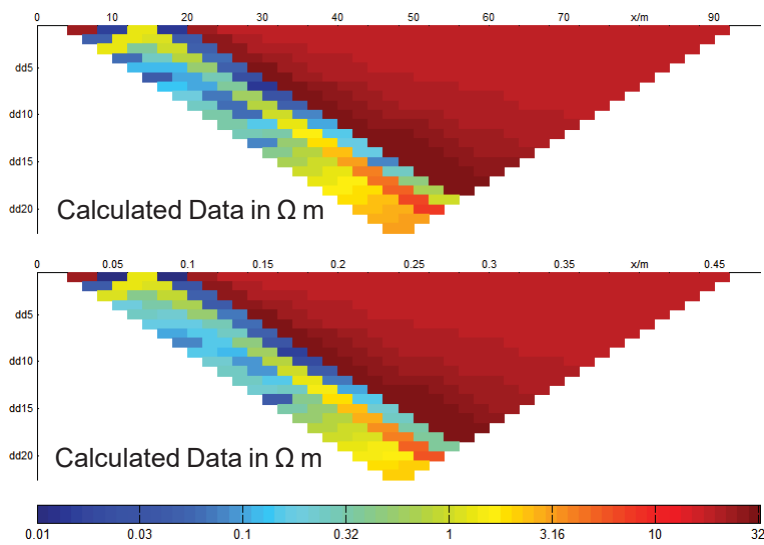


Abb. 44: Vorwärtsmodell 6 mit Dipol-Dipol-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

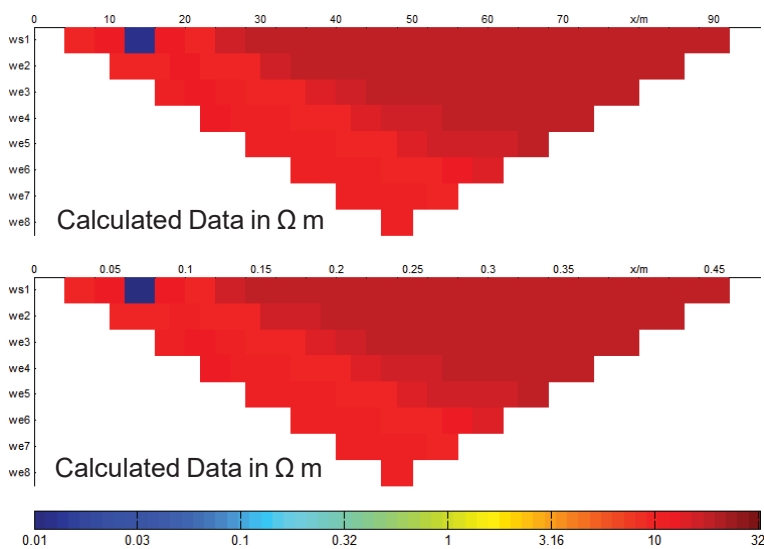


Abb. 45: Vorwärtsmodell 6 mit Wenner-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

Es ergeben sich Unterschiede in den Ergebnissen der Vorwärtsmodelle, bei denen anzunehmen ist, dass es sich dabei um Rundungsfehler handelt, die bei der Berechnung entstehen und in kleinerem Maßstab eine deutlich stärkere Ausprägung zeigen.

4.5 Vorwärtsmodelle und geoelektrische Tomographie „Tank“

Blindmessungen mit Wasser

In den Abbildungen Abb. 46 bis Abb. 51 sind Ergebnisse der geoelektrischen Tomographie aus Blindmessungen, bei denen der Tank mit Leitungswasser ($\sigma_w = 421 \mu\text{S/cm}$ bei $18,0 \text{ }^\circ\text{C}$) gefüllt war, den Ergebnissen der Vorwärtsmodelle gegenübergestellt. Die Abweichung der erwarteten und der tatsächlich gemessenen Werte ist als „Data Misfit“ prozentual dargestellt.

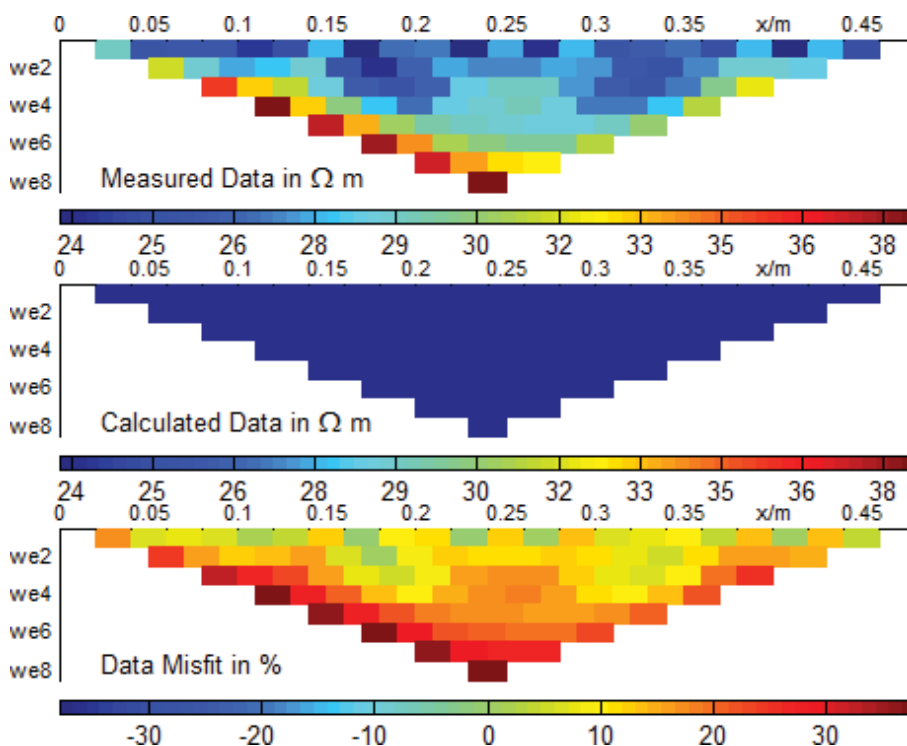


Abb. 46: Blindmessung Elektrodenreihe A in Wenner-Konfiguration: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

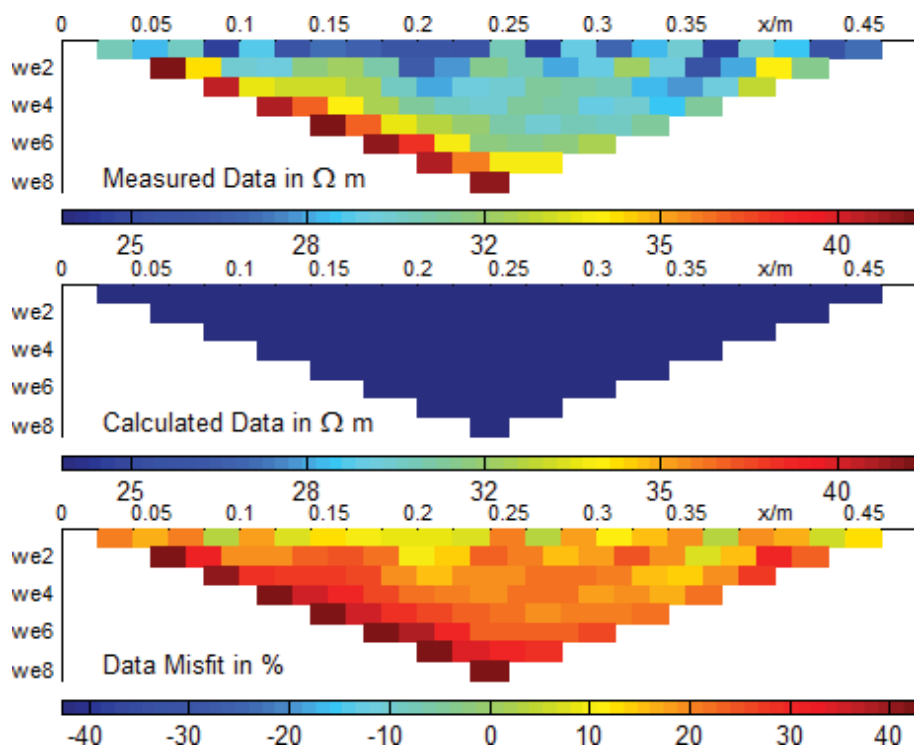


Abb. 47: Blindmessung Elektrodenreihe B in Wenner-Konfiguration: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

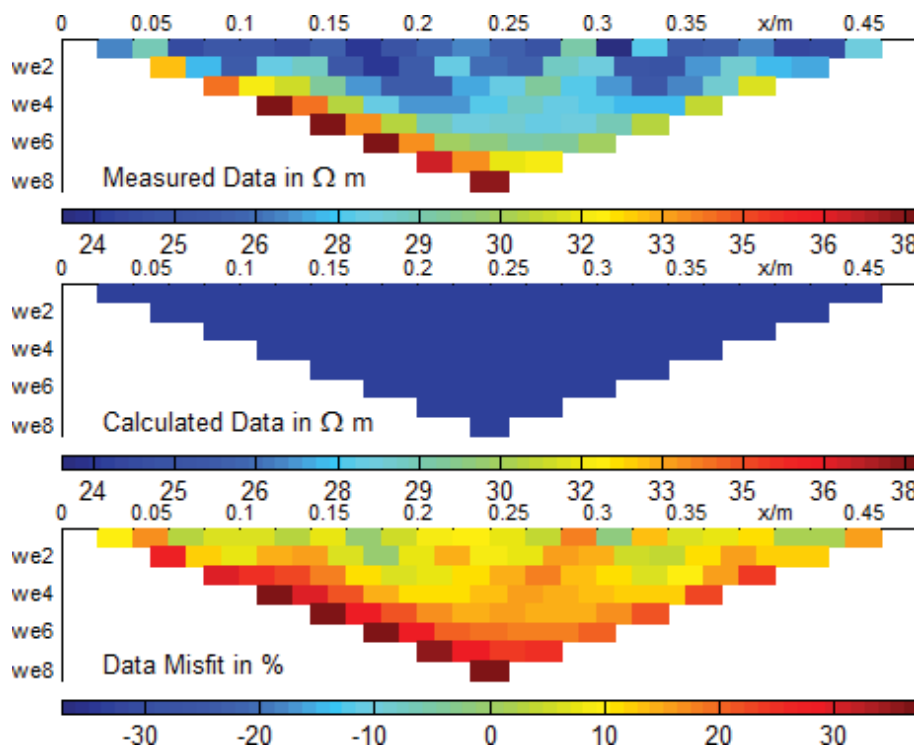


Abb. 48: Blindmessung Elektrodenreihe C in Wenner-Konfiguration: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

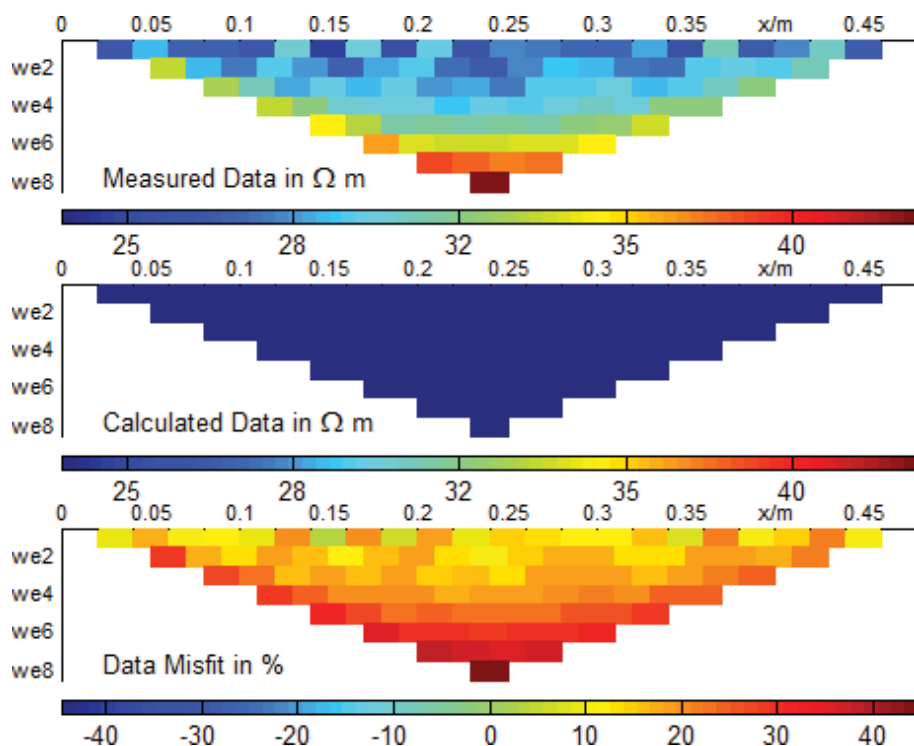


Abb. 49: Blindmessung Elektrodenreihe D in Wenner-Konfiguration: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

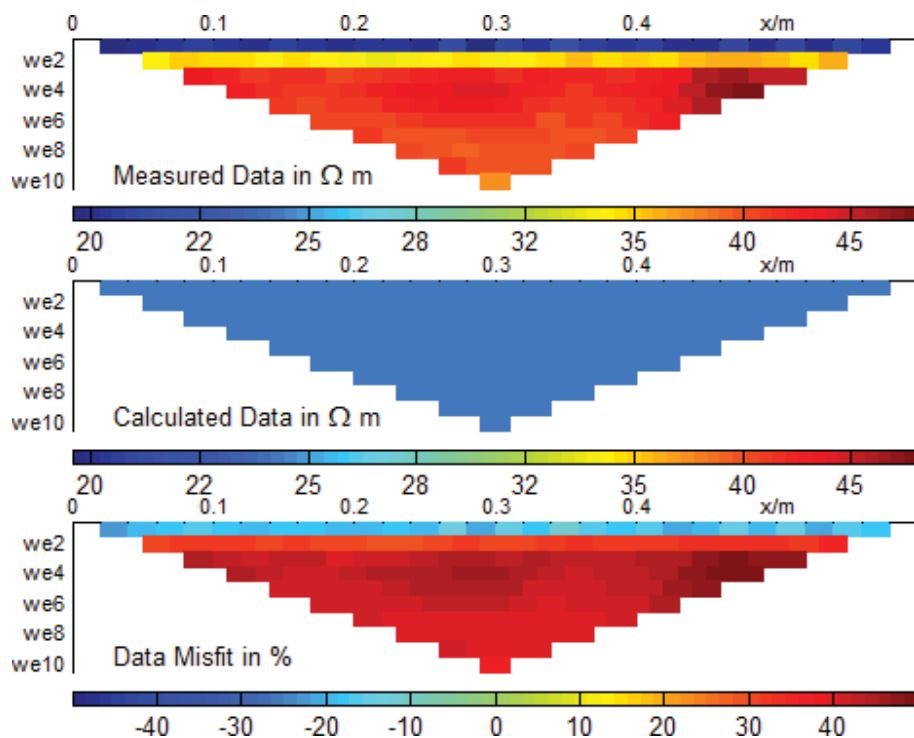


Abb. 50: Blindmessung Elektrodenreihe U in Wenner-Konfiguration: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

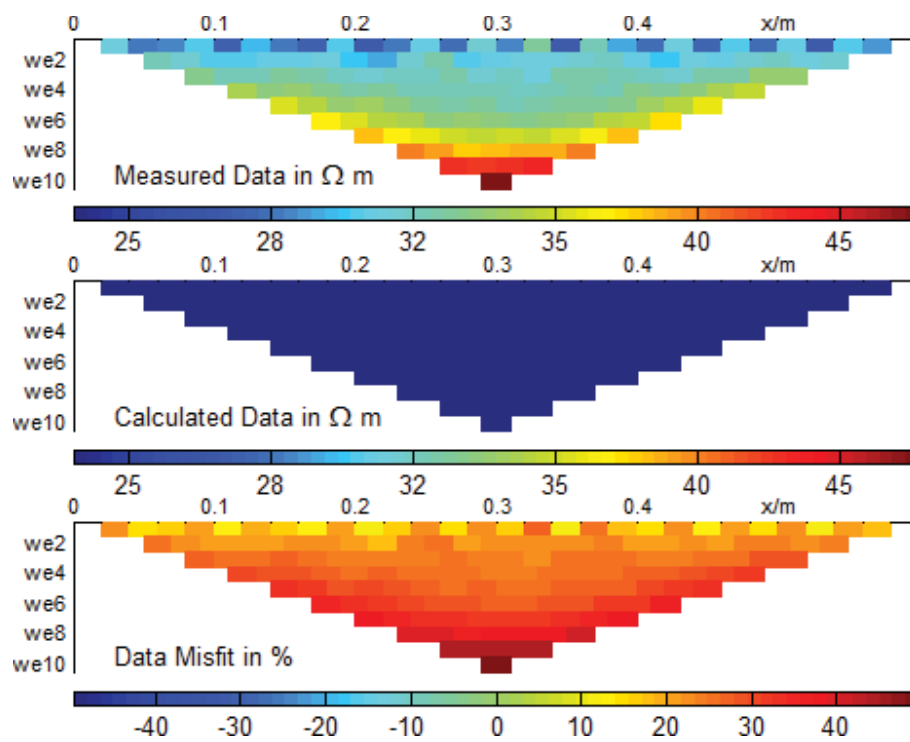


Abb. 51: Blindmessung Elektrodenreihe O in Wenner-Konfiguration: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

Versuchskammer in vollständig gesättigtem Zustand

In den Abbildungen Abb. 52 bis Abb. 63 sind Ergebnisse der geoelektrischen Tomographie aus Messungen des gesättigten Zustandes, bei denen der Tankinhalt mit Leitungswasser ($\sigma_w = 421 \mu\text{S}/\text{cm}$ bei $18,0 \text{ }^\circ\text{C}$) gesättigt war, den Ergebnissen der Vorwärtsmodelle gegenübergestellt. Die Abweichung der erwarteten und der tatsächlich gemessenen Werte ist als „Data Misfit“ prozentual dargestellt.

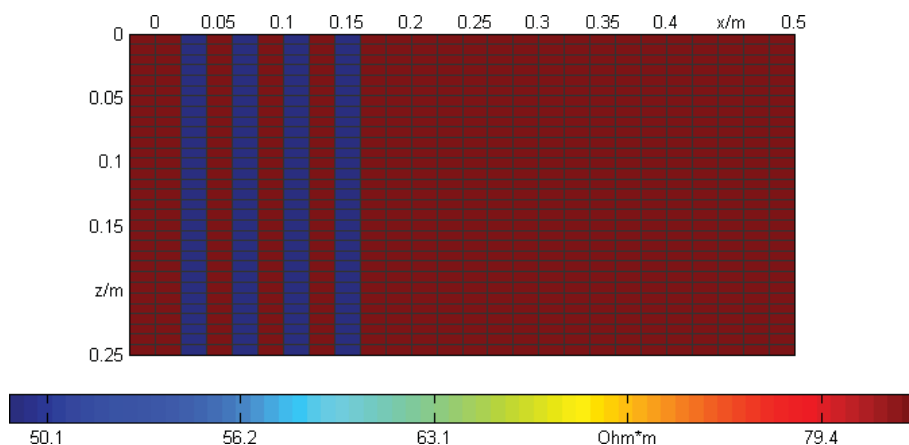


Abb. 52: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe A zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: $84 \Omega\text{m}$ (braun), $49 \Omega\text{m}$ (blau).

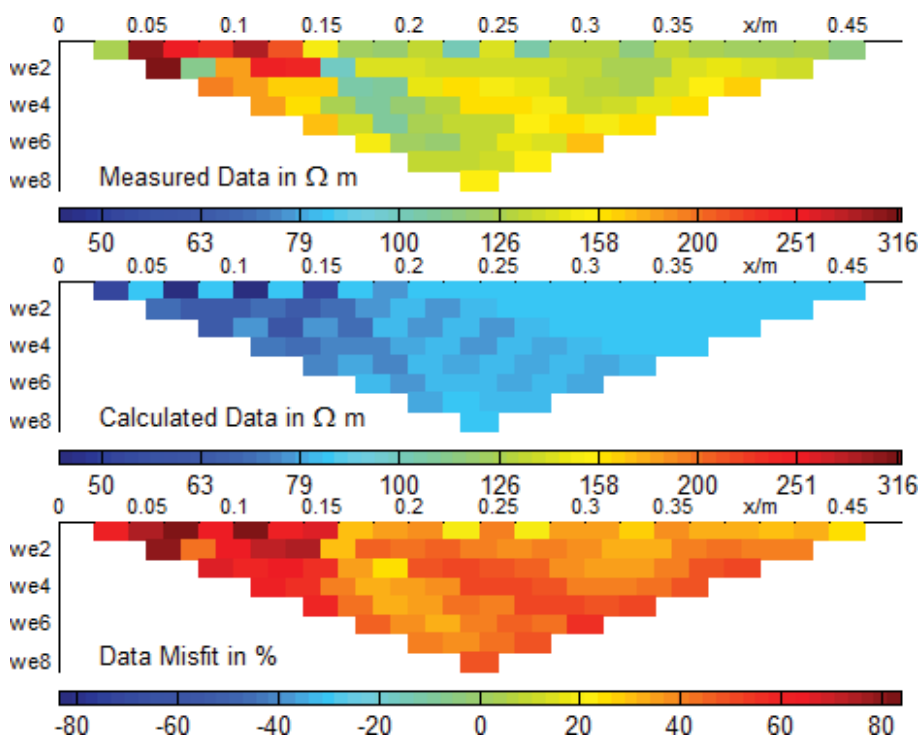


Abb. 53: Elektrodenreihe A in Wenner-Konfiguration bei vollständiger Wassersättigung: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

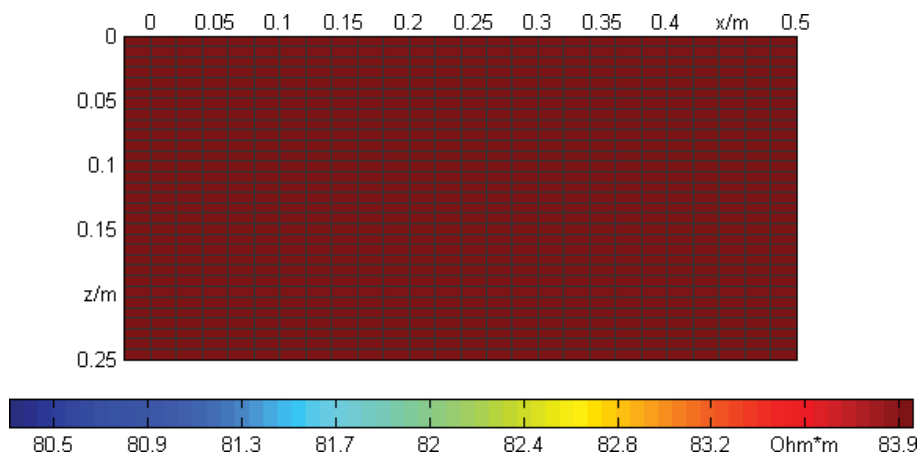


Abb. 54: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe B zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 84 Ω m (braun).

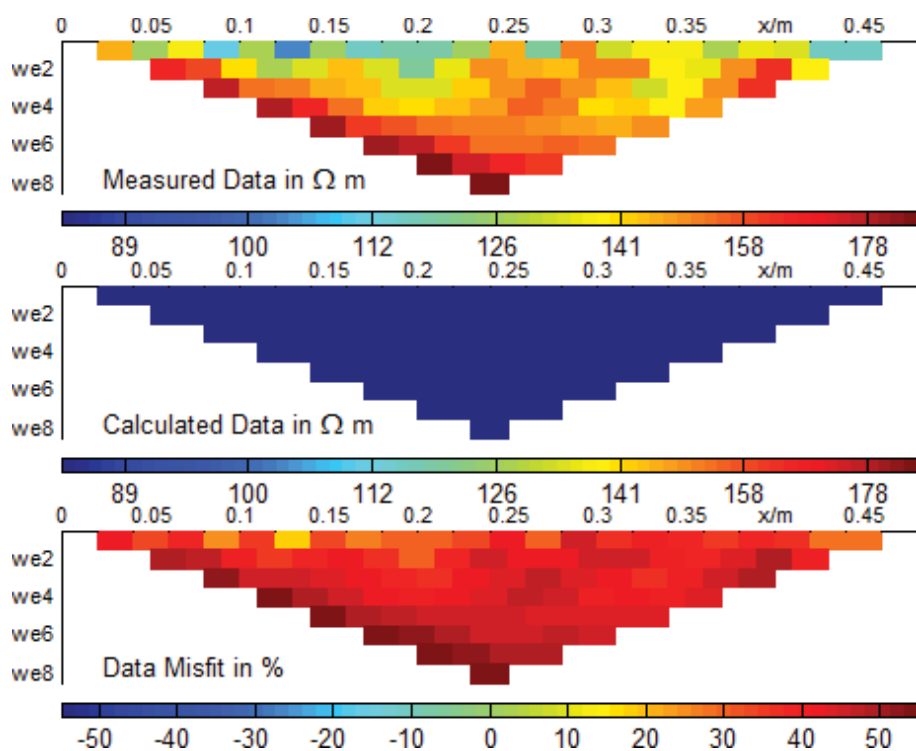


Abb. 55: Elektrodenreihe B in Wenner-Konfiguration bei vollständiger Wassersättigung: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

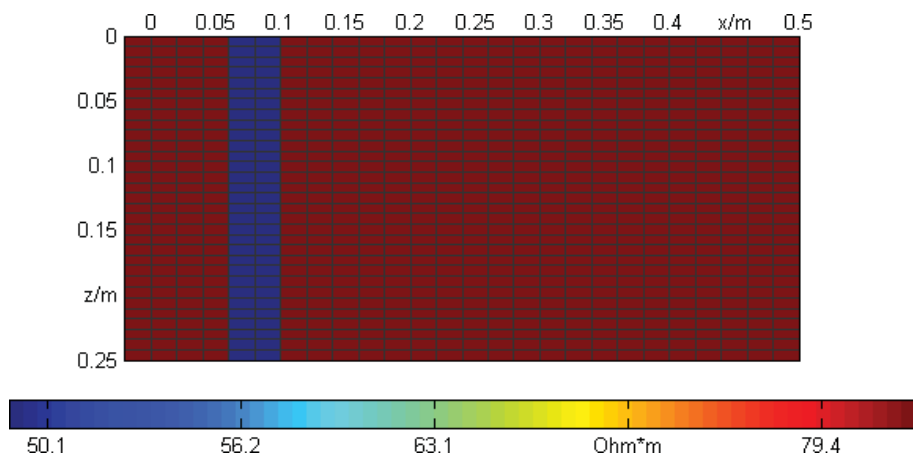


Abb. 56: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe C zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 84 Ωm (braun), 49 Ωm (blau).

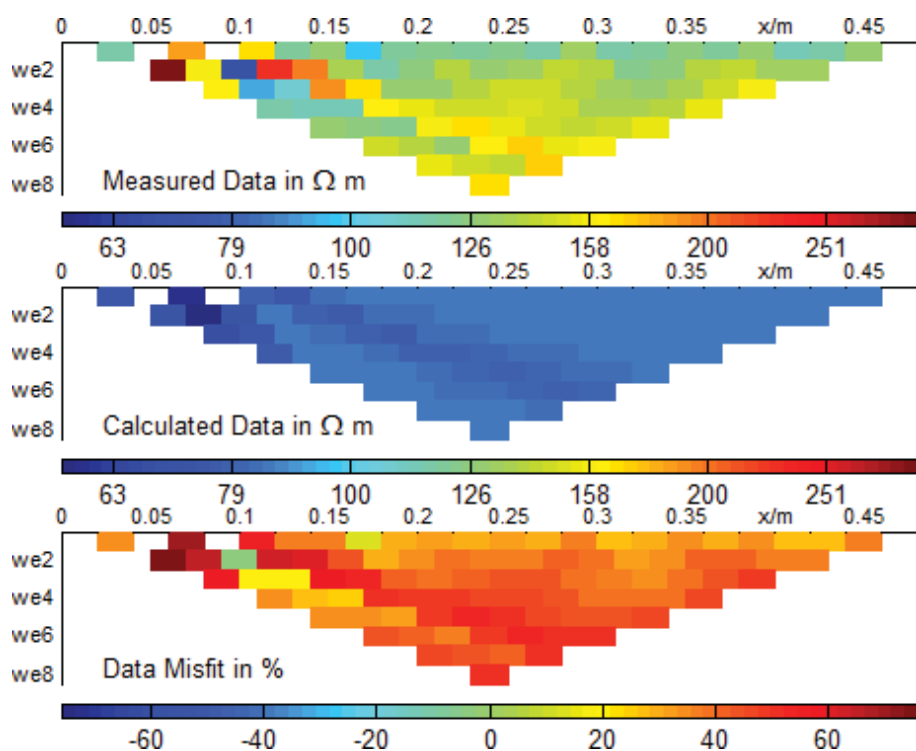


Abb. 57: Elektrodenreihe C in Wenner-Konfiguration bei vollständiger Wassersättigung: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

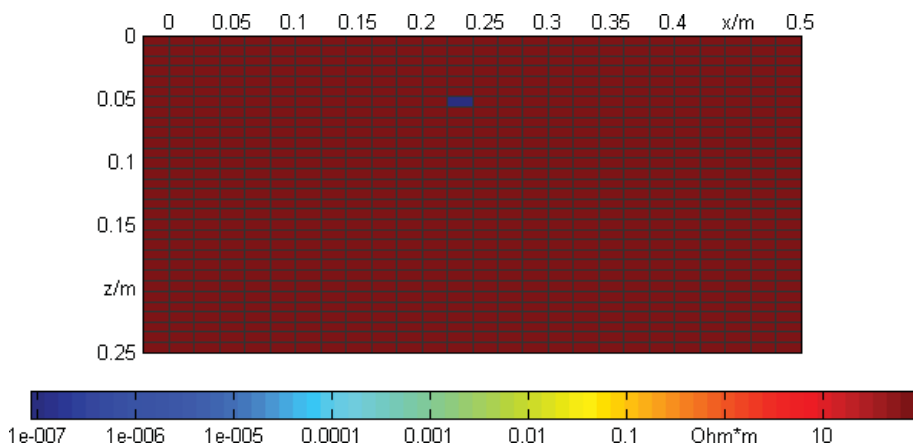


Abb. 58: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe D zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 84 Ωm (braun), $8,5\text{E}-08 \Omega\text{m}$ (blau).

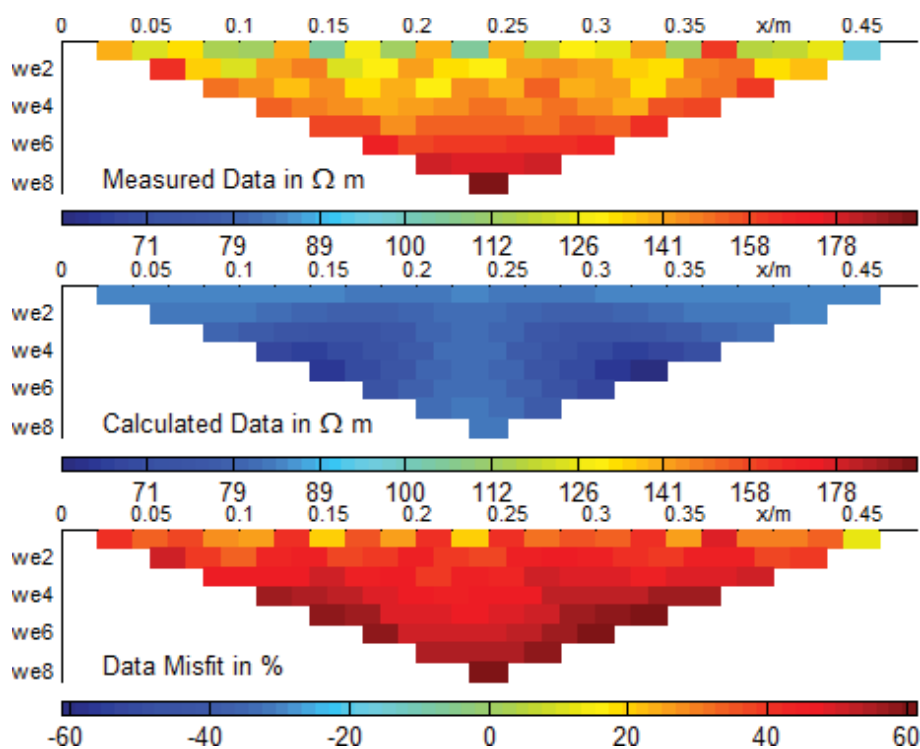


Abb. 59: Elektrodenreihe D in Wenner-Konfiguration bei vollständiger Wassersättigung: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

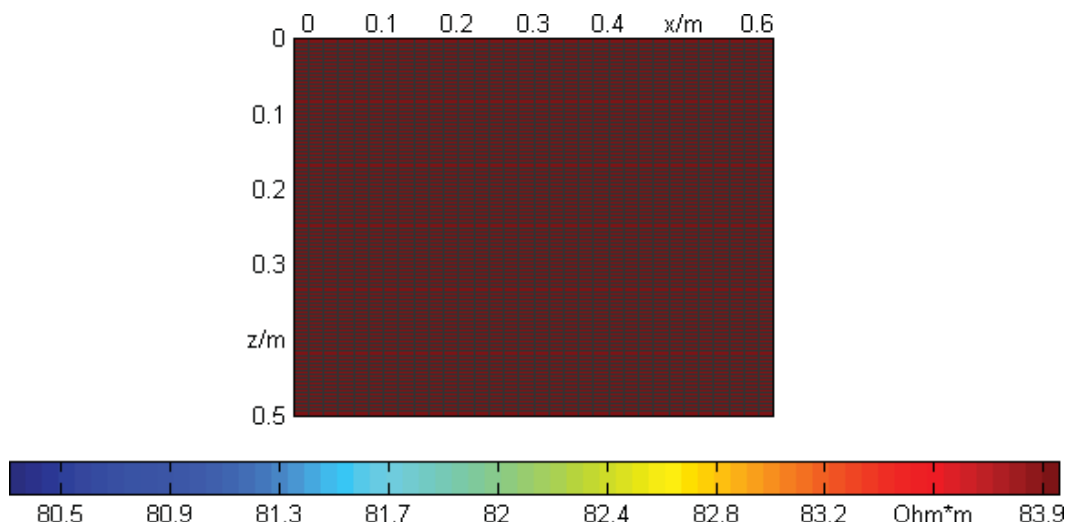


Abb. 60: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe U zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 84 Ω m (braun).

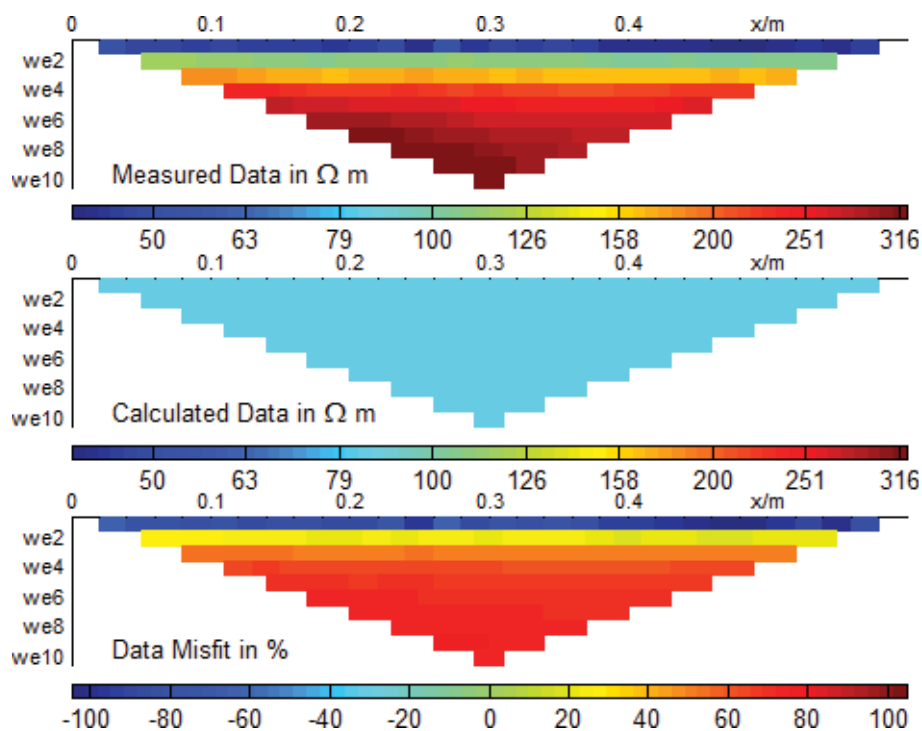


Abb. 61: Elektrodenreihe U in Wenner-Konfiguration bei vollständiger Wassersättigung: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

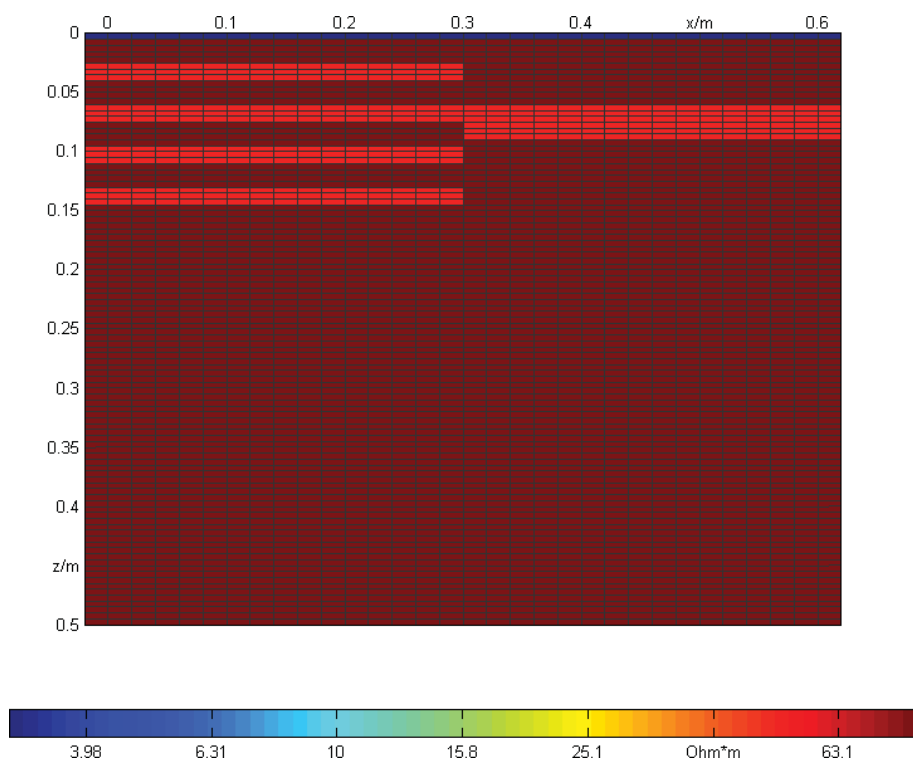


Abb. 62: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe O zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 84 Ωm (braun), 6,5 Ωm (blau), 49 Ωm (rot).

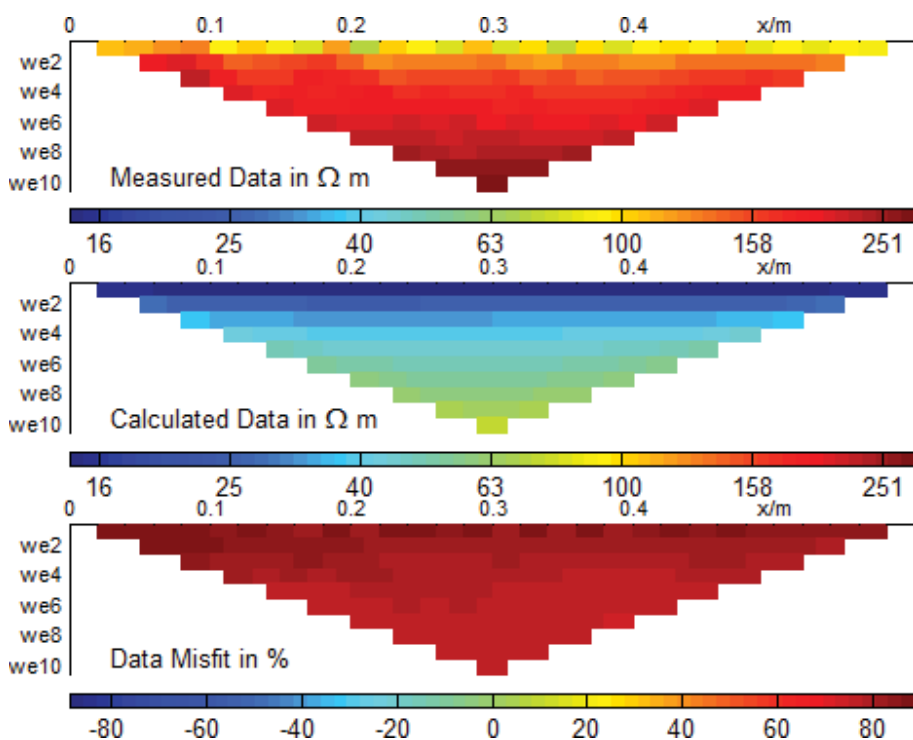


Abb. 63: Elektrodenreihe O in Wenner-Konfiguration bei vollständiger Wassersättigung: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

Versuchskammer in erdfeuchtem Zustand

In den Abbildungen Abb. 64 bis Abb. 75 sind Ergebnisse der geoelektrischen Tomographie aus Messungen des erdfeuchten Zustandes, bei denen zugegebenes Wasser bereits abgelassen war, den Ergebnissen der Vorwärtsmodelle gegenübergestellt. Die Abweichung der erwarteten und der tatsächlich gemessenen Werte ist als „Data Misfit“ prozentual dargestellt.

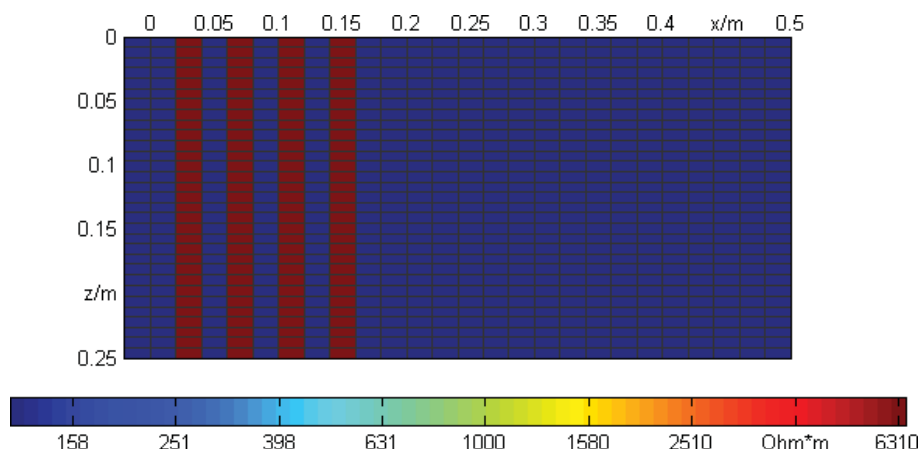


Abb. 64: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe A zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 120 Ω m (blau), 6500 Ω m (braun).

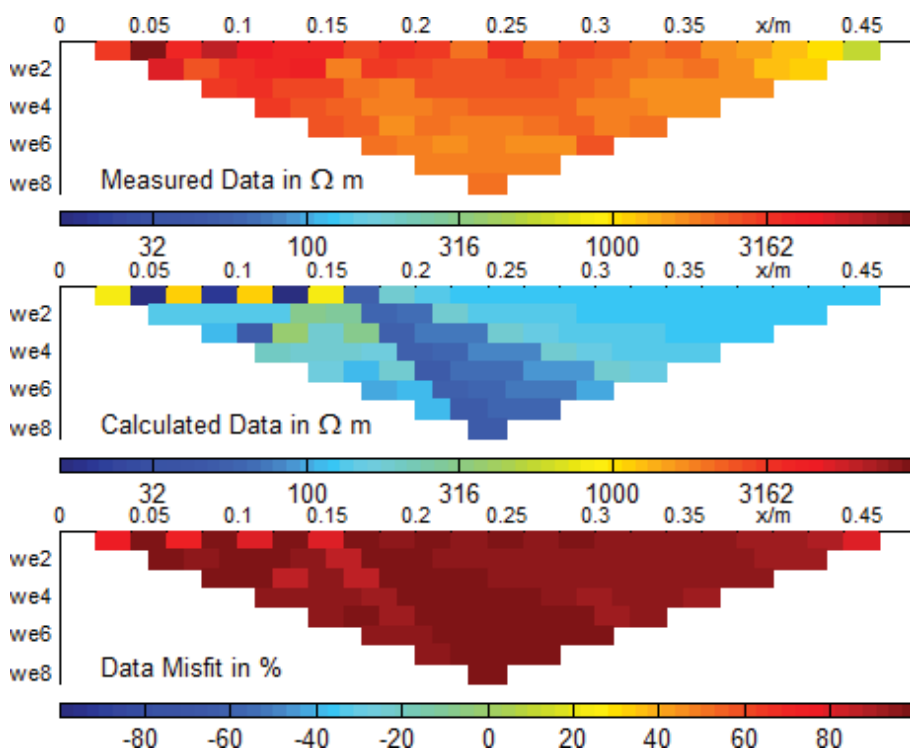


Abb. 65: Elektrodenreihe A in Wenner-Konfiguration bei erdfeuchtem Zustand: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

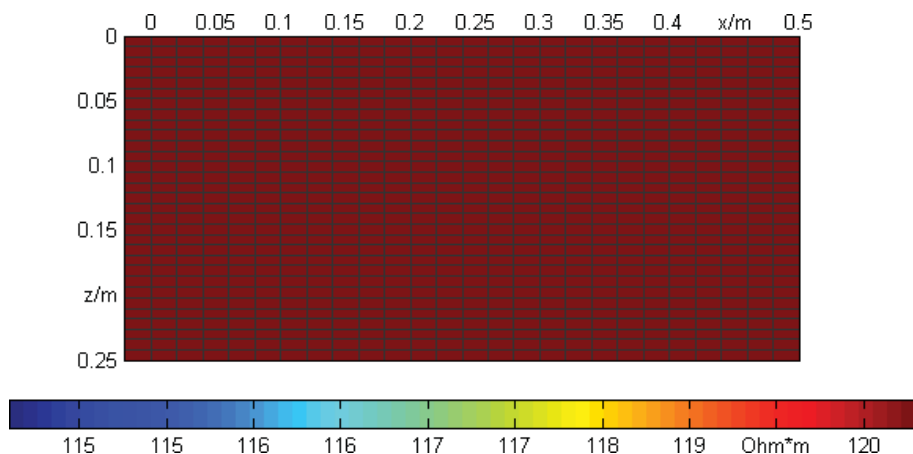


Abb. 66: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe B zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 120 Ωm (braun)

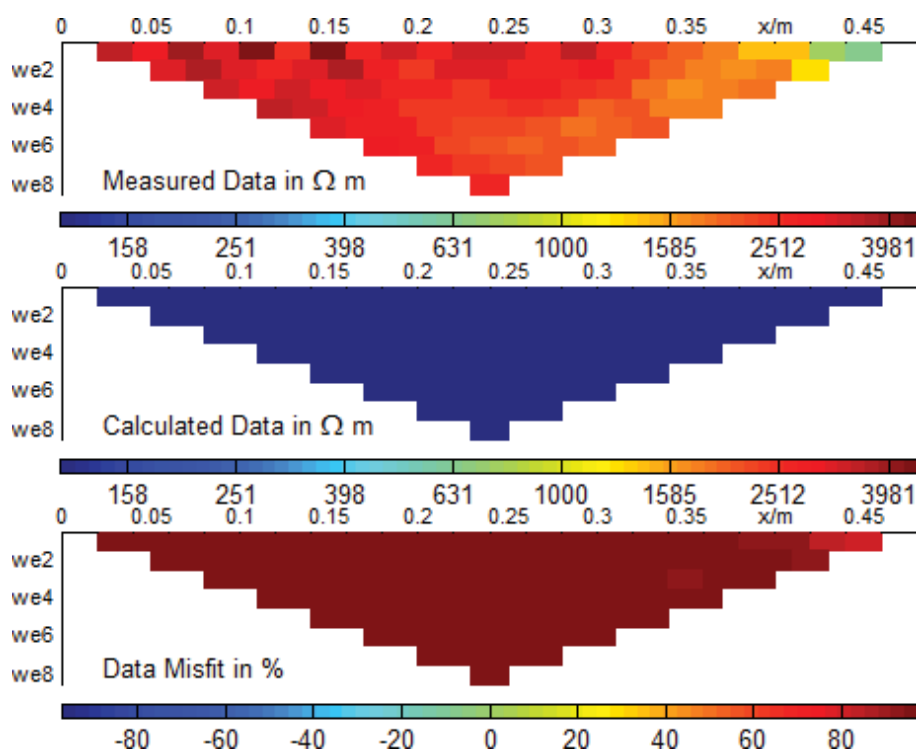


Abb. 67: Elektrodenreihe B in Wenner-Konfiguration bei erdfeuchtem Zustand: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

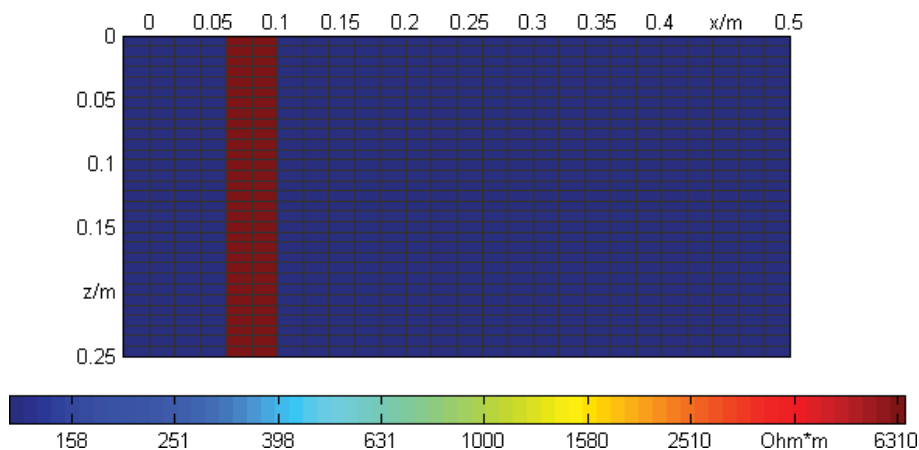


Abb. 68: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe C zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 120 Ω m (blau), 6500 Ω m (braun).

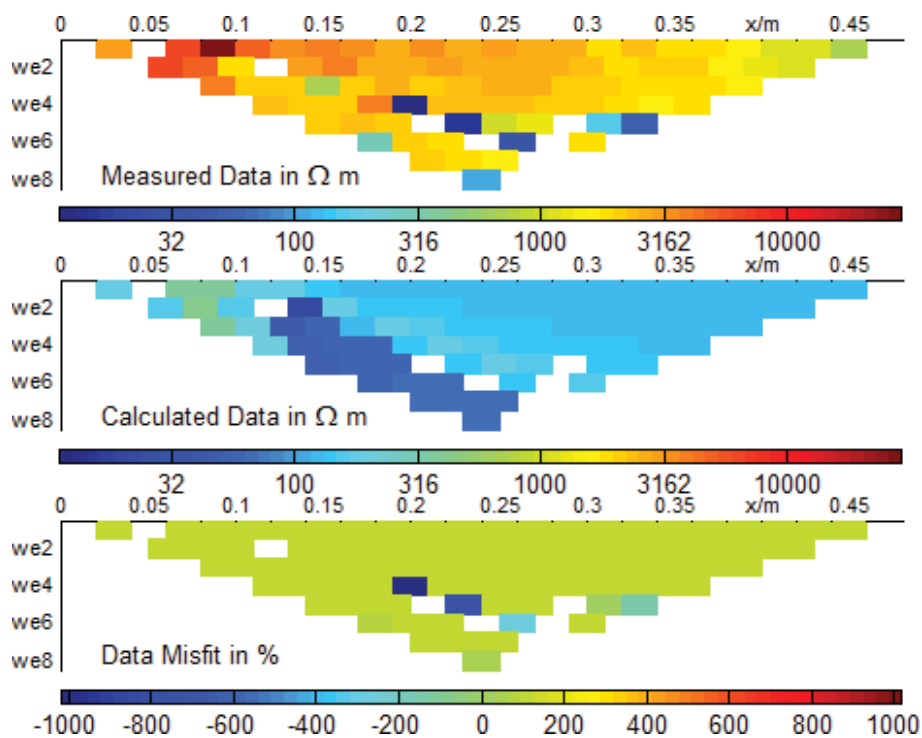


Abb. 69: Elektrodenreihe C in Wenner-Konfiguration bei erdfeuchtem Zustand: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

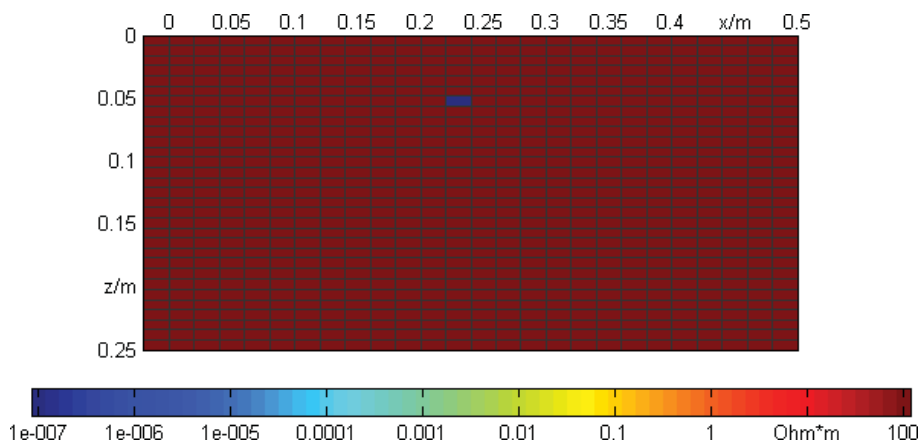


Abb. 70: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe D zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 120 Ωm (braun), $8,5\text{E}-08 \Omega\text{m}$ (blau).

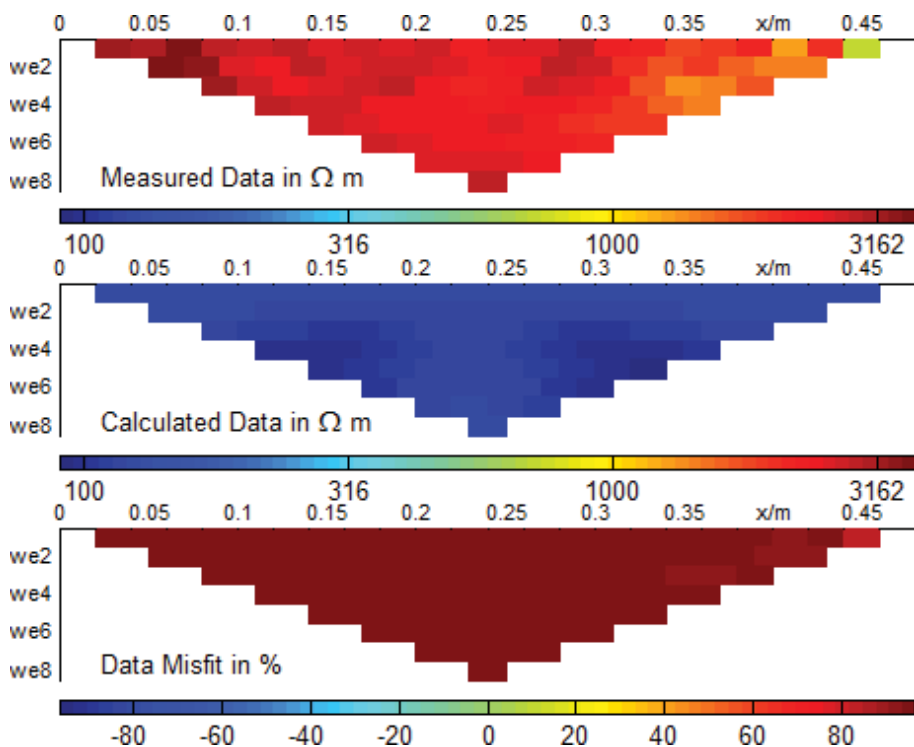


Abb. 71: Elektrodenreihe D in Wenner-Konfiguration bei erdfeuchtem Zustand: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

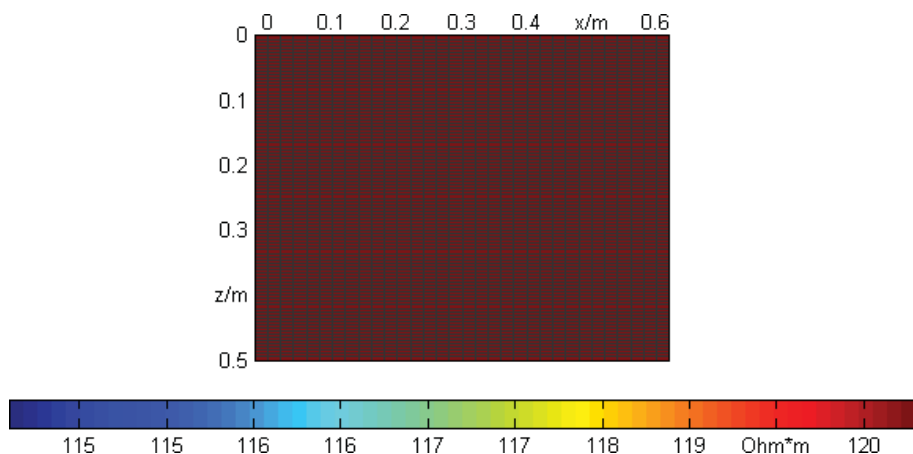


Abb. 72: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe U zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 120 Ωm (braun).

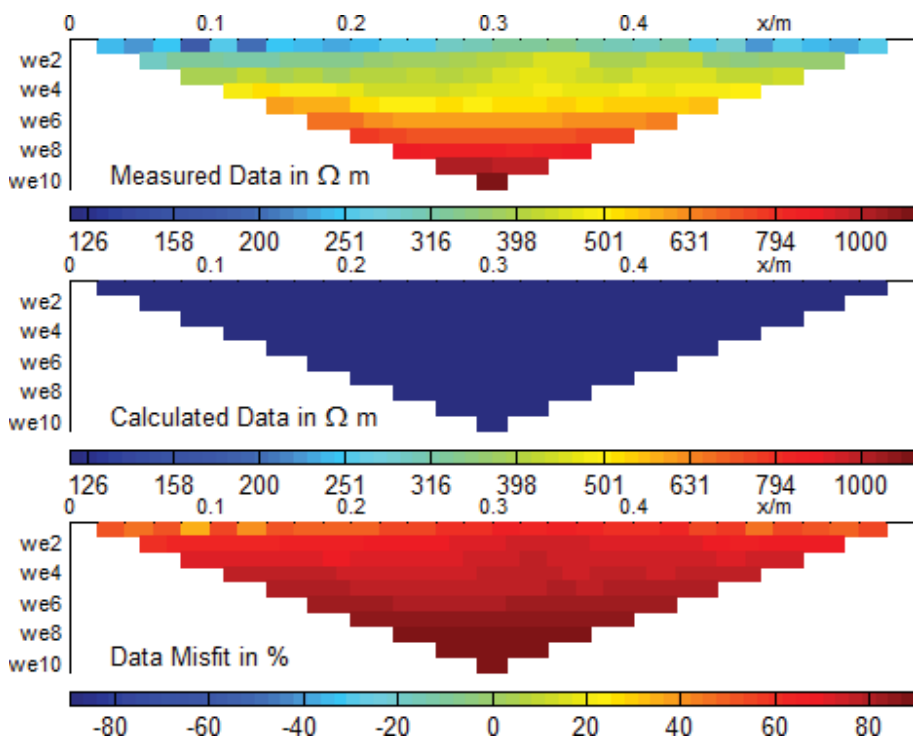


Abb. 73: Elektrodenreihe U in Wenner-Konfiguration bei erdfeuchtem Zustand: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

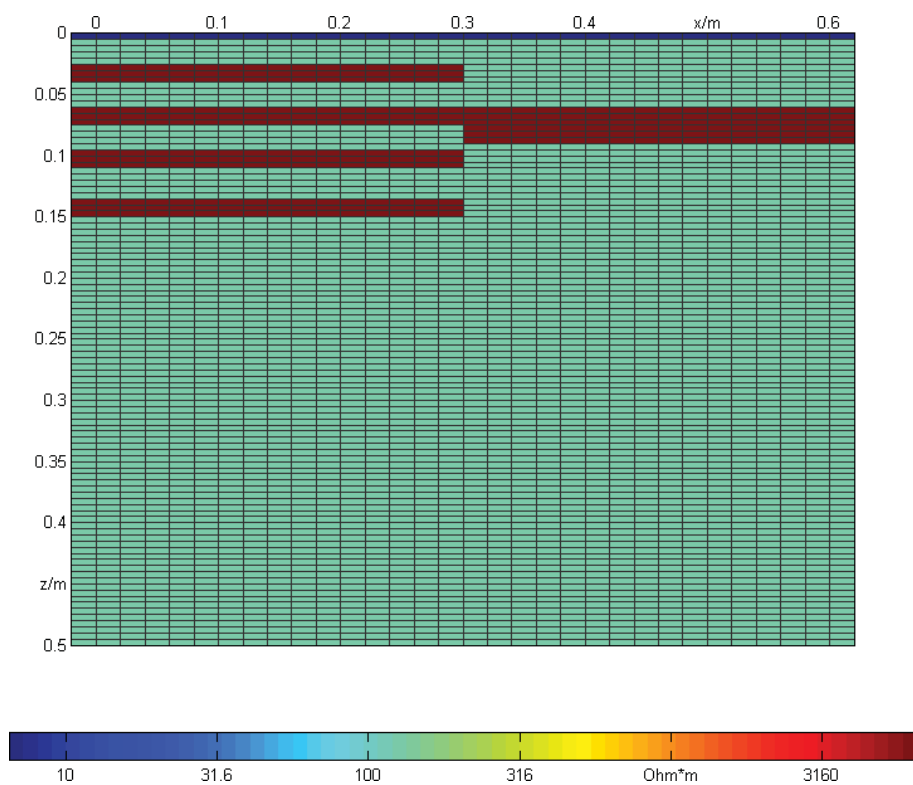


Abb. 74: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe O zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 120 Ωm (türkis), 6,5 Ωm (blau), 6500 Ωm (braun).

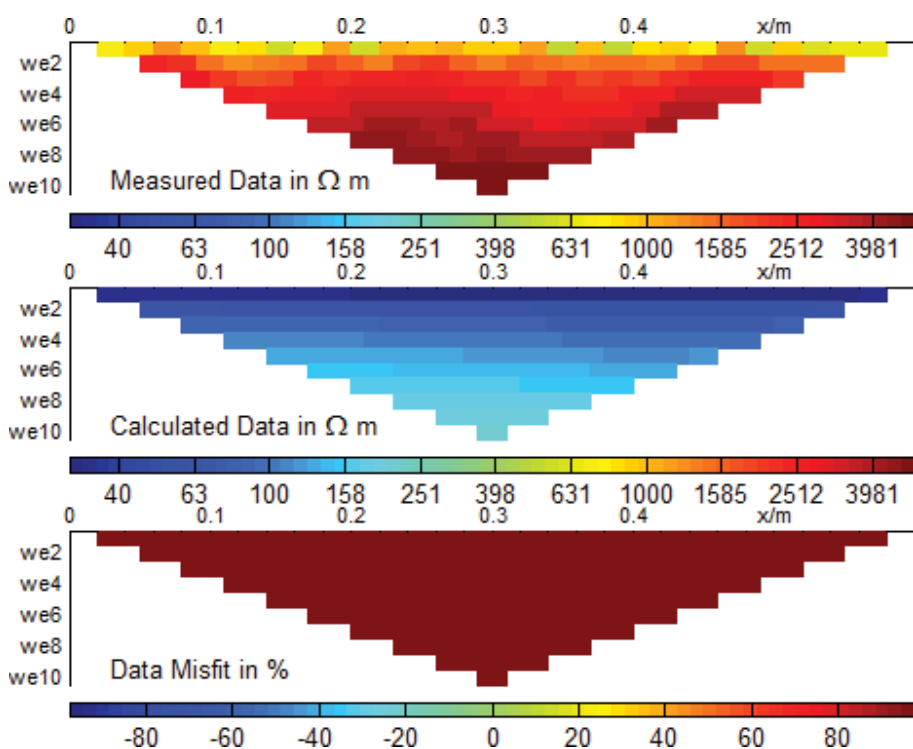


Abb. 75: Elektrodenreihe O in Wenner-Konfiguration bei erdfeuchtem Zustand: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).

5 Diskussion

5.1 Magnetische Parameter

Bei der Bestimmung der magnetischen Suszeptibilität aller 12 Referenzmaterialien zeigte sich bei Messungen mit dem für den Feldeinsatz konzipierten Exploranium KT-9, dass eine Bestimmung wegen Überschreitung des Messbereiches des Gerätes (Error) bei den metallischen Proben aus Kupferschrott (CU) und Eisen-Granalien (FE) nicht möglich war. Die Probenmaterialien PET und Sand wiesen eine zu geringe magnetische Suszeptibilität auf, um sie mit diesem Messgerät zu ermitteln.

Aus den Untersuchungen mit dem Bartington MS2 System wurden vergleichsweise durchgehend geringere Werte gemessen. PET und Sand lagen bei diesem Gerät innerhalb der Anzeigeungenauigkeit des Gerätes. Messungen von Kupferschrott (CU) ergaben Werte im Bereich von $-5,12E-03$ bis $-1,28E-03$ SI. Bei Eisen-Granalien (FE) ergaben sich Werte im Bereich $7,0E-03$ bis $9,42E-02$ SI.

Nachfolgende Labormessungen an einer AGICO MFK1-FA Kappabridge lieferten durchaus vergleichbare Ergebnisse. Probengruppe PET zeigte hier durch negative Messwerte ($-9,18E-07$ bis $-1,77E-06$ SI) diamagnetisches Verhalten. Probengruppe FEn lag mit besonders hohen Messwerten im Bereich von $8,9E-01$ SI bis $9,97E-01$ SI deutlich abgrenzt von den übrigen Fraktionen. Ausschließlich in Untersuchungen mit der AGICO Kappabridge konnten geringe Suszeptibilitätswerte für die Fraktionen Sand und PET nachgewiesen werden.

Der Vergleich der Messergebnisse der magnetischen Suszeptibilität unterschiedlicher Geräte in Abb. 58 zeigt, dass die Messwerte des Exploranium KT-9 in den meisten Fällen höher liegen als jene, der beiden Laborgeräte Bartington MS2 und AGICO MFK1-FA, die durchaus vergleichbare Ergebnisse lieferten.

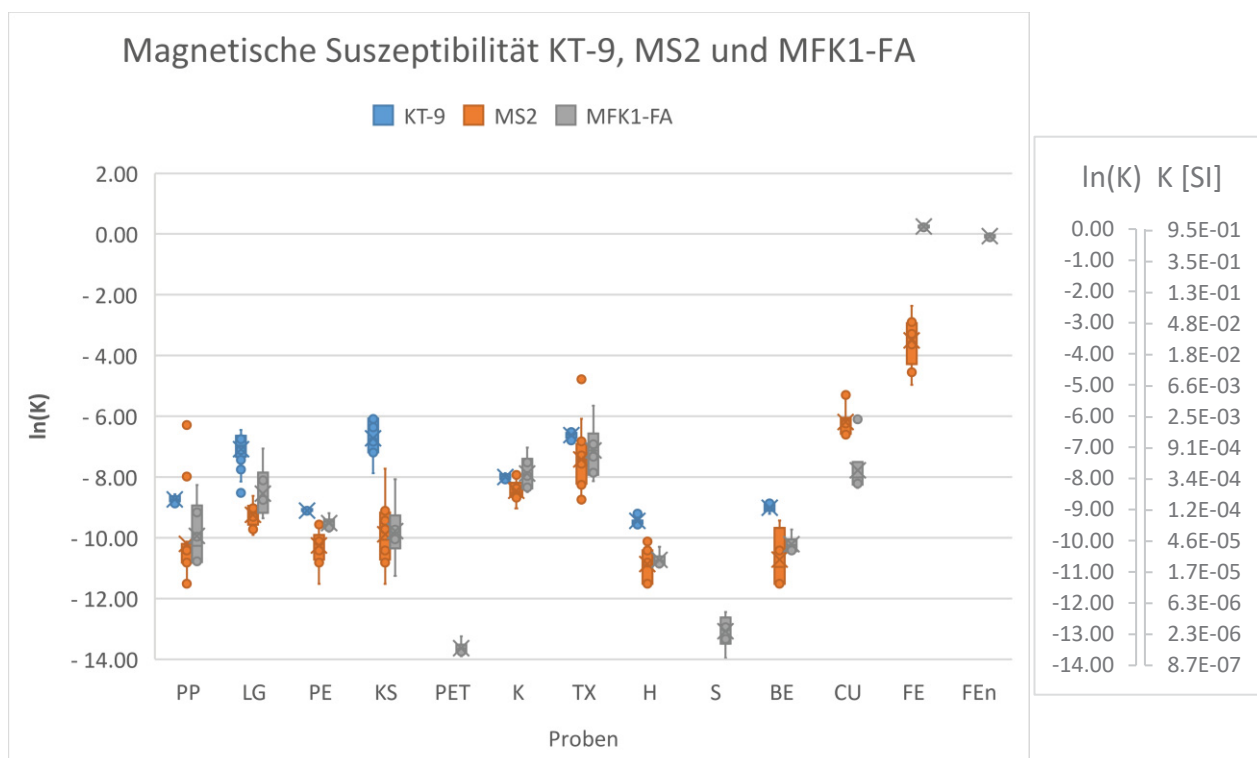


Abb. 76: Natürlicher Logarithmus der magnetischen Suszeptibilität gemessen an Exloranium KT-9, Bartington MS2 und AGICO MFK1-FA. Für die Darstellung wurden bei PET Absolutwerte herangezogen. Dies gilt ebenso für CU, aufgrund von negativen Messwerten am Bartington MS2 System.

Nach Abtrennung von festgestellten Kontaminationen (magnetisierbare Bestandteile) aus vereinzelt Proben führten erneute Messungen erwartungsgemäß zu deutlich geringeren Werten der magnetischen Suszeptibilität. Kontaminationen durch andere Substanzen sind in Deponien nicht unüblich.

Weitere Untersuchungen der magnetischen Suszeptibilität an einer KLF-3 Minikappa ergaben für die Eisen-Granalien im Vergleich den Messwerten der AGICO MFK1-FA (Abb. 77) um bis 9 % höhere Ergebnisse für die Gesamtproben. Beim Vergleich von Teil- (FEn) und Gesamtprobenmessungen (FE) der AGICO Kappabridge wurden um bis zu 30 % Prozent geringere Werte für die Suszeptibilität der über das Massenverhältnis hochgerechneten Teilproben ermittelt. Für die Diskrepanz zwischen den Ergebnissen konnte keine Erklärung gefunden werden.

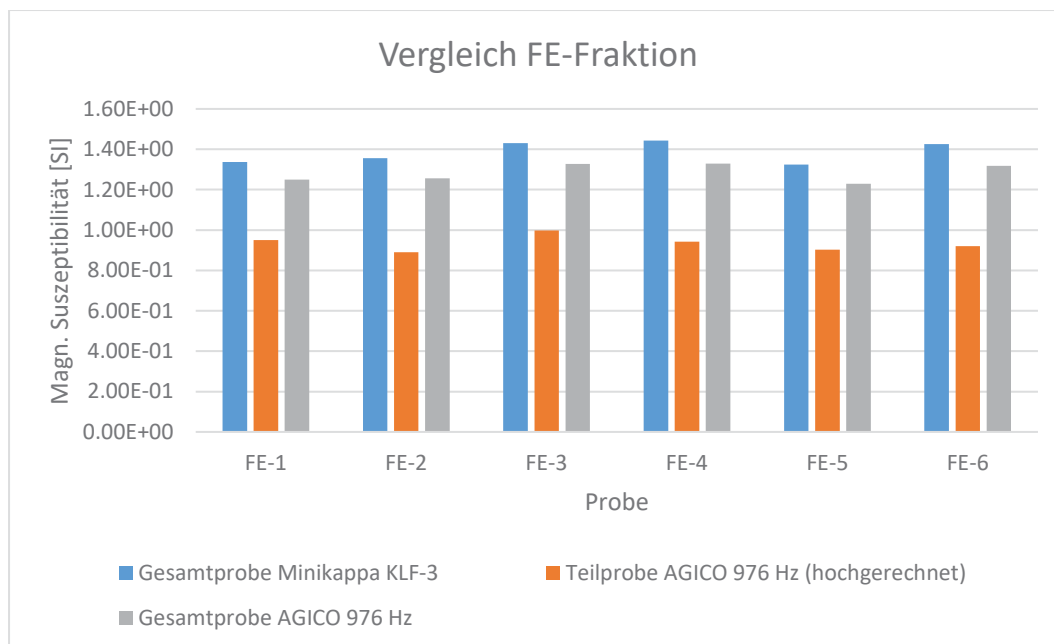


Abb. 77: Magnetische Suszeptibilität für FE; Messgeräte Minikappa KLF-3, AGICO MFK1-FA.

Ein Vergleich der Messungen der CU-Probengruppe (Abb. 78) zeigt bei vier von sechs Proben diamagnetisches Verhalten an der Minikappa KLF-3. An der AGICO Kappabridge wurden hingegen durchgehend positive Suszeptibilitäten gemessen. Verfahren, bei denen die magnetische Suszeptibilität induktiv gemessen wird, werden daher für diese Materialien als ungeeignet betrachtet.

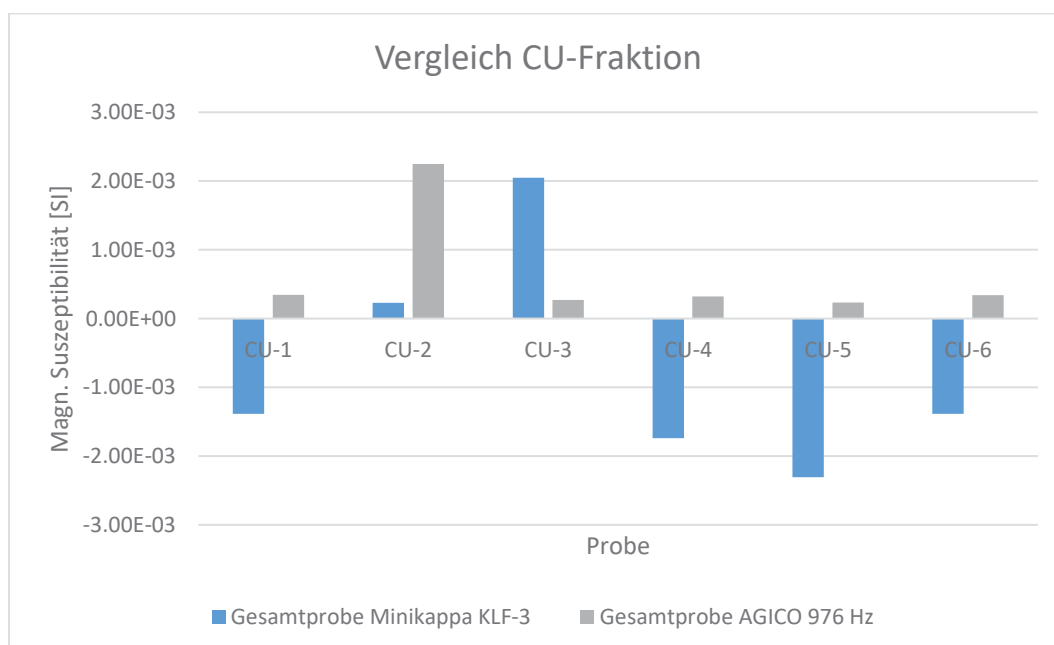
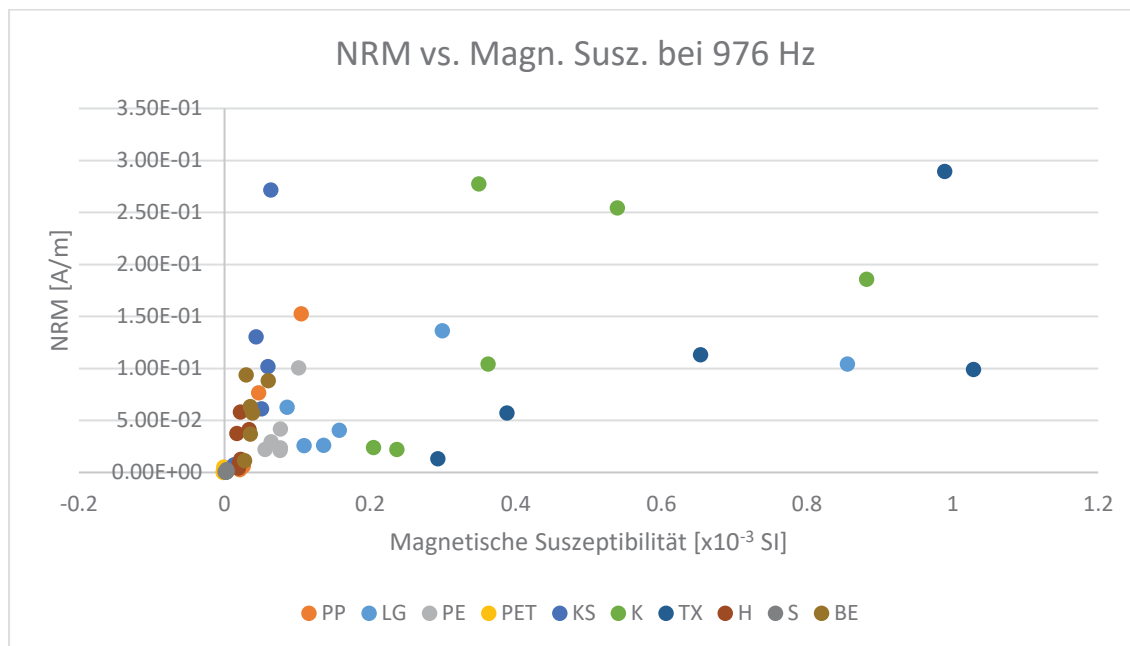


Abb. 78: Magnetische Suszeptibilität für CU, Messgeräte Minikappa KLF-3, AGICO MFK1-FA.

Die Intensität der natürlichen remanenten Magnetisierung ist mit Werten um $9,50E-04$ für PET und $8,20E-04$ für Sand im Vergleich zu den übrigen Fraktionen deutlich geringer.

Die Darstellung natürlicher remanenter Magnetisierung gegen die magnetische Suszeptibilität in Abb. 79 zeigt insgesamt eine starke Variation aller Fraktionen. Vor allem bei Fraktionen wie Karton und Papier (K), sowie Textilien (TX) wird ein Zusammenhang mit zuvor erwähnten Kontaminationen vermutet.



Deponiestoffe handelt, ist eine Anreicherung dieser Fraktionen mit Substanzen, die in Deponiewässern enthalten sind, nicht auszuschließen. Alle übrigen Proben zeigten keinen signifikanten Erwerb einer Remanenz.

Alle Proben zeigen mehrheitlich eine hauptsächlich remanente Magnetisierung. Der Königsberger Faktor Q liegt bei den meisten Proben bei geringen Werten. Zwar lassen sich die meisten untersuchten Stoffe aufgrund ihrer magnetischen Suszeptibilität in gewissem Maße differenzieren, jedoch wird die Aussagekraft einer Messung der Suszeptibilität im Feld als zu gering eingeschätzt, um einzelne Stoffe anhand dieses Parameters bestimmen zu können. Der Erfolg einer Messung ist zudem von mehreren Faktoren abhängig. Verunreinigungen, die Homogenität der Fraktionen sowie eingesetzten Messgeräte können Messungen der magnetischen Suszeptibilität maßgeblich beeinflussen. Außerdem sind Einflüsse auf magnetische Untersuchungen durch Kontaminationen mit anderen Substanzen nicht zu vernachlässigen. Die verwendeten induktiven Messerverfahren zur Bestimmung der magnetischen Suszeptibilität werden für die beiden Probengruppen Eisen-Granalien und Kupferschrott als ungeeignet eingeschätzt.

5.2 Elektrische Leitfähigkeit

Im Laborversuch ergaben Messungen der elektrischen Leitfähigkeit am Zylinder 1 für vollständig gesättigte Proben deutlich höhere Werte als Messungen der erdfeuchten Proben. Dies ist vor allem auf die Zugabe einer Salzwasserlösung (2,33 mS/cm bei 18,7 °C) zurückzuführen. Im gesättigten Zustand ergaben die Messungen für Proben aus Kunststoff (PP, LG, PE, KS, PET) Werte im Bereich von 821,81 bis 1622,93 $\mu\text{S/cm}$. Sand wies mit 590,27 $\mu\text{S/cm}$ die geringsten Leitfähigkeitswerte auf. Deponiestoffe Karton (K), Textilien (TX) und Holz (H) wiesen Werte im Bereich von 3170,88 bis 3647,00 $\mu\text{S/cm}$ auf. Die Leitfähigkeit dieser Stoffe liegt damit deutlich über jener der zugefügten Salzwasserlösung. Es wird daher eine Beeinflussung durch gut leitfähige Bestandteile, die den Stoffen anhaften oder in ihnen gebunden sind, durch die Aufnahme der Salzwasserlösung vermutet. Höchste Leitfähigkeitswerte zeigte in diesem Versuch das Probenmaterial Blumenerde (4136,05 $\mu\text{S/cm}$).

Bei Messungen im erdfeuchten Zustand zeigten die Kunststoffe PP, LG, PE, KS, PET besonders geringe Leitfähigkeitswerte im Bereich von 2,39 $\mu\text{S/cm}$ (PET) bis 35,95 $\mu\text{S/cm}$ (LG). Eine mögliche Begründung ergibt sich durch das geringe Wasserrückhaltevermögen dieser Stoffe. Vor allem Karton (K), Textilien (TX), Holz (H), Sand (S) und Blumenerde (BE) hielten deutlich mehr Salzwasserlösung zurück. Deponiestoffe Karton, Textilien und Holz ergaben Werte von 357,65 bis 614,65 $\mu\text{S/cm}$.

Sand zeigte mit 595,43 $\mu\text{S}/\text{cm}$ annähernd ähnliche Messwerte wie im gesättigten Zustand. Blumenerde (BE) wies mit 1661,08 $\mu\text{S}/\text{cm}$ die höchsten Werte elektrischer Leitfähigkeit auf.

Weitere Leitfähigkeitsmessungen, bei denen das Probenmaterial mit Leitungswasser (405 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei 17,8 °C) gesättigt war, ergaben in Dipol-Dipol-Konfiguration an Zylinder 2 unter Berücksichtigung der Behältergeometrie in allein neun Elektrodenebenen Werte um 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ für Sand. Erneute Messungen, die nach Abfließen des Wassers durch Öffnungen an der Unterseite (ca. 19 % des zugegebenen Wassers) durchgeführt wurden, bewirkten deutlich geringere Messwerte besonders in den oberen Teilen des eingebauten Sandes. An den untersten Positionen 8 und 9 lagen die Werte im Vergleich zum gesättigten Zustand nur um etwa 8 % darunter. Da erst beim Ausbau des Sandes eine Menge von rund 320 ml Wasser abfließen konnte, werden hohe Werte für untere Bereiche des Zylinders darauf zurückgeführt.

Beim Probenmaterial Kunststoff schwarz (KS) kam es zu Leitfähigkeitswerten im Bereich von 192,39 (Elektrodenposition 3) bis 210,16 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Elektrodenposition 7). Messungen des „erdfeuchten“ Zustandes ergaben von Elektrodenposition 1 bis zur Elektrodenposition 7 nur geringe Leitfähigkeitswerte bis 2,39 $\mu\text{S}/\text{cm}$, erst in den untersten beiden Positionen erhöhte sich die Leitfähigkeit auf bis zu 9,89 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Diese geringfügig erhöhten Messwerte in den untersten Bereichen werden auf das gebundene Haftwasser zurückgeführt, da nur etwa 86 % des zugefügten Wassers abgeflossen waren. Die Annahme, dass dieser Kunststoff über eine geringe elektrische Leitfähigkeit verfügt, wird damit als weitestgehend bestätigt angesehen.

Die Versuche zeigen, dass die elektrische Leitfähigkeit aller Probenmaterialien stark vom Wassergehalt und der Leitfähigkeit des Wassers abhängt. Außerdem wird bei einigen Fraktionen (Holz, Textilien und Karton) vermutet, dass sie durch Deponiesickerwässer mit stärker leitfähigen Substanzen angereichert wurden, die eine höhere elektrische Leitfähigkeit bewirken.

5.3 Skalierbarkeit

Anhand von Modellberechnungen mittels DC2DResInv konnte die Vergleichbarkeit von zu erwartenden Ergebnissen aus einem geplanten Technikums-Versuch mit Ergebnissen im Deponiemaßstab im Verhältnis 1:200 sowohl in Dipol-Dipol- als auch in Wenner-Elektrodenkonfiguration bestätigt werden. Modellversuche zeigten in Vorwärtsberechnungen zwar Diskrepanzen, jedoch werden diese auf die geringe die Bandbreite der Skalierung zurückgeführt. Für die praktische Anwendung wird eine

Unterscheidung von Messergebnissen, deren Werte nur um wenige Ωm voneinander abweichen als nicht möglich eingeschätzt.

5.4 Machbarkeit geophysikalischer Erkundung

Die geoelektrische Tomographie am wassergefüllten Tank ergab Werte für den spezifischen Widerstand von 19,56 bis 47,93 Ωm . An den vertikalen Elektrodenreihen A bis D wurden durchschnittliche Werte von rund 29,5 Ωm ermittelt. Die beiden horizontalen Elektrodenreihen O und U liefern Werte um 34 Ωm . Das Vorwärtsmodell kann als homogenes Modell angesehen werden, dessen spezifischer Widerstand bei 24 Ωm entsprechend der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit für Leitungswasser ($\sigma_w = 421 \mu\text{S}/\text{cm}$ bei 18,0 °C) liegt. Die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Modellen liegen ausgehend von den tatsächlich ermittelten Messwerten (100 %) in einem Bereich von -22,7 bis +49,9 % (Elektrodenreihe U). Für die Bewertung muss die geringe Skalierung berücksichtigt werden. Auffallend hohe Messwerte ergeben sich bei Elektrodenreihe A, B und C (Abb. 46 bis Abb. 48). Dabei handelt es sich vorwiegend um Messungen, bei denen die Elektrode A der Wenner-Anordnung Position 1 der Elektrodenreihe einnahm. In der wassergefüllten Versuchskammer war die erste Position der vertikalen Elektrodenreihen jeweils oben, nur wenige Zentimeter unter der Wasseroberfläche positioniert. Generell liegen die Ergebnisse der Blindmessungen in einer ähnlichen Größenordnung wie jene der Modellberechnungen. Mit Ausnahme von Elektrodenreihe U ist in den übrigen Fällen zu beobachten, dass die Abweichungen in maximaler Tiefe am höchsten sind.

Im Falle bestmöglicher Sättigung des eingebauten Materials durch Leitungswasser umfassen die Messwerte für den spezifischen elektrischen Widerstand einen Bereich von 41 bis 323 Ωm . Bei den Vorwärtsmodellen hingegen ergibt sich ein maximaler spezifischer Widerstand von 84 Ωm bei allen Elektrodenreihen außer O (72,5 Ωm). Geringste Widerstandswerte ergeben sich in den Vorwärtsmodellen bei Elektrodenreihe O mit 14,3 Ωm . Es können teilweise ähnliche Strukturen beim Vergleich berechneter und tatsächlich gemessener Ergebnisse wiedergefunden werden, jedoch führten die gewählten Parameter, die aus den vorangegangenen Laborversuchen stammen, nicht zu einer eindeutigen Übereinstimmung. Der Data Misfit zwischen gemessenem Modell und Vorwärtsmodell liegt hier bei bis zu 88,8 %. Bei Elektrodenreihe U liegen in der ersten Messreihe die ermittelten Werte des spezifischen Widerstandes niedriger als jene des Vorwärtsmodells, sodass sich eine Abweichung von bis zu -104 % ergibt.

Wesentlich höhere Werte wurden bei den geoelektrischen Messungen am erdfeuchten Material festgestellt. Mit Ausnahme von Elektrodenreihe U ($476 \Omega\text{m}$) liegt die spezifische Leitfähigkeit im Mittel bei rund 2200 bis 2470 Ωm . Damit sind diese Werte im Vergleich zu den Ergebnissen der Vorwärtsmodelle um ein Vielfaches höher, bei denen die spezifische Leitfähigkeit in einer Größenordnung von 11,6 (Elektrodenreihe D) bis 150,9 Ωm (Elektrodenreihe A) liegt. Es kommt im Modellvergleich zu einem Data Misfit von durchschnittlich 90 %. Dadurch wird die Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus den Messungen mit Ergebnissen der Vorwärtsmodelle als nicht gegeben betrachtet.

Ein Vergleich der Ergebnisse aus gemessenen und berechneten ERT Modellen in Dipol-Dipol-Anordnung konnte aufgrund unterschiedlicher systembedingter Anzahlen von Messungen nicht durchgeführt werden. Es besteht offenbar ein Einfluss der Elektrodenkette, der zu den Diskrepanzen der Ergebnisse in Kapitel 4.5 beiträgt und eine aufwändigere Korrektur erforderlich macht, die im Rahmen dieser Arbeit aber nicht durchgeführt werden konnte. Für eine abschließende Beurteilung der Eignung nichtinvasiver Methoden der Geophysik zur Charakterisierung von Deponieabfallstoffen bedarf es der Anwendung von Korrekturmaßnahmen und der Berücksichtigung weiterer Faktoren, die sich sowohl auf die Ergebnisse geoelektrischer Tomographie als auch Modellberechnungen auswirken können.

6 Zusammenfassung

Die Untersuchungen der magnetischen Suszeptibilität der Probenmaterialien zeigen, dass vor allem die beiden metallischen Fraktionen (FE, CU) deutlich höhere Werte aufweisen. Alle übrigen Fraktionen, außer PET und Sand (S) sind untereinander nur in geringem Maße unterscheidbar. Außerdem ist der Einfluss von Kontaminationen auf die Messergebnisse nicht zu vernachlässigen. Sowohl bei Proben mit sehr hoher magnetischer Suszeptibilität als auch bei Proben mit sehr geringer Suszeptibilität ist eine Bestimmung in den meisten Fällen nur mit dem Labormessgerät AGICO MFK1-FA Kappabridge möglich. Für die Fraktion, die aus Kupferschrott besteht, werden Verfahren, bei denen die magnetische Suszeptibilität induktiv gemessen wird als ungeeignet eingestuft. In den meisten Fällen ist sowohl die magnetische Suszeptibilität als auch die natürliche remanente Magnetisierung der Probenmaterial relativ gering. Somit ist kein Einfluss auf die magnetische Prospektion gegeben. Remanenzenerwerb konnte durch Untersuchungen der viskosen remanenten Magnetisierung nur bei den Probengruppen Karton (K) und Textilien (TX) festgestellt werden. Mehrheitlich zeigen die Proben hauptsächlich remanente Magnetisierung und geringe Königsberger Faktoren.

Besonders Fraktionen wie Holz (H), Sand (S) und Blumenerde (BE), die die Flüssigkeit gut zurückhalten konnten, ergaben auch bei Messungen des erdfeuchten Zustandes relativ hohe Leitfähigkeitswerte. Außerdem wird bei einigen Fraktionen (Holz, Textilien und Karton) vermutet, dass sie durch Deponiesickerwässer mit stärker leitfähigen Substanzen angereichert wurden, die eine höhere elektrische Leitfähigkeit bewirken. Kunststoffe wie Polypropylen (PP), Leichtgut (LG), Polyethylen (PE), Kunststoff schwarz (KS) und PET wiesen bei erdfeuchten Messungen eine besonders geringe elektrische Leitfähigkeit auf.

Bei der Überprüfung der Skalierbarkeit von Deponie- und Labormaßstab anhand von Modellberechnungen konnte die Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus einem geplanten Technikums-Versuch mit Ergebnissen im Deponiemaßstab sowohl in Dipol-Dipol- als auch in Wenner-Elektrodenkonfiguration rechnerisch gewährleistet werden. Die durchgeführten Blindmessungen im Technikums-Maßstab am wassergefüllten Tank lieferten durchaus Werte für den spezifischen Widerstand, die den Erwartungen weitgehend entsprachen. An einigen vertikal eingebauten Elektrodenreihen (A, B, C) sind anhand der Ergebnisse höhere Werte gemessen worden. Hier wird ein Zusammenhang mit der geringen Wasserüberdeckung der Elektrode 1 vermutet.

Spezifische Widerstandswerte aus Versuchen im Technikums-Maßstab liegen bei vollständiger Sättigung mit Leitungswasser in den meisten Fällen höher als es die Modellberechnungen erwarten ließen. Vielfach höher als erwartet lagen die Messwerte des spezifischen Widerstandes bei erdfeuchtem Material. Eine Übereinstimmung zwischen geoelektrischer Tomographie und berechnetem Vorwärtsmodell wird durch eine hohen Data Misfit als nicht gegeben angesehen. Eine abschließende Beurteilung der Eignung nichtinvasiver Methoden der Geophysik zur Charakterisierung von Deponieabfallstoffen kann nicht getroffen werden und bedarf der Anwendung aufwändigerer Korrekturmaßnahmen sowie der Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren.

7 Literaturverzeichnis

Bartington Instruments Ltd. (2008): Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System. San Carlos, USA: GMW Associates.

Bavusi, M.; Rizzo, E.; Lapenna, V. (2006): Electromagnetic methods to characterize the Savoia di Lucania waste dump (Southern Italy). In: *Environ Geol* 51 (2), S. 301–308. DOI: 10.1007/s00254-006-0327-9.

Bernstone, C.; Dahlin, T.; Ohlsson, T.; Hogland, H. (2000): DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excavation surveys. In: *Environ Geol* 39 (3-4), S. 360–371.

Bockreis, A.; Knapp, J. (2011): Landfill Mining–Deponien als Rohstoffquelle. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 63 (3-4), S. 70–75.

Burnley, S. J. (2007): A review of municipal solid waste composition in the United Kingdom. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 27 (10), S. 1274–1285. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.06.018.

Cardarelli, E.; Di Filippo, G. (2004): Integrated geophysical surveys on waste dumps: evaluation of physical parameters to characterize an urban waste dump (four case studies in Italy). In: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 22 (5), S. 390–402. DOI: 10.1177/0734242X04046042.

Chambers, J. E.; Kuras, O.; Meldrum, P. I.; Ogilvy, R. D.; Hollands, J. (2006): Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. In: *GEOPHYSICS* 71 (6), 231-239. DOI: 10.1190/1.2360184.

Di Maio, R.; Fais, S.; Ligas, P.; Piegari, E.; Raga, R.; Cossu, R. (2018): 3D geophysical imaging for site-specific characterization plan of an old landfill. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 76, S. 629–642. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.03.004.

Dobrin, M. B.; Savit, C. H. (1960): Introduction to Geophysical Prospecting: McGraw-hill New York.

- Dumont, G.; Robert, T.; Marck, N.; Nguyen, F. (2017): Assessment of multiple geophysical techniques for the characterization of municipal waste deposit sites. In: *Journal of Applied Geophysics* 145, S. 74–83. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.07.013.
- Exploranium Radiation Detection Systems (1997): User's Guide KT-9 Kappameter, Rev. 1: Exploranium G.S. Limited.
- Fricke, K. (2009): Urban Mining - nur ein Modebegriff? In: *Müll und Abfall* 41 (10), S. 489.
- Günther, T.: DC2DInvRes - Direct Current 2D Inversion and Resolution. Online Documentation. Unter Mitarbeit von Thomas Günther. Hg. v. RESISTIVITY.NET productions. Online verfügbar unter <http://www.resistivity.net/dc2dinvres/index.html>, zuletzt geprüft am 21.10.2019.
- Hermozilha, H.; Grangeia, C.; Matias, M. S. (2010): An integrated 3D constant offset GPR and resistivity survey on a sealed landfill — Ilhavo, NW Portugal. In: *Journal of Applied Geophysics* 70 (1), S. 58–71. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.11.004.
- Hölzle, I. (2010): Vom Deponierückbau bis zum landfill mining – eine Synthese internationaler Untersuchungen. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 62 (7-8), S. 155–161.
- Jones, P. T.; Geysen, D.; Tielemans, Y.; van Passel, S.; Pontikes, Y.; Blanpain, B. et al. (2013): Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: a critical review. In: *Journal of Cleaner Production* 55, S. 45–55.
- Knödel, K.; Krummel, H.; Lange, G. (2005): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Geophysik (German Edition). 2nd ed.: Springer.
- Krook, J.; Svensson, N.; Eklund, M. (2012): Landfill mining: a critical review of two decades of research. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 32 (3), S. 513–520. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.10.015.
- Marchetti, M.; Settini, A. (2011): Integrated geophysical measurements on a test site for detection of buried steel drums. In: *Annals of Geophysics* 54 (1), S. 105–114.
- McCann, D. M. (1994): Geophysical methods for the assessment of landfill and waste disposal sites: a review. In: *Land Contamination and Reclamation* (2), S. 73–83.
-

- Mor, S.; Ravindra, K.; Visscher, A. de; Dahiya, R. P.; Chandra, A. (2006): Municipal solid waste characterization and its assessment for potential methane generation: a case study. In: *The Science of the total environment* 371 (1-3), S. 1–10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.04.014.
- Muras, A.; Küppers, B.; Höllen, D.; Rothschedl, R. (Hg.) (2018): Landfill Mining of a Mixed Municipal Solid Waste and Commercial Waste Landfill: Application of Existing Processing Technology – Opportunities and Limitations. 4th International Symposium on Enhanced Landfill Mining (ELFM IV).
- Orlando, L.; Marchesi, E. (2001): Georadar as a tool to identify and characterise solid waste dump deposits. In: *Journal of Applied Geophysics* 48 (3), S. 163–174.
- Porsani, J. L.; Filho, W. M.; Elis, V. R.; Shimeles, F.; Dourado, J. C.; Moura, H. P. (2004): The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. In: *Journal of Applied Geophysics* 55 (3-4), S. 199–209. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2003.11.001.
- Raga, R.; Cossu, R. (2018): Landfill Mining. In: *Solid Waste Landfilling*: Elsevier, S. 1061–1073.
- Rettenberger, G.; Christ, M.; Fell, A.; Friedrich, S. (2011): Untersuchungen zum Wertstoffpotenzial in Abfällen von rückgebauten Hausmülldeponien. In: *Müll und Abfall* 43 (10), S. 466–469.
- Soffel, H. C. (1991): Paläomagnetismus und Archäomagnetismus: Springer-Verlag.
- Soupios, P.; Ntarlagiannis, D. (2017): Characterization and Monitoring of Solid Waste Disposal Sites Using Geophysical Methods: Current Applications and Novel Trends. In: Debashish Sengupta und Sudha Agrahari (Hg.): *Modelling Trends in Solid and Hazardous Waste Management*, Bd. 75. Singapore: Springer Singapore, S. 75–103.
- Vargemezis, G.; Tsourlos, P.; Giannopoulos, A.; Trilyrakis, P. (2015): 3D electrical resistivity tomography technique for the investigation of a construction and demolition waste landfill site. In: *Stud Geophys Geod* 59 (3), S. 461–476. DOI: 10.1007/s11200-014-0146-5.
- Vogelsang, D. (1993): Geophysik an Altlasten. Leitfaden für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Juristen. 2., neubearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer.
-

Vollprecht, D.; Bobe, C.; Stiegler, R.; van de Vijver, E.; Wolfsberger, T.; Küppers, B.; Scholger, R. (2019): Relating magnetic properties of municipal solid waste constituents to iron content – Implications for enhanced landfill mining. In: *Detritus Journal* Manuskript eingereicht zur Publikation.

Walach, G. (1990): Deponieflächenerkundung mit geophysikalischen Methoden. In: *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ)* 135 (5), S. 210–219.

Winterstetter, A.; Laner, D. (2015): Wirtschaftliche Rückgewinnung von Wertstoffen aus Deponien – Untersuchung eines Deponierückbauprojekts in Belgien. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 67 (1-2), S. 54–63. DOI: 10.1007/s00506-014-0207-6.

7.1 Abbildungen

Abb. 1: Referenzproben: 01-PP; 02-LG; 03-PE; 04-KS; 05- PET; 06-K; 07- TX; 08-H; 09-S; 10-BE; 11-CU; 12-FE	9
Abb. 2: Bulk-Messungen zur Bestimmung der magnetischen Suszeptibilität mittels Exploranium KT-9.	11
Abb. 3: Bartington MS2 System mit MS2EI Sensor.....	11
Abb. 4: AGICO MFK1-FA Kappabridge.	12
Abb. 5: Zylinder 1 mit Probenmaterial befüllt und vollständig gesättigt.....	14
Abb. 6: Frontalansicht Zylinder 2.	15
Abb. 7: Draufsicht Zylinder 2 mit Elektrodenanordnung.	16
Abb. 8: Zylinder 2 mit Dipol-Dipol Elektrodenanordnung. Zur Bestimmung des Geometriefaktors vollständig mit Leitungswasser befüllt.	16
Abb. 9: Geometriefaktor Zylinder 2.....	17
Abb. 10: Leitfähigkeitsmessung des vollständig wassergesättigten Referenzmaterialies Sand an Zylinder 2; Dipol-Dipol-Elektrodenanordnung.	18
Abb. 11: Versuchskammer mit eingebautem Kies überdeckt durch Trennvlies und Elektrodenreihe U.	19
Abb. 12: A) Einbau einer Kunststoffschicht (d = 16 mm) mit Abgrenzung zum Sand durch ein Trennvlies. B) Vollständige Einhüllung des Kunststoffes mit Vlies auch an der Oberseite und Überdeckung mit Sand. Die abgebildete Sperrholzplatte diente dem Einbau der Materialien und wurde nach Fertigstellung entfernt.	20
Abb. 13: Platzierung der Eisen-Granalien in einem Abstand von 50 mm zur Elektrodenreihe D. Abgebildete Holzmaterialien dienten der korrekten Positionierung und wurden wieder entfernt.	21
Abb. 14: Versuchskammer mit geringmächtiger Überdeckung durch Blumenerde und Elektrodenreihe O.	21
Abb. 15: Versuchskammer mit Anordnung der Elektrodenreihen (A, B, C, D, U). Die Konfiguration der Dipole (A-B-M-N) ist rot dargestellt.	22
Abb. 16: Geometriefaktor der Versuchskammer bei vertikaler Elektrodenanordnung.	23

Abb. 17: Natürlicher Logarithmus der magnetischen Suszeptibilität, gemessen mit dem Exploranium KT-9. Jede Bulk-Probe wurde sechsmal in zwei Durchgängen (12x), außer LG (24x), gemessen.	25
Abb. 18: Natürlicher Logarithmus der magnetischen Suszeptibilität, gemessen mit dem Bartington MS2. Jede Bulk-Probe wurde sechsmal in zwei Durchgängen (12x), außer LG (24x), gemessen.	26
Abb. 19: Natürlicher Logarithmus der magnetischen Suszeptibilität K bei einer Frequenz von 976 Hz und einer Anzahl von sechs Proben. Bei der diamagnetischen Probengruppe PET wurden die negativen Messwerte zum Vergleich als Absolutwerte dargestellt.	27
Abb. 20: Frequenzabhängigkeit der unterschiedlichen Materialien gegen die magnetische Suszeptibilität K bei einer Frequenz von 976 Hz.	31
Abb. 21: Natürlicher Logarithmus der Intensität der NRM. Werte für FE und CU wurden mit dem Bartington Mag-01H Fluxgate Magnetometer gemessen, alle weiteren Probenmesswerte entstammen dem 2G Enterprises Kryogenmagnetometer. Probengruppe CU exklusive Probe CU-2.	32
Abb. 22: Viskose remanente Magnetisierung der Probengruppe K.	33
Abb. 23: Viskose remanente Magnetisierung der Probengruppe TX.	33
Abb. 24: Logarithmierte Leitfähigkeitswerte aus Laborversuch mittels Lippmann 4point light an Zylinder 1 bei vollständig gesättigten Materialien. Wiederholungsmessungen (orange).	35
Abb. 25: Logarithmierte Leitfähigkeitswerte aus Laborversuchen mittels Lippmann 4point light an Zylinder 1 bei erdfeuchten Materialien. Wiederholungsmessungen (orange).	36
Abb. 26: Elektrische Leitfähigkeit des Referenzmaterials Sand (S) in vollständig wassergesättigtem (blau) und erdfeuchtem Zustand (orange); Zylinder 2.	37
Abb. 27: Elektrische Leitfähigkeit des Referenzmaterials Kunststoff, schwarz (KS) in vollständig wassergesättigtem (blau) und erdfeuchtem Zustand (orange); Zylinder 2.	38
Abb. 28: Modell 1, Deponiemaßstab; Einzelne Zelle, mittig angeordnet mit hohem spezifischen Widerstandswert (4170 Ωm) in einer Umgebung mit geringerem spezifischen Widerstandswert (17 Ωm).	41

Abb. 29: Vorwärtsmodell 1 mit Dipol-Dipol-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	41
Abb. 30: Vorwärtsmodell 1 mit Wenner-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	41
Abb. 31: Modell 2, Deponiemaßstab; Einzelne Zelle, mittig angeordnet mit niedrigem spezifischen Widerstandswert ($1,5E-08 \Omega m$) in einer Umgebung mit höherem spezifischen Widerstandswert ($17 \Omega m$).....	42
Abb. 32: Vorwärtsmodell 2 mit Dipol-Dipol-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	42
Abb. 33: Vorwärtsmodell 2 mit Wenner-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	42
Abb. 34: Modell 3, Deponiemaßstab; Einzelne Lage in horizontaler Anordnung im unteren Bereich mit hohem spezifischen Widerstandswert ($4170 \Omega m$) in einer Umgebung mit geringerem spezifischen Widerstandswert ($17 \Omega m$).	43
Abb. 35: Vorwärtsmodell 3 mit Dipol-Dipol-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	43
Abb. 36: Vorwärtsmodell 3 mit Wenner-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	43
Abb. 37: Modell 4, Deponiemaßstab; Einzelne Lage in horizontaler Anordnung im unteren Bereich mit niedrigem spezifischen Widerstandswert ($1,5E-08 \Omega m$) in einer Umgebung mit höherem spezifischen Widerstandswert ($17 \Omega m$).	44
Abb. 38: Vorwärtsmodell 4 mit Dipol-Dipol-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	44
Abb. 39: Vorwärtsmodell 4 mit Wenner-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	44

- Abb. 40: Modell 5, Deponiemaßstab; Einzelne Lage in vertikaler Anordnung im linken Bereich mit hohem spezifischen Widerstand ($4170 \Omega\text{m}$) in einer Umgebung mit geringerem spezifischen Widerstandswert ($17 \Omega\text{m}$). 45
- Abb. 41: Vorwärtsmodell 5 mit Dipol-Dipol-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]). 45
- Abb. 42: Vorwärtsmodell 5 mit Wenner-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]). 45
- Abb. 43: Modell 6, Deponiemaßstab; Einzelne Lage in vertikaler Anordnung im linken Bereich mit niedrigem spezifischen Widerstandswert ($1,5\text{E}-08 \Omega\text{m}$) in einer Umgebung mit höherem spezifischen Widerstandswert ($17 \Omega\text{m}$). 46
- Abb. 44: Vorwärtsmodell 6 mit Dipol-Dipol-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]). 46
- Abb. 45: Vorwärtsmodell 6 mit Wenner-Elektrodenkonfiguration; Deponiemaßstab (oben), Labormaßstab (unten). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]). 46
- Abb. 46: Blindmessung Elektrodenreihe A in Wenner-Konfiguration: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]). 47
- Abb. 47: Blindmessung Elektrodenreihe B in Wenner-Konfiguration: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]). 48
- Abb. 48: Blindmessung Elektrodenreihe C in Wenner-Konfiguration: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]). 48
- Abb. 49: Blindmessung Elektrodenreihe D in Wenner-Konfiguration: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]). 49
- Abb. 50: Blindmessung Elektrodenreihe U in Wenner-Konfiguration: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]). 49
-

Abb. 51: Blindmessung Elektrodenreihe O in Wenner-Konfiguration: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	50
Abb. 52: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe A zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 84 Ω m (braun), 49 Ω m (blau).	51
Abb. 53: Elektrodenreihe A in Wenner-Konfiguration bei vollständiger Wassersättigung: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	51
Abb. 54: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe B zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 84 Ω m (braun).	52
Abb. 55: Elektrodenreihe B in Wenner-Konfiguration bei vollständiger Wassersättigung: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	52
Abb. 56: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe C zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 84 Ω m (braun), 49 Ω m (blau).	53
Abb. 57: Elektrodenreihe C in Wenner-Konfiguration bei vollständiger Wassersättigung: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	53
Abb. 58: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe D zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 84 Ω m (braun), 8,5E-08 Ω m (blau).	54
Abb. 59: Elektrodenreihe D in Wenner-Konfiguration bei vollständiger Wassersättigung: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	54
Abb. 60: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe U zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 84 Ω m (braun).	55
Abb. 61: Elektrodenreihe U in Wenner-Konfiguration bei vollständiger Wassersättigung: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	55

Abb. 62: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe O zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 84 Ω m (braun), 6,5 Ω m (blau), 49 Ω m (rot).	56
Abb. 63: Elektrodenreihe O in Wenner-Konfiguration bei vollständiger Wassersättigung: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	56
Abb. 64: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe A zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 120 Ω m (blau), 6500 Ω m (braun).	57
Abb. 65: Elektrodenreihe A in Wenner-Konfiguration bei erdfeuchtem Zustand: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	57
Abb. 66: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe B zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 120 Ω m (braun)	58
Abb. 67: Elektrodenreihe B in Wenner-Konfiguration bei erdfeuchtem Zustand: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	58
Abb. 68: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe C zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 120 Ω m (blau), 6500 Ω m (braun).	59
Abb. 69: Elektrodenreihe C in Wenner-Konfiguration bei erdfeuchtem Zustand: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	59
Abb. 70: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe D zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 120 Ω m (braun), 8,5E-08 Ω m (blau).....	60
Abb. 71: Elektrodenreihe D in Wenner-Konfiguration bei erdfeuchtem Zustand: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	60
Abb. 72: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe U zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 120 Ω m (braun).....	61
Abb. 73: Elektrodenreihe U in Wenner-Konfiguration bei erdfeuchtem Zustand: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]).	61
Abb. 74: Gewähltes Startmodell Elektrodenreihe O zur Vorwärtsmodellberechnung; Parameter: 120 Ω m (türkis), 6,5 Ω m (blau), 6500 Ω m (braun).....	62

- Abb. 75: Elektrodenreihe O in Wenner-Konfiguration bei erdfeuchtem Zustand: ERT Tank (Measured Data), Vorwärtsmodell (Calculated Data) und Abweichung (Data Misfit). (x-Achse: Distanz [m], y-Achse: Pseudotiefe [-]). 62
- Abb. 76: Natürlicher Logarithmus der magnetischen Suszeptibilität gemessen an Exloranium KT-9, Bartington MS2 und AGICO MFK1-FA. Für die Darstellung wurden bei PET Absolutwerte herangezogen. Dies gilt ebenso für CU, aufgrund von negativen Messwerten am Bartington MS2 System. 64
- Abb. 77: Magnetische Suszeptibilität für FE; Messgeräte Minikappa KLF-3, AGICO MFK1-FA..... 65
- Abb. 78: Magnetische Suszeptibilität für CU, Messgeräte Minikappa KLF-3, AGICO MFK1-FA..... 65
- Abb. 79: Natürliche remanente Magnetisierung in Abhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität. Darstellung exklusive Probengruppen FE und CU. 66
-

7.2 Tabellen

Tab. 1: Referenzproben.....	10
Tab. 2: Geometrieangaben zu Zylinder 1.	13
Tab. 3: Geometrieangaben zu Zylinder 2.	15
Tab. 4: Statistische Parameter zur Untersuchung der Referenzproben mittels Kappabridge; Quartilsberechnungen erfolgten exklusive Median; Für PET wurden aufgrund negativer Messwerte Absolutwerte zur Berechnung verwendet.	28
Tab. 5: Magnetischen Suszeptibilität für FE- und CU-Proben; Messgerät KLF-3 Minikappa.....	29
Tab. 6: Magnetische Suszeptibilität vereinzelter Proben vor und nach dem Entfernen von Kontaminationen; Messgerät AGICO MFK1-FA.....	30
Tab. 7: Mediane der induzierten und remanenten Magnetisierung, sowie des Königsberger Quotienten aller 12 Referenzmaterialien.	34
Tab. 8: Ergebnisse der elektrischen Leitfähigkeit der Materialien in vollständig wassergesättigtem (Salzwasserlösung) Zustand.	35
Tab. 9: Ergebnisse der elektrischen Leitfähigkeit der Materialien in erfeuchtem Zustand nach Abfließen der Salzwasserlösung.	36
Tab. 10: Ergebnisse aus elektrischen Messungen des Vlieses.	38
Tab. 11: Maximale Abweichung der Messwerte des Deponiemaßstabes aus der Gegenüberstellung von Vorwärtsmodellen im Deponie- und Labormaßstab bei Dipol-Dipol- und Wenner-Elektrodenkonfiguration.	39

Anhang

Vergleichende Daten von Labor- und Deponiemaßstab

