

Methoden zur Analyse, Interpretation und Modellierung des elektrischen Widerstandes von archäologischen Steinstrukturen

Dissertation
zur Erlangung des Grades
„Doktor der Naturwissenschaften“
im Promotionsfach Geographie

am Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften
der Johannes Gutenberg-Universität
in Mainz

Pascal Brengel
geb. in Zweibrücken

Mainz, den 30.04.2015

1. Berichtstatter:
2. Berichtstatter:

Tag der mündlichen Prüfung: 22.07.2015

Zusammenfassung

In der Archäologie werden elektrische Widerstandsmessungen routinemäßig zur Prospektion von Fundstellen eingesetzt. Die Methode ist kostengünstig, leicht anwendbar und liefert in den meisten Fällen zuverlässige und leicht zu interpretierende Ergebnisse. Dennoch kann die Methode die archäologischen Strukturen in manchen Fällen nur teilweise oder gar nicht abbilden, wenn die bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften des Bodens und der archäologischen Strukturen dies nicht zulassen. Der spezifische elektrische Widerstand wird durch Parameter wie Wassergehalt, Bodenstruktur, Bodenskelett, Bodentextur, Salinität und Bodentemperatur beeinflusst. Manche dieser Parameter, wie z.B. der Wassergehalt und die Bodentemperatur, unterliegen einer saisonalen Veränderung.

Die vorliegende Arbeit untersucht den spezifischen elektrischen Widerstand von archäologischen Steinstrukturen und evaluiert die Möglichkeit, auf Grundlage von Geländemessungen und Laboranalysen archäologische Strukturen und Böden als numerische Modelle darzustellen. Dazu wurde eine Kombination von verschiedenen bodenkundlichen, geoarchäologischen und geophysikalischen Methoden verwendet. Um archäologische Strukturen und Bodenprofile als numerische Widerstandsmodelle darstellen zu können, werden Informationen zur Geometrie der Strukturen und ihren elektrischen Widerstandswerten benötigt. Dabei ist die Qualität der Hintergrundinformationen entscheidend für die Genauigkeit des Widerstandsmodells. Die Geometrie der Widerstandsmodelle basiert auf den Ergebnissen von Rammkernsondierungen und archäologische Ausgrabungen. Die an der Ausbildung des elektrischen Widerstands beteiligten Parameter wurden durch die Analyse von Bodenproben gemessen und ermöglichen durch Pedotransfer-Funktion, wie die RHOADES-Formel, die Abschätzung des spezifischen elektrischen Widerstandes des Feinbodens. Um den Einfluss des Bodenskeletts auf den spezifischen elektrischen Widerstand von Bodenprofilen und archäologischen Strukturen zu berechnen, kamen die Perkolationstheorie und die Effective Medium Theory zum Einsatz. Die Genauigkeit und eventuelle Limitierungen der Methoden wurden im Labor durch experimentelle Widerstandsmessungen an ungestörten Bodenproben und synthetischen Materialien überprüft.

Die saisonale Veränderung des Wassergehalts im Boden wurde durch numerische Modelle mit der Software HYDRUS simuliert. Die hydraulischen Modelle wurden auf Grundlage der ermittelten bodenkundlichen und archäologischen Stratigraphie erstellt und verwenden die Daten von lokalen Wetterstationen als Eingangsparameter. Durch die Kombination der HYDRUS-Ergebnisse mit den Pedotransfer-Funktionen

konnte der Einfluss dieser saisonalen Veränderung auf die Prospektionsergebnisse von elektrischen Widerstandsmethoden berechnet werden. Die Ergebnisse der Modellierungsprozesse wurden mit den Geländemessungen verglichen. Die beste Übereinstimmung zwischen Modellergebnissen und den Prospektionsergebnissen konnte für die Fallstudie bei Katzenbach festgestellt werden. Bei dieser wurden die Modelle auf Grundlage von archäologischen Grabungsergebnissen und detaillierten bodenkundlichen Analysen erstellt.

Weitere Fallstudien zeigen, dass elektrische Widerstandsmodelle eingesetzt werden können, um den Einfluss von ungünstigen Prospektionsbedingungen auf die Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessungen abzuschätzen. Diese Informationen unterstützen die Planung und Anwendung der Methoden im Gelände und ermöglichen eine effektivere Interpretation der Prospektionsergebnisse. Die präsentierten Modellierungsansätze benötigen eine weitere Verifizierung durch den Vergleich der Modellierungsergebnisse mit detailliertem geophysikalischem Gelände-Monitoring von archäologischen Fundstellen. Zusätzlich könnten elektrische Widerstandsmessungen an künstlichen Mauerstrukturen unter kontrollierten Bedingungen zur Überprüfung der Modellierungsprozesse genutzt werden.

Abstract

Electrical resistance measurements are routinely used in archaeological prospection to survey underground structures. The method is cost effective, easy to undertake and usually produces good results. However, the method sometimes fails to detect archaeological remains or gives only partial detection. The electrical resistivity of soils and archaeological structures is known to be influenced by the physical and chemical properties of soils and archaeological features, such as soil moisture, soil structure, soil skeleton, soil texture, salinity and temperature. Some of these parameters, like moisture content and soil temperature may undergo seasonal variations that can affect prospection results at different times of the year.

This thesis explores the resistivity of stone-built structures and how data collected by fieldwork and laboratory analysis can be used to create realistic numerical models of the resistivity of such remains. It considers the value of techniques from soil science, geoarchaeology and geophysics that are used to examine the resistivity of archaeological structures and soils. In order to create resistivity models, information about the geometry and the resistivity values of archaeological structures and the surrounding soil is required. The accuracy of the model depends on the quality of the information that is used to create the model. The stratigraphy of soils and archaeological remains was examined by vibracores and archaeological excavations and served as the basis for the geometry of both hydraulic and resistivity models. The electrical resistivity of soils can be estimated by so-called pedotransfer functions, such as the RHOADES equation, which are based on the empirical relationship between the underlying soil physical, soil chemical properties and the electrical resistivity. Additionally the influence of the insulating soil skeleton on the bulk resistivity of soils and stone built structures was calculated by using the percolation theory and effective medium theory. The accuracy and limits of these methods were tested by experimental resistivity measurements on undisturbed soil samples and synthetic materials.

The seasonal variation of soil moisture was modelled with the software HYDRUS. All of the hydraulic models used were created from actual soil stratigraphy and archaeological excavation recordings. HYDRUS uses weather data from local weather stations as input. The computed values were used to calculate the effect of changing soil moisture on the results of electrical resistance methods. The outcome of the modelling processes was compared with the field measurements. Eventually the best fit was found for the Katzenbach case study, as the models were based on detailed archaeological and geoarchaeological analysis of the site.

Finally this thesis concludes that numerical resistivity models help to understand why electrical resistance methods sometimes fail to detect buried stone-built structures. Therefore the approach helps to guide the use of resistance methods and the interpretation of prospection results. It may be necessary to further investigate the accuracy of the modelling procedure by comparing the results with detailed geophysical site monitoring. Resistivity measurements on artificial stone-built structures under controlled conditions could be used to more completely verify the modelling approach presented.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung**Abstract****Inhaltsverzeichnis** **I****Abbildungsverzeichnis** **V****Tabellenverzeichnis** **X**

1	Einführung	1
1.1	Fragestellungen und Ziele	2
1.2	Untersuchungsgebiete	3
2	Elektrische Widerstandsmessungen in der Archäologie	6
2.1	Elektrische Widerstandskartierung (ER)	8
2.2	Elektrische Widerstandstomographie (ERT)	9
2.3	Elektromagnetik (EM)	10
2.4	Erfolg und Misserfolg von geophysikalischer Prospektion	11
2.5	Forschungsstand	13
3	Der elektrische Widerstand von Böden und archäologischen Strukturen	18
3.1	Wassergehalt	19
3.2	Bodenstruktur	20
3.3	Bodenskelett	21
3.4	Textur	22
3.5	Salinität	22
3.6	Temperatur	23
3.7	Saisonal variable Parameter	26

4	Methoden zur Analyse des elektrischen Widerstandes von Böden und archäologischen Strukturen	27
4.1	Elektrische Widerstandsmessungen an Bodenprofilen und Bodenproben	27
4.1.1	Elektrische Widerstandsmessungen an Bodenprofilen	27
4.1.2	Elektrische Widerstandsmessungen an ungestörten Bodenproben	28
4.1.3	Temperaturkorrektur	31
4.2	Bodenproben und Laboranalysen	32
4.3	Transferfunktionen und Näherungsgleichungen zur Berechnung hydraulischer und elektrischer Eigenschaften von Böden und archäologischen Strukturen	32
4.3.1	Die RHOADES-Formel	35
4.3.2	Näherungsgleichungen für hydraulische Bodenparameter	37
4.4	Berechnung des elektrischen Widerstandes von mehrphasigen Medien	37
4.4.1	Perkolationstheorie	37
4.4.2	Effective Medium Theory	38
4.6	Software zur Modellierung von physikalischen und chemischen Bodenparametern und des elektrischen Widerstandes	39
4.6.1	Inversion	40
4.6.2	Forward Resistivity Modeling	41
4.6.3	Modellierung der saisonalen Veränderung des Wassergehalts im Boden mit HYDRUS	43
5	Ergebnisse und Diskussion der Prospektion, Analyse und Modellierung von archäologischen Steinstrukturen anhand von Fallbeispielen	46
5.1	Der elektrische Widerstand von Mauer- und Steinstrukturen - ausgewählte Fallbeispiele	46
5.1.1	Amiternum	47
5.1.2	Katzenbach	49
5.1.3	Donnersberg	50
5.1.4	Otzenhausen	52

5.1.5	Zusammenfassung	54
5.2	Die villae rusticae bei Mauchenheim und Offenheim	55
5.2.1	Mauchenheim	55
5.2.1.1	Geophysikalische Prospektion	56
5.2.1.1.1	Elektrische Widerstandskartierung	56
5.2.1.1.2	Elektrische Widerstandstomographie	57
5.2.1.1.3	Bodenradar	58
5.2.1.2	Analyse	59
5.2.1.3	Elektrisches Widerstandsmodell für Mauchenheim	60
5.2.2	Offenheim	62
5.2.2.1	Geophysikalische Prospektion	64
5.2.2.1.1	Elektrische Widerstandskartierung	64
5.2.2.1.2	Magnetometer	65
5.2.2.1.3	Elektrische Widerstandstomographie	66
5.2.2.2	Analyse	68
5.2.2.3	Elektrisches Widerstandsmodell für Offenheim	70
5.2.3	Zusammenfassung	72
5.3	Der römische vicus bei Eisenberg	74
5.3.1	Geologie Eisenberg	75
5.3.2	Geophysikalische Prospektion	76
5.3.2.1	Bodenradar	76
5.3.2.2	Elektrische Widerstandskartierung	77
5.3.2.3	Elektrische Widerstandstomographie	78
5.3.3	Rammkernsondierungen	80
5.3.3.1	Ergebnisse der RHOADES-Formel für Eisenberg	81
5.3.3.2	Perkolationstheorie und Effective Medium Theory	89
5.3.4	Elektrisches Widerstandsmodell für Eisenberg	90
5.3.5	HYDRUS Modell für Eisenberg	93

5.3.6	Kombination der HYDRUS-Ergebnisse mit dem elektrischen Widerstandsmodell	96
5.3.7	Zusammenfassung	97
5.4	Die villa rustica „Im Falkensaß“ bei Katzenbach/Donnersbergkreis	98
5.4.1	Luftbilder der Fundstelle	100
5.4.2	Topographie und Hydrologie im Raum Katzenbach	101
5.4.3	Geologie im Raum Katzenbach	101
5.4.4	Geophysikalische Prospektion	103
5.4.4.1	Elektrische Widerstandskartierung	104
5.4.4.2	Elektrische Widerstandstomographie	107
5.4.4.3	Bodenradar	110
5.4.4.4	Magnetometer	111
5.4.5	Grabungsergebnisse	112
5.4.6	Bodenkundliche und geoarchäologische Analyse von Schnitt 2	116
5.4.6.1	Ergebnisse der RHOADES-Formel für Katzenbach	122
5.4.6.2	Perkolationstheorie und Effective Medium Theory	126
5.4.7	Elektrisches Widerstandsmodell für Schnitt 2	133
5.4.8	HYDRUS-Modell für Katzenbach	139
5.4.9	Kombination der HYDRUS-Ergebnisse mit dem elektrischen Widerstandsmodell	144
5.4.10	Zusammenfassung	151
6.	Synthese	152
	Literaturverzeichnis	156

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Forschungsstrategie und Arbeitsabläufe.	3
Abbildung 1-2: Untersuchungsgebiete in Rheinland-Pfalz und dem Saarland.	5
Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau einer elektrischen Widerstandsmessung.	7
Abbildung 2-2: Elektrische Widerstandskartierung im Gelände.	8
Abbildung 2-3: Schematische Verteilung der Messpunkte bei einer elektrischen Widerstandstomographie.	10
Abbildung 2-4: Verwendung der verschiedenen Prospektionsmethoden in England und Schottland.	16
Abbildung 2-5: Prozentuale Verteilung der untersuchten Prospektionsmethoden in der Fachzeitschrift Archaeological Propection.	17
Abbildung 4-1: Schematischer Aufbau der für die elektrischen Widerstandsmessungen an Bodenprofilen verwendeten Elektrodenkonfiguration.	28
Abbildung 4-2: Schematische Aufsicht auf die Elektrodenkonfiguration bei Messungen an Bodenproben in einem Messzylinder.	29
Abbildung 4-3: Ergebnis der Kalibrationsmessungen in den Messzylindern.	30
Abbildung 4-4: Entnahme von ungestörten Bodenproben mit einem Messzylinder und Aufbau einer Messbox mit Spannungsmessgerät.	31
Abbildung 4-5: Schematische Darstellung der in der RHOADES-Formel verwendeten leitfähigen Pfade.	34
Abbildung 5-1: Mauerstrukturen.	47
Abbildung 5-2: Inversionsergebnis des ERT-Profiles AM49.	48
Abbildung 5-3: Position der ERT-Profile auf der Grabungsfläche bei Amiternum.	48
Abbildung 5-4: Inversionsergebnis des ERT-Profiles am Zangentor mit Res2DInv und ERTLab.	51
Abbildung 5-5: Inversionsergebnis der quasi-3D ERT-Prospektion am Zangentor.	52
Abbildung 5-6: ERT am Nordwall des Hunnenrings bei Otzenhausen.	53
Abbildung 5-7: Inversionsergebnisse der ERT-Profile am Nordwall des Hunnenrings bei Otzenhausen.	54
Abbildung 5-8: Luftbild der Palastvilla bei Mauchenheim.	56
Abbildung 5-9: Elektrische Widerstandskartierung und ERT-Profil auf der Palastvilla bei Mauchenheim.	57
Abbildung 5-10: Timeslices der Bodenradar-Prospektion auf der Palastvilla bei Mauchenheim.	59
Abbildung 5-11: Elektrisches Widerstandsmodell für Mauchenheim und Inversionsergebnisse bei unterschiedlichen Hintergrundwiderständen.	61

Abbildung 5-12: Ergebnis der Anwendung der Pol-Pol-Konfiguration auf das Widerstandsmodell von Mauchenheim.	62
Abbildung 5-13: Luftbild der Palastvilla bei Offenheim.	63
Abbildung 5-14: Ergebnis der elektrischen Widerstandskartierung und Lage der ERT-Profile.	65
Abbildung 5-15: Ergebnis der Magnetometer-Prospektion und Lage der elektrischen Widerstandskartierung.	66
Abbildung 5-16: Inversionsergebnisse der ERT-Profile bei Offenheim.	67
Abbildung 5-17: Schematische Darstellung der Bodenprofile bei Offenheim.	69
Abbildung 5-18: Ergebnisse der modifizierten Pol-Pol-Konfiguration bei verschiedenen ρ_m -Werten der Mauerstruktur.	70
Abbildung 5-19: Elektrische Widerstandsmessungen zur Bestimmung des Hintergrundrauschens bei Offenheim.	71
Abbildung 5-20: Einfluss des Hintergrundrauschens auf Messungen mit der Pol-Pol-Konfiguration bei verschiedenen ρ_m -Werten der Mauerstruktur.	72
Abbildung 5-21: Großflächige Senkungsbereiche im Untersuchungsgebiet (A) und Bodenprofil im Grabungsareal (B).	75
Abbildung 5-22: Ergebnisse der Prospektion mit dem Bodenradar.	77
Abbildung 5-23: Ergebnis der elektrischen Widerstandskartierung bei Eisenberg.	78
Abbildung 5-24: ERT-Profile Eis1 bis Eis6 bei Eisenberg.	79
Abbildung 5-25: Bohrung B1 bei Eisenberg.	80
Abbildung 5-26: Bohrung B2 bei Eisenberg.	81
Abbildung 5-27: Eingangparameter der RHOADES-Formel aus den Bohrungen B1 und B2.	82
Abbildung 5-28: Ergebnis der RHOADES-Formel im Vergleich mit der Stratigraphie der Bohrungen B1 und B2.	83
Abbildung 5-29: Ergebnisse der RHOADES-Formel für B1 im Vergleich mit den Inversionsergebnissen von ERT-Profil Eis2.	84
Abbildung 5-30: Ergebnisse der RHOADES-Formel für B2 im Vergleich mit den Inversionsergebnissen von ERT-Profil Eis2.	84
Abbildung 5-31: Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessungen an der ungestörten und gestörten Löss-Probe im Vergleich mit dem volumetrischen Wassergehalt.	86
Abbildung 5-32: Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessungen an der ungestörten und gestörten Ton-Probe im Vergleich mit dem volumetrischen Wassergehalt.	87
Abbildung 5-33: Vergleich der elektrischen Widerstandsmessung an der ungestörten Löss-Probe mit den Ergebnissen der RHOADES-Formel bei unterschiedlichem Wassergehalt.	89
Abbildung 5-34: Elektrisches Widerstandsmodell 1 für den Zeitpunkt der ERT-Messungen im Juni 2012 auf Grundlage von ERT-Profil Eis2.	91

Abbildung 5-35: Elektrisches Widerstandsmodell 2 für den Zeitpunkt der Bohrungen im Januar 2013 auf Grundlage der Stratigraphie und Ergebnissen der RHOADES-Formel.	92
Abbildung 5-36: Elektrisches Widerstandsmodell 3 zur Berechnung des Einfluss der Tiefenlage der Mauerstruktur auf die Prospektionsergebnisse der elektrischen Widerstandskartierung.	93
Abbildung 5-37: Ergebnis der Anwendung einer modifizierten Pol-Pol-Konfiguration mit einem Elektrodenabstand von 0.5 m auf Mauerstrukturen mit unterschiedlichen Tiefenlagen.	93
Abbildung 5-38: HYDRUS-Modell für ERT-Profil Eis2.	94
Abbildung 5-39: Klimadiagramm Eisenberg.	95
Abbildung 5-40: Saisonale Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes in den Schichten L1 bis L4.	95
Abbildung 5-41: Berechnung der saisonalen Veränderung des ρ der Schichten L1 bis L4 aus der Kombination von HYDRUS, RHOADES-Formel und Effective Medium Theory.	97
Abbildung 5-42: Inversionsergebnis für Widerstandsmodell 2 mit den ρ_m -Werten für Juni 2013.	97
Abbildung 5-43: Übersichtskarte der Fundstellen bei Katzenbach.	99
Abbildung 5-44: Luftbild der Fundstelle „Im Falkensaß“ bei Katzenbach.	100
Abbildung 5-45: Geologie im Raum Katzenbach.	103
Abbildung 5-46: Prospektionsergebnisse der elektrischen Widerstandskartierung auf der Fundstell„Im Falkensaß“ bei Katzenbach.	106
Abbildung 5-47: Inversionsergebnisse der ERT-Profile bei Katzenbach.	108
Abbildung 5-48: Prospektionsergebnisse mit dem Bodenradar auf der Fundstelle „Im Falkensaß“ bei Katzenbach.	110
Abbildung 5-49: Ergebnisse der Testmessungen mit dem Caesium-Magnetometer auf Nebengebäude 3.	111
Abbildung 5-50: Lage der Grabungsschnitte im Bezug zur elektrischen Widerstandskartierung und den ERT-Profilen	114
Abbildung 5-51: Grabungsergebnisse Schnitt 1.	115
Abbildung 5-52: Grabungsergebnisse Schnitt 2.	115
Abbildung 5-53: Grabungsergebnisse Schnitt 3.	116
Abbildung 5-54: Schematische Darstellung des Profils und Entnahme der Bodenproben in Schnitt 2.	117
Abbildung 5-55: Dünnschliff der Bodenproben K1-K4 aus Schnitt 2.	118
Abbildung 5-56: Verteilung des volumetrischen Wassergehaltes in Schnitt 2.	119
Abbildung 5-57: Mit dem WET-Sensor gemessene Temperaturen in Schnitt 2.	120

Abbildung 5-58: Verteilung der magnetischen Suszeptibilität in Schnitt 2.	121
Abbildung 5-59: Verteilung des ρ in Ω_m in Schnitt 2 durch direkte elektrische Widerstandsmessungen.	122
Abbildung 5-60: Aus den Bodenproben ermittelte Eingangsparameter der RHOADES-Formel für Schnitt 2.	123
Abbildung 5-61: Horizontbezogene Verteilung der Lagerungsdichte in Schnitt 2.	123
Abbildung 5-62: Ergebnisse der RHOADES-Formel für Schnitt 2.	124
Abbildung 5-63: Einfluss der Eingangsparameter der RHOADES-Formel auf die Berechnung des ρ der Bodenhorizonte in Schnitt 2.	125
Abbildung 5-64: Verteilung des ρ in Ω_m in Schnitt 2 aus ERT-Profil KB 1.	126
Abbildung 5-65: Verteilung des volumetrischen Steingehalts in Schnitt 2.	127
Abbildung 5-66: Vergleich der elektrischen Widerstandsmessungen an einem zweiphasigen Medium mit den Berechnungen durch die Perkolationstheorie und Effective Medium Theory.	129
Abbildung 5-67: Vergleich der elektrischen Widerstandsmessungen an einem zweiphasigen Medium mit den Berechnungen durch die Perkolationstheorie und Effective Medium Theory bei einer Verwendung des gravimetrischen Anteils der Inklusionen.	130
Abbildung 5-68: Vergleich der elektrischen Widerstandsmessungen mit den Berechnungen der Perkolationstheorie und Effective Medium Theory bei Veränderungen der Leitfähigkeit einer NaCl-Lösung.	132
Abbildung 5-69: Berechnung des ρ der Mauerstruktur bei verschiedenen Steinkonzentrationen mit der Perkolationstheorie und der Effective Medium Theory.	133
Abbildung 5-70: Elektrisches Widerstandsmodell für Schnitt 2.	134
Abbildung 5-71: Ergebnis der Anwendung der modifizierten Pol-Pol-Konfiguration auf das Widerstandsmodell für den Zeitpunkt der Grabung im Juni 2013 bei einer Steinkonzentration von 70 % in der Mauerstruktur.	135
Abbildung 5-72: Ergebnis der Anwendung der modifizierten Pol-Pol-Konfiguration auf das Widerstandsmodell für den Zeitpunkt der Grabung im Juni 2013 bei einer Steinkonzentration von 75 % in der Mauerstruktur.	136
Abbildung 5-73: Ergebnis der Anwendung der Schlumberger-Konfiguration auf das Widerstandsmodell für den Zeitpunkt der Grabung im Juni 2013 bei einer Steinkonzentration von 70 % in der Mauerstruktur.	137
Abbildung 5-74: Ergebnis der Anwendung der Schlumberger-Konfiguration auf das Widerstandsmodell für den Zeitpunkt der Grabung im Juni 2013 bei einer Steinkonzentration von 75 % in der Mauerstruktur.	137
Abbildung 5-75: Vergleich der Verteilung des ρ aus ERT-Profil KB 1 mit den verwendeten ρ_m -Werten im elektrischen Widerstandsmodell.	138
Abbildung 5-76: Vergleich der Verteilung des ρ aus ERT-Profil KB 1 mit den Inversionsergebnissen des elektrischen Widerstandsmodells.	138
Abbildung 5-77: Geometrie des HYDRUS-Modells für Schnitt 2 bei Katzenbach.	140

Abbildung 5-78: Klimadiagramm für den Raum Katzenbach aus den für das HYDRUS-Modell verwendeten Eingangsdaten.	141
Abbildung 5-79: Saisonale Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes in den Bodenhorizonten in Schnitt 2 bei Katzenbach.	141
Abbildung 5-80: Saisonale Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes in verschiedenen Bereichen der Mauerstruktur.	143
Abbildung 5-81: Berechnung der saisonalen Veränderung des ρ der Bodenhorizonte durch die Kombination von RHOADES-Formel, Perkolations-theorie und HYDRUS.	144
Abbildung 5-82: Berechnung der saisonalen Veränderung des ρ der Mauerstruktur durch die Kombination von RHOADES-Formel, Perkolations-theorie, bzw. Effective Medium Theory und HYDRUS.	146
Abbildung 5-83: Ergebnis der Anwendung der modifizierten Pol-Pol-Konfiguration auf das Widerstandsmodell mit den aus der Kombination von RHOADES-Formel, Perkolations-theorie und HYDRUS berechneten Eingangswerten für Juni 2013 und Juni 2014.	146
Abbildung 5-84: Ergebnis der Anwendung der modifizierten Pol-Pol-Konfiguration auf das Widerstandsmodell mit den aus der Kombination von RHOADES-Formel, Perkolations-theorie und HYDRUS berechneten Eingangswerten für Dezember 2013.	147
Abbildung 5-85: Saisonale Veränderung des Kontrast zwischen Mauerstruktur und Bodenmaterial bei einer Messung mit der modifizierten Pol-Pol-Konfiguration.	147
Abbildung 5-86: Berechnung des Einflusses der saisonalen Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes im Boden auf die Prospektions-ergebnisse mit ERT für Juli 2013 bis Dezember 2013.	149
Abbildung 5-87: Berechnung des Einflusses der saisonalen Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes im Boden auf die Prospektions-ergebnisse mit ERT für Januar 2014 bis Juni 2014.	150

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1:	Materialeigenschaften der im HYDRUS-Modell für Eisenberg verwendeten Geometrien.	94
Tabelle 5-2:	Berechnung des Einflusses des Bodenskeletts auf den elektrischen Widerstand der Bodenhorizonte.	127
Tabelle 5-3:	Materialeigenschaften der im HYDRUS-Modell für Katzenbach verwendeten Geometrien.	140

1 Einführung

Elektrische Widerstandsmessungen werden routinemäßig eingesetzt, um archäologische Strukturen zu detektieren und zu identifizieren. Diese Methode kann in archäologischen Kontexten genutzt werden, da sich der spezifische elektrische Widerstand (ρ) von archäologischen Strukturen häufig von dem des umliegenden Untergrundes unterscheidet.

Seit den 1950ern werden elektrische Widerstandsmethoden zur archäologischen Prospektion eingesetzt. Durch die Weiterentwicklung der Widerstandsmessgeräte entstanden Multielektrodensysteme, deren Messdaten durch die Weiterverarbeitung mit spezieller Software detaillierte und aussagekräftige Messbilder ergeben (CLARK 1990; SCOLLAR et al. 1990; GAFFNEY & GATER 2003). Üblicherweise werden elektrische Widerstandsverfahren in zwei verschiedenen Varianten eingesetzt:

- Horizontale 2D Kartierungen (engl. ER = Electrical Resistance), bei denen Veränderungen des elektrischen Widerstandes an der Geländeoberfläche über Potentialmessungen ermittelt werden. Diese Methode wird zumeist eingesetzt, wenn sich die archäologischen Strukturen aus geophysikalischer Sicht gut vom umliegenden Bodenmaterial unterscheiden lassen, wie z.B. bei Mauerstrukturen (SCHMIDT 2013).
- 2D oder 3D elektrische Widerstandstomographien (engl. ERT = Electrical Resistivity Tomography), bei denen durch Multielektrodensysteme Informationen über die vertikale Verteilung des elektrischen Widerstands im Boden gewonnen werden. Diese Methode kann angewendet werden, um komplexe archäologische Strukturen zu untersuchen (PAPADOPOULOS et al. 2006; WAKE et al. 2012).

Die Interpretation von elektrischen Widerstandskartierungen basiert auf erkennbaren Mustern von Anomalien, die den Verlauf einer archäologischen Struktur nachzeichnen (BRENGEL et al. 2013). Aus einer mehr als 50 Jahre langen Forschungs- und Nutzungsgeschichte geht jedoch hervor, dass archäologische Strukturen häufig gar nicht oder nur teilweise durch elektrische Widerstandskartierungen detektiert werden können. Die Gründe für diese unbefriedigenden Ergebnisse sind größtenteils unbekannt und verhindern präzise Vorhersagen zu den Erfolgsaussichten der Methode unter bestimmten Voraussetzungen (JORDAN 2009a). Bislang werden meist allgemeine und unspezifische Aussagen zu den für die Methode wichtigen Parametern herangezogen, die aber nur geringfügig aussagekräftig sind (BRENGEL et al. 2013).

Problematisch ist aber nicht nur die Erfolgsaussicht der Methode, sondern auch die Interpretation der Daten bei einer erfolgreichen Kartierung. Da das Wissen über die Prozesse, welche an der Bildung von elektrischen Widerstandsanomalien beteiligt sind, bislang limitiert ist, wird eine detaillierte Interpretation mit einer Zuweisung der geophysikalischen Anomalie zu einem archäologischen Befund erschwert.

1.1 Fragestellungen und Ziele

Die vorliegende Arbeit untersucht Möglichkeiten, um die elektrischen Widerstände von archäologischen Strukturen zu analysieren, um die Prospektionsmethode effektiver einzusetzen und ihre Ergebnisse besser interpretieren zu können. Da elektrische Widerstandsmethoden vor allem auf Steinstrukturen in archäologischem Kontext angewendet werden, ist diese Arbeit auch auf diese Strukturen ausgerichtet. Als Fallbeispiele werden Steinstrukturen mit unterschiedlichen Konstruktionsweisen und aus verschiedenen Epochen und Naturräumen untersucht.

Die für die Ausbildung des ρ von archäologischen Strukturen ausschlaggebenden Faktoren wie Bodenfeuchte, Bodentextur, Steingehalt und Salinität stehen im Fokus dieser Untersuchungen. Bodenkundliche und geoarchäologische Untersuchungen ermöglichen die Bestimmung des Einflusses dieser Parameter auf den ρ und stellen somit realistische Eingangswerte für numerische Modellierungsansätze dar (Abb. 1-1).

Fragestellungen und Ziele

- (I) Evaluierung der bodenphysikalischen und bodenchemischen Parameter die zur Bildung des elektrischen Widerstandes von Böden und archäologischen Strukturen beitragen.
- (II) Identifizierung und Evaluierung bodenkundlicher, geologischer und physikalischer Methoden, die zur Berechnung des elektrischen Widerstandes von Böden und archäologischen Strukturen genutzt werden können.
- (III) Identifizierung und Evaluierung von Modellierungsansätzen für variable bodenphysikalische und bodenchemische Parameter.
- (IV) Design und Anwendung von numerischen Widerstandsmodellen mit realistischen Eingangswerten.

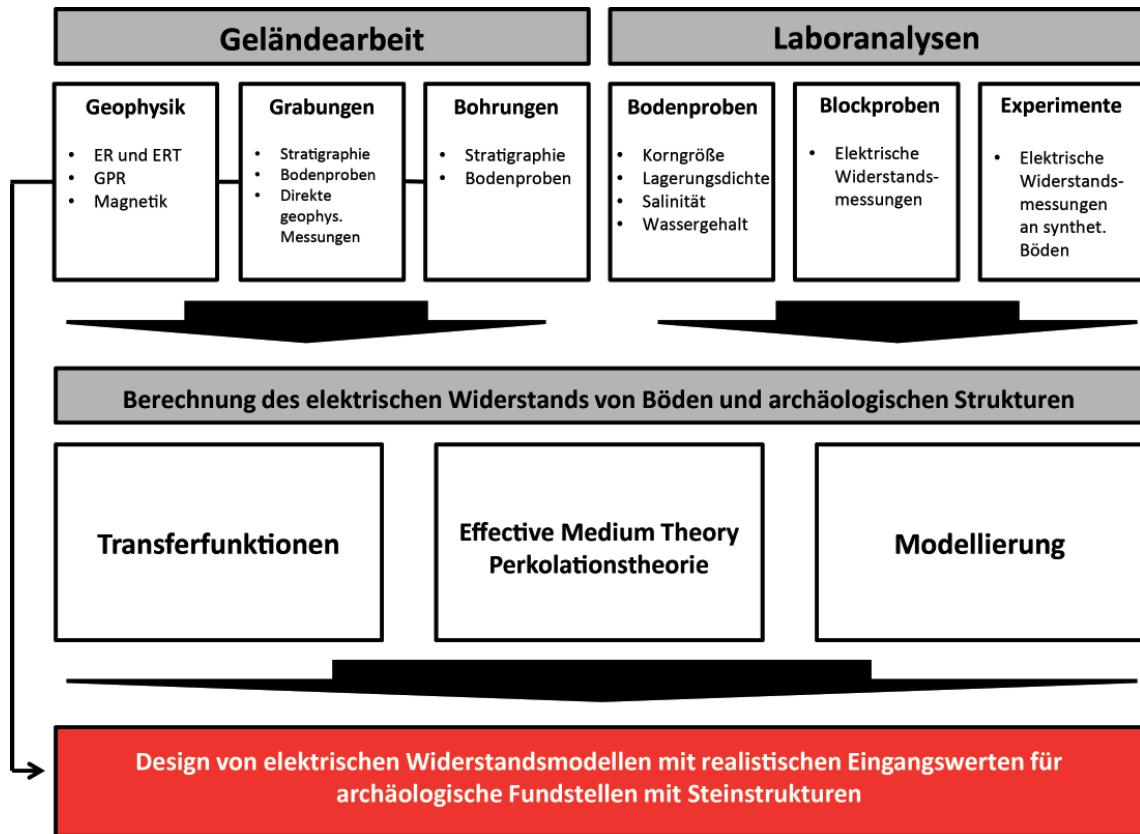


Abbildung 1-1: Forschungsstrategie und Arbeitsabläufe.

1.2 Untersuchungsgebiete

Die untersuchten archäologischen Fundstellen konzentrieren sich mit Ausnahme der Fallstudie bei Amiternum (Italien) auf den Südwesten von Deutschland in den Bundesländern Rheinland-Pfalz und Saarland (Abb. 1-2). Ihre Auswahl erfolgte nach den Kriterien Bauweise, Naturraum, Erhaltungszustand, Forschungsgeschichte und Zugänglichkeit. Da die archäologische Forschung, insbesondere die Prospektion mit geophysikalischen Methoden und archäologische Grabung, eine Genehmigung durch die zuständige Landesarchäologie benötigt, wurden die Projekte in enger Kooperation mit den zuständigen Behörden und kooperierenden Archäologen von verschiedenen archäologischen Instituten durchgeführt. Die in Rheinland-Pfalz bekannten archäologischen Fundstellen mit Steinstrukturen stammen größtenteils aus der Eisenzeit und Römerzeit.

Die eisenzeitlichen Steinstrukturen beschränken sich ausschließlich auf die von befestigten Siedlungen bekannten Verteidigungswälle, die teilweise noch über der Erdoberfläche erhalten sind (SCHINDLER 1968; KOCH & SCHINDLER 1994). Die Nutzung von elektrischen Widerstandsmethoden zur Prospektion des Aufbaus der Wallanlagen

wurde bislang nur selten in Betracht gezogen (NEIGHBOUR et al. 2001; BRENGEL 2012), da die natürlichen Gegebenheiten im Umfeld der Wallanlagen (insbesondere schlechter Bodenkontakt durch hohen Steingehalt im Boden) eine Anpassung der Prospektionsmethode erfordern können (Kapitel 5.1.4). Der Bezug der vorliegenden Arbeit zu den eisenzeitlichen Wallanlagen liegt in den durch die Bauweise resultierenden ρ und den Prozessen, die zur Veränderung des ρ der Wallanlagen führen.

In Rheinland-Pfalz kann durch eine intensive landwirtschaftliche Nutzung in römischer Zeit von einer hohen Dichte an römischen Landgütern ausgegangen werden. Die Gebäude wurden größtenteils aus Stein errichtet und sind in ihrer Bauweise relativ ähnlich (FAUL 2013). Diese Landgüter verteilen sich über sehr unterschiedliche Naturräume, wie z.B. das Mainzer Becken mit einer Abfolge von unterschiedlichen marinen Sedimenten, die zusätzlich von Löss überdeckt werden, bis hin zu Gebirgsböden auf unterschiedlichen Ausgangsgesteinen (LGB-RLP 2005). Aufgrund ihrer Häufigkeit und Bauweise sind die villae rusticae ein beliebtes Prospektionsziel mit elektrischen Widerstandsmethoden und stehen deshalb im Vordergrund der vorliegenden Forschungsarbeit.

Die angeführten archäologischen Fundstellen verfügen über stark unterschiedliche Forschungsgeschichten, woraus verschiedene Datensets für die Analyse der bei der Bildung des elektrischen Widerstandes beteiligten Prozesse zur Verfügung stehen. Diese Informationen können je nach Ausprägung von archäologischen Grabungszeichnungen bis hin zu bodenkundlichen und geoarchäologischen Analysen von Bodenprofilen und Bohrungen reichen. Der Vergleich dieser qualitativen Unterschiede ermöglicht Aussagen über die minimalen Ansprüche an das Hintergrundwissen, das zur Erstellung von zuverlässigen elektrischen Widerstandsmodellen notwendig ist. Die Fallstudien mit relativ geringem Hintergrundwissen werden zur Untersuchung der generellen Anwendung und dem archäologischen sowie denkmalpflegerischen Potential von elektrischen Widerstandsmethoden (Donnersberg, Bundenbach, Otzenhausen, Amiternum) herangezogen, während Fundstellen mit zusätzlichen bodenkundlichen, geologischen und geomorphologischen Informationen zur Untersuchung der Verbindung zwischen naturräumlichen Gegebenheiten, archäologischem Erhaltungszustand und den Prospektionsergebnissen verwendet wurden (Mauchenheim und Offenheim).

Die aus bodenkundlicher und geoarchäologischer Sicht detailliertesten Fallstudien (Katzenbach und Eisenberg) stehen im Zentrum dieser Untersuchungen und werden zur Erörterung des maximalen Potentials der vorgestellten Methoden zur

Verbesserung der Anwendung von elektrischen Widerstandsmethoden und der Interpretation ihrer Prospektionsergebnisse herangezogen.

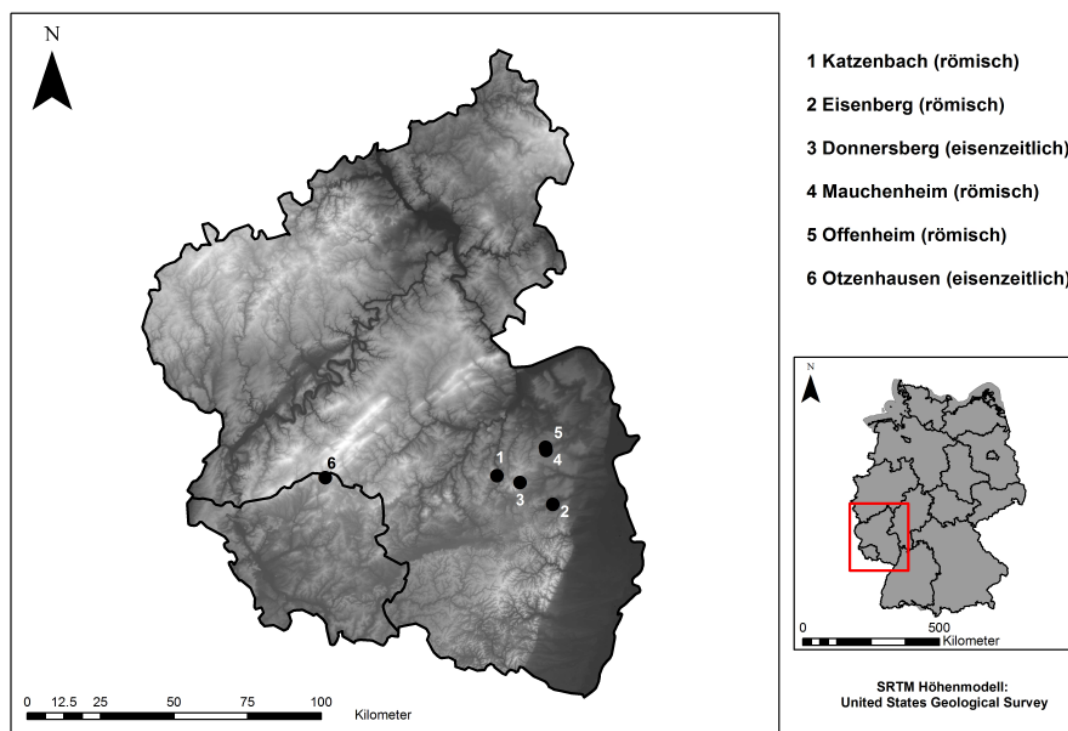


Abbildung 1-2: Untersuchungsgebiete in Rheinland-Pfalz und dem Saarland.

2 Elektrische Widerstandsmessungen in der Archäologie

Zur archäologischen Prospektion werden verschiedene Varianten der elektrischen Widerstandsmessung angewendet, wobei die elektrische Widerstandskartierung (ER = engl. Electrical Resistance), elektrische Widerstandstomographie (ERT = engl. Electrical Resistivity Tomography) und die Elektromagnetik (EM = engl. Electromagnetic) am häufigsten eingesetzt werden. Allen elektrischen Widerstandsmethoden liegt das Ohm'sche Gesetz zu Grunde, das die Beziehung zwischen elektrischem Widerstand und dem im Boden stattfindenden Stromfluss beschreibt:

$$R = \frac{V}{I} \quad [1]$$

R = elektrischer Widerstand in Ω

V = Spannung in Volt

I = Stromstärke in Ampere

Der elektrische Widerstand (R) in Ω besitzt keinen räumlichen Bezug, d.h. er kann nicht als materialspezifischer Wert angesehen werden und ermöglicht nur eine bedingte Vergleichbarkeit mit anderen Widerstandsmessungen. Aus diesem Grund wurde der materialspezifische Wert spezifischer elektrischer Widerstand (ρ) eingeführt, der in Ωm angegeben wird. Der Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes ist die spezifische elektrische Leitfähigkeit (σ) in S/m (SCOLLAR et al. 1990). Der ρ eines Körpers ergibt sich aus seinen physikalischen und chemischen Eigenschaften (Kapitel 3). In Böden können diese Eigenschaften unterschiedlich stark ausgeprägt sein, was eine große Spannbreite des ρ verursacht. GREINWALD & THIERBACH (1997) geben einen Bereich von 20 - 9000 Ωm für Böden an, während SCOLLAR et al. (1990) Werte von 1 – 5000 Ωm beobachten. Das Prinzip der Ausbildung des ρ durch chemische und physikalische Eigenschaften eines Körpers kann auch auf archäologische Strukturen angewendet werden, wobei auch hier eine große Spannbreite möglich ist. Niedrige ρ -Werte < 20 Ωm sind zum Beispiel von verfüllten Siedlungsgruben bekannt (SCOLLAR et al. 1990), während an eisenzeitlichen Wallanlagen ρ -Werte von mehreren 10000 Ωm auftreten können (BRENGEL 2012; BRENGEL 2013). Generell grenzen sich die elektrische Widerstandskartierung und die elektrische Widerstandstomographie von der Elektromagnetik ab, da es sich bei den beiden erstgenannten um die Anwendung der klassischen Vier-Punkt-Methode handelt, bei der über zwei Stromelektroden

(A und B) der elektrische Strom in den Boden geleitet wird, während über die zwei Potentialelektroden (M und N) die Veränderung der Spannung V in Volt gemessen wird (Abb. 2-1). Bei der Messung der Veränderung der Spannung handelt es sich um eine Potentialmessung, welche die Ausbildung eines Gradientenfeldes bei der Einleitung des Stroms über die Stromelektroden ausnutzt (CLARK 1990). Die meisten Messinstrumente leiten einen konstanten Stromfluss in den Untergrund, wobei es sich um einen Wechselstrom mit extrem niedriger Frequenz handelt (< 25 Hz), der verhindern soll, dass sich durch die Ausrichtung der im Boden enthaltenen Ionen entlang des Stromfeldes eine Polarisierungs-Barriere bildet, die einen späteren Stromfluss (z.B. bei der folgenden Messung) behindern würde (GAFFNEY & GATER 2003; JORDAN 2009a). Sollte der Stromfluss auf Grund eines schlechten Bodenkontakts nicht konstant sein, verändert sich auch die Potentialmessung. Jedoch bleibt das Verhältnis zwischen Stromfluss und Potentialmessung, der elektrische Widerstand, konstant (CLARK 1990).

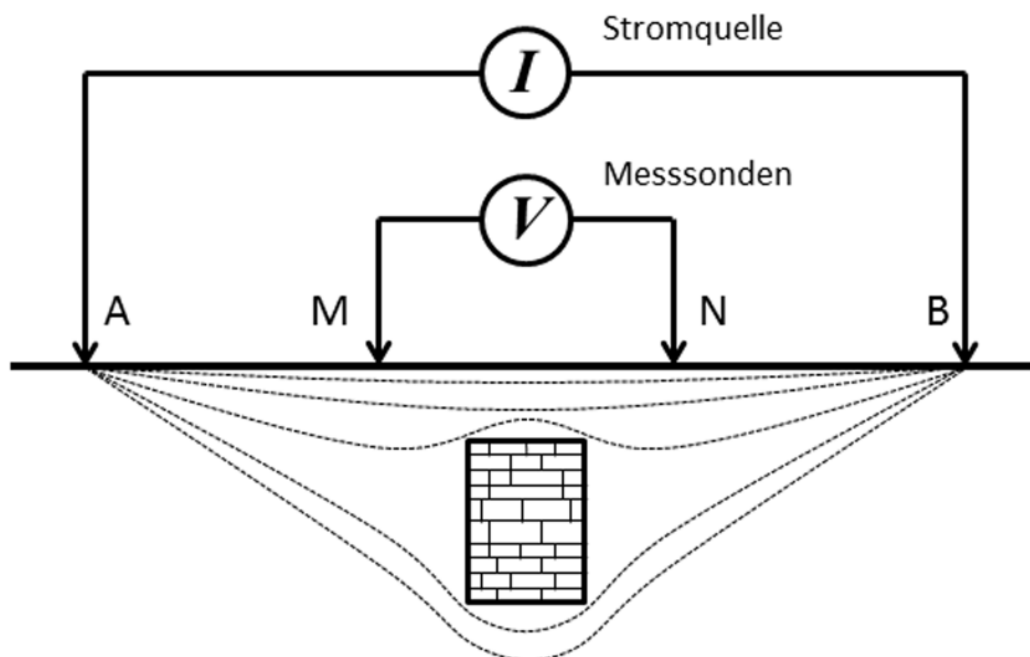


Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau einer elektrischen Widerstandsmessung mit einer Wenner-Konfiguration über einer Mauerstruktur und der idealisierte Stromfluss. Quelle: verändert nach GAFFNEY & GATER 2003.

In der Theorie finden die Messungen an einem idealisierten, homogenen Körper statt, der nur über einen spezifischen elektrischen Widerstand verfügt. Diese Eigenschaft trifft jedoch nicht auf den Boden zu, an dem im Gelände die Widerstandsmessungen durchgeführt werden (SCOLLAR et al. 1990). Viel eher handelt es sich um einen heterogenen Körper, dessen ρ durch seine bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften räumlich variiert. Der durch die Vier-Punkt-Anordnung erhaltene Wert

besteht deshalb zu einem gewissen Grad aus einem gemittelten Widerstandswert dieser unterschiedlichen Einzelkörper und muss deshalb klar vom materialspezifischen Wert spezifischer Widerstand (ρ) abgegrenzt werden. In der Literatur hat sich die Bezeichnung scheinbarer spezifischer Widerstand (ρ_a) etabliert (SCHMIDT 2013).

2.1 Elektrische Widerstandskartierung (ER)

Die elektrische Widerstandskartierung ist die am frühesten angewendete geophysikalische Prospektionsmethode in der Archäologie (Kapitel 2.5). Bei dieser Methode werden elektrische Widerstandsmessgeräte mit integriertem Datenspeicher angewendet, wie z.B. das Geoscan RM15 oder sein Nachfolger, das Geoscan RM85. Generell ist eine unbegrenzte Anzahl an Elektrodenanordnungen möglich, sofern deren Geometrie bekannt ist (SCOLLAR et al. 1990). Jedoch hat sich die Anwendung der Twin-Probe-Anordnung zum heutigen Zeitpunkt weitestgehend durchgesetzt. Bei der Twin-Probe-Anordnung werden zwei mobile Elektroden verwendet, die mit einem auf einem Rahmen sitzenden Widerstandsmessgerät verbunden sind (Abb. 2-2 A). Eine weitere Verbindung besteht zu zwei festen Elektroden, deren Position sich im Verlauf der Prospektion nicht verändert. Der Elektrodenabstand zwischen den beiden mobilen Elektroden liegt gewöhnlich bei 0.5 m. Um größere Eindringtiefen der Messung zu erreichen, kann dieser Abstand vergrößert werden. Manche Widerstandsmessgeräte unterstützen die gleichzeitige Verwendung von mehreren mobilen Elektroden (Abb. 2-2 B), wodurch schnellere Prospektionen möglich sind.



Abbildung 2-2: Elektrische Widerstandskartierung im Gelände. Fotos: P. BRENGEL.

Die Prospektion einer Fläche erfolgt durch die Einteilung der Fläche in ein gleichmäßiges Raster, dessen Auflösung beliebig verändert werden kann. In jedem dieser Rasterquadrate wird eine Messung mit den mobilen Elektroden durchgeführt (GAFFNEY & GATER 2003). Gewöhnlich messen die Widerstandsmessgeräte den elektrischen Widerstand in Ω , da für die Berechnung des ρ_a in Ωm bei der Twin-Probe-Anordnung die Annahme einer unendlichen Entfernung von mobilen Elektroden zu den beiden festen Elektroden notwendig ist. In der vorliegenden Arbeit wurde für alle Prospektionen mit der elektrischen Widerstandskartierung ein Elektrodenabstand von 0.5 m zwischen den beiden mobilen Elektroden verwendet. Die Interpretation der Daten beruht auf der Sichtbarkeit von Mustern von Widerstandsanomalien, deren Wert von dem des umliegenden Bodens abweicht. So werden z.B. Mauerstrukturen im Idealfall als lineare Anomalien mit einem hohen elektrischen Widerstand abgebildet.

Die Vorteile der elektrischen Widerstandskartierung liegen in ihrer robusten Bauweise und der unkomplizierten Durchführung der Messungen. Fehlmessungen resultieren in den meisten Fällen durch schlechten Elektrodenkontakt der mobilen Elektroden, was zumeist auf Anwenderfehler oder die Oberflächenbeschaffenheit der Prospektionsfläche zurückzuführen ist. Da die meisten Widerstandsmessgeräte, die bei der elektrischen Widerstandskartierung eingesetzt werden, in ihrer maximalen Stromausgabe limitiert sind, ist die Methode bei relativ trockenen Böden fehleranfällig. Die aus diesen Prospektionen resultierenden Messergebnisse werden häufig durch eine große Anzahl an statistischen Ausreißern unbrauchbar gemacht (SCOLLAR et al. 1990).

2.2 Elektrische Widerstandstomographie (ERT)

Bei der elektrischen Widerstandstomographie (ERT) wird eine große Anzahl an Elektroden mit konstantem Elektrodenabstand auf einer Linie angeordnet. Die an die Elektroden über Multikanal-Kabel angeschlossenen Widerstandsmessgeräte, wie z.B. die Syscal Pro von Iris Instruments oder das HP Light 10W von Lippmann, verwenden automatisch jede mögliche Elektrodenkombination zur Messung des elektrischen Widerstandes. Dabei wird der Elektrodenabstand a sukzessiv vergrößert, was zu einer größeren Eindringtiefe führt. Das Ergebnis sind Messpunkte mit einem Wert für ρ_a in Ωm , die in der Form eines umgedrehten Trapezes im Untergrund verteilt sind, sogenannte Pseudosektionen (Abb. 2-3). Die Position der einzelnen Messpunkte ergibt sich aus der Geometrie der zur Messung verwendeten Elektrodenanordnung. Die am häufigsten verwendeten Anordnungen sind die Wenner-, Schlumberger- und die Dipol-Dipol-Anordnung. Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Konfiguration wurden ausgiebig erforscht und finden sich z.B. in ASPINALL & GAFFNEY (2001), DAHLIN & ZHOU

(2006) und SZALAI & SZARKA (2008).

Die Punktdaten mit ρ_a -Werten lassen nur wenige Schlüsse auf die tatsächliche vertikale Verteilung des ρ im Untergrund zu. Deshalb werden sogenannte Inversionsprogramme benötigt, die diese Verteilung iterativ berechnen (Kapitel 4.6). In der Anwendung ist die Methode sehr flexibel und wird für eine Vielzahl an Fragestellungen angewendet (Kapitel 2.5). Ein Vorteil gegenüber den bei der elektrischen Widerstandskartierung eingesetzten Messgeräten ist die höhere Flexibilität bei der Stromeinleitung in den Untergrund. Die Syscal Pro kann Spannungen von bis zu 800 V erzeugen, was bei trockenem und steinigem Boden von Vorteil sein kann.

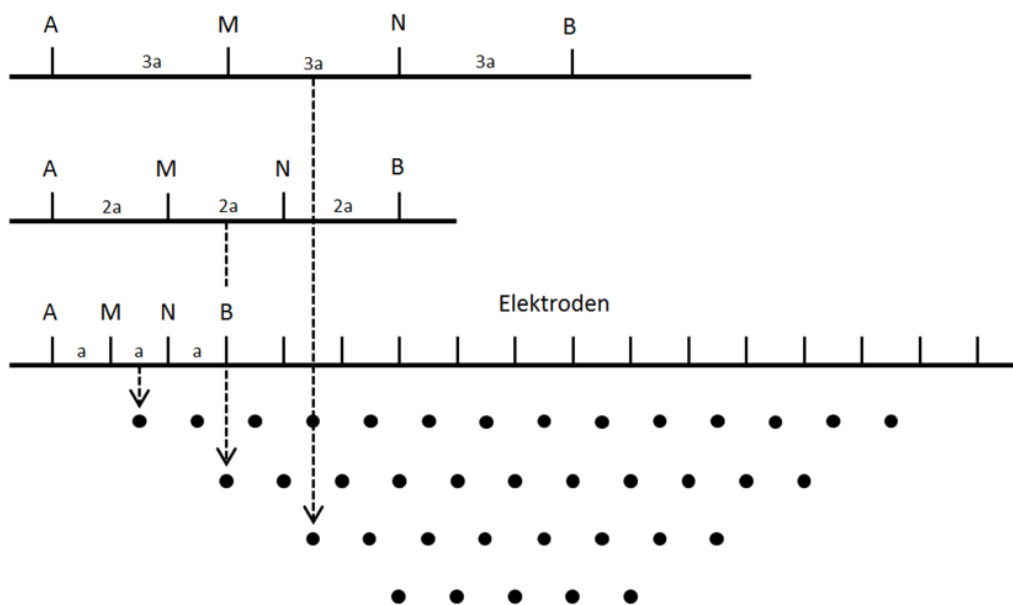


Abbildung 2-3: Schematische Verteilung der Messpunkte bei einer elektrischen Widerstandstomographie. Quelle: verändert nach KNÖDEL et al. 2007.

2.3 Elektromagnetik (EM)

Die Elektromagnetik unterscheidet sich von den beiden erstgenannten Methoden insofern, dass hierbei kein Kontakt zum Boden über Elektroden hergestellt werden muss. Sie erzeugt durch einen Wechselstrom in einem Kabel ein Magnetfeld, das wiederum im Boden ein Magnetfeld in Materialien mit hoher magnetischer Suszeptibilität und in elektrisch leitfähigen Materialien ein elektrisches Feld induziert. Durch mehrere Sensoren kann die Stärke dieser beiden Induktionen gemessen werden und der Anwender erhält dadurch zwei für die archäologische Prospektion sehr nützliche Messwerte, nämlich die magnetische Suszeptibilität und die elektrische

Leitfähigkeit (σ) im Boden.

Moderne Messgeräte verwenden verschiedene Sensoren, deren Ausrichtung und Entfernung von der Induktionsquelle die Messung der elektrischen Leitfähigkeit in verschiedenen Tiefen zur selben Zeit ermöglicht. Das Dualem S21 z.B. liefert Werte für die elektrische Leitfähigkeit in den Tiefen von 0.5, 1.0, 1.5 und 3.2 m für jeden Messpunkt und zusätzlich Werte für die magnetische Suszeptibilität (DE SMEDT et al. 2013). Elektromagnetik wird häufig in Gebieten angewendet, in denen hohe Tongehalte, sowie die Salinität und Wassersättigung des Bodens die Anwendung anderer Methoden, wie z.B. des Bodenradars, verhindern (SAEY et al. 2012; DE SMEDT et al. 2013). Zusätzlich kann die Methode bei tieferliegenden archäologischen Strukturen angewendet werden, da eine sehr hohe Eindringtiefe gewährleistet wird.

2.4 Erfolg und Misserfolg von geophysikalischer Prospektion

Der Erfolg einer geophysikalischen Prospektion zur Detektion archäologischer Strukturen wird vor allem aus archäologischer Sicht oftmals kritisch betrachtet, da die Methoden in manchen Fällen die archäologischen Strukturen nicht oder nur teilweise detektieren können. Hinzu kommen die sogenannten „Ghost Features“, die in der geophysikalischen Prospektion sichtbar sind, in der archäologischen Grabung aber auf Grund fehlender optischer Befunde nicht mehr angesprochen werden können (SIMON et al. 2012). Die Gründe für dieses „Versagen“ sind nur teilweise bekannt, können aber zumindest in den meisten Fällen beschrieben werden. Generell ist der Begriff „Versagen“ jedoch nicht passend. Viel eher handelt es sich dabei um eine physikalische Limitierung der einzelnen Methoden, die zu einer Nicht-Detektion der Strukturen führt. In einer auf den Nordwesten von England bezogenen Untersuchung der Effektivität geophysikalischer Prospektion für archäologische Fragestellungen fasst JORDAN (2009b) die Gründe für eine nicht erfolgreiche Prospektion zusammen:

- Die archäologischen Strukturen sind zu tief unter Bodenmaterial begraben (Kapitel 5.3).

Die Problematik der tief verschütteten archäologischen Strukturen ergibt sich für nahezu jede flächenhaft angewendete Prospektionsmethode. Die Eindringtiefe der elektrischen Widerstandskartierung mit dem Twin-Probe Array wird durch den Abstand der mobilen Elektroden limitiert. Die elektrische Widerstandstomographie ist in dieser Hinsicht weniger anfällig, da der Elektrodenabstand theoretisch immer erweitert werden kann, um größere Eindringtiefen zu erreichen. Jedoch nimmt mit größer werdendem Elektrodenabstand die Auflösung der Pseudosektionen ab.

- Die archäologischen Strukturen werden von natürlichem oder anthropogenem Material überdeckt, das die geophysikalischen Messungen stark beeinflusst.

Dieses Problem tritt vor allem bei Prospektionen mit Magnetometern auf, da Material mit hoher magnetischer Suszeptibilität an der Erdoberfläche oder im Boden Anomalien ausbilden kann, welche die Anomalien der archäologischen Strukturen überdecken. Hierbei sind vor allem anthropogene Eisenschlacken, die zur Düngung auf die Felder gebracht wurden, und vulkanische Gesteine, die über eine hohe natürliche magnetische Suszeptibilität verfügen, zu nennen. An diese Problematik anschließend müssen auch Störobjekte genannt werden, die sich nicht im Boden befinden, wie z.B. metallische Zäune, Gebäude und vorbeifahrende Autos. Bei der Anwendung der Twin-Probe-Konfiguration spielt der ρ der oberflächennahen Schichten eine entscheidende Rolle. Extrem hohe oder niedrige ρ -Werte in diesen Bereichen können zur Maskierung der von einer archäologischen Struktur hervorgerufenen Widerstandsanomalie führen (SCOLLAR et al. 1990).

- Die archäologischen Strukturen stellen aus geophysikalischer Sicht keinen Kontrast zum umliegenden Bodenmaterial dar (Kapitel 5.2.2).

Geophysikalische Methoden messen genau jene physikalischen Eigenschaften, für die sie entworfen wurden. Unterscheidet sich die spezifische physikalische Eigenschaft einer archäologischen Struktur nicht von der des umliegenden Bodens, so wird sie zwar trotzdem von der Methode erfasst, bildet aber keine erkennbare Anomalie aus. Über den Erfolg einer geophysikalischen Prospektion entscheidet deshalb bereits in der Planungsphase das vorhandene Hintergrundwissen über die örtliche Archäologie und die Bodenverhältnisse. Manche Strukturen lassen sich auch nur in einigen wenigen physikalischen Parametern unterscheiden, während sie in anderen Parametern dem umliegenden Boden gleichen. Dementsprechend ist es nicht ungewöhnlich, wenn zwei Methoden unterschiedliche Ergebnisse für dieselbe Untersuchungsfläche liefern. Vor allem bei der kommerziellen Durchführung von geophysikalischen Prospektionen wird aus finanziellen Gründen häufig nur eine Methode angewendet. Im ungünstigsten Fall kann genau diese Methode die archäologischen Strukturen nicht detektieren, während eine andere Methode durchaus erfolgreich sein könnte. Die Wirkung eines solchen Fehlschlags ist gravierend, vor allem aus Sicht der Auftraggeber. Aus Erfahrung äußern sich vor allem die ausführenden Grabungsleiter und Grabungstechniker kritisch zu geophysikalischen Methoden, da sie das zuvor beschriebene „Versagen“ der Methode bereits erlebt haben und sich im schlechtesten Fall der Zeitplan einer Grabung negativ beeinflusst wurde.

- Die archäologischen Strukturen sind zu klein und können durch die Auflösung und Sensitivität der geophysikalischen Methoden nicht erfasst werden.

Grundsätzlich bieten geophysikalische Methoden eine große Bandbreite an Auflösungen und Sensitivitäten, die auch manuell reguliert werden können, aber definitiv in ihrer maximalen Qualität limitiert sind. Im Hinblick auf elektrische Widerstandsmethoden ist die Auflösung zum einen durch den Elektrodenabstand gegeben und vor allem bei der elektrischen Widerstandskartierung durch den Abstand der einzelnen Messpunkte limitiert. Generell sind sehr kleine Elektrodenabstände und ein feinmaschiges Messraster möglich, werden jedoch bei konventionellen Fragestellungen der archäologischen Prospektion als wenig sinnvoll angesehen.

Aus den genannten Gründen müssen für eine effektive Anwendung geophysikalischer Methoden zur archäologischen Prospektion das Potential und die Grenzen der Methoden erforscht und vor allem auch publiziert werden (JORDAN 2009b).

2.5 Forschungsstand

Ausgehend von Eigenpotentialmessungen zur Auffindung von erzhaltigen Schichten im Bergbau des späten 19. Jahrhunderts haben sich die verschiedenen elektrischen Widerstandsverfahren bis zum heutigen Zeitpunkt zu einem der effektivsten und meistangewendeten Prospektionsverfahren in der naturwissenschaftlichen und archäologischen Forschung entwickelt. Die frühe Anwendungs- und Forschungsgeschichte wird ausführlich in verschiedenen Publikationen beleuchtet (JACOBS & MEYER 1992; KERTZ 1999), während in der vorliegenden Arbeit der Forschungsstand seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts und im speziellen die Nutzung von elektrischen Widerstandsverfahren zur archäologischen Prospektion thematisiert werden soll. Als eine der ersten dokumentierten archäologischen Prospektionen mit elektrischen Widerstandsverfahren gelten die Untersuchungen in Williamsburg (Virginia/USA) durch ein kanadisches Unternehmen im Jahr 1938. In den Ergebnissen der Prospektion konnten Widerstandsanomalien angesprochen werden, die jedoch nicht durch eine kurz darauf durchgeführte Grabung verifiziert werden konnten. Dementsprechend handelt es sich zwar um die erste Anwendung der Methode mit dem Vorhaben archäologische Strukturen zu prospektieren, jedoch war die Prospektion nicht erfolgreich (BEVAN 2000). Die erste erfolgreiche Anwendung der Methode ist für das Jahr 1946 dokumentiert. ATKINSON gelang durch die Nutzung eines Widerstandsmessgerätes mit einer Wenner-Anordnung die erfolgreiche Prospektion einer Grubenstruktur in Dorchester-on-Thames (England) (CLARK 1990). In den 1950er und 1960er Jahren wurden die Messegeräte an das neue Anforderungsprofil der

archäologischen Prospektion angepasst, was vor allem zu einer Verkürzung der für einen Datenpunkt nötigen Messzeit führte.

Im Vergleich mit den heute genutzten Prospektionsmethoden wurde das Potential der elektrischen Widerstandsmessungen früh erkannt und die Methode schnell verbessert. SCOLLAR et al. sehen die Gründe hierfür vor allem in den bereits verfügbaren Messgeräten und der kostengünstigen Anschaffung der Ausrüstung, aber auch die einfache Interpretation der Messdaten wird eine Rolle gespielt haben (SCOLLAR et al. 1990). Eine signifikante Weiterentwicklung der Methode entstand durch eine neue Generation von Widerstandsmessgeräten in den 1980er Jahren. Hervorzuheben ist an dieser Stelle vor allem das Geoscan RM4 sowie sein Nachfolger, das RM15 (JORDAN 2009a). Mittlerweile existiert mit dem Geoscan RM85 bereits die dritte Generation dieser Geräte. Einen weiteren Entwicklungsschritt stellen die sogenannten Multiplex-Systeme (z.B. Geoscan MPX15) dar. Sie ermöglichen zeitgleiche Messungen mit mehreren Elektroden im Twin-Probe-Array, wodurch der Zeitaufwand für eine Kartierung verringert werden konnte. In diesem Zusammenhang ist auch die Entwicklung mobiler Quadripol-Messsysteme zu nennen (SCOLLAR et al. 1990; JORDAN 2009b). Für die archäologische Prospektion hat sich die Methode noch nicht durchgesetzt, allerdings konnten bereits gute Ergebnisse bei großflächigen Prospektionen erzielt werden, wie das Beispiel der römischen Stadt Epomanduodurum in Frankreich beweist (BOSSUET et al. 2012). Das für die Geländearbeit eingesetzte Automatic Resistivity Profiling System (ARP) wurde ursprünglich für die Anwendung bei landwirtschaftlichen Fragestellungen entwickelt und wird auch vornehmlich zu diesem Zweck eingesetzt (TABBAGH et al. 2000). Resultat dieser Entwicklung sind immer größere, zusammenhängende Widerstandskartierungen von archäologischen Fundstätten (GAMILI et al. 1999; GAFFNEY et al. 2004; GIBSON & GEORGE 2006; O'ROURKE & GIBSON 2009; PARKYN 2010; HEINZELMANN & JORDAN 2012).

Im Gegensatz zur Widerstandskartierung mit mobilen Elektroden ist für die elektrische Widerstandstomographie (Electrical Resistivity Tomography/ERT oder Electrical Imaging/EI) eine spätere Entwicklung und Nutzung zur archäologischen Prospektion zu beobachten. Obwohl die Methode bereits 1987 eingeführt (SHIMA & SAKAYAMA 1987) und auch zur archäologischen Prospektion eingesetzt wurde (SCOLLAR 1990), wird das Potential der Methode erst zu Beginn der 1990er Jahre erkannt (NOEL & XU 1991; GRIFFITHS & BARKER 1994; HESSE et al. 1997), weil die ersten für geologische Prospektionen entwickelten Multielektrodensysteme und Inversions-Software eine effizientere Datenaquise und leichter interpretierbare Ergebnisse ermöglicht. Die elektrische Widerstandstomographie wird heute zu einer

weiten Spannbreite von Prospektionszielen angewendet. Eine klassische Zielsetzung ist die Prospektion von Steinstrukturen in verschiedenen Kontexten (DOGAN & PAPAMARINOPOULOS 2003; DIAMANTI et al. 2005; DRAHOR 2006; HECHT & FASSBINDER 2006; O'ROURKE & GIBSON 2009; BONGIOVANNI et al. 2011), wobei auf diesem Feld sicherlich Unterkategorien wie die Nutzung von ERT in Gebäuden (TSOKAS et al. 2008; CARDARELLI & DI FILIPPO 2009; COZZOLINO et al. 2013) oder zur Untersuchung des Erhaltungszustandes von über der Erdoberfläche befindlichen Mauern (SASS 2003; MOL & PRESTON 2010; SASS & VILES 2010; TSOURLOS & TSOKAS 2011) angebracht sind. Neben Steinstrukturen können auch die meisten anderen archäologischen Strukturen, wie z.B. Grabhügel (ASTIN et al. 2007; COLLIER et al. 2003; TONKOV & LOKE 2006; PAPADOPOULOS et al. 2010), Hohlräume, wie unterirdische Gänge und Räume (CARDARELLI et al. 2010; ELWASEIF & SLATER 2010; ORLANDO 2013), und Graben- und Grubenstrukturen (MATTHES 2012; MURDIE et al. 2003; BESCOBY & BOWDEN 2013; NOWACZINSKI et al. 2012) mit der Methode prospektiert werden. Einen erweiterten Anwendungsbereich findet die Methode in der Geoarchäologie, Geomorphologie und Geologie, wobei Themenbereiche wie die Permafrostforschung (HAUCK 2001; HAUCK et al. 2003), Naturrisikoforschung (CHANG et al. 2012; VÖTT et al. 2011; WILLERSHÄUSER et al. 2012) und Seismologie und aktive Tektonik (SIMILOX-TOHON et al. 2004; CAPUTO et al. 2003) abgedeckt werden. Ein weiterer vielversprechender Ansatz existiert seit relativ kurzer Zeit durch die Anwendung von schwimmenden Elektroden, wodurch unter Wasser liegende Strukturen prospektiert werden können (PSOMIADIS et al. 2009; PASSARO 2010). Neben der klassischen 2D-Anwendung der Methode entwickelten sich in den 1990er Jahren erste Ansätze zur Nutzung von 3D-Tomographien (DABAS et al. 1994; MAURIELLO et al. 1998). Zum heutigen Zeitpunkt wird die Methode verstärkt zur Lösung von Fragestellungen mit komplexen oder mehrphasigen archäologischen Strukturen angewendet (ARGOTE-ESPINO et al. 2013; LEUCCI et al. 2007; TSOKAS et al. 2009).

Die zur archäologischen Prospektion angewendeten geophysikalischen Verfahren stehen naturgemäß in Konkurrenz zueinander, da eine kosten- und zeiteffektive Arbeit zum Erhalt eines Ergebnisses mit maximaler Qualität oberste Priorität genießt. Der Stellenwert einer Methode lässt sich mit Einschränkungen aus Datenbanken und Publikationen erfassen. In Europa existiert lediglich in Großbritannien ein Trend zur zentralen Erfassung archäologischer Prospektionsdaten, was sich in den Datenbanken des English Heritage (The English Heritage Geophysical Survey Database) und der Bournemouth University (Archaeological Investigations Project) widerspiegelt. Die Datenbank des English Heritage wurde 2011 mit dem OASIS-Projekt (Datenbank für Schottland) zusammengeführt und bildet seitdem die größte Datenbank für Großbritannien. In der Datenbank befinden sich Metadaten von über

2700 Prospektionen seit den 1960er Jahren. Abbildung 2-4 gibt den prozentualen Anteil der Methoden an den Gesamtprospektionen in England und Schottland in 3-Jahres-Intervallen für den Zeitraum von 1996 bis 2013 wieder. Von 1996 bis 2004 ist die elektrische Widerstandskartierung nach der Magnetometrie die am häufigsten genutzte Methode. Ab 2005 kehrt sich der zuvor positiv ausgerichtete Trend um und bis 2013 hat sich die prozentuale Nutzung der Methode mehr als halbiert. Eine ähnliche Entwicklung ist für alle weiteren Methoden ablesbar, wohingegen die Nutzung der Magnetometer-Prospektionen stark anstieg und bis 2013 mehr als 80% der aufgenommenen Prospektionen mit dieser Methode durchgeführt wurden. Der Anstieg der Magnetometer-Nutzung in Großbritannien ist auf die Vorgabe der lokalen Behörden zurückzuführen, dass alle Prospektionen, die im Vorfeld von Bauvorhaben durchgeführt werden, in der Datenbank dokumentiert werden. Da es sich dabei hauptsächlich um die Arbeit kommerzieller Firmen handelt, wird die kosteneffektivste Methode zur schnellstmöglichen Abdeckung großer Flächen eingesetzt, wobei es sich um Magnetometer-Systeme mit mehreren Sensoren handelt. Die Datenbank repräsentiert damit hauptsächlich kommerzielle Anwendungen von geophysikalischen Methoden. Dabei wird die Arbeit von nicht-kommerziellen Gruppen wie Universitäten und archäologischen Vereinen, die auch andere Methoden einsetzen, nur zu einem geringen Prozentsatz in der Datenbank vertreten. Das Interesse an der elektrischen Widerstandstomographie ist zudem relativ gering, da bei kommerziellen Anwendungen meistens flächenhafte Kartierungen gefragt sind.

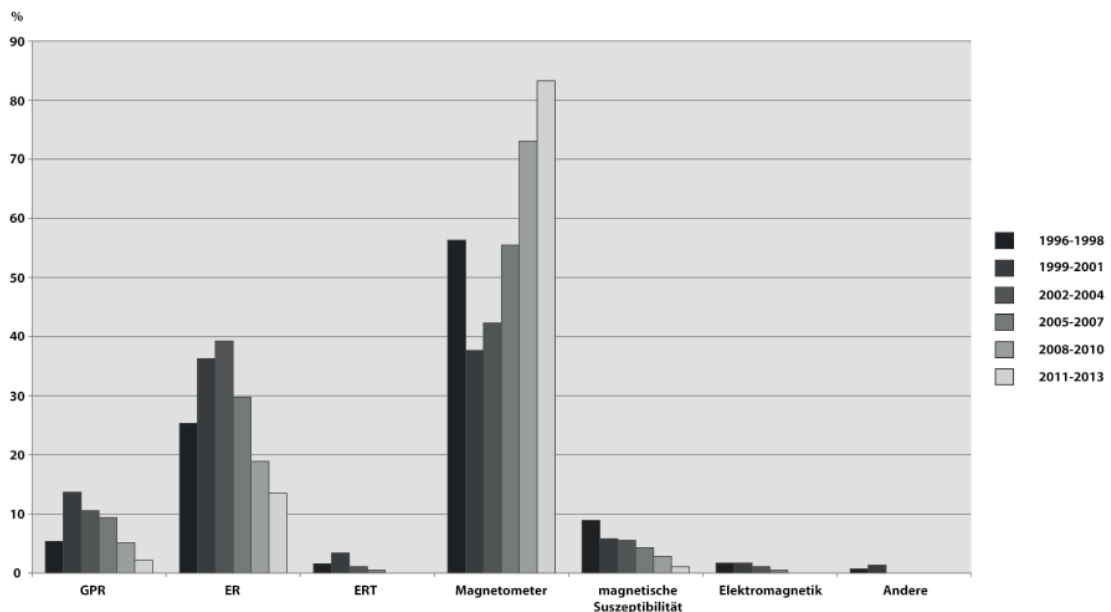


Abbildung 2-4: Verwendung der verschiedenen Prospektionsmethoden in England und Schottland auf Grundlage der English Heritage Geophysical Survey Database. Stand: Dezember 2013.

Regionale Interpretationen der Methodennutzung müssen auch vor dem Hintergrund der naturräumlichen Gegebenheiten betrachtet werden (JORDAN 2009b). Am Beispiel von Großbritannien spielt vor allem die hohe Bodenfeuchte bei der Methodenwahl eine enorme Rolle. Resultat ist ein relativ geringer Anteil an Prospektionen mit dem Bodenradar. Eine Übersicht über das Forschungsinteresse liefert die Auswertung der im Fachjournal *Archaeological Prospection* erschienenen Aufsätze (Abb. 2-5). Um einen zuverlässigen Datensatz zu erhalten, wurden methodische Diskussionen sowie die Anwendungen der Methode zusammengefasst. Klar ablesbar ist seit 1999 ein gesteigertes Forschungsinteresse an Bodenradar und Fernerkundungsmethoden, wobei zu beachten ist, dass beiden Methoden eine Sonderausgabe gewidmet wurde. Eine weitere interessante Entwicklung ist das gesteigerte Interesse an elektromagnetischen Methoden seit 2008. Vermutlich liegen die Gründe hierfür auch in der effektiven Flächenabdeckung der Methode sowie den guten Ergebnissen bei elektrisch leitfähigen Böden. Die Anzahl der Publikationen, in denen die elektrische Widerstandskartierung thematisiert wird, hat seit 1996 kontinuierlich abgenommen und pendelt sich seit dem Zeitraum zwischen 2008 bis 2010 bei 5% ein. Das von JORDAN (2009b) vermutete gesteigerte Forschungsinteresse an der Methode durch die Verfügbarkeit von mobilen Quadripol-Messsystemen wird nicht ersichtlich. Die elektrische Widerstandstomographie hingegen ist auf Grund ihrer variablen Anwendbarkeit ein beliebtes Forschungsobjekt. In jedem der betrachteten 3-Jahres-Abschnitte wurden zwischen 13 und 16% der Prospektionen mit der Methode durchgeführt, womit die ERT sich nach der Magnetometrie und dem Bodenradar an dritter Stelle etabliert hat.

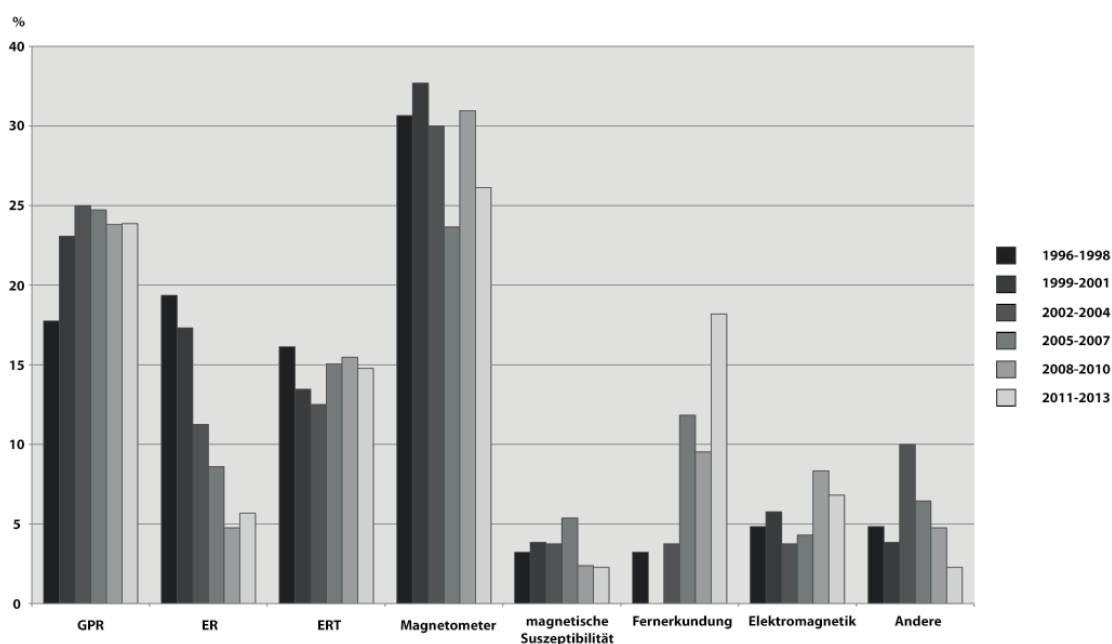


Abbildung 2-5: Prozentuale Verteilung der untersuchten Prospektionsmethoden in der Fachzeitschrift *Archaeological Prospection*. Quelle: International Society for Archaeological Prospection. Stand Dezember 2013.

3 Der elektrische Widerstand von Böden und archäologischen Strukturen

Der ρ bzw. die σ von Böden und archäologischen Strukturen ist das Resultat einer Kombination verschiedener bodenphysikalischer und bodenchemischer Eigenschaften (SAMOUËLIAN et al. 2005). In Böden findet der Stromfluss hauptsächlich durch das Bodenwasser und die darin befindlichen Ionen statt, die sich unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes im Boden ausrichten und bewegen (RHOADES et al. 1999; JORDAN 2009a). Demnach stellt die Anzahl und Konnektivität wassergefüllter Poren sowie die Konzentration an gelösten Ionen im Bodenwasser einen wichtigen Faktor bei der Ausbildung des ρ von Böden dar (FRIEDMAN 2005; SAMOUËLIAN et al. 2005). Die Mobilität der Ionen verändert sich zudem mit der Temperatur und wirkt sich damit auf den ρ von Böden aus (HESSE 1966a). Eine weitere Möglichkeit des Stromflusses durch Böden ergibt sich durch die Schichtflächenleitfähigkeit an den geladenen Oberflächen von Tonmineralen (ROBERTS & WILDENSCHILD 2004).

Der Wassergehalt und die Konnektivität von wassergefüllten Poren werden durch die Bodenstruktur bestimmt, wobei Makro- und Mikrostruktur von Bedeutung sind (SCHACHTSCHABEL et al. 1984). Veränderungen der Bodenstruktur durch Trocknungsprozesse oder anthropogene Störungen, insbesondere bei tonreichen Böden, können zur Veränderung der Bodenstruktur und folglich auch des ρ der Böden führen (SÉGER et al. 2009).

FRIEDMAN (2005) unterteilt diese Bodeneigenschaften in drei Gruppen:

- Gruppe 1 besteht aus Faktoren, deren Einfluss auf den ρ durch ihre volumetrische Ausprägung veränderlich ist, wie z.B. Porosität, volumetrischer Wassergehalt (θ) und Struktur.
- Gruppe 2 besteht aus den Faktoren der festen Bodenbestandteile, wie Korngrößenverteilung, Kationenaustauschkapazität und Partikelform.
- Gruppe 3 beschreibt die Eigenschaften der Bodenlösung wie die Ionenkonzentration, Zusammensetzung der Kationen und Temperatur.

Ein der Bodenstruktur nahestehender Faktor ist das Bodenskelett. Im Zusammenhang mit archäologischen Fundstellen sind auch Keramik und Ziegelstücke zu berücksichtigen. Sie stellen im Boden Inklusionen mit einem hohen ρ dar. Da elektrische Widerstandsmessungen homogenisierte Werte für einen Boden ergeben, haben die Inklusionen einen Einfluss auf den Gesamtwiderstand (REY et al. 2006).

Die zum ρ von Böden beitragenden Parameter sind weitestgehend bekannt, die Qualität ihres Beitrages wird jedoch in manchen Fällen noch diskutiert oder unterschiedlich interpretiert. In der vorliegenden Arbeit steht vor allem die Erfassung dieser Parameter in archäologischen Grabungen und ihre Analyse durch geowissenschaftliche und geoarchäologische Techniken im Vordergrund, um realistische Eingangswerte für elektrische Widerstandsmodelle zu erhalten. Ein besonderes Augenmerk gilt den Parametern, die einer saisonalen oder langfristigen Veränderung unterliegen.

3.1 Wassergehalt

Die Beziehung zwischen Wassergehalt und ρ von Böden und Gesteinen wird erstmals durch die Arbeiten von ARCHIE (1942) an wassergesättigten Sandsteinen beschrieben und quantifiziert. Die Wassersättigung von Böden und Gesteinen führt dazu, dass eine Vielzahl kontinuierlicher Pfade mit hoher elektrischer Leitfähigkeit im Porenvolumen entstehen, die maßgeblich die elektrische Leitfähigkeit eines Bodenvolumens beeinflussen. Besonderen Ausdruck erhält die Leitfähigkeit der flüssigen Phase im Boden durch das Leitfähigkeitskonzept von RHOADES et al. (1989), bei dem wassergefüllte Makroporen einen von zwei dominanten Faktor darstellen (Kapitel 4.3.1).

Das Bodenwasser wird als das Wasser definiert, das bei der Trocknung bei 105°C vom Boden getrennt werden kann (SCHACHTSCHABEL et al. 1984). Im Zusammenhang mit elektrischen Widerstandsmessungen ist eine raumbezogene Komponente für die Angabe des Wassergehaltes notwendig, um eine Vergleichbarkeit der Messungen zu ermöglichen. Gebräuchlich ist die Angabe des volumetrischen Wassergehaltes in %. Der Wassergehalt von Böden kann nicht als statischer Parameter betrachtet werden, da der Wasserhaushalt durch die jahreszeitlich gesteuerte Evaporation und das Abfließen von Bodenwasser in tieferliegende geologische Grundwasserleiter von einem kontinuierlich ablaufenden Prozessgefüge abhängig ist (SCHACHTSCHABEL et al. 1984). Der volumetrische Wassergehalt im Boden unterliegt im Vergleich zu den anderen hier präsentierten bodenphysikalischen und bodenchemischen Parametern der stärksten jahreszeitlichen Veränderung.

Die elektrische Leitfähigkeit durch die flüssige Phase des Bodens wird einerseits vom Anteil des Bodenwassers im Porenvolumen des Bodens (welches sich aus der Porosität des Bodens ergibt), andererseits auch durch die Qualität des Bodenwassers beeinflusst. In diesem Fall ergibt sich die Qualität durch die im Bodenwasser gelösten Salze, die zur elektrolytischen Leitfähigkeit beitragen (Kapitel 3.5). Die bei der elektrolytischen Leitfähigkeit ausschlaggebende Mobilität der im Wasser gelösten Ionen wird durch die

Temperatur beeinflusst (Kapitel 3.6) (SAMOUËLIAN et al. 2005).

Zusätzlich muss berücksichtigt werden, wie das Bodenwasser im Boden gebunden wird. Zum einen befindet sich Wasser mehr oder weniger frei in den Makroporen des Bodens, zum anderen kann Wasser auch in den Mikroporen durch chemische und physische Prozesse stärker gebunden sein (JORDAN 2009a). HAUCK & SCHEUERMANN (2005) beschreiben den Beitrag von Kapillarwasser, freiem Wasser und Haftwasser zur elektrischen Leitfähigkeit als gleichbedeutend, sehen aber einen geringeren Beitrag des Haftwassers zur dielektrischen Leitfähigkeit gegeben. Die angeführten Varianten des Bodenwassers werden auch in den Transferfunktionen von RHOADES et al. (1999) aufgegriffen.

Die Beziehung zwischen Wassergehalt und elektrischer Leitfähigkeit wird heute routinemäßig zur Ableitung des Wassergehaltes im Boden aus elektrischen Widerstandsmessungen herangezogen und als nicht-invasive Erkundung des Untergrundes bei bautechnischen und landwirtschaftlichen Fragestellungen eingesetzt (SCHWARTZ et al. 2008; BRUNET et al. 2010; GARRÉ et al. 2012; CHRÉTIEN et al. 2014). Der Einfluss des Wassergehaltes auf elektrische Widerstandsmessungen zur archäologischen Prospektion wurde zwar diskutiert (HESSE 1966b; SCOLLAR et al. 1990; CLARK 1990), bislang jedoch nur in seltenen Fällen über einen deskriptiven Ansatz hinaus weiterverfolgt (JORDAN 2009a; FRY et al. 2012; FRY 2014).

3.2 Bodenstruktur

Unter Bodenstruktur wird die räumliche Anordnung der festen Bodenbestandteile verstanden. Die Bodenstruktur kann in verschiedenen Maßstäben betrachtet werden, zum einen dem optisch leicht ansprechbaren Makrogefüge, zum anderen dem nur unter Vergrößerung sichtbaren Mikrogefüge (SCHACHTSCHABEL et al. 1984; SÉGER et al. 2009). Die Ausprägung der Bodenstruktur reicht von Einzelkorngefügen in sandigen Böden über relativ ungegliederte Kohärentgefüge bis hin zur Bildung von verschiedenen Formen von Aggregatgefügen, die eine Vielzahl an geometrischen Formen umfassen können (SCHACHTSCHABEL et al. 1984). Besonders in Pflughorizonten ist die Bodenstruktur durch die mechanische Beanspruchung äußerst heterogen ausgeprägt, was ein Problem bei der repräsentativen Beprobung zur Ermittlung der Bodenstruktur darstellt. Bei einer zu kleinen Probenmenge und einer ungünstigen Position der Bodenprobe im Bodenprofil ist nur eine geringe Repräsentativität der Bodenprobe mit Bezug auf die Bodenstruktur gegeben. Die ideale Probengröße, das sogenannte Representative Elementary Volume (REV) ist erreicht, wenn bei einer Vergrößerung keine signifikante Veränderung des Wertes für Porosität oder Lagerungsdichte

beobachtet werden kann (BEAR 1979).

BESSON et al. (2004) beschreiben den Einfluss von anthropogener Verdichtung des Bodens durch landwirtschaftliche Maschinen auf den elektrischen Widerstand des Bodens. Die verdichteten Bereiche unter landwirtschaftlichen Fahrspuren zeigen einen niedrigeren ρ als die poröseren Bereiche des Bodens (bei gleichbleibendem volumetrischem Wassergehalt und Salinität) und stehen somit in direktem Zusammenhang mit der Lagerungsdichte, die in diesem Fall zur Beschreibung der Struktur herangezogen wurde. SÉGER et al. (2009) verwenden Elektrodenanordnungen mit kleinen Elektrodenabständen zur Prospektion von Fragmentgefügen in landwirtschaftlichen Pflughorizonten, die sich vom umliegenden Bodenmaterial durch die Struktur abgrenzen. Eine großflächige Verdichtung des zu prospektierenden Bodens kann aus archäologischer Sicht möglicherweise zur Verbesserung der Prospektionsergebnisse von elektrischen Widerstandskartierungen eingesetzt werden. JORDAN (2009a) vergleicht zwei Prospektionsflächen in Italice, wobei auf der verdichteten Prospektionsfläche bessere Ergebnisse erzielt wurden.

In den Pedotransfer-Funktionen zur Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens fließt die Bodenstruktur entweder als Lagerungsdichte (RHOADES et al. 1999) oder Porosität (ARCHIE 1942; WAXMAN & SMITS 1968; SEN et al. 1988) ein. Hierbei muss erneut auf die Verknüpfung zwischen elektrolytischer Leitfähigkeit durch Wasser im Porenraum und der Bodenstruktur hingewiesen werden, da diese Beziehung einer jahreszeitlich gesteuerten Veränderung unterliegen kann. Besonders in tonreichen Böden kommt es je nach Wasserhaushalt zur Ausbildung von Trockenrissen oder dem Aufquellen von Tonmineralen, wodurch die Bodenstruktur und folglich auch die Struktur und Konnektivität der elektrisch leitfähigen Pfade durch wassergefüllte Makroporen nachhaltig verändert werden kann.

3.3 Bodenskelett

Die Heterogenität von Böden ist nicht ausschließlich durch die Struktur des Feinbodens begründet. Viele Böden, vor allem in Gebieten in denen Festgestein oder grobkörnige Sedimente als Ausgangsmaterial der Bodenbildung fungieren, verfügen über ein ausgeprägtes Bodenskelett. Diese laut Definition (SCHACHTSCHABEL et al. 1984) mineralischen Bestandteile mit Korngröße > 2 mm stellen in der Regel einen Körper mit hohem ρ dar, was je nach Größe der Inklusion einen Einfluss auf den ρ des Bodenvolumens hat. REY et al. (2006) konnten experimentell nachweisen, dass die elektrische Widerstandstomographie (ERT) den ρ eines Bodenvolumens mit Bodenskelettanteilen von 0-40% korrekt homogenisiert.

Bei der Berechnung des Einflusses von Inklusionen auf den ρ von Böden wird häufig auf die für geologische Fragestellungen entwickelten Beziehungen zwischen den elektrisch isolierenden Festbestandteilen von Sandsteinen und einer in ihrem Porenraum befindlichen, leitfähigen Flüssigkeit zurückgegriffen (ARCHIE 1942). Die meisten Weiterentwicklungen beziehen auf dieses sogenannte ARCHIE Gesetz (Kapitel 4.3).

Bei archäologischen Fundstellen ist die Heterogenität des Bodens im Hinblick auf Inklusionen noch einmal differenzierter zu betrachten. Zu den natürlich vorkommenden Inklusionen aus dem Ausgangsgestein kommen Materialien wie Keramik- und Ziegelbruch, Steinmaterial aus Mauerstrukturen und Knochensubstanz hinzu, welche relativ unregelmäßig im Boden verteilt sind. Möglich sind aber auch intentionell eingebrachte Inklusionen, z.B. Keramikkonzentrationen in Abfallgruben (GOLDBERG & MACPHAIL 2006). Bei der Betrachtung von bestimmten Mauerstrukturen spielt die Kombination von Inklusionen und Feinboden eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Die Annahme, es handle sich bei einer Mauerstruktur um einen aus geophysikalischer Sicht homogenen Körper, ist in manchen Fällen nicht zutreffend (Kapitel 5.1).

3.4 Textur

Die Textur des Bodens stellt einen direkten Faktor für die elektrische Leitfähigkeit von Böden dar, und kann zur Charakterisierung anderer Parameter der elektrischen Leitfähigkeit herangezogen werden. Wie in Kapitel 3 erläutert, findet die Schichtflächenleitfähigkeit entlang der Oberflächen von Tonmineralen statt, deren prozentualer Anteil am Bodenvolumen durch die Korngrößenverteilung ermittelt werden kann und in der Transferfunktion von RHOADES et al. (1999) eine dominante Rolle spielt. Außerdem steht die Textur in einem Zusammenhang mit Lagerungsdichte, Porosität und Ausbildung verschiedener geometrischer Bodenstrukturen. Zusätzlich spielt die Geometrie der einzelnen Komponenten, bei Böden die Form der einzelnen mineralischen Bestandteile, eine Rolle bei der Ausprägung der elektrischen Leitfähigkeit eines gemischten Mediums (McLACHLAN 1990).

3.5 Salinität

Die durch gelöste Salze im Bodenwasser hervorgerufene elektrolytische Leitfähigkeit ist ein maßgeblicher Faktor für die elektrische Leitfähigkeit von Böden (FRIEDMAN 2005). Der Begriff Salinität bezieht sich auf die Konzentration von gelösten anorganischen Substanzen im Bodenwasser sowie die festen, aber löslichen Salze im Boden, wie z.B. Natrium, Magnesium, Calcium, Kalium, Chlorid, Sulfate,

Hydrogencarbonate, Nitrate und Carbonate (RHOADES et al. 1999). Die ungelösten Salze stehen im Zusammenhang mit der Kationenaustauschkapazität des Bodens (FRIEDMAN 2005), die sich aus Tongehalt, Aufbau der Tonminerale und der organischen Substanz im Boden ergibt (SCHACHTSCHABEL et al. 1984). Durch diesen Effekt kommt es zur Schichtflächenleitfähigkeit an den geladenen Oberflächen von Tonmineralen (TABBAGH & COSENZA 2006).

Die Anwesenheit von gelösten Salzen im Bodenwasser resultiert hauptsächlich aus einer natürlichen, externen Zufuhr über das Regenwasser oder durch anthropogene Bewässerungssysteme. Aber auch durch das anstehende Gestein, wie z.B. marine Ablagerungen, können Salze durch Verwitterung in die Böden gelangen (SCHACHTSCHABEL et al. 1984). Durch den steigenden Bedarf an Nahrungsmitteln müssen immer mehr Flächen durch Bewässerung landwirtschaftlich nutzbar gemacht werden. Die Bewässerung führt dazu, dass dem Boden immer mehr Salze zugeführt werden, die bei einer schlechten Entwässerung des Bodens zur Versalzung und Verschlechterung der Bodenqualität führen (RHOADES et al. 1999). Da zwischen der Leitfähigkeit des Bodenwassers und der Salinität eine direkte Beziehung besteht, kann die Messung der elektrischen Leitfähigkeit an Bodenproben oder im Gelände angewendet werden, um gefährdete Versalzungsbereiche zu identifizieren und durch Entwässerungssysteme darauf zu reagieren (RHOADES et al. 1976; CORWIN & LESCH 2003).

Extreme Fälle von Salinität in Böden sind vor allem in ariden Gebieten mit Bewässerung und gleichzeitig hoher Evaporation anzutreffen (CORWIN & LESCH 2003). Hier kommt es zur Ausbildung von Solonchaken, die durch Salzkrusten an der Oberfläche oder Salzanreicherungen in den B-Horizonten charakterisiert sind (SCHACHTSCHABEL et al. 1984). Eine jährliche Variation der Salinität in Böden konnte bislang nur in küstennahen Gebieten mit hohem externen Eintrag von Salzen (HOSSAIN et al. 2012; HE et al. 2014) oder landwirtschaftlich bewässerten Böden in ariden Zonen (AKBAR et al. 2014) nachgewiesen werden. In Mitteleuropa ist die Salinität von Böden an küstenfernen Standorten nur gering ausgeprägt und unterliegt keiner nennenswerten saisonalen Variabilität, ausgenommen einige Bereiche im spanischen Inland und Beckenlagen in Ungarn und Rumänien (TÓTH et al. 2008).

3.6 Temperatur

Der ρ von Böden wird durch die Bodentemperatur beeinflusst, da bei steigender Temperatur die Mobilität von Ionen im Bodenwasser zunimmt, was zu einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit führt (SAMOUËLIAN et al. 2005). In Böden kann die

Veränderung der Temperatur in zwei zeitlichen Maßstäben stattfinden: täglich oder jährlich (HESSE 1966b; SAMOUËLIAN et al. 2005). Die tägliche Variation ist eng an die Intensität der Sonneneinstrahlung gebunden und erreicht ihr Maximum in Mitteleuropa am frühen Nachmittag (HESSE 1966b; SCOLLAR et al. 1990). In den oberen 10 cm des Bodenprofils ist die stärkste tägliche Temperaturveränderung zu beobachten. Sie nimmt mit zunehmender Tiefe ab (SCHACHTSCHABEL et al. 1984; BREVIK et al. 2004). Der Effekt der täglichen Temperaturveränderung auf den ρ von Böden konnte experimentell als vernachlässigbar nachgewiesen werden (BREVIK et al. 2004). Bei der Verwendung von konventionellen Elektrodenabständen und einer entsprechend hohen Magnitude der durch archäologische Strukturen verursachten Anomalien ist der Einfluss auch bei der archäologischen Prospektion gering und dementsprechend vernachlässigbar (SCOLLAR et al. 1990).

Die jahreszeitliche Veränderung der Bodentemperatur ist in Amplitude und Eindringtiefe stärker ausgeprägt als die tageszeitliche Veränderung (SCHACHTSCHABEL et al. 1984). Der Effekt dieser langfristigen Veränderungen auf den ρ des Bodens ist dementsprechend größer und muss bei der Planung und Interpretation von elektrischen Widerstandskartierungen zur archäologischen Prospektion berücksichtigt werden (HESSE 1966b; SCOLLAR et al. 1990). Der jährliche Temperaturgang ist ähnlich wie der tägliche Temperaturgang sinusförmig ausgeprägt und nimmt mit zunehmender Tiefe ab (SCHACHTSCHABEL et al. 1984). Er wird durch das thermische Absorptionsvermögen des Bodens lokal beeinflusst, das wiederum in Abhängigkeit von Bodenfarbe, Bodenstruktur, Korngröße, Wassergehalt, Humusgehalt und Vegetation steht (SCHACHTSCHABEL et al. 1984; CLARK 1990; AALTONEN 2001).

Eine besondere Rolle bei der Beurteilung von elektrischen Widerstandsmessungen nehmen extrem niedrige Bodentemperaturen unter dem Gefrierpunkt ein. Die Mobilität der Ionen im Bodenwasser nimmt beim Übergang in den festen Aggregatzustand rapide ab, was den Stromfluss durch das Bodenwasser erheblich einschränkt (HESSE 1966; SCOLLAR et al. 1990). Bei Widerstandskartierungen führt ein durch Eis in den oberen Bodenschichten hoher Kontaktwiderstand zu einer Maskierung von Widerstands anomalien und einer erheblichen Erhöhung des Hintergrundrauschens (CLARK 1990).

Der Einfluss von Temperaturveränderungen auf die elektrische Leitfähigkeit von Böden ist im Vergleich mit anderen saisonal variierenden Faktoren wie dem Bodenwasser und der Bodenstruktur nur schwer zu quantifizieren. Da Prozesse wie Evaporation und die Bildung von Trockenrissen temperaturgesteuert ablaufen, aber einen entgegengesetzten Einfluss auf den ρ ausüben, kann der Einfluss

der Bodentemperatur durch Monitoring im Gelände nur bedingt nachgewiesen werden (CLARK 1990; JORDAN 2009a). Unter kontrollierten Laborbedingungen an wassergesättigten Proben kann der Einfluss von Temperaturveränderungen zwar evaluiert werden (BESSON et al. 2008), jedoch ist der wassergesättigte Zustand des Bodens im Gelände nur phasenweise während länger anhaltenden, humiden Phasen in den Wintermonaten anzutreffen. Bei ungesättigten Bodenproben ist die Beziehung zwischen ρ und Temperatur komplexer, da bei sinkendem Wassergehalt die Bedeutung der Schichtflächenleitfähigkeit an Tonmineralen zunimmt, was jedoch bei den meisten Formeln zur Temperaturkorrektur nicht berücksichtigt wird (BESSON et al. 2008).

Der Einfluss von Temperaturveränderungen auf die Ergebnisse von elektrischen Widerstandskartierungen wird weitestgehend als ernstzunehmender Parameter angenommen, jedoch existieren unterschiedliche Auffassungen bezüglich des Ausmaßes. CLARK (1990) verweist auf die Probleme bei Bodenfrost, spricht jedoch den oberflächennahen Temperaturveränderungen nur einen geringen Einfluss zu, der im Vergleich mit der Bedeutung des Bodenwassers als Faktor für den ρ von Böden in den Hintergrund tritt. Ähnliche Schlussfolgerungen lieferten auch die vorläufigen Ergebnisse des intensiven Monitorings von archäologischen Strukturen im Zuge des DART-Projekts (FRY et al. 2012; FRY 2014). SCOLLAR et al. (1990) merkt zudem an, dass die meisten archäologischen Strukturen in einer Tiefe liegen, in der die Temperaturveränderung nur langsam und mit geringer Amplitude verläuft, was zu einem geringen Einfluss der Temperatur in der archäologischen Stratigraphie auf den elektrischen Widerstand hindeutet. Gleichzeitig muss aber berücksichtigt werden, dass bei den elektrischen Widerstandsmessungen durch Potentialmessungen über Elektroden an der Erdoberfläche durchgeführt wird und keine direkten elektrischen Widerstandsmessungen an den archäologischen Strukturen selbst stattfinden. Diese Messungen des ρ_a integrieren dementsprechend die Temperaturbedingungen an der Oberfläche in den Gesamtwiderstand bis zur maximalen Eindringtiefe (SCOLLAR et al. 1990).

Die Problematik des Temperatureinflusses auf die elektrische Leitfähigkeit spielt auch bei bodenkundlichen Anwendungen der Methode eine Rolle, wenn über empirisch abgeleitete Transferfunktionen Rückschlüsse von elektrischen Widerstandsmessungen auf bodenphysikalische und bodenchemische Parameter wie Salinität und Wassergehalt durchgeführt werden (Vgl. Kapitel 4.3) (WAXMAN & SMITS 1968; RHOADES et al. 1999). Für diese Arbeiten wurden Formeln zur Korrektur der elektrischen Widerstandsmessungen auf eine Referenztemperatur von 25°C entwickelt, die stark

vereinfacht eine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit von ungefähr 2% pro 1°C Temperaturanstieg berechnen (KELLER & FRISCHKNECHT 1966; RHOADES et al. 1999; BESSON et al. 2008).

3.7 Saisonale variable Parameter

Die Einfluss der beschriebenen physikalischen und chemischen Parameter auf die Prospektionsergebnisse von elektrischen Widerstandsmethoden und die daraus folgende Ableitung von idealen Prospektionsbedingungen geht zumeist auf die Kombination von wiederholten Geländemessungen und Wetterbeobachtungen zurück (AL-CHALABI & REES 1962; HESSE 1966a; HESSE 1966b; CLARK 1980). Eine detaillierte Zusammenfassung und Analyse dieser Studien kann in FRY (2014) gefunden werden. Diese Untersuchungen beschränken sich häufig auf die Analyse von Wetterdaten, wie Niederschlag und Temperatur, und berechnen daraus eine Wasserbilanz, die als Hinweis auf den Wasserhaushalt im Boden herangezogen werden. Sie vernachlässigen häufig aber die tatsächliche Verteilung des volumetrischen Wassergehalts im Boden, der sich nicht ohne weiteres nur aus Wetterbeobachtungen rekonstruieren lässt.

Jüngere Ansätze kombinieren die wiederholten Geländemessungen mit einem intensiven Monitoring der physikalischen und chemischen Parameter, wie z.B. die Messung des Wassergehalts durch in archäologischen Strukturen und Böden installierten TDR-Sensoren (Time Domain Reflectometry) (BODDICE et al. 2013; FRY 2014). Die TDR-Sensoren erlauben über die Messung der Veränderung von hochfrequenten elektromagnetischen Impulsen die Ableitung der elektrischen Leitfähigkeit und Dielektrizitätskonstante, wodurch auch die Bodenfeuchte abgeleitet werden kann. Problematisch ist jedenfalls die Installation der Messsonden, da diese in Bodenprofilen und archäologischen Strukturen eine unvermeidbare Störung der Struktur hervorruft, die möglicherweise spätere hydrologische Abläufe im Bodenprofil beeinflussen könnte (ROTHE et al. 1997). Die Installation der Sonden in steinigen Böden oder Steinstrukturen ist besonders anspruchsvoll und kann zu fehlerhaften Messungen führen (SOUTO et al. 2008).

Generell erlauben diese Studien zwar sehr genaue Analyse der Veränderung des ρ von Böden und archäologischen Strukturen mit Bezug auf die saisonale Veränderung von physikalischen und chemischen Parametern, jedoch beschränken sie sich auf die jeweils untersuchten Fallbeispiele und lassen sich nur auf nahezu identische Fundstellen und Strukturen übertragen.

4 Methoden zur Analyse des elektrischen Widerstandes von Böden und archäologischen Strukturen

Zusätzlich zu den in Kapitel 2 beschriebenen elektrischen Widerstandsmessungen wurden weitere Methoden zur Bestimmung des ρ von Böden und archäologischen Strukturen angewendet. Die Methoden stammen aus unterschiedlichen Forschungsbereichen wie z.B. Bodenkunde, Geophysik, Geoarchäologie und Geologie.

4.1 Elektrische Widerstandsmessungen an Bodenprofilen und Bodenproben

Zur Messung des ρ von ungestörten Bodenproben existieren verschiedene Konzepte. Grundlegend ist die Frage, ob die Messung im Gelände oder unter kontrollierten Bedingungen im Labor stattfinden soll, woraus sich unterschiedliche Anforderungen an das zu verwendende Equipment und die Entnahme der Bodenproben ergeben.

4.1.1 Elektrische Widerstandsmessungen an Bodenprofilen

Die Messung des ρ im Gelände, z.B. direkte Messungen an Boden- oder Grabungsprofilen, kann durch Elektrodenanordnungen mit kleinen Abständen zwischen den einzelnen Elektroden durchgeführt werden. Angewendet wurde eine Wenner-Elektrodenkonfiguration mit einem Elektrodenabstand von 3 bzw. 6 cm. Die unterschiedlichen Elektrodenabstände bieten die nötige Flexibilität bei der Anwendung auf Bodenprofile mit hohem Skelettanteil. Die 4 cm langen Elektroden sind in einem Plastikbalken verschraubt. Im inneren des Balkens verläuft die Verkabelung, die an ein Spannungsmessgerät wie z.B. Geoscan RM15 oder SYSCAL Pro angeschlossen werden kann (Abb. 4-1). Der Geometriefaktor K ergibt sich aus den Elektrodenabständen und ermöglicht die Berechnung des ρ in Ωm nach Formel [2].

$$\rho = 2\pi K \frac{\Delta V}{I} = 2\pi K * R \quad [2]$$

mit $K1 = 0.06$ und $K2 = 0.03$

Bei der Anwendung im Gelände haben sich vor allem Bodenprofile mit hohem Skelettanteil und/oder einer großen Anzahl an Großporen oder Rissen als problematisch erwiesen. Diese Charakterisierung trifft häufig auf den Ap-Horizont zu. Resultat war zumeist ein erhöhter ρ im Vergleich zu den Ergebnissen der ERT und Pedotransfer-Funktionen.

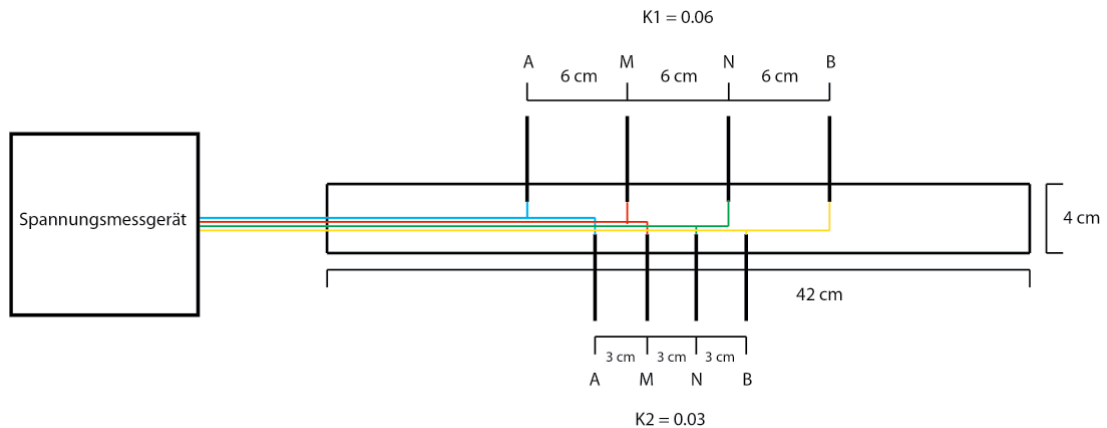


Abbildung 4-1: Schematischer Aufbau der für die elektrischen Widerstandsmessungen an Bodenprofilen verwendeten Elektrodenkonfiguration.

4.1.2 Elektrische Widerstandsmessungen an ungestörten Bodenproben

Die Entnahme ungestörter Bodenproben im Gelände wird bei bodenkundlichen Untersuchungen routinemäßig mit sogenannten Stechzylindern durchgeführt. Um ungestörte Bodenproben für elektrische Widerstandsmessungen zu gewinnen, muss das Material und die Technik jedoch angepasst werden. Besonders mit Bezug auf das Volumen der Probe sollte bei der elektrischen Widerstandsmessung für eine ausreichende Größe der Bodenprobe gesorgt werden. Die verwendeten Plexiglas-Zylinder besitzen ein Volumen von 785.39 cm^3 und sind bereits mit vorgefertigten Elektrodenkanälen ausgestattet. Der Durchmesser und die Höhe des Zylinders betragen jeweils 0.1 m (Abb. 4-2). Ähnliche Zylinder finden Anwendung bei RHOADES et al. (1999), GIAO et al. (2003) und BESSON (2007). Bei den elektrischen Widerstandsmessungen handelt es sich um eine klassische Vier-Punkt-Anordnung mit regelmäßigen Elektrodenabständen. Die Widerstandsmessungen wurden mit einer SYSCAL Pro der Firma IRIS Instruments durchgeführt. Jede Messung wurde mit einem um 90° versetzten Elektrodenaufbau wiederholt, um eine mögliche Beeinflussung durch die Elektrodenposition oder das Elektrodenmaterial erfassen zu können.

Um den spezifischen elektrischen Widerstand ρ berechnen zu können, ist der Geometriefaktor K notwendig (Formel [3]).

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} = K * R \quad [3]$$

Daraus ergibt sich folgende Bestimmungsformel für K (Formel [4]):

$$\frac{\rho}{R} = K \quad [4]$$

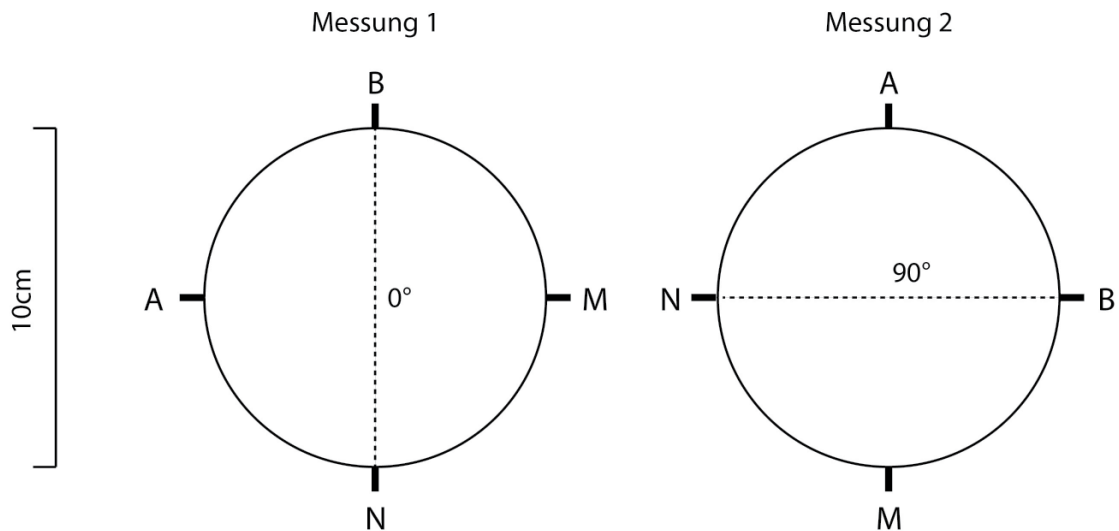


Abbildung 4-2: Schematische Aufsicht auf die Elektrodenkonfiguration bei Messungen an Bodenproben in einem Messzylinder.

Der gesamte Zylinder wurde mit einer Natriumchlorid-Lösung mit bekannter elektrischer Leitfähigkeit gefüllt. Schrittweise wurde die elektrische Leitfähigkeit erhöht, während zeitgleich elektrische Widerstandsmessungen durchgeführt wurden. Das Verhältnis zwischen ρ und R in Abbildung 4-3 lässt sich als lineare Funktion darstellen, die dem Geometriefaktor K entspricht. Jede Messung wurde mit um 90° versetzten Elektroden wiederholt, wodurch sich zwei ähnliche Werte für K ergaben ($K = 0.4019$ m mit $R^2 = 0.9925$ und $K = 0.4013$ m mit $R^2 = 0.9956$). Aus der Kombination der beiden Messreihen ergab sich ein Geometriefaktor von $K = 0.4016$ m mit $R^2 = 0.994$ (Abb. 4-3). Die ermittelten Werte für K korrelieren mit den von BESSON (2007) ermittelten Werten bei einem Zylinder mit einer Höhe von 0.05 m und einem Durchmesser von 0.1 m mit $K = 0.2$ m.

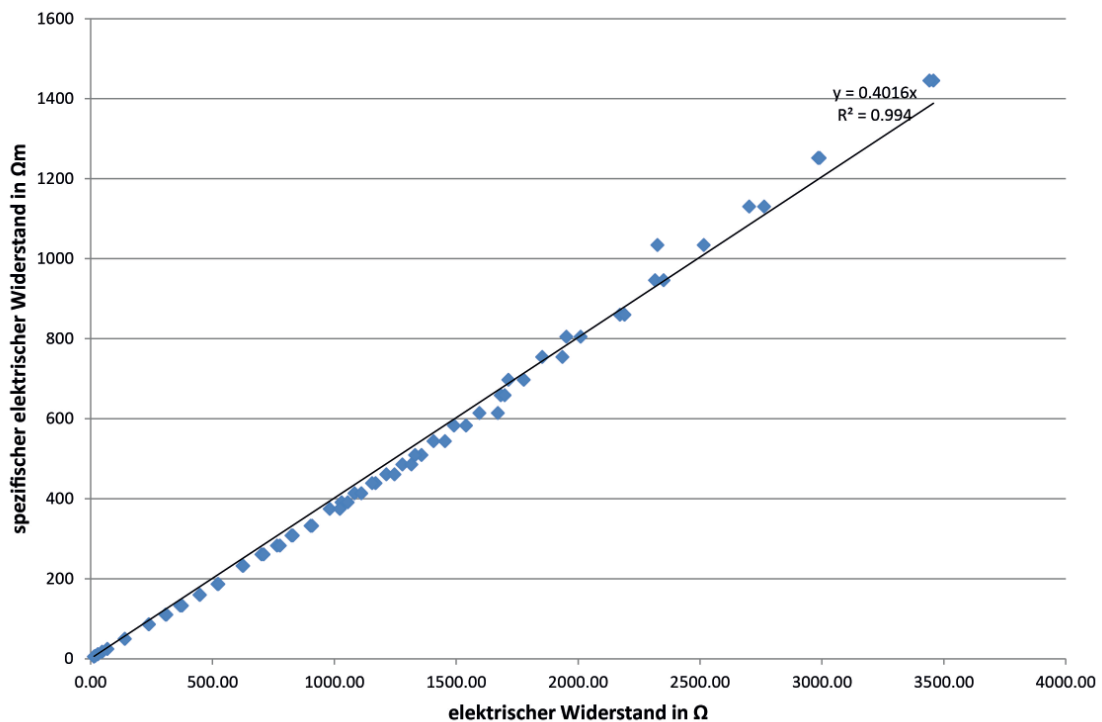


Abbildung 4-3: Ergebnis der Kalibrationsmessungen in den Messzylindern.

Die Entnahme der Bodenproben erfolgte mittels der Plexiglas-Zylinder im Gelände (Vgl. Abb. 4-4 A). Bei der Beprobung von A-Horizonten und Bodenhorizonten mit archäologischer Beeinflussung wurde jedoch deutlich, dass ein hoher Skelettanteil die ungestörte Entnahme der Bodenproben mit dieser Methode stark erschwert und in vielen Fällen komplett verhindert. Eine Anpassung der Größe der Zylinder vereinfachte die ungestörte Probenentnahme in Bodenhorizonten mit hohem Skelettanteil, bedingte jedoch eine geringere Repräsentativität der Probe. Eine weitere Problematik ergibt sich durch Inklusionen mit geringer elektrischer Leitfähigkeit in den Zylindern, da diese in einem kleinen Bodenvolumen einen größeren Einfluss auf die Widerstandsmessung haben als in einem praktisch unbegrenzten Bodenvolumen.

In der Literatur wird die Entnahme der Bodenproben unterschiedliche gehandhabt. Während die meisten Fallstudien ungestörte Bodenproben verwenden (BESSON 2007; WUNDERLICH et al. 2013), untersucht NADLER (1991) die Verwendbarkeit von gestörten Bodenproben, die in den Messbehältern auf die im Gelände angetroffene Lagerungsdichte verdichtet werden. Da die Entnahme von ungestörten Bodenproben bei archäologischen Fundstellen mit Steinstrukturen durch eine hohe Konzentration von Inklusionen teilweise verhinderte, wurde der von NADLER (1991) postulierte Ansatz mit Bodenproben aus Eisenberg rekonstruiert und mit den Ergebnissen der RHOADES-Formel verglichen (Kapitel 5.3). Da in der vorliegenden Arbeit die Veränderung des

Wassergehaltes im Boden als dominanter Einfluss auf die Veränderung des ρ von Böden angenommen wird, wurde abweichend von den von NADLER durchgeführten Experimenten der volumetrische Wassergehalt der Bodenproben durch Trocknung schrittweise verändert. Zeitgleich wurden elektrische Widerstandsmessungen bei variierendem volumetrischem Wassergehalt durchgeführt.



Abbildung 4-4: Entnahme von ungestörten Bodenproben mit einem Messzylinder und Aufbau einer Messbox mit Spannungsmessgerät. Fotos: P. BRENGEL.

Neben den Messzylindern wurden auch Messboxen zur Messung von elektrischen Widerständen an Bodenproben und experimentellen, mehrphasigen Medien durchgeführt. Die rechteckige Box besteht aus Plexiglas und verfügt über vier Elektroden, wobei an den Kopfseiten Messingplatten als Elektroden A und B verwendet wurden (Abb. 4-4 B). Die Elektroden M und N wurden ebenfalls aus Messing angefertigt und mit einem Schrumpfschlauch isoliert, so dass die Messungen nur über die Spitzen der Elektroden durchgeführt wurden. Der Geometriefaktor K wurde in diesem Fall über die Geometrie der Messbox berechnet, wodurch sich $K = 0.03$ ergab.

4.1.3 Temperaturkorrektur

Der ρ von Böden wird durch die Bodentemperatur beeinflusst. Da dieser Effekt die Messungen entscheidend beeinflussen kann, ist eine Korrektur der elektrischen Widerstandsmessung auf eine Referenztemperatur nötig. In der Literatur existiert eine Vielzahl an Konversionsformeln, eine umfassende Analyse findet sich bei BESSON (2007) und BESSON et al. (2008). Heute hat sich eine Korrektur auf die Referenztemperatur $T_m = 25^\circ\text{C}$ etabliert (KELLER & FRISCHKNECHT 1966; RHOADES et

al. 1999). Der Temperaturkoeffizient α kann in einem Bereich von 0.0191 bis 0.025 liegen (HAYASHI 2003), in der vorliegenden Arbeit wurde für $\alpha = 0.025$ gewählt, da dieser Wert hauptsächlich bei geophysikalischen Messungen verwendet wird (KELLER & FRISCHKNECHT 1966; HAYASHI 2003).

$$\rho_{T_m} = \rho_{25^\circ\text{C}} [1 + \alpha (T_m - 25^\circ\text{C})] \quad [5]$$

$\rho_{25^\circ\text{C}}$ = spezifischer elektrischer Widerstand bei einer Referenztemperatur von 25°C

ρ_{T_m} = spezifischer elektrischer Widerstand bei der gemessenen Temperatur

α = Temperaturkoeffizient von 0.025

In der Praxis erwies sich die Ermittlung der Temperatur der Bodenprobe als nur bedingt umsetzbar. Messungen an der Oberfläche der Bodenprobe ergaben zwar realistische Temperaturwerte im Bereich der Raumtemperatur, jedoch wäre eine genaue Messung der Temperatur im Inneren der Bodenprobe nicht ohne eine Störung der Bodenprobe möglich gewesen. Aus diesem Grund wurden die Bodenproben konstant bei einer Temperatur von 25°C in einem Trockenschrank getrocknet und nur zu den elektrischen Widerstandsmessungen entnommen, so dass die Temperaturkorrektur nicht notwendig war.

4.2 Bodenproben und Laboranalysen

Die in der vorliegenden Arbeit analysierten Bodenproben stammen aus archäologischen Grabungen oder Bohrungen. Alle Bodenprofile und Bohrungen wurden auf Grundlage der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AD-HOC-AG Boden 2005) aufgenommen. Die Laboranalysen umfassten, neben den elektrischen Widerstandsmessungen an gestörten und ungestörten Bodenproben, die Bestimmung der für die Transferfunktionen benötigten Eingangsparameter (Kapitel 4.3.2 und 4.3.3). Zusätzlich wurden Messungen der magnetischen Suszeptibilität und der Temperatur an Bodenprofilen durchgeführt.

4.3 Transferfunktionen und Näherungsgleichungen zur Berechnung hydraulischer und elektrischer Eigenschaften von Böden und archäologischen Strukturen

Der Einfluss bodenphysikalischer und bodenchemischer Eigenschaften auf den ρ kann durch Transferfunktionen näherungsweise berechnet werden. Bei der Anwendung dieser Funktionen zur Berechnung von Eigenschaften von Böden spricht man auch von Pedotransfer-Funktionen. Die Formeln berechnen die elektrische Leitfähigkeit

(σ), die der Kehrwert des ρ ist. Die Erforschung dieser Methode ist hauptsächlich auf geologische Fragestellungen im Bereich Lagerstättenerkundung und Hydrogeologie zurückzuführen. Ausgangspunkt der heute verfügbaren Pedotransfer-Funktionen ist die empirisch abgeleitete ARCHIE-Formel (ARCHIE 1942), die das Verhältnis von elektrischer Leitfähigkeit zu physikalischen und chemischen Parametern eines wassergesättigten, porösen Mediums beschreibt.

$$\sigma_a = F \sigma_w \quad [6]$$

mit σ_a als elektrische Leitfähigkeit des Mediums, σ_w als elektrische Leitfähigkeit der porenfüllenden Flüssigkeit und F als sogenanntem Formationsfaktor („formation factor“). Diese Formel lässt sich in verschiedenen Schreibweisen verwenden, eine populäre Formulierung der ARCHIE-Formel ist:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_w} = \frac{1}{F} = \phi^m \quad [7]$$

mit ϕ als Porosität des Mediums und m als materialabhängige, empirische Komponente, die auch als Zementierungsindex bezeichnet wird. Der Wert kann laut Literatur einen Wertebereich zwischen 1.2 und 4.0 annehmen (FRIEDMAN 2005).

Die Formeln [6] und [7] wurden für die Anwendung bei geologischen Fragestellungen konzipiert und implementieren nicht den Einfluss von Tonmineralen auf die elektrische Leitfähigkeit.

Auf dieser Grundlage wurden komplexere Transferfunktionen entwickelt, die eine Verknüpfung von Wassersättigung, Porosität, Leitfähigkeit des Porenwassers und Schichtflächenleitfähigkeit der Tonminerale mit der elektrischen Leitfähigkeit ermöglichen (WAXMAN & SMITS 1968; SEN et al. 1988).

Pedotransfer-Funktionen müssen nicht notwendigerweise auf der Archie-Formel basieren, wie die empirisch abgeleitete Formel von RHOADES (RHOADES et al. 1989, 1999) zeigt, bei der die räumliche Verteilung der elektrischen Leiter im Boden als Pfade elektrischer Leitfähigkeit angesprochen werden. In diesem Fall wird die elektrische Leitfähigkeit von Böden durch drei parallel ablaufende Pfade beschrieben (Abb. 4-5) (CORWIN & LESCH 2003). Pfad 1 ist eine Kombination aus fester und flüssiger Phase und verläuft im mikroporösen Feinmaterial und dem in Mikroporen gebundenen Bodenwasser (JORDAN 2009a). Pfad 2 beschreibt die elektrische Leitfähigkeit durch die im Bodenwasser gelösten Ionen. Im Gegensatz zu Pfad 1 befindet sich das Bodenwasser in durchgängigen Makroporen. Pfad 3 beschreibt die elektrische Leitfähigkeit nur durch

die festen Mineralbestandteile des Bodens. Für die meisten Böden ist Pfad 3 jedoch vernachlässigbar und wird dementsprechend nicht in der Formel berücksichtigt.

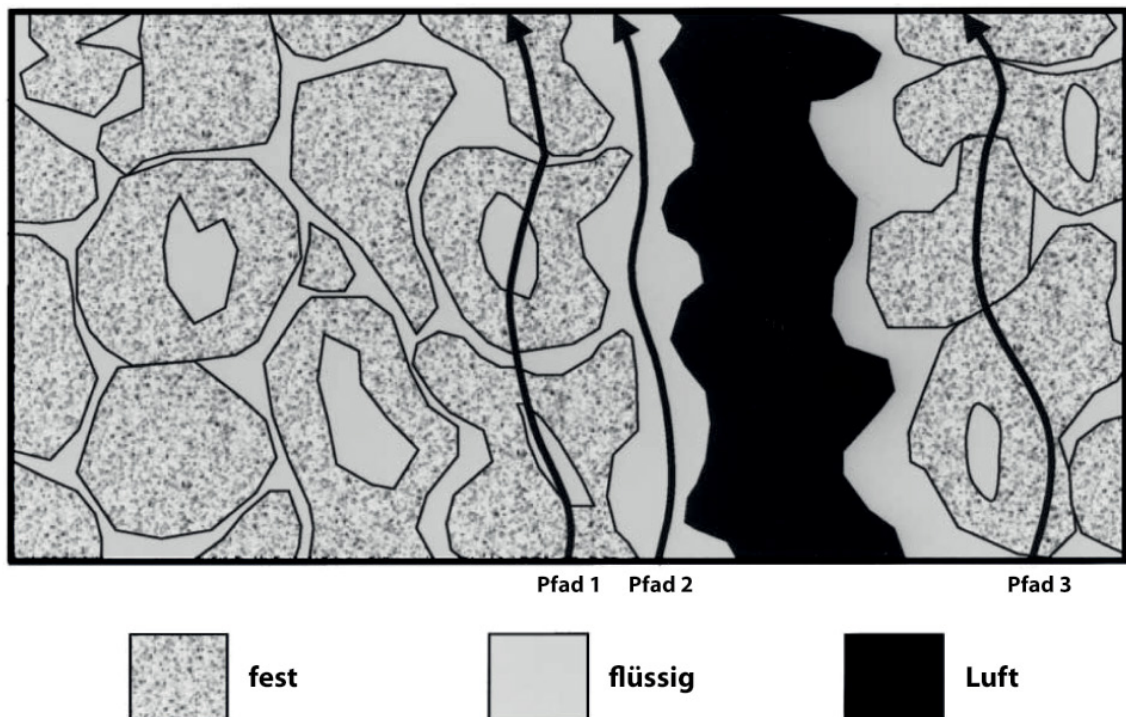


Abbildung 4-5: Schematische Darstellung der in der RHOADES-Formel verwendeten, leitfähigen Pfade. Quelle: verändert nach RHOADES et al. (1989) und CORWIN & LESCH (2003).

Die verschiedenen Funktionen benötigen unterschiedliche Eingangsdaten und produzieren teilweise auch voneinander abweichende Ergebnisse (LALOY et al. 2011). Bislang beziehen sich diese Vergleiche nur auf spezifische Fallbeispiele, so dass nur bedingt Aussagen zu der Leistungsfähigkeit der Funktionen möglich sind. Möglicherweise ist eine Beurteilung der Anwendbarkeit durch Sensitivitätsanalysen durchführbar (BORÚS 1999).

LALOY et al. (2011) vergleichen mehrere Pedotransfer-Funktionen zur Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit eines lehmigen Bodens und legen die nötigen Eingangsdaten sowie die zu ermittelnden freien Parameter dar. Aus dieser Auflistung wird vor allem die Anwendbarkeit der Funktionen ersichtlich, da mehrere Formeln komplexe Eingangsparameter (REVIL-Modell, REVIL & GLOVER 1998) oder eine Vielzahl unbekannter Parameter (Volume-averaging Modell, LINDE et al. 2006) verwenden. Die RHOADES-Formel bietet den Vorteil, dass alle benötigten Eingangsparameter aus Bodenproben bestimmt werden können. Im Gegensatz dazu stehen stärker an die ARCHIE-Gleichung angepasste Formeln, wie z.B. die WAXMAN-SMITS-Formel. Sie verwendet Parameter wie den Zementierungsindex und Formationsfaktor, die sich nicht ohne weiteres aus den physischen und chemischen Parametern der Bodenproben

ableiten lassen. Ein weiteres Argument für die Verwendung der RHOADES-Formel ergibt sich aus der spezifischen Ableitung zur Berechnung des ρ von Böden, während die von der ARCHIE-Gleichung abgeleiteten Pedotransfer-Funktionen zumeist das Anwendungsgebiet Lagerstättenkunde in Festgesteinen tangieren.

Die Wahl der korrekten Pedotransfer-Funktionen zur Berechnung des elektrischen Widerstandes von Böden wird in der Forschung kontrovers diskutiert, die veröffentlichten Studien bedienen häufig nur sehr spezifische Fallstudien mit einer geringen Spannweite an Bodentypen (LALOY et al. 2011), so dass eine allgemeine Aussage zur besten und effektivsten Pedotransfer-Funktionen kaum möglich ist (WUNDERLICH et al. 2013).

4.3.1 Die RHOADES-Formel

Die in Abbildung 4-5 dargestellten Pfade lassen sich wie folgt als Formel [8] darstellen: der erste Teil der Formel in eckigen Klammern beschreibt die elektrische Leitfähigkeit durch Pfad 1, während Pfad 2 durch den zweiten Teil der Formel außerhalb der eckigen Klammern repräsentiert wird. Da davon ausgegangen wird, dass Pfad 3 einen vernachlässigbaren Anteil zur elektrischen Leitfähigkeit beiträgt, wurde in der Reformulierung der RHOADES-Formel auf die Darstellung des Pfades verzichtet.

$$\sigma_a = \left[\frac{(\theta_{ss} + \theta_{ws})^2 \sigma_{ws} \sigma_s}{(\theta_{ss} \sigma_{ws}) + (\theta_{ws} \sigma_s)} \right] + (\theta_w - \theta_{ws}) \sigma_{wc} \quad [8]$$

σ_{ws} = elektrische Leitfähigkeit des Porenwassers in Pfad 1 in dS/m

σ_{wc} = elektrische Leitfähigkeit des Porenwassers in Pfad 2 in dS/m

σ_s = elektrische Oberflächenleitfähigkeit der festen Phase in Pfad 1 in dS/m

Die elektrischen Leitfähigkeiten werden mit den volumetrischen Anteilen der festen und flüssigen Phasen an den einzelnen Pfaden kombiniert.

θ_{ss} = volumetrischer Anteil der Oberflächenleitfähigkeit in Pfad 1

θ_{ws} = volumetrischer Anteil der flüssigen Phase in Pfad 1

θ_w = Gesamtvolumen der flüssigen Phase aus Pfad 1 und Pfad 2

Die beschriebenen Leitfähigkeiten und volumetrischen Anteile werden durch vereinfachte Näherungsgleichungen berechnet, die auf einer Vielzahl von empirischen Beobachtungen und Messungen an Böden basieren (RHOADES et al. 1976, 1989, 1999).

$$\theta_w = \frac{(P_w * p_b)}{100} \quad [9]$$

P_w = gravimetrischer Wassergehalt in % und p_b = Lagerungsdichte in g/cm³

Die RHOADES-Formel verwendet als Eingangsparameter den gravimetrischen Wassergehalt, der in der vorliegenden Arbeit entweder direkt aus den Bodenproben bestimmt oder aus dem volumetrischen Wassergehalt und der Lagerungsdichte berechnet wurde.

$$\theta_{ws} = 0.639\theta_w + 0.011 \quad [10]$$

Die Konstanten 0.639 und 0.011 in [5] wurden empirische abgeleitet (RHOADES et al. 1989).

$$\theta_{ss} = \frac{p_b}{2.65} \quad [11]$$

Die elektrische Oberflächenleitfähigkeit der festen Phase in Pfad 1 (σ_s) kann entweder in Verbindung mit dem Sättigungsgrad (SP) oder dem prozentualen Tongehalt ($\%C$) im Boden betrachtet werden. In der Literatur kommen beide Varianten zur Anwendung (BORÚS 1999; CORWIN & LESCH 2003).

$$\sigma_s = 0.019(SP) - 0.434 \quad [12a]$$

oder

$$\sigma_s = 0.023(\%C) - 0.021 \quad [12b]$$

Da der Sättigungsgrad auch für die Näherungsgleichung zur Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit des Porenwassers in Pfad 2 [13] verwendet wird, würde bei der Nutzung von Formel [12a] als Bestandteil von Formel [8] die Bestimmung des prozentualen Tongehalts als Parameter wegfallen. Da jedoch erwiesen ist, dass der Tongehalt eine wichtige Kenngröße für die elektrische Leitfähigkeit darstellt, wird Formel [12b] in der vorliegenden Arbeit verwendet.

$$\sigma_{wc} = \left[\frac{(\sigma_e p_b SP)}{100\theta_w} \right] \quad [13]$$

In Näherungsgleichung [13] wird zusätzlich zu den bereits erwähnten Parametern die elektrische Leitfähigkeit des Porenwassers (σ_e) in dS/m eingeführt.

4.3.2 Näherungsgleichungen für hydraulische Bodenparameter

Nicht immer ist die notwendige Probenentnahme für alle Eingangsparameter von Formel [8] möglich. Ein problematischer Kennwert ist die Lagerungsdichte, die zum Beispiel nicht aus Rammkernsondierungen gewonnen werden kann, da die Bodenproben bei der Entnahme zu stark gestört werden. Auch die Entnahme von Stechzylinderproben aus Grabungsschnitten und Bodenprofilen kann bei hohem Skelettanteil problematisch sein.

SAXTON et al. (1986) und SAXTON & RAWLS (2006) kalkulieren die Lagerungsdichte sowie weitere hydraulische Bodenparameter über die Korngrößenverteilung der Bodenproben. Die Näherungsgleichungen sind empirisch abgeleitet und basieren auf der Datenbank des U.S. Department of Agriculture (USDA). Die minimal zu ermittelnden Eingangsparameter sind die Volumenanteile der Korngrößenklassen Ton, Schluff und Sand. Ergänzt wird die Näherungsgleichung durch die Parameter Organik (%) und Skelettanteil (%). Ein nicht ermittelbarer Parameter ist der Anpassungs-Faktor DF , der den Einfluss landwirtschaftlicher Nutzung auf die Lagerungsdichte beschreibt. Der Wertebereich von DF liegt zwischen 0.9 (locker) bis 1.3 (starke Verdichtung).

4.4 Berechnung des elektrischen Widerstandes von mehrphasigen Medien

Pedotransfer-Funktionen verwenden ausschließlich Eingangsparameter aus der Analyse von Feinbodenmaterial. Ein Aspekt, der dabei nicht berücksichtigt wird, sind Steineinschlüsse im Feinbodenmaterial und die damit verbundene Heterogenität von Böden. Betrachtet man den Boden als ein dreidimensionales Gebilde mit einem spezifischen Gesamtwiderstand, so tragen die im Bodenpaket eingeschlossenen Steine zu diesem Widerstand bei. Wie der Beitrag der Inklusionen zum Gesamtwiderstand berechnet wird, hängt stark von der Größe der Inklusionen ab. Der ρ kleinerer Steine kann mit der Annahme einer mehr oder weniger gleichmäßigen Verteilung im Feinbodenmaterial zum ρ aus Formel [8] addiert werden. Dabei kommen Gleichungen zum Einsatz, die den ρ eines gemischten Mediums berechnen.

4.4.1 Perkolationstheorie

Die Perkolationstheorie beschreibt die Eigenschaften einer großen Anzahl von Objekten, die durch Konnektivität in Verbindung zueinander stehen und somit neben

ihren individuellen Eigenschaften zur Ausbildung der Eigenschaften eines zufälligen Netzwerkes beitragen (HUNT 2005). In der Bodenkunde kann diese Theorie angewendet werden, um Transportprozesse im Porenbereich zu modellieren und vorherzusagen (BIRD & PERRIER 2010).

Bei der Perkolationstheorie wird der Boden als dreidimensionales Medium betrachtet, das aus zwei Komponenten besteht: Komponente 1 besitzt als Materialeigenschaft einen niedrigen ρ , während Komponente 2 durch einen hohen ρ charakterisiert ist. Komponente 1 und 2 stehen in einem bestimmten volumetrischen Verhältnis zueinander (BIGALKE 2000a). Sie werden in einem zufälligen Gitternetz angeordnet und repräsentieren eine Matrix (Komponente 2), dessen Zwischenräume (zufälliges Gitternetz) von Komponente 1 ausgefüllt werden (BIGALKE 2000b). Aus dieser Beschreibung lässt sich auch der Anwendungsbereich der Perkolationstheorie erkennen, nämlich die Lagerstättenkunde, bei der poröse Gesteine als Speichermedium eines abbauwürdigen Materials fungieren. Neben dem ρ der beiden Komponenten spielt auch die Konnektivität C eine entscheidende Rolle. C wird von BAHR (1997) als durchschnittliche elektrische Konnektivität bezeichnet und von BIGALKE (2000a) in Zusammenhang mit der Konzentration von Komponente 1 gesetzt. Bei einer Konzentration von 100% von Komponente 1 ist $C = 1$ und der elektrische Gesamtwiderstand des Mediums ist gleich dem ρ von Komponente 1. Bei $C = 0$ besteht keine Konnektivität.

Die Perkolationstheorie lässt sich zur Berechnung des ρ von Böden mit Inklusionen nutzen, da Komponente 1 das leitfähige Feinbodenanteil $< 2\text{mm}$ repräsentiert und Komponente 2 dem Skelettanteil $> 2\text{mm}$ entspricht. Zur Berechnung des elektrischen Widerstandes von heterogenen Materialien wurde eine von BIGALKE programmierte html-Datei verwendet, die folgende Eingabewerte verwendet:

ρ_1 = spezifischer elektrischer Widerstand der leitfähigen Komponente in Ωm

ρ_2 = spezifischer elektrischer Widerstand der weniger leitfähigen Komponente in Ωm

p = Konzentration der leitfähigen Komponente in %

p_c = Schwellenwert (0.25 bei Kontaktperkolation in 3D)

4.4.2 Effective Medium Theory

Das BRUGGEMAN Modell ist eine Anwendung zur Berechnung physikalischer Konstanten von heterogenen, zumeist zweiphasigen Materialien (BRUGGEMAN 1935). In der Literatur ist es auch als „Effective Medium Theory“ (EMT) oder „Effective Medium Approximation“

(EMA) bekannt (McLACHLAN et al. 1990). Es handelt sich nicht notwendigerweise um eine Anwendung zur Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit eines heterogenen Materials, jedoch basiert die Entwicklung der Effective Medium Theory sowie viele ihrer Weiterentwicklungen auf dieser physikalischen Eigenschaft (BRUGGEMAN 1935; BHATTACHARYA & CHAKLADER 1982). In der vorliegenden Arbeit wird eine vereinfachte Interpolationsfunktion zur Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit eines zweiphasigen Mediums verwendet, bei der angenommen wird, dass die elektrische Leitfähigkeit der kugelförmigen Inklusionen = 0 ist (McLACHLAN et al. 1990). Dementsprechend spielt, im Gegensatz zur Perkolations-theorie nach BIGALKE, die elektrische Leitfähigkeit der Inklusionen keine Rolle und wird nicht als Eingabewert verwendet.

$$\sigma_m(f) = \sigma_h (1-f)^{\frac{3}{2}} \quad [15]$$

$\sigma_m(f)$ = elektrische Leitfähigkeit des Mischmediums in dS/m

σ_h = elektrische Leitfähigkeit des leitfähigen Mediums in dS/m

f = volumetrischer Anteil des isolierenden Mediums in %

4.6 Software zur Modellierung von physikalischen und chemischen Bodenparametern und des elektrischen Widerstandes

Bei der Anwendung von elektrischen Widerstandsmessungen, insbesondere von ERT, geben die bei der Messung erhaltenen ρ_a -Werte keinen Aufschluss über die tatsächliche Verteilung des elektrischen Widerstandes im Boden. Diese wird mittels Inversionsprogrammen berechnet (Kapitel 4.6.1).

Um die Erfolgsaussichten einer Prospektion mit elektrischen Widerstandsmethoden zu prüfen, wird das sogenannte Forward Resistivity Modeling eingesetzt, wobei auf Grundlage einer gegebenen Widerstandsverteilung im Boden die Messwerte der elektrischen Widerstandsmethoden auf dieses Modell berechnet werden (Kapitel 4.6.2).

Eine klassische Anwendung von Modellierungen ist die zeitliche Veränderung eines Zustandes eines physikalischen Parameters im Boden, in diesem Fall der volumetrische Wassergehalt (Kapitel 4.6.3). Ausgehend von einer bekannten Verteilung des zu untersuchenden Parameters wird die zeitliche Veränderung des Parameters durch zumeist externe Einflüsse auf das Modell berechnet. Die hier beschriebenen Modellierungsansätze basieren auf empirischen Beobachtungen von kausalen Zusammenhängen im Gelände oder Labor. Jedoch muss generell darauf hingewiesen werden, dass alle Modelle nur näherungsweise die realen Verhältnisse darstellen können.

4.6.1 Inversion

Durch die Anwendung von ERT wird grundsätzlich ein Datenset gewonnen, das lediglich Informationen über den ρ_a von einer Vielzahl an Messpunkten enthält, die sich in einem von der Elektrodenkonfiguration abhängigen Muster im Untergrund verteilen. Diese Information ist an sich schwer zu interpretieren und lässt nur wenige Rückschlüsse auf die tatsächliche Verteilung des ρ im Boden zu. Benötigt wird also ein Algorithmus, der die 2D flächenhafte oder die 3D volumenbezogene Verteilung des ρ aus den Punktinformationen des Datensets näherungsweise berechnet. Als weitere Problematik ist anzumerken, dass die durchgeführten Messungen auf Potentialmessungen an der Oberfläche beruhen, also nicht der tatsächliche ρ im Untergrund gemessen wurde. Aus diesem Grund ist es notwendig, den Begriff „scheinbarer spezifischer Widerstand“ bei der Ansprache von nicht invertierten Pseudosektionen zu verwenden.

Die am häufigsten für diese Berechnung angewendete Technik ist die Inversion mittels nicht-linearer Iterationen. Dabei wird von einem Initialmodell ausgegangen, welches schrittweise korrigiert wird, um es an die realen Messdaten anzupassen. Das Initialmodell besteht aus einem regelmäßigen Gitter aus zweidimensionalen Feldern oder dreidimensionalen Volumen (Finite Element Method, *FEM*), denen jeweils ein ρ_a -Wert zugewiesen wird, der sich aus dem bekannten Wert für den eingespeisten Strom I und der gemessenen Spannung V sowie der Elektrodenkonfiguration ergibt. Innerhalb eines Elements des Gitters aus rechteckigen Feldern ist der scheinbare Widerstand konstant. Das Start-Modell wird durch die Lösung einer vektorbasierten Transformation an die Messdaten angeglichen, bevor das berechnete Modell mit den gemessenen Ausgangsdaten verglichen wird. Gesucht wird dabei das Modell, das die geringste Abweichung von den Messdaten liefert. Diese Abweichung kann aus den beobachteten und berechneten elektrischen Widerständen ermittelt werden und wird von den meisten Inversionsprogrammen als RMS Fehler bezeichnet (TSOURLOS 1995). Sobald sich der RMS Fehler nicht mehr signifikant ändert, wird der Anpassungsprozess als abgeschlossen angesehen (TSOURLOS 1995; MATTHES 2012).

Inversionssoftware für ERT-Profile ermöglicht eine effektivere Interpretation von elektrischen Widerstandsdaten, jedoch müssen die Limitierungen und mathematischen Probleme des Inversionsprozess berücksichtigt werden. TSOURLOS (1995) beschreibt den Effekt einer Vielzahl an Messungenauigkeiten, wie z.B. ungenaue Elektrodenposition, spezifische Eigenschaften der Messinstrumente und physikalische Beeinflussung durch die Oberflächenbeschaffenheit des zu untersuchenden Terrains, die in ihrer Gesamtheit einen großen Einfluss auf den Inversionsprozess haben können. Zusammengefasst werden diese Einflüsse als sogenanntes „Noise“ oder Rauschen. Ein weiteres Problem

ergibt sich aus der Anwendung von FEM. Die Menge der verwendeten Rechtecke ist durch die Anzahl der Messergebnisse limitiert (gleichzeitig wird so auch die Auflösung des gesamten Messbildes eingeschränkt) und führt dadurch zur Bildung künstlicher Grenzen, die nicht notwendigerweise die reale Widerstandsverteilung im Untergrund widerspiegeln. Die komplexen Einzelprozesse, die bei der Inversion eine Rolle spielen, können im ungünstigsten Fall Artefakte erzeugen, die in die archäologische Interpretation der Daten einfließen (TSOURLOS 1995).

Generell besteht ein großes Interesse an der Entwicklung neuer Inversionssoftware, vor allem die Erforschung schneller und effektiver Algorithmen spielt bei sich ständig vergrößernden Datensets eine große Rolle (LOKE & BARKER 1996; LI & SPITZER 2002; PAPADOPOULOS et al. 2011).

In der vorliegenden Arbeit wurden für die Inversion der ERT-Profile die Programme Res2DInv (Geotomo Software) (LOKE 1994; LOKE & BARKER 1996; LOKE & DAHLIN 2002; LOKE et al. 2003) in der 32- und 64-Bit Variante sowie ERTLab (Geostudi Astier, Multi-Phase Technologies) (CARDARELLI & FISCHANGER 2006; CARDARELLI & FILIPPO 2009; CARDARELLI et al. 2010) in einer 64-Bit Variante verwendet.

4.6.2 Forward Resistivity Modeling

Der Begriff „Modeling“ wird mit Bezug auf elektrische Widerstandsverfahren hauptsächlich als das bei Inversionsprogrammen angewendete Konzept des „Forward Resistivity Modelings“ (FRM) genutzt. Beim Forward Modeling liegt ein Model des Untergrundes mit bekannten ρ -Werten vor. Nun soll das Datenset berechnet werden, das man bei der Anwendung von elektrischen Widerstandsmethoden mit einer bestimmten Elektrodenkonfiguration auf diesem Untergrund erhält.

Dem Forward Modeling können verschiedene Konzepte zu Grunde liegen. Die am häufigsten angewendeten Konzepte sind die „Finite Difference Method“ (FDM) und die „Finite Element Method“ (FEM). Beide Methoden beruhen auf der Unterteilung des zu untersuchenden Raums in Unterregionen. Während bei FDM eine Unterteilung in rechteckige Zellen erfolgt, denen ein Messpunkt mit einem ρ -Wert zugeordnet wird, erfolgt bei der Nutzung von FEM eine Unterteilung in Elemente, deren Knotenpunkte („nodes“) als Netzwerk für Interpolationsfunktionen dienen. Beide Methoden haben das Ziel, das unbekannte Spannungspotenzial zu berechnen (TSOURLOS 1995).

Die Nutzung von FRM setzte relativ zeitnah mit der Nutzung von ERT zur geologischen und archäologischen Prospektion ein und entwickelte sich parallel zu den steigenden Rechnerleistungen in den 1990er Jahren (NOEL & XU 1991; RADSTAKE et al. 1991). Die

Anwendung der Methode kann aus verschiedenen Forschungsinteressen erfolgen und wird dementsprechend unterschiedlich konzipiert. In Zusammenhang mit archäologischen Fragestellungen wird FRM hauptsächlich zur Hypothesenprüfung eingesetzt. Ziel ist es, die in einem ERT-Profil angesprochenen Anomalien einer archäologischen Struktur zuzuweisen. Dabei stellt sich die Frage, welche Form und welchen Widerstandswert diese Anomalien bei einer spezifischen archäologischen Struktur annimmt. Dieser Ansatz ist mit Hintergrundwissen zu den im Untersuchungsraum bekannten oder erwarteten archäologischen Strukturen verknüpft.

Die Vielzahl an Verwendungsmöglichkeiten von FRM lässt eine entsprechende Klassifizierung des Forschungsvorhabens nur bedingt zu. Häufig können mit diesem Ansatz mehrere Hypothesen adressiert werden, wie z.B. eine Verbesserung der Inversions Software und zeitgleiche archäologische Hypothesenprüfung. Dennoch ist eine Klassifizierung der FRM-Ansätze in der archäologischen Forschung sinnvoll, um eine mögliche Forschungslücke zu identifizieren und zu füllen.

- Synthetische Modelle zur Verbesserung von Inversions-Software sowie interpretations- und verifikationsunterstützende Softwareprodukte (CARDARELLI & FISCHANGER 2006; GÜNTHER et al. 2006; CARDARELLI & DI FILIPPO 2009; CATT et al. 2009; PAPADOPOULOS et al. 2009; CARDARELLI et al. 2010; ELWASEIF & SLATER 2010; BAŞOKUR & AKCA 2011; PAPADOPOULOS et al. 2011; HAUCK et al. 2003; SINGH et al. 2013). In diesem Fall ist anzumerken, dass die synthetischen Datensets fast immer an reale Fallstudien angelehnt sind und somit auch der archäologischen oder naturwissenschaftlichen Verifikation von Objekten dienen können.
- Synthetische Modelle zur Verbesserung des Messaufbaus, des Prospektionswinkels oder der Prospektionsrichtung. Besonders im Bereich der 3D-Messungen konnten hier wertvolle Informationen zum Messaufbau gewonnen werden (PAPADOPOULOS et al. 2006; PAPADOPOULOS et al. 2010; BERGE & DRAHOR 2011; WILKINSON et al. 2012).
- Synthetische Modelle zur Verbesserung von Elektrodenkonfigurationen. Es ist bekannt, dass jede Elektrodenanordnung mit Vor- und Nachteilen verbunden ist (ASPINALL & GAFFNEY 2001), weshalb eine Untersuchung dieser Aspekte unumgänglich ist (APPEL et al. 1997; DAHLIN & LOKE 1998; COSKUN & SZYMANSKI 1999; CANDANSAYAR & BAŞOKUR 2001; HAUCK et al. 2003).
- Synthetische Modelle zur Untersuchung der von archäologischen Strukturen verursachten Widerstandsanomalien. Hierbei handelt es sich um eine

der gängigsten Anwendungen von FRM, wobei das Vorgehen bei dieser Fragestellung sehr unterschiedlich sein kann. Gelegentlich wird diese Methode angewendet, um die Erfolgsaussichten einer Prospektion mit elektrischen Widerstandsverfahren zu ergründen. Die Werte für den elektrischen Widerstand und die Form der Anomalien werden durch vorhandenes Hintergrundwissen über die zu erwartende Archäologie und geologische bzw. bodenkundliche Rahmenparameter geschätzt (ORLANDO 2013). Die populärere Anwendung von FRM findet jedoch nach der Prospektion im Gelände statt. Häufig liegt der Grund hierfür in nicht interpretierbaren Widerstandsanomalien. Hierbei handelt es sich jedoch um eine Zusammenführung von archäologischer Arbeitshypothese mit den Prospektionsergebnissen (APPEL et al. 1997; NEGRI et al. 2008; GLOVER 2010; LEOPOLD et al. 2011; ZEYEN et al. 2011; TEIXIDO et al. 2013).

In der vorliegenden Arbeit wurde die Software RES2DMOD zur Erstellung von elektrischen Widerstandsmodellen verwendet. Basierend auf diesen Modellen berechnet die als Freeware verfügbare Software die Verteilung des ρ_a im Boden und erstellt damit synthetische Datensätze von ERT-Profilen (LOKE 1994; LOKE & DAHLIN 2002). Die Software ermöglicht eine unkomplizierte Erstellung von Widerstandsmodellen, entweder über ein optisches Interface in der Software selbst oder über eine Bearbeitung der Dateien per Text-Editor. Die in den Modellen verwendeten Widerstandswerte wurden als ρ_m gekennzeichnet, um eine klare Abgrenzung von den im Gelände gemessenen Werten zu ermöglichen. Durch die Verwendung einer modifizierten Pol-Pol-Elektrodenkonfiguration wurden die Messungen mit der Twin-Probe-Anordnung zur elektrischen Widerstandskartierung simuliert, während die Modelle für ERT-Profile mit einer Wenner-Schlumberger-Anordnung simuliert und später mit Res2dInv invertiert wurden. Beim Export der ρ_a -Werte in das Res2DInv-Format kann die Beeinflussung der Messungen durch das Hintergrundrauschen berechnet werden.

4.6.3 Modellierung der saisonalen Veränderung des Wassergehalts im Boden mit HYDRUS

Die hydraulischen Eigenschaften von Böden sind von besonderem Interesse in der Bodenkunde, da sie maßgebliche Faktoren für eine effektive landwirtschaftliche Nutzung von Böden darstellen. Im Hinblick auf die elektrische Leitfähigkeit von Böden spielen diese Bodeneigenschaften ebenfalls eine Rolle, weil eine direkte Beziehung zwischen dem Wassergehalt und der elektrischen Leitfähigkeit besteht (Kapitel 3.1).

Die HYDRUS Software wurde zur Modellierung des Wasserflusses in Böden mit unterschiedlichen Sättigungsgraden entwickelt und ermöglicht zudem die Modellierung

des Wärmetransports und den Transport von gelösten Stoffen in Böden. Die Software arbeitet mit der numerischen Lösung (finite difference und finite element) von hydraulischen Funktionen, wobei der Nutzer unter einer Vielzahl von Funktionen wählen kann (ŠIMŮNEK et al. 2008). Alle Modelle sind auf die RICHARDS-Gleichung zurückzuführen (RICHARDS 1931). In den für Katzenbach (Kapitel 5.4) und Eisenberg (Kapitel 5.3) erstellten 2D-Modellen wird die analytische Funktion von VAN GENUCHTEN (1980) verwendet.

Zur Erstellung eines 2D-Modells wird ein Bodenprofil als geometrische Form dargestellt. Die Geometrie des Modells ergibt sich aus dem Hintergrundwissen zur Stratigraphie des Bodenprofils oder der archäologischen Strukturen. Jeder geometrischen Form des Modells müssen hydraulische Eigenschaften zugewiesen werden, welche die Berechnung des Wasserflusses erst ermöglichen. Bei der Modellierung von Steinstrukturen kann die Struktur in manchen Fällen als homogen angesehen werden, aber häufig ist die Darstellung der einzelnen Steine der Struktur effektiver. Die Darstellung von Steinen als geometrische Objekte in HYDRUS wurde bereits zur Modellierung des Wasserflusses in steinigem Böden in Gebirgsregionen angewendet. Da eine Geometrie ohne hydraulische Eigenschaften in HYDRUS nicht möglich ist, werden extrem niedrige hydraulische Eigenschaften bei der Modellierung von Steinen verwendet, die keinen Wasserfluss in diesen Objekten zulassen (NOVÁK et al. 2011; HLAVÁČIKOVÁ et al. 2013).

Der Wasserfluss in Böden ist durch seine physikalischen Eigenschaften festgelegt, wohingegen beim Transport von gelösten Stoffen auch chemische Prozesse berücksichtigt werden müssen (ŠIMŮNEK & VAN GENUCHTEN 2008). HYDRUS verwendet verschiedene Kombinationen von Eingangsparametern zur Berechnung der hydraulischen Eigenschaften eines Bodens. Neben bereits vordefinierten Eigenschaften für standardisierte Bodenarten können spezifische Kombinationen von Bodenarten durch eine angegliederte Software zur Anwendung von Pedotransfer-Funktionen (Rosetta Lite DLL) berechnet werden (SCHAAP et al. 2001). Als Eingangsgrößen werden die Korngrößenverteilung und die Lagerungsdichte zur Berechnung der von VAN GENUCHTEN (1980) abgeleiteten Parameter zum Wasserrückhaltevermögen von Böden verwendet. Hierbei handelt es sich um den minimalen (θ_r) und maximalen (θ_s) volumetrischen Wassergehalt unter realen Evaporations- und Niederschlagsbedingungen, die hydraulische Leitfähigkeit bei Sättigung (K_s) in cm/Tag und die Konnektivität der Poren (l). Zusätzlich werden aus den Eingangsparametern empirische Koeffizienten abgeleitet, die zur Lösung der hydraulischen Funktion notwendig sind.

Die Geometrie des Modells wird mit einem Finite-Element-Mesh (FEM) verknüpft,

das zur räumlichen Lösung der VAN GENUCHTEN-Gleichungen durch Forward Modeling verwendet wird. Das FEM kann lokal verdichtet werden, wenn an einer Stelle besonders komplexe Geometrien eine hohe Dichte an Knotenpunkten zur Lösung der Gleichungen benötigen.

Der zeitliche Ablauf der Modellierung kann variabel gestaltet werden. Als Zeiteinheiten sind Sekunden, Minuten, Stunden, Tage und Jahre wählbar. In Kombination mit den verfügbaren Niederschlagsdaten von lokalen Wetterstationen ist als Zeiteinheit eine tägliche Ermittlung des Wasserflusses im Boden am sinnvollsten. Ein Modell mit 365 Intervallen von einem Tag kann also verwendet werden, um die saisonale Veränderung des Wassergehaltes im Boden mit einer Auflösung von einem Tag darzustellen. Für kurzfristigere Veränderungen des Wassergehalts in Böden, z.B. nach Starkniederschlägen, muss der zeitliche Ablauf der Modellierung angepasst werden.

Als externen Input für Niederschlag und Evaporation wurden die Daten von lokalen Wetterstationen verwendet. Maßgebliche Parameter sind der summierte Niederschlag pro Tag in mm und die aus verschiedenen Parametern berechnete Evaporationsrate nach PENMAN (ALLEN et al. 1998) in mm.

5 Ergebnisse und Diskussion der Prospektion, Analyse und Modellierung von archäologischen Steinstrukturen anhand von Fallbeispielen

Die in der vorliegenden Arbeit analysierten Fallbeispiele repräsentieren verschiedene Bauweisen von Mauer- und Steinstrukturen in archäologischen Kontexten und unterschiedlichen Naturräumen (Kapitel 1.2). Kapitel 5.1 behandelt die Bauweise von Mauerstrukturen und die daraus resultierenden elektrischen Widerstände. In Kapitel 5.2 werden Fallbeispiele analysiert werden, bei denen die elektrischen Widerstandsmethoden die archäologischen Strukturen nur unvollständig oder gar nicht abbilden konnten.

Kapitel 5.3 und 5.4 beschreiben detaillierte bodenkundliche Analysen und archäologische Grabungsergebnisse und wurden zur Überprüfung der Anwendungsmöglichkeiten der in Kapitel 4 beschriebenen Methoden herangezogen.

5.1 Der elektrische Widerstand von Mauer- und Steinstrukturen - ausgewählte Fallbeispiele

Aus geophysikalischer Sicht stellt eine archäologische Struktur im Idealfall im Messbild eine Anomalie dar, die durch die spezifischen physikalischen Eigenschaften der Struktur hervorgerufen wird. Im Kontext von elektrischen Widerstandsmessungen stellen Mauer- und Steinstrukturen das häufigste Prospektionsziel dar (Kapitel 2.5). Bei der Interpretation wird davon ausgegangen, dass eine aus Stein aufgebaute Struktur im Vergleich zum umliegenden Bodenmaterial einen höheren ρ hervorruft. Jedoch ist z.B. bei Mauerstrukturen aus tonhaltigen Ziegeln auch ein umgedrehtes Verhältnis, d.h. die Mauerstruktur besitzt einen niedrigeren ρ als das umliegende Bodenmaterial, bekannt (BONGIOVANNI et al. 2011).

Generell stellt sich die Frage, wie eine Mauer- oder Steinstruktur aufgebaut ist und welche Komponenten in welchem Ausmaß zum ρ der Struktur beitragen. In Abbildung 5-1 sind vier verschiedene archäologische Strukturen aus unterschiedlichen Epochen abgebildet, deren Hauptkomponente Steinmaterial ist, aber die aus geophysikalischer Sicht völlig unterschiedliche Anomalien in der elektrischen Widerstandskartierung und elektrischen Widerstandstomographie ergeben.



Abbildung 5-1: Mauerstrukturen. Fotos: A) D. JORDAN; B) P. BRENGEL; C) GDKE RLP, Direktion Landesarchäologie Speyer; D) P. BRENGEL.

5.1.1 Amiternum

Amiternum ist eine römische Stadt im Aterno-Tal in den Abruzzen, die ab 293 v. Chr. unter römische Kontrolle gelangte. Ältere Funde belegen aber bereits eine eisenzeitliche Besiedlung des Gebietes. Im Rahmen eines Forschungsprojektes fanden zwischen 2006 und 2010 geophysikalische Prospektionen und Ausgrabungen durch die Universität Bern und die Johannes Gutenberg-Universität Mainz statt, bei denen auch experimentelle Messungen mit elektrischen Widerstandsmessgeräten sowie die anschließende Ausgrabung der prospektierten Strukturen stattgefunden haben (HEINZELMANN & JORDAN 2013).

Die prospektierte Fläche befindet sich in unmittelbarer Umgebung des römischen Theaters von Amiternum. Durch vorherige Grabungen wurden in diesem Bereich bereits Mauerstrukturen festgestellt, die aber nicht durch die elektrische Widerstandskartierung erfasst werden konnten, da sich die Strukturen vermutlich zu tief unter der Erdoberfläche befanden. Daraufhin wurde eine kleine Grabungsfläche definiert, die im Anschluss eingehend mit der elektrischen Widerstandstomographie in hoher Auflösung prospektiert wurde. Abbildung 5-2 zeigt die Inversionsergebnisse von Res2DEInv und ERTLab eines repräsentativen Profils aus diesem Datenset.

Die Grabung legte auf einer Fläche von 2 x 2 m eine Mauerstruktur (M1) frei, die an

der Grenze der Grabungsfläche in einem 90° Winkel weiterverläuft (Abb. 5-3). Die Mauer besteht aus zwei Steinsetzungen aus lokal anstehendem Kalkstein, die durch Mörtel zusammengehalten werden. Parallel dazu verläuft eine lineare Struktur aus opus caementitium (M2), die jedoch tiefer liegt als Mauerstruktur 1 und in den ERT-Profilen auf Grund ihrer Tiefenlage nicht abgebildet werden konnte.

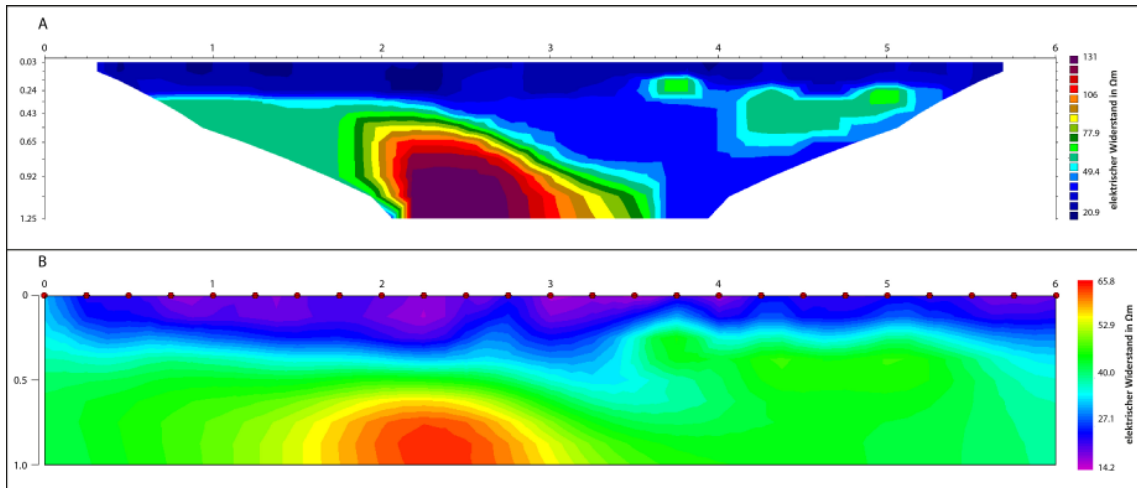


Abbildung 5-2: Inversionsergebnis des ERT-Profiles AM49 mit Res2DInv (A) und ERTLab (B).

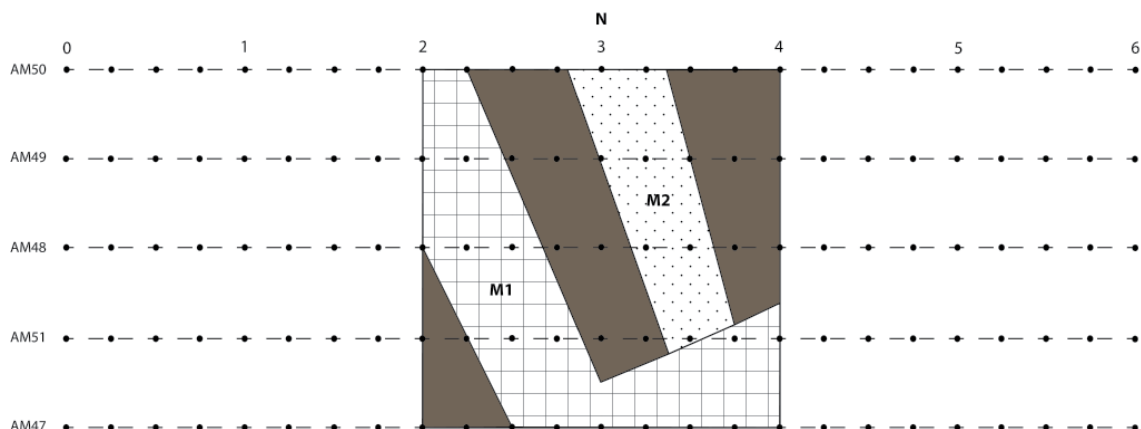


Abbildung 5-3: Position der ERT-Profile auf der Grabungsfläche bei Amiternum.

Das umliegende Bodenmaterial ist stark tonhaltig und mit großen Mengen an Ziegel- und Steinmaterial angereichert, was sich in einem punktuell erhöhten ρ in den ERT-Profilen äußert (Abb. 5-2 A). Die relativ niedrigen ρ -Werte an der Oberfläche lassen sich durch Regenfälle am Vorabend der Messung erklären. Interessanterweise scheinen die durch den erhöhten Wassergehalt niedrigeren ρ -Werte konzentriert über der Mauerstruktur aufzutreten, was auf einen Einfluss der archäologischen Struktur auf den Versickerungsprozess des Regenwassers im Boden hindeutet (Abb. 5-2 B).

Anhand der Grabungsergebnisse in Amiternum lassen sich für eine Prospektion mit

elektrischen Widerstandsverfahren wichtige Aussagen zum Aufbau von Mauerstrukturen extrahieren. Mauerstruktur I besteht aus Kalkstein mit einem hohen ρ , die Zwischenräume werden von Mörtel mit ebenfalls hohem ρ ausgefüllt. Da beide Materialien vermutlich über einen ähnlichen ρ verfügen, ist die Struktur aus geophysikalischer Sicht als weitestgehend homogen anzusehen. Eine homogene Struktur, deren physikalische Parameter sich im Jahresverlauf vermutlich nur geringfügig verändern, stellt für die Modellierung der Mauerstruktur ein einfaches Zielobjekt dar. Denkbar ist eine langfristige Veränderung der physikalischen Parameter durch Verwitterung oder mechanische Zerstörung durch landwirtschaftliche Bearbeitung.

5.1.2 Katzenbach

Die detaillierte Beschreibung und Analyse der geophysikalischen Prospektionen und archäologischen Ausgrabungen der villa rustica bei Katzenbach ist in Kapitel 5.4 dargestellt. Dennoch soll der Aufbau der Steinstrukturen in diesem Kapitel als Kontrast herangezogen werden, da sich in diesem Fall der Aufbau der Mauerstruktur stark von dem Fallbeispiel aus Amiternum unterscheidet.

In Katzenbach sind lediglich die Fundamente der Nebengebäude erhalten. Sie befinden sich ca. 30 cm unter der Erdoberfläche und zeigen an ihrer Oberkante Zerstörungsspuren durch landwirtschaftliche Bewirtschaftung (Abb. 5-1 B). Für die Fundamente wurde lokal anstehender Sandstein verwendet, der in eine Fundamentgrube eingefüllt wurde. Diese kann vom umliegenden Bodenmaterial an Hand der dunkleren Färbung unterschieden werden. Eine Ausrichtung der einzelnen Steine kann nicht erkannt werden, auch die Größe und Form der verwendeten Steine ist keiner Regelmäßigkeit unterworfen. Auf dem Fundament konnte an einigen Stellen noch der Rest einer Lage aus lokal anstehendem Basalt angetroffen werden. Da hier die einzelnen Steine viel dichter und sorgfältiger gesetzt wurden, handelt es sich wahrscheinlich um die erste Lage des aufgehenden Mauerwerkes.

Zwischen den einzelnen Sandsteinen des Fundaments befindet sich Bodenmaterial mit einem relativ hohen Tongehalt (ca. 14 %), das im Hinblick auf den elektrischen Widerstand einen hohen Kontrast zum Steinmaterial darstellt. Im Gegensatz zu den Mauerstrukturen in Amiternum ist diese Steinstruktur dementsprechend als ein zweiphasiges Medium mit einem hohen und einem niedrigen ρ anzusprechen, das in einer elektrischen Widerstandsmessung aber als eine Anomalie mit einem elektrischen Gesamtwiderstand dargestellt wird. Für die beiden Phasen des Mediums ergibt sich auch eine unterschiedliche Veränderung der physikalischen Parameter, die im letztendlich den ρ beeinflusst. Während das Bodenmaterial im klimatischen Jahresverlauf eine

zyklische Veränderung des Wassergehaltes durchläuft, ist für das Steinmaterial eher eine langfristige Veränderung (> 100 Jahre) durch Verwitterung und mechanische Zerstörung anzunehmen.

5.1.3 Donnersberg

Die Wallanlagen von eisenzeitlichen Siedlungen, den sogenannten „oppida“, stellen eine besondere Form der Steinstrukturen dar. Teilweise sind ihre Überreste noch als Erhebungen in der Landschaft sichtbar. Ihre Gemeinsamkeit ist die Trockenbauweise der Mauerstrukturen, die nur durch Holzkonstruktionen gestützt werden. Abgesehen davon sind jedoch völlig unterschiedliche architektonische Varianten bekannt, die sich teilweise an den natürlichen Gegebenheiten orientieren. Die bekannteste Variante ist der von Julius Caesar beschriebene „murus gallicus“, der aus einer Frontmauer und einer rückwärtigen Stützmauer besteht, die im Zwischenraum durch eine Kombination von Holzkonstruktionen und Füllmaterial stabilisiert wird. Eine weitere Variante ist die vor allem in Rheinland-Pfalz und dem Saarland vorkommende Pfostenschlitzmauer, bei der die Frontmauer in regelmäßigen Abständen von vertikalen Stabilisierungspfosten durchzogen ist. Die Mauer wird auf der Rückseite entweder von einem angeschütteten Erdwall oder einer weiteren Mauerstruktur mit Füllmaterial gestützt. Auf dem Donnersberg in Rheinland-Pfalz befindet sich ein ca. 240 ha großes oppidum, das mit einer Wallanlage mit einer Gesamtlänge von 8.5 km befestigt ist und somit zu den flächenmäßig größten oppida in Europa gehört. Die Wallanlage ist als Pfostenschlitzmauer angelegt, die von rückwärtig angeschüttetem Boden- und Steinmaterial gestützt wird. Als Baumaterial wurde der lokal anstehende Rhyolith des Donnersbergs verwendet (ZEEB-LANZ 2008). Im Vorfeld einer Grabung an einem Zangentor im Jahr 2011 wurde ERT eingesetzt, um den Aufbau und Erhaltungszustand der Wallanlage zu erforschen. Zusätzlich wurden vier ERT-Profile parallel zueinander angelegt, um eine quasi-3D Inversion der Daten durchführen zu können. Alle ERT-Profile wurden mit ERTLab und Res2DInv verarbeitet und einer topographischen Korrektur unterzogen.

Durch die Grabung wurde ausgehend von der Toranlage die Frontseite der Wallanlage auf einer Länge von 4 m freigelegt. Dabei wurde deutlich, dass es sich um drei Mauerphasen handelt (Abb. 5-1 C). Es wird angenommen, dass die beiden jüngeren Mauerphasen jeweils eine umfassende Reparaturmaßnahme der gesamten Wallanlage darstellen. Jede der Mauern besteht aus sorgfältig angeordneten Steinen an der Front, rückwärtig sind sie größtenteils mit kleineren Steinen aufgefüllt. Auffällig ist, dass sich zwischen den Steinen kein leitfähiges Bodenmaterial befindet, sondern auch nach über 2000 Jahren Hohlräume zwischen den Steinen zu finden sind. Lediglich an der Oberfläche des Walls

scheint Bodenmaterial und organisches Material zwischen die Steine zu gelangen. Die ursprünglich zwischen 3 und 4 m hohe Mauerfront ist mit der Zeit nach vorne kollabiert, was durch eine große Menge an Steinmaterial vor der jüngsten Mauerphase ersichtlich wurde. Das verstürzte Material ist im Gegensatz zum noch erhaltenen Teil der Mauer eine Mischung aus Stein- und Bodenmaterial.

Der beschriebene Aufbau der Wallanlage lässt sich durch die ERT-Messungen detailliert nachvollziehen und sogar ergänzen. Ein erstes ERT-Profil (Abb. 5-4) mit einer Gesamtlänge von 65 m wurde so angelegt, dass die Überreste des Walls orthogonal geschnitten und mögliche Strukturen im Umfeld der Wallanlage erfasst werden. Dem Wall vorgelagert konnte eine Anomalie mit einem niedrigen ρ identifiziert werden, die vermutlich durch einen Graben verursacht wird.

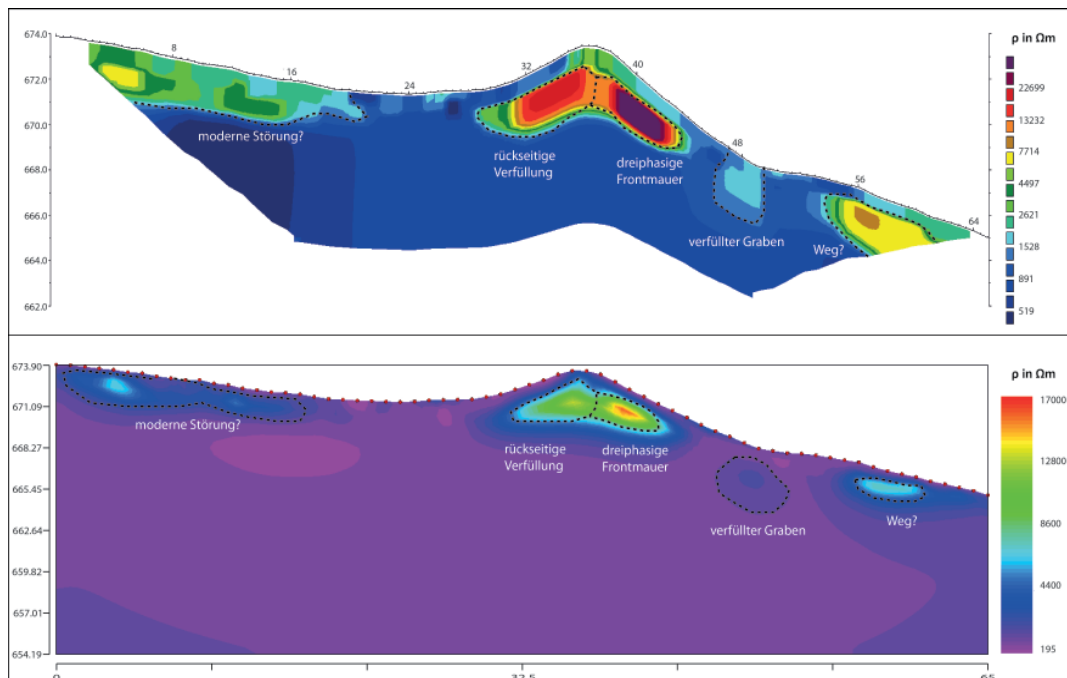


Abbildung 5-4: Inversionsergebnis des ERT-Profiles am Zangentor mit Res2DInv und ERTLab.

Abbildung 5-5 zeigt die dreidimensionalen Inversionsergebnisse der parallel zueinander angeordneten ERT-Profile im unmittelbaren Umfeld der Grabung am Zangentor. Die ρ -Werte sind als Iso-Flächen dargestellt und auf die wesentlichen architektonischen Bestandteile des Walls fokussiert. Die Mauerstruktur an der Front kann als Bereich mit hohem ρ angesprochen werden und bildet einen deutlichen Kontrast zu dem verstürzten Material vor dem Wall und der rückwärtigen Verfüllung, die beide einen ähnlichen Widerstand aufweisen. Eine hinter dem Wall verlaufende Anomalie mit niedrigem ρ könnte möglicherweise durch einen verfüllten Graben hervorgerufen werden, aber auch eine Wasserstauung durch die Wallanlage ist als Ursache für diese Anomalie denkbar.

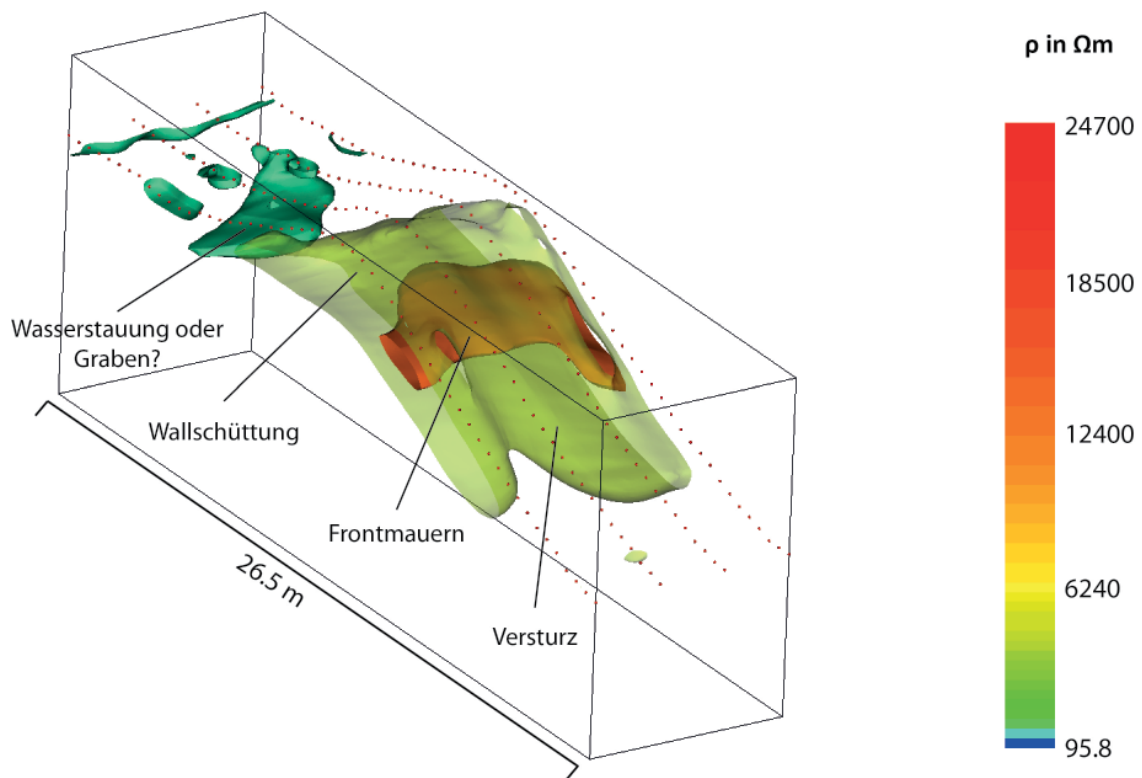


Abbildung 5-5: Inversionsergebnis der quasi-3D ERT-Prospektion am Zangentor.

Der Vergleich zwischen den Messergebnissen am Donnersberg und bei Katzenbach, das nur ca. 10 km Luftlinie vom Donnersberg entfernt liegt, zeigt, dass der Aufbau von Mauer- und Steinstrukturen je nach Epoche und Lokalität variieren kann, was in der Gegenwart wiederum Einfluss auf die elektrischen Widerstandsmessungen nimmt. Die Messwerte liegen zwischen 100 Ωm (Katzenbach) und ca. 24000 Ωm (Donnersberg).

5.1.4 Otzenhausen

Das oppidum im nördlichen Saarland bei Otzenhausen, auch bekannt als Hunnenring, ist eine eisenzeitliche Siedlung, die durch eine Wallanlage geschützt wurde. Insbesondere der nördliche Teil der Wallanlage ist in einer außergewöhnlichen Weise konstruiert, da der bis zu 8 m hohe Wall augenscheinlich nur aus locker gestapeltem Steinmaterial (lokal anstehender Quarzit) besteht (Abb. 5-6 A). Ob die Konstruktionsweise einen bestimmten Verteidigungszweck erfüllte oder aus repräsentativen Gründen in dieser Weise errichtet wurde, ist bislang noch nicht bekannt (SCHINDLER 1968). Weiterhin ist bislang nicht bekannt, ob das heutige Aussehen einem verstürzten Wall mit Mauerstrukturen entspricht oder ob der Wall bereits in dieser Form geplant wurde. Grabungsschnitte sind bislang auf Grund der Instabilität der gestapelten Steine und dem hohen finanziellen und

logistischen Aufwand gescheitert und heute nicht mehr möglich, da der Nordwall als Grabungsschutzgebiet ausgewiesen ist. Bekannt ist jedoch, dass sich an den Rändern des Nordwalls die Überreste eines älteren Erdwalls befinden (HORNUNG & BRAUN 2010).



Abbildung 5-6: ERT am Nordwall des Hunnenrings bei Otzenhausen. Fotos: P. BRENGEL.

ERT wurde am Nordwall eingesetzt, um der Frage nach dem älteren Erdwall unter dem Steinmaterial oder Überresten von Mauerstrukturen nachzugehen. Da durch das Steinmaterial kein guter Elektrodenkontakt zum Untergrund erreicht werden konnte, wurde eine Methode zur Messung des ρ von Steinhalden und Blockgletschern in alpinen Gebieten adaptiert. Dabei werden Armierungseisen als Elektroden verwendet und mit einem Schwamm ummantelt, der mit einer leitfähigen Lösung getränkt ist (Abb. 5-6 B) (HAUCK 2001; HAUCK et al. 2003). Wie erwartet wurden extrem hohe ρ -Werte gemessen, da ein Stromfluss bei einer solchen Steinstruktur nur in geringen Maßen durch das Steinmaterial stattfinden kann. Eventuell kann der Strom auch durch einen dünnen Wasserfilm auf der Steinoberfläche fließen. Jedoch ist fraglich, ob hierbei durchgehende elektrische Pfade vorliegen.

Die Ergebnisse der ERT-Profile (Abb. 5-7) stützen die Hypothese eines älteren Erdwalls, der sich durch einen niedrigeren ρ von den darüber liegenden Steinpackungen abzeichnet. Die als Erdwall interpretierte Anomalie konnte in zwei ERT-Profilen (OTZ1S150 und OTZ2S150) festgestellt werden. Die extrem hohen ρ -Werte im Zentrum des Walls resultieren aus den lose gestapelten Steinen und Hohlräumen. Innerhalb der Steinpackung

sind zwar lokale Anomalien sichtbar, diese korrelieren jedoch nicht mit der Form der Anomalien bei anderen eisenzeitlichen Wallanlagen (BRENDEL 2013). Da diese zudem in den beiden ERT-Profilen an unterschiedlichen Stellen auftreten, ist eher von einer unterschiedlichen Ausprägung der Steinpackung als von einer intentionell errichteten Mauerstruktur auszugehen. Über der Steinpackung befindet sich ein Bereich mit niedrigerem elektrischem Widerstand, der vermutlich aus dem bereits beschriebenen Wasserfilm auf den Steinen und auch von nachträglich eindringendem Feinmaterial hervorgerufen wird. An einigen Stellen auf dem Nordwall haben mit der Zeit Pflanzen Halt gefunden. In diesen Bereichen konnte organisches Material angetroffen werden, das bei den im Untersuchungsgebiet vorherrschenden klimatischen Bedingungen phasenweise einen hohen Wassergehalt aufweist. Die Hohlräume zwischen den Steinen werden hier also von der Oberfläche her mit leitfähigerem Material gefüllt, was zu einer Veränderung des elektrischen Widerstandes der Steinstruktur führt. Dieses Fallbeispiel führt vor Augen, dass sich manche Steinstrukturen aus geophysikalischer Sicht nicht nur durch die jahreszeitlich bedingte Veränderung ihrer physikalischen Parameter unterschiedlich darstellen, sondern auch eine langfristige Veränderung eine entscheidende Rolle spielen kann.

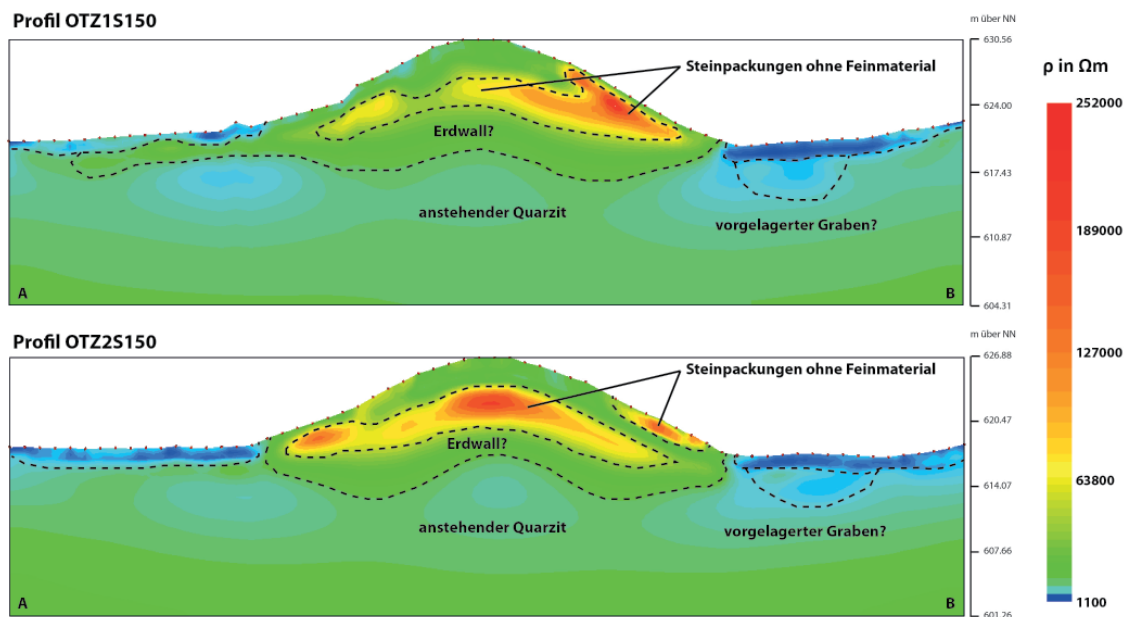


Abbildung 5-7: Inversionsergebnisse der ERT-Profile am Nordwall des Hunnenrings bei Otzenhausen.

5.1.5 Zusammenfassung

Die Untersuchung von Mauer- und Steinstrukturen durch geophysikalische Messungen und archäologische Grabungen zeigt, dass diese Strukturen aus geophysikalischer Sicht nicht immer einen homogenen Körper darstellen. Dies ist zum einen durch

ihre ursprüngliche Bauweise, zum anderen durch nachträglich ablaufende Prozesse wie Verwitterung und anthropogene Zerstörung begründet. Die geophysikalische Heterogenität einer Struktur kann relativ stark ausgeprägt sein (z.B. in Katzenbach), während sie bei anderen Strukturen derselben Epoche relativ gering ist (z.B. in Amitemnum). Deshalb müssen in vielen Fällen Mauerstrukturen als mehrphasige Körper aufgefasst werden, deren verschiedene Phasen sich zeitlich und in ihrer geophysikalischen Ausprägung unterschiedlich stark verändern. Bei der Erstellung von Modellen, die den Einfluss der Veränderung auf archäologische Prospektionen mit elektrischen Widerstandsmethoden abschätzen, muss dies berücksichtigt werden.

5.2 Die Fallbeispiele Mauchenheim und Offenheim

Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse geophysikalischer Prospektionen beschrieben, bei denen die Methoden die archäologischen Strukturen nur teilweise oder gar nicht abbilden konnten. Es handelt sich um die Prospektionen von zwei villae rusticae im Raum Alzey mit elektrischer Widerstandskartierung, ERT, Bodenradar und Magnetik. Zudem werden die Ergebnisse mit Bewuchsanomalien aus Luftbildern verglichen.

Die beiden untersuchten archäologischen Fundstellen datieren in die Römerzeit und liegen ca. 1 km voneinander entfernt. Die Geologie des Untersuchungsgebietes ist aus den marinen Küsten- und Beckensedimenten des Mainzer Beckens aufgebaut, die eine Spannweite von Tonmergeln bis zu sandigen Küstenablagerungen abdecken (LGB-RLP 2005). Die Lage der beiden Fundstellen ermöglicht eine gute Vergleichbarkeit der Fallstudien, da sich die topographischen, hydrologischen und geomorphologischen Voraussetzungen sehr ähnlich sind.

5.2.1 Mauchenheim

Die Palastvilla bei Mauchenheim ist eine der herausragenden römischen Einzelsiedlungen in der Region Alzey. Sie befindet sich auf einem leicht geneigten Südost-Hang in unmittelbarer Nähe der Selz und zählt zu einer der am besten zerstörungsfrei untersuchten römischen Siedlungsstellen der Region (KRIESEL 1978; WECKMÜLLER & BURGER 2013; FAUL 2013). Durch eine große Anzahl an Luftbildern ist das Ausmaß des Hauptgebäudes größtenteils bekannt und konnte dank des Einsatzes der lokalen Bevölkerung vor der Zerstörung durch landwirtschaftliche Bewirtschaftung geschützt werden. Eine Rekonstruktion auf Grundlage von Luftbildern findet sich in WECKMÜLLER & BURGER (2013). Auf dem Luftbild von Juni 1998 ist das Hauptgebäude sowie weitere Strukturen der Siedlungsfläche in unterschiedlicher Qualität ansprechbar (Abb. 5-8). Besonders deutlich zeigt sich der Grundriss des

Hauptgebäudes als negative Bewuchsmerkmale. Interessanterweise sind sie im westlichen Bereich des Hauptgebäudes großflächiger sichtbar, teilweise wird auch der Verlauf der Mauerstrukturen überdeckt. Die Bewuchsanomalien sind das Resultat von Stressreaktionen der Pflanzen, die durch eine zu geringe Wasserverfügbarkeit im Boden hervorgerufen wird. Die Wasserverfügbarkeit steht in direktem Zusammenhang mit den lokalen Bodeneigenschaften und den archäologischen Strukturen. Es deutet sich bereits in diesen Aufnahmen an, dass das Untersuchungsgebiet mit Bezug auf die bodenphysikalischen Parameter und möglicherweise auch archäologischen Strukturen kleinräumlich variabel ist.



Abbildung 5-8: Luftbild der Palastvilla bei Mauchenheim. Luftbild: P. HAUPT.

5.2.1.1 Geophysikalische Prospektionen

Im Mai 2013 wurden auf einer Fläche von 30 x 90 m Testmessungen mit der elektrischen Widerstandskartierung (RM15 von Geoscan Research), ERT (SYSCAL Pro von IRIS Instruments) sowie einem Bodenradar mit einer kombinierten 200- und 600- MHz Antenne (RIS MF Hi-mod von IDS) durchgeführt, um den Erhaltungszustand des Hauptgebäudes zu erforschen.

5.2.1.1.1 Elektrische Widerstandskartierung

Durch die elektrische Widerstandskartierung wurden elektrische Widerstandswerte zwischen 6.05 und 20.0 Ω gemessen, was ρ_a -Werten von 15.6 und 51.6 Ωm entspricht. Auffällig ist, dass die archäologischen Strukturen im westlichen Teil der Prospektionsfläche höhere Widerstandsanomalien verursachen (Abb. 5-9).

Die Mauerstrukturen sowie eine große, flächenhafte Anomalie werden durch elektrische Widerstände im Bereich 18.0 bis 20.0 Ω repräsentiert, während mit zunehmender östlicher Lage der Prospektionsfläche die Mauerstrukturen nur noch durch Werte im Bereich 12.0 bis 14.0 Ω abgebildet werden. Die niedrigsten elektrischen Widerstände wurden im östlichsten Bereich des Messfeldes gemessen und bilden eine auffällige Anomalie, die vermutlich einer natürlichen paläogeographischen Form zuzuordnen ist.

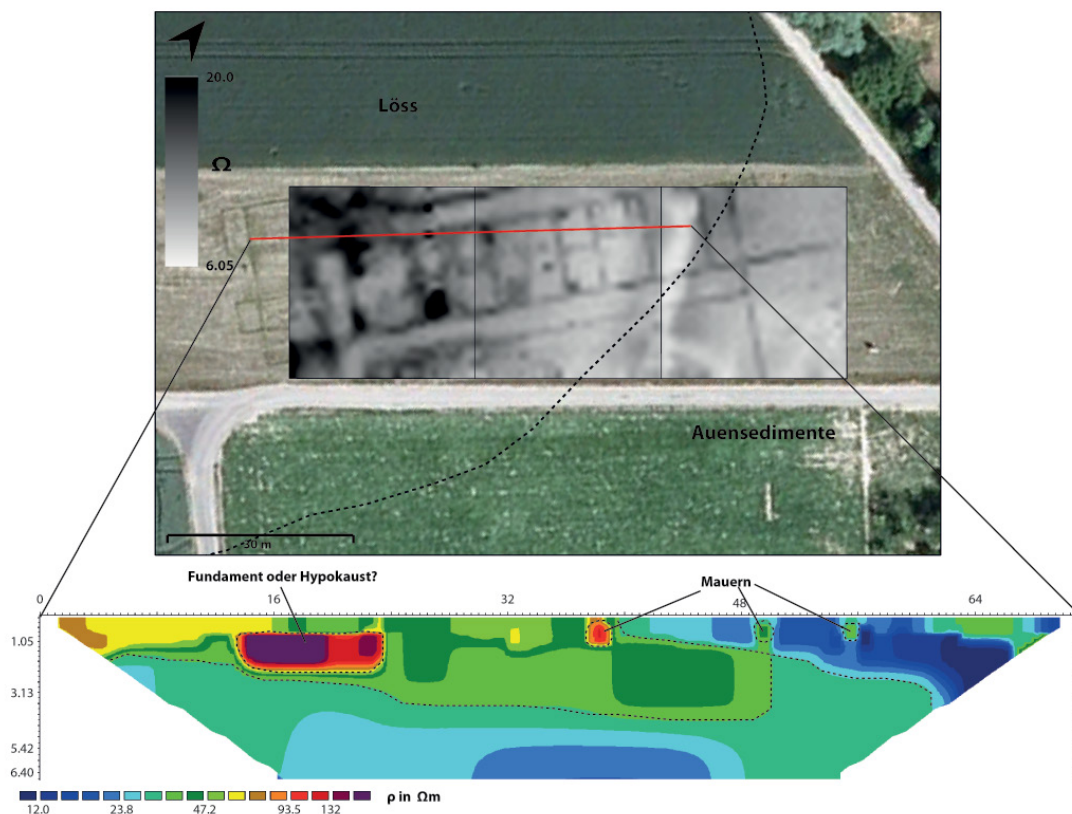


Abbildung 5-9: Elektrische Widerstandskartierung und ERT-Profil auf der Palastvilla bei Mauchenheim.

5.2.1.1.2 Elektrische Widerstandstomographie

Das ERT-Profil wurde so angelegt, dass es möglichst viele Mauerstrukturen und die stark unterschiedlichen Bereiche im Westen und Osten der Prospektionsfläche schneidet. Die Messungen wurden mit einer Schlumberger-Konfiguration und einem Elektrodenabstand

von 1 m durchgeführt. Der Wertebereich liegt zwischen 12.0 und 132.0 Ωm . Mindestens drei Mauerstrukturen heben sich als Anomalien mit höherem ρ vom umliegenden Bodenmaterial ab. Während die beiden östlichen Mauerstrukturen nur Werte von ca. 50 Ωm verursachen (Abb. 5-9), zeichnet sich die dritte Mauerstruktur bei Meter 39 des ERT-Profiles durch einen Wert von mehr als 100 Ωm aus. Da sich alle drei Mauerstrukturen in derselben Tiefe befinden, kann von einem relativ ähnlichen Erhaltungszustand ausgegangen werden. Der einzige erkennbare Unterschied zwischen diesen drei Strukturen liegt nicht in der Struktur selbst, sondern im ρ des umliegenden Bodenmaterials. Die beiden östlichen Mauerstrukturen werden von Bodenmaterial mit einem niedrigen ρ umgeben (ca. 12.0 bis 16.9 Ωm). Im Gegensatz dazu befindet sich die westliche Mauerstruktur in einem Bereich mit einem ρ von ca. 50 Ωm . Eine weitere, tiefer liegende Struktur zwischen den Elektrodenpositionen 14 und 24 bildet die höchsten Werte von bis zu 132 Ωm und könnte durch ein Fundament oder ein Hypokaust verursacht werden. Diese Anomalie kann nicht eindeutig in den Prospektionsergebnissen der elektrischen Widerstandskartierung oder des Bodenradars identifiziert werden, da sie erst ab einer Tiefe von 1.2 m auftritt, was die Eindringtiefe der beiden Methoden bei den vorliegenden Bodenverhältnissen und der gewählten Konfiguration überschreitet.

5.2.1.1.3 Bodenradar

Die Messungen mit dem Bodenradar wurden auf der Messfläche der elektrischen Widerstandskartierung durchgeführt. Die in Abbildung 5-10 dargestellten Timeslices repräsentieren die flächenhaften Reflektionen der archäologischen Strukturen in einer zusammengefassten Tiefe von jeweils 10 cm. Ab einer Tiefe von 30 cm können die ersten linearen Anomalien, die dem Verlauf von Mauerstrukturen entsprechen, angesprochen werden.

In Timeslice 5, bzw. einer Tiefe von 40-50 cm ist erneut der Unterschied zwischen dem östlichen und westlichen Bereich der Prospektionsfläche zu erkennen. Während im westlichen Bereich neben den Mauerstrukturen auch viele kleinere Reflektionen zu sehen sind, erfolgt ab Meter 40 auf der X-Achse ein abrupter Übergang. Ab diesem Punkt sind in östlicher Richtung nur noch die Mauerstrukturen klar ersichtlich. Kleinere Reflektionen durch verstärktes Mauermaterial oder einzelne Steine sind, obwohl sicherlich vorhanden, nicht sichtbar. Die Grenze zwischen den unterschiedlichen Bereichen korreliert mit der Mauerstruktur bei Elektrode 38 im ERT-Profil, die den Übergang zu einem Untergrund mit niedrigem elektrischem Widerstand markiert.

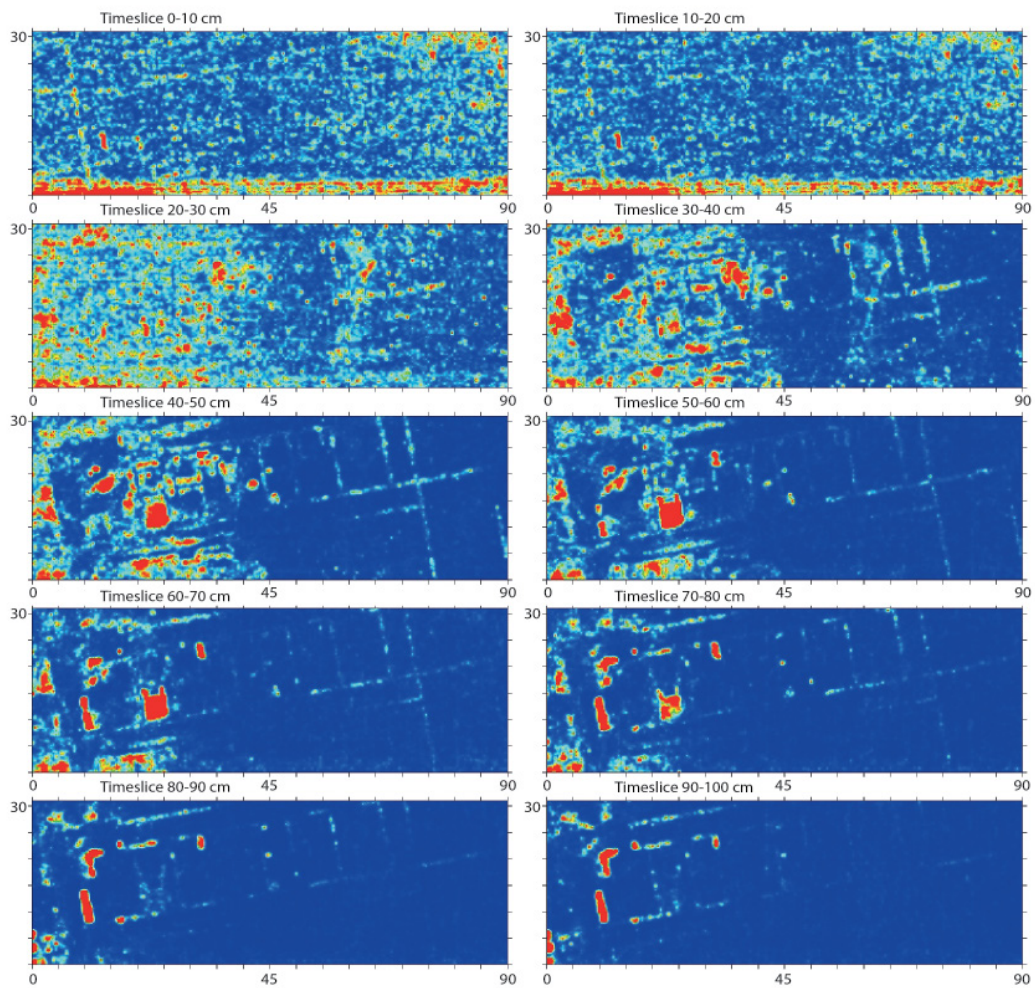


Abbildung 5-10: Timeslices der Bodenradar-Prospektion (600 MHz-Antenne) auf der Palastvilla bei Mauchenheim.

5.2.1.2 Analyse

Alle angewendeten geophysikalischen Methoden erfassen den Unterschied innerhalb der Prospektionsfläche und verdeutlichen die teilweise drastischen Auswirkungen auf die Prospektionsergebnisse und die archäologische Interpretation der Daten. Die Gründe für diese unterschiedlichen Prospektionsergebnisse auf solch kleinem Raum liegen vermutlich in den bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften des umliegenden Materials und sind nicht direkt durch den Erhaltungszustand der archäologischen Strukturen begründet. Die geologische Karte GK 25 Blatt 6213 Alzey (LGB-RLP 1998) liefert erste Anhaltspunkte über die oberflächlich anstehenden Sedimente sowie die hydrologischen Gegebenheiten. Das Untersuchungsgebiet wird von zwei Seiten von Bachläufen eingerahmt. Im Süden verläuft die Selz, die in Richtung Nord-Osten entwässert. Von Norden fließt ein kleiner, heute weitgehend kanalisierter Bach in Richtung der Selz. In Abbildung 5-9 liegt dieser Bach parallel

zu dem Nord-Süd verlaufenden asphaltierten Weg. Die geologische Karte weist für den Bereich des Bachlaufs holozäne Sedimente aus, die dem typischen Aufbau von Bachterrassen mit abwechselnden Fazies aus sandigem, bzw. steinigem Substrat und tonigen Hochflutsedimenten entsprechen. Im Untersuchungsgebiet befinden sich diese Auensedimente genau im östlichen Bereich der Prospektionsfläche (Abb. 5-9). Zieht man in Betracht, dass bei einer geologischen Kartierung auch immer ein gewisser Ungenauigkeitsfaktor eine Rolle spielt, könnten die Auensedimente möglicherweise bis in das Prospektionsgebiet reichen und mit den niedrigen ρ -Werten im ERT-Profil korrelieren. Hinzu kommt, dass ehemalige Bachläufe aus hydrologischer Sicht oftmals noch an einen rezenten Bachlauf gekoppelt sind. Diese Kombination aus tonhaltigem Boden und erhöhtem Wassergehalt ist eine mögliche Erklärung für den niedrigen ρ des Bodenmaterials und den geringen Kontrast zwischen Bodenmaterial und Mauerstruktur. Eine ähnliche Auswirkung der bodenphysikalischen Parameter ergibt sich für das Bodenradar. Durch eine erhöhte Bodenfeuchte und einen erhöhten Tongehalt im östlichen Bereich der Prospektionsfläche würden Eindringtiefe und Kontrast der archäologischen Struktur zum umliegenden Material negativ beeinflusst.

5.2.1.3 Elektrisches Widerstandsmodell für Mauchenheim

Das elektrische Widerstandsmodell für Mauchenheim wurde auf Grundlage der elektrischen Widerstandstomographie mit der Software Res2DMod angefertigt. Die daraus berechnete Verteilung des ρ_a wurde mit der Software Res2DInv invertiert. Im Fokus der Modelle steht der Einfluss des ρ des Bodenmaterials auf die Ausbildung einer Widerstands-anomalie durch die Mauerstrukturen.

Als Grundlage des Modells fungiert ein ERT-Profil mit 36 Elektroden und einem Elektrodenabstand von 0.5 m. Die Mauerstruktur befindet sich in der Mitte des Profils und besitzt eine Größe von 0.5 x 0.425 m und einen ρ_m von 250 Ω m. Um die beschriebenen Unterschiede im elektrischen Widerstand des Bodenmaterials des östlichen und westlichen Bereichs der Prospektionsfläche zu repräsentieren, wurden ρ_m -Werte von 14 und 50 Ω m gewählt (Abb. 5-11). Da keine Bodenproben zur Berechnung der ρ -Werte entnommen werden konnten und keine detaillierten Angaben zum Aufbau der Mauerstrukturen bekannt sind, handelt es sich bei den gewählten Maßen und Werten um geschätzte Angaben basierend auf dem ERT-Profil. Zusätzlich wurde die Annahme getroffen, dass das Bodenmaterial weitestgehend homogen ist. Das Modell wurde mit einer Wenner-Schlumberger-Elektrodenkonfiguration zum Vergleich mit dem ERT-Profil und einer Pol-Pol-Elektrodenkonfiguration zum Vergleich mit der elektrischen Widerstandskartierung durchgeführt. Die Pol-Pol-Messungen ergaben einen stärkeren Kontrast zwischen Mauer

und umliegendem Bodenmaterial (ca. $10 \Omega\text{m}$) bei einem hohen Hintergrundwert (Abb. 5-12), was im Einklang mit den Ergebnissen von SCOLLAR et al. (1990) und HESSE (1966b) steht. Aus Abbildung 5-12 lässt sich beim Vergleich mit den in Kapitel 5.2.1.1 vorgestellten realen Daten außerdem die Ungenauigkeit bei der Schätzung der ρ -Werte verdeutlichen. Die Höchstwerte der elektrischen Widerstandskartierung lagen zwischen 15.6 und $51.6 \Omega\text{m}$, während das Modell Werte von über $60 \Omega\text{m}$ hervorruft.

Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass zwei mehr oder weniger identische Mauerstrukturen, die sich in zwei aus geophysikalischer Sicht unterschiedlichen Böden befinden, bei der Prospektion mit der elektrischen Widerstandskartierung einen unterschiedlichen Kontrast zwischen der Anomalie der Mauerstruktur und dem Bodenmaterial verursachen. Aus Sicht der Denkmalpflege bedeutet dies, dass bei der Beurteilung des Erhaltungszustandes einer Mauerstruktur durch elektrische Widerstandsmessungen bei gleichzeitiger starker Heterogenität des Bodenmaterials der Fundstelle eine erhöhte Vorsicht bei der Interpretation der Prospektionsergebnisse notwendig ist.

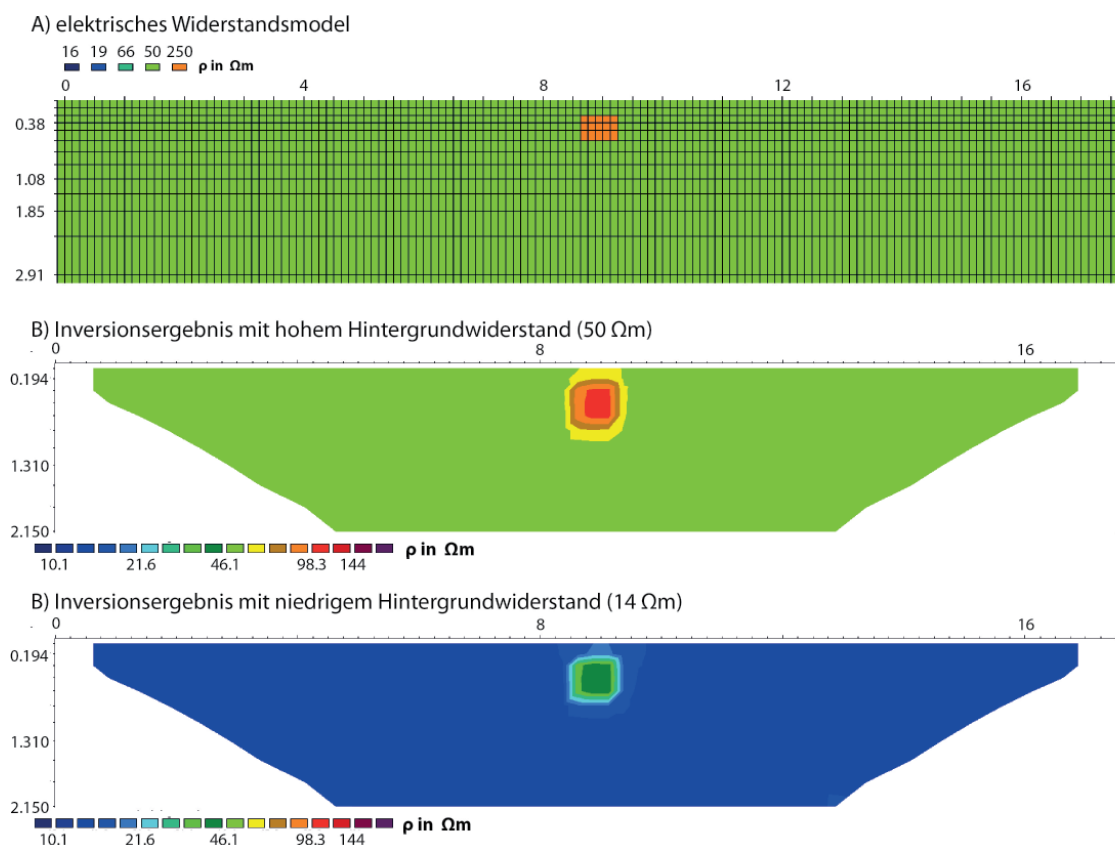


Abbildung 5-11: Elektrisches Widerstandsmodell für Mauchenheim und Inversionsergebnisse bei unterschiedlichen Hintergrundwiderständen.

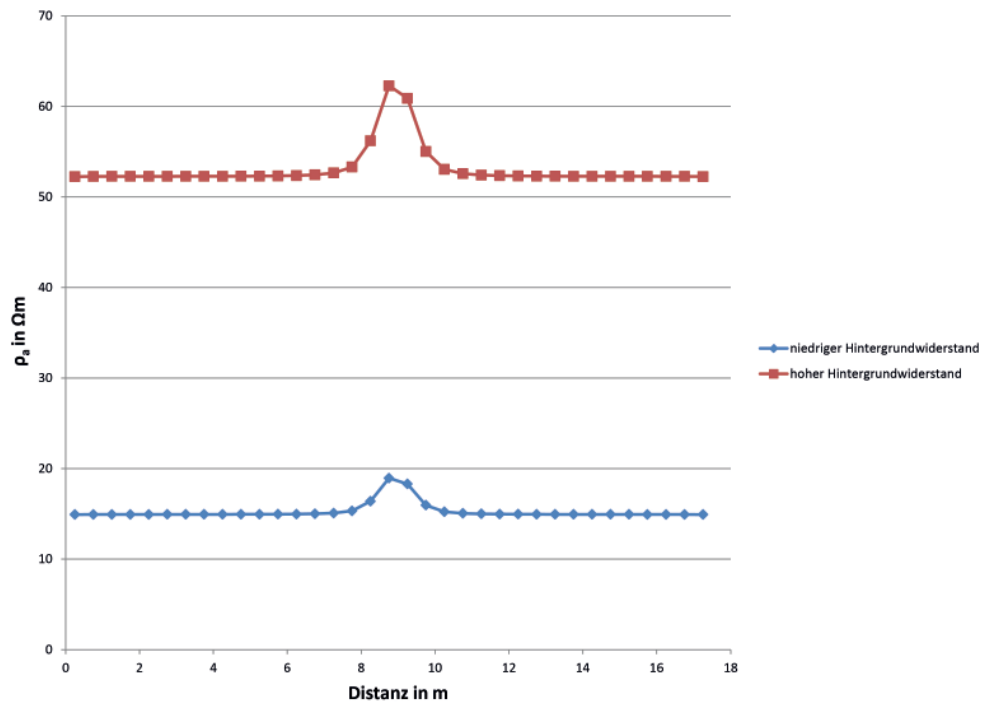


Abbildung 5-12: Ergebnis der Anwendung der Pol-Pol-Konfiguration auf das Widerstandsmodell von Mauchenheim.

5.2.2 Offenheim

Aus der Gemarkung Offenheim ist eine weitere Palastvilla bekannt, die in ihren Ausmaßen der Mauchenheimer Palastvilla ähnelt. Auch hier sind durch Luftbilder Lage und Grundriss der Hofanlage größtenteils bekannt (FAUL 2013). Besonders gut ausgeprägte Bewuchsmerkmale auf einem Luftbild aus dem Jahr 2012 (Abb. 5-13) zeigen ein queraxial aufgebautes Hofareal mit mindestens sechs Nebengebäuden und einem repräsentativen Hauptgebäude (OFENLOCH 2014). Die Mauerstrukturen sind als negative Bewuchsanomalien sichtbar und vermitteln einen sehr guten Erhaltungszustand des Hauptgebäudes.

Das Untersuchungsgebiet liegt östlich von Offenheim auf einem nach Südosten ausgerichteten, leicht geneigten Hang, an dessen Fuß der kanalisierte Steinbach verläuft. Die Fläche wird landwirtschaftlich genutzt, hauptsächlich mit einer abwechselnden Fruchtfolge von Zuckerrüben und Winterweizen. In den letzten 10 Jahren betrug die maximale Pflugtiefe ca. 20 cm, allerdings können durch die bei der Zuckerrübenernte eingesetzten Vollernter tiefere Bodeneingriffe entstanden sein. Aus naturräumlicher Sicht befindet sich das Untersuchungsgebiet im Alzeier Hügelland, dessen geologischer Aufbau maßgeblich durch die marinen Sedimente des Mainzer Beckens geprägt ist. Die tertiären Sedimente treten im Untersuchungsgebiet als eine Abfolge von marinen Becken- und

Küstensedimenten auf, die ein breites Spektrum von Festgestein (Kalksteine), tonigen Beckensedimenten (Mergel) bis hin zu sandigen Küstensedimenten (oberer und unterer Meeressand, Schleichsand) umfasst. Die tertiäre Geologie wird häufig von pleistozänem Löss und holozänen Auensedimenten überlagert (LGB-RLP 2005).



Abbildung 5-13: Luftbild der Palastvilla bei Offenheim. Luftbild: U. KIESOW, Archaeoflug.

Auf der Luftbildaufnahme von Anfang Juni 2012 zeigt sich der Grundriss des Hauptgebäudes sowie mehrerer Nebengebäude als Bewuchsanomalien. Ein besonderes Augenmerk sei hierbei auf den östlichen und westlichen Flügel des Hauptgebäudes und das Nebengebäude in der südöstlichen Ecke des Hofareals gelegt. Für beide Flügel des Nebengebäudes ist der Grundriss erkennbar, auch eine interne Raumaufteilung ist ansprechbar. Das Nebengebäude ist zwar als Bewuchsanomalie sichtbar, jedoch nicht so deutlich ausgeprägt wie der Grundriss des Hauptgebäudes. Aus dem Luftbild können, abgesehen von der archäologischen Interpretation, auch Informationen zu den Bodenverhältnissen gewonnen werden. Im südlichen Bereich des Feldes, in der Nähe des kanalisierten Baches, zeigt die Vegetation eine großflächige, hellgrüne Verfärbung, die häufig im Zusammenhang mit einer erhöhten Bodenfeuchte steht. Dieser hellgrüne

Bereich endet abrupt an einer West-Ost verlaufenden linearen Anomalie, die laut älteren topographischen Karten dem Verlauf eines ehemaligen Feldwegs entspricht. Im Ansatz zeigt sich, dass die Prospektionsfläche aus bodenkundlicher und hydrologischer Sicht keine homogene Fläche zu sein scheint.

5.2.2.1 Geophysikalische Prospektion

Im Zuge einer studentischen Abschlussarbeit am Institut für Vor- und Frühgeschichte der Johannes Gutenberg-Universität Mainz und in Kooperation mit der Landesarchäologie Mainz sowie der Gemeinde Offenheim wurde im Winter 2013 und Frühjahr 2014 die Fundstelle mittels geophysikalischer Methoden prospektiert, um genauere Informationen über den Erhaltungszustand sowie die Funktion einzelner Teile des Hofareals zu erhalten. Zum Einsatz kamen auf einer Fläche von 23.400 m² die elektrische Widerstandskartierung (RM15 von Geoscan Research), ERT (SYSCAL Pro von IRIS Instruments), Magnetometer (Geometrics G-858) sowie ein Bodenradar (RIS MF Hi-mod von IDS mit 200- und 600-Mhz-Antenne).

5.2.2.1.1 Elektrische Widerstandskartierung

Zur Anwendung kam eine Twin-Probe-Konfiguration mit einem Elektrodenabstand von 0.5 m zwischen den beiden mobilen Elektroden. Die horizontale Messauflösung lag bei 1 m. Die elektrische Widerstandskartierung zeigt sehr variable Ergebnisse für das Hauptgebäude. Ein bereits aus Luftbildern bekanntes pilzförmiges Wasserbecken (FAUL 2013) sowie eine weiter nördlich gelegene, T-förmige Struktur bilden Anomalien mit hohem elektrischem Widerstand (Abb. 5-14). Im Vergleich dazu wurden die aus den Luftbildern bekannten Mauerzüge des West- und Ostflügels durch diese Methode gar nicht oder nur teilweise erfasst. Vom Ostflügel ist lediglich ein Teil des Grundrisses sowie eine flächenhafte Anomalie, die vermutlich im Zusammenhang mit einem Hypokaust steht, sichtbar. Der Grundriss des Westflügels konnte durch die elektrische Widerstandskartierung überhaupt nicht abgebildet werden. Im Gegensatz dazu steht das Prospektionsergebnis des östlichen Nebengebäudes, dessen Grundriss sehr gut durch die Methode abgebildet werden konnte. Die Ergebnisse zeigen außerdem eine Ausbildung von Streifen, die mit der Richtung der landwirtschaftlichen Bearbeitung korreliert.

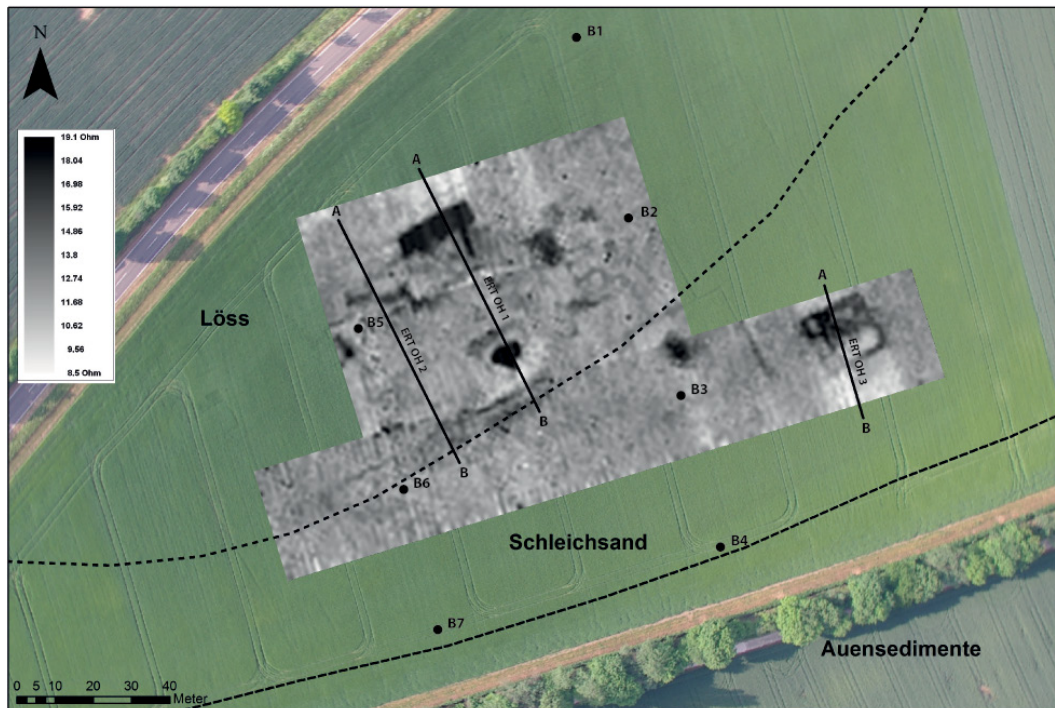


Abbildung 5-14: Ergebnis der elektrischen Widerstandskartierung und Lage der ERT-Profile. Luftbild: U. KIESOW, Archaeoflug.

5.2.2.1.2 Magnetometer

Bei der Prospektion mit dem Caesium-Magnetometer kamen vier Sonden zum Einsatz, die in einem Abstand von jeweils 0,5 m voneinander an einem Messwagen befestigt wurden. Die Auflösung in Laufrichtung lag bei 0,2 m pro Messung. Die hohen Messwerte in nT werden im Messbild durch helle Farben, niedrige Messwerte durch dunkle Farben dargestellt. Die Prospektion erbrachte ein ähnliches Ergebnis wie die Prospektion mit der elektrischen Widerstandskartierung (Abb. 5-15). Die großflächigen Strukturen des Hauptgebäudes (pilzförmiges Wasserbecken und zwei vermutete Hypokaustanlagen im West- und Ostflügel) werden mit Ausnahme der T-förmigen Anomalie im nördlichen Bereich von der Methode abgebildet. Die Mauerzüge von West- und Ostflügel hingegen können nicht angesprochen werden. Da die Hofmauer und die beiden an sie angebauten Nebengebäude eine deutliche negative Anomalie im Messbild hervorrufen, besitzt das verwendete Steinmaterial eine niedrigere magnetische Suszeptibilität als das umliegende Bodenmaterial. Es ist davon auszugehen, dass das Hauptgebäude mit dem gleichen Steinmaterial erbaut wurde und das negative Prospektionsergebnis in diesem Bereich dementsprechend nicht durch das Material, sondern durch den Erhaltungszustand der Strukturen bedingt wird.

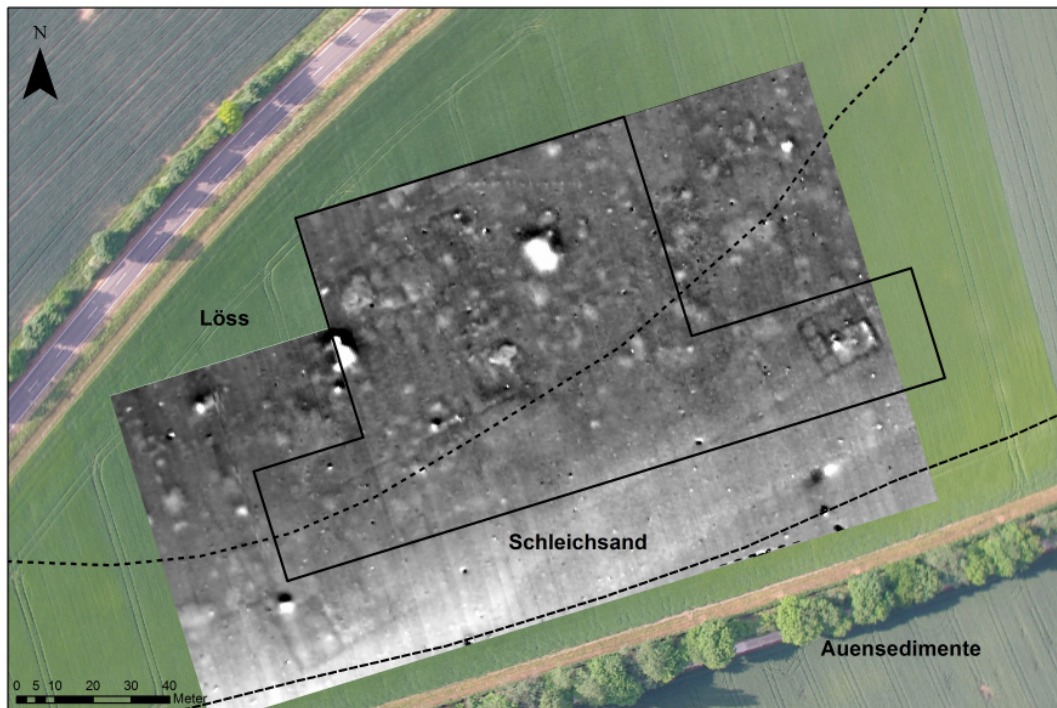


Abbildung 5-15: Ergebnis der Magnetometer-Prospektion und Lage der elektrischen Widerstandskartierung. Messwerte zwischen 47 nT (weiß) und -40 nT (schwarz). Luftbild: U. KIESOW, Archaeoflug.

5.2.2.1.3 Elektrische Widerstandstomographie

Die vertikale Verteilung des ρ in den ERT-Profilen (Abb. 5-16) gibt weiteren Aufschluss über die in der Flächenkartierung erkannte Heterogenität der archäologischen Strukturen (Abb. 5-14). Die Messungen wurden mit der Schlumberger-Konfiguration und einem Elektrodenabstand von 1 m (ERT-Profil OH1 und OH2) bzw. 0,5 m (ERT-Profil OH3) durchgeführt. In ERT-Profil ERT OH 1 sind die T-förmige Struktur sowie das pilzförmige Wasserbecken als Anomalien mit hohem ρ erkennbar (Abb. 5-16). Die hohen elektrischen Widerstände von über 300 Ωm deuten auf massive Strukturen aus Material mit geringer elektrischer Leitfähigkeit hin. Weitere Anomalien mit hohem ρ können mit archäologische Strukturen in Verbindung gebracht werden, jedoch erscheint der Bereich bis in eine Tiefe von ca. 1,5 m weitestgehend homogen zu sein. Eine weitere Beobachtung lässt sich in ERT-Profil OH 2 machen: der oberflächennahe Bereich erscheint weitestgehend homogen mit Werten um 60 Ωm . An einigen Stellen ist ein leicht erhöhter ρ vorhanden, jedoch ist der Kontrast zum umliegenden Material relativ gering. Auf den ersten Blick korreliert dieser Sachverhalt mit den negativen Prospektionsergebnissen der elektrischen Widerstandskartierung in diesem Bereich.

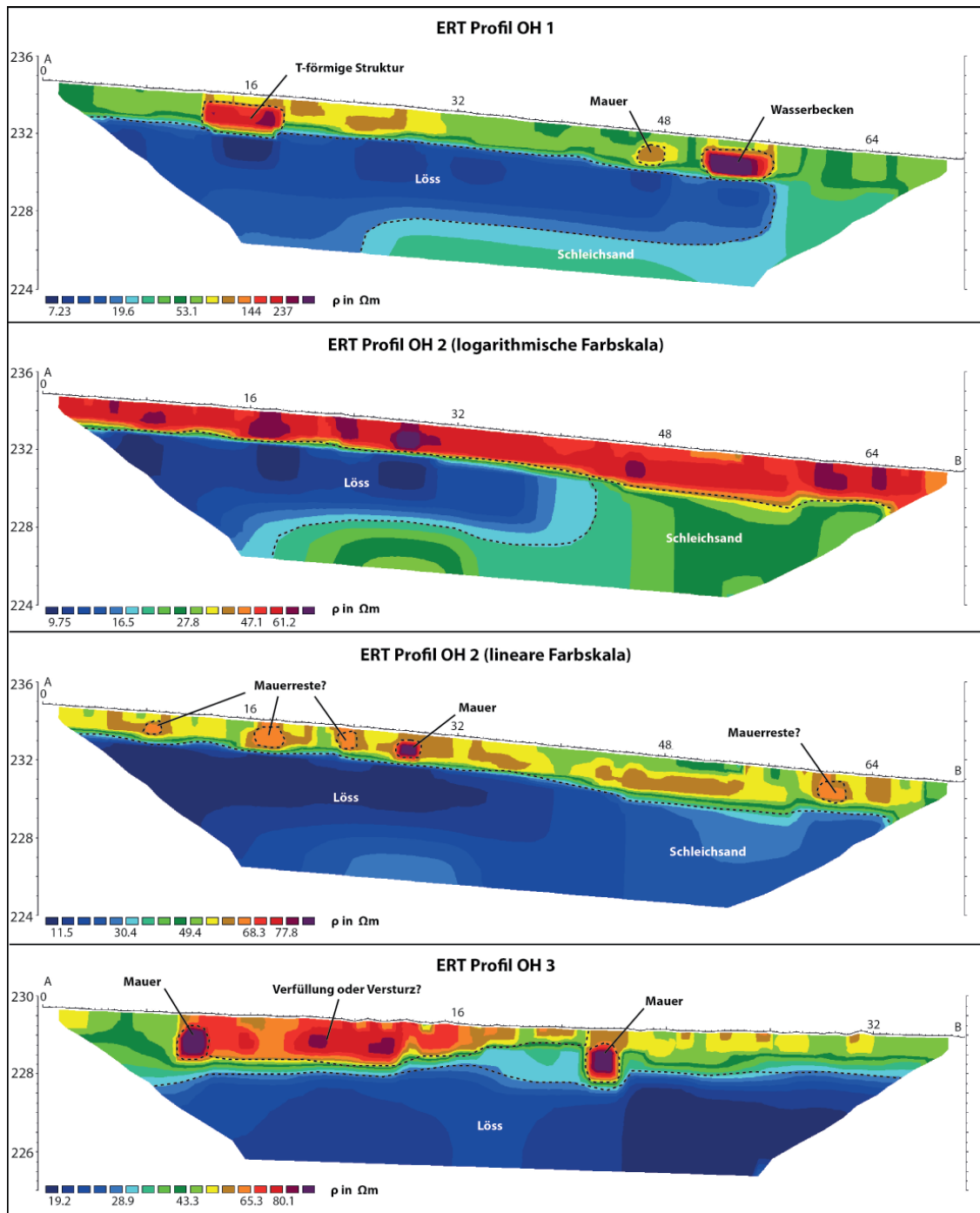


Abbildung 5-16: Inversionsergebnisse der ERT-Profile bei Offenheim.

Der weitere Informationsgehalt des Profils besteht aus dem aus der geologischen Kartierung bekannten Übergang von Löss in den hangabwärts liegenden Schleichsand. Teilweise überlagert der Löss den Schleichsand.

Um den Kontrast im oberflächennahen Bereich des ERT-Profils zu erhöhen, wurde eine Darstellung der Inversionsergebnisse des ERT-Profils OH 2 mit einer linearen Farbskala gewählt. Die zuvor nur undeutlich sichtbaren Anomalien mit erhöhtem ρ treten nun

besser hervor und erlauben im Bereich zwischen Profilmeter 24 und 32 des ERT-Profiles die sichere Interpretation einer Mauerstruktur. Aus den Luftbildern ist für diesen Bereich jedoch eine Vielzahl weiterer Mauerstrukturen bekannt, die bislang mit keiner der vorgestellten Prospektionsmethoden eindeutig erfasst werden konnten. Neben der bereits angesprochenen Mauerstruktur in ERT-Profil OH 2 sind durch die lineare Farbskala vier Anomalien mit einem ρ von ca. 65-70 Ωm erkennbar, die exakt mit der Position der Mauerstrukturen aus dem Luftbild übereinstimmen. Hierbei handelt es sich vermutlich um die Überreste von Mauerstrukturen, die durch die landwirtschaftliche Bearbeitung und Erosion bereits so stark zerstört wurden, dass sie aus geophysikalischer Sicht nur noch einen geringen Kontrast zum umliegenden Bodenmaterial bilden.

Wie bereits bei der Prospektion des südöstlichen Nebengebäudes mit der elektrischen Widerstandskartierung zeigt auch das ERT-Profil OH 3 in diesem Bereich sehr klare Anomalien der Außenmauern und internen Struktur des Nebengebäudes. Die durch die Mauern verursachten Anomalien weisen Werte von ca. 100 Ωm auf. Diese klar definierten Anomalien sowie der hohe ρ lassen auf einen relativ guten Erhaltungszustand schließen. Die Mauern scheinen bis in eine Tiefe von ca. 1.3 Metern erhalten zu sein, ihre Oberkante liegt ca. 0.3 bis 0.5 m unter der Erdoberfläche.

5.2.2.2 Analyse

Die Erkundung der Prospektionsfläche mittels Bohrungen zeigt eine Unterteilung des Untersuchungsgebietes in Erosions- und Akkumulationsbereiche (Abb. 5-17). Während die Bodenprofile im Kulminationsbereich (B1 und B2) einen relativ mächtigen Pflughorizont Ap aufweisen, der ab einer Tiefe von ca. 0.5 m in den anstehenden Löss übergeht, können am Hangfuß Bodenprofile mit flacheren Pflughorizonten angetroffen werden, die über einem Kolluvium (B3) oder einer Serie von Kolluvien (B4) angesiedelt sind. Das zweite Transekt (B5 bis B7) bestätigt diesen Aufbau. Betrachtet man die Bodenprofile im Kontext der Ergebnisse der geophysikalischen Prospektion, lassen sich einige Korrelationen erkennen. Im Kulminationsbereich haben Erosionsprozesse zu einer Abtragung des über den archäologischen Strukturen befindlichen Bodenmaterials geführt. Dementsprechend liegen die archäologischen Strukturen in diesem Bereich näher an der Erdoberfläche, was eine Zerstörung durch landwirtschaftliche Bearbeitung begünstigt. Ausgenommen hiervon sind tieferliegende Strukturen, wie das Wasserbecken und die Hypokaustanlagen, die nicht vom Pflug erreicht werden und zusätzlich durch ihre massive Bauweise widerstandsfähiger sind. Am Hangfuß akkumuliert sich das Material, zusätzlich spielt der heute kanalisierte Bach eine Rolle. In naturnahem Zustand können durch den Bach Hochflutsedimente entstanden sein, die sich möglicherweise in

der als Kolluvium M2 identifizierten Schicht in B4 und B7 äußern. Generell ergeben sich dadurch für den Erhaltungszustand der archäologischen Strukturen am Hangfuß günstigere Bedingungen, was vermutlich auch der Grund für die relativ gut ausgeprägten geophysikalischen Anomalien des südöstlichen Nebengebäudes ist.

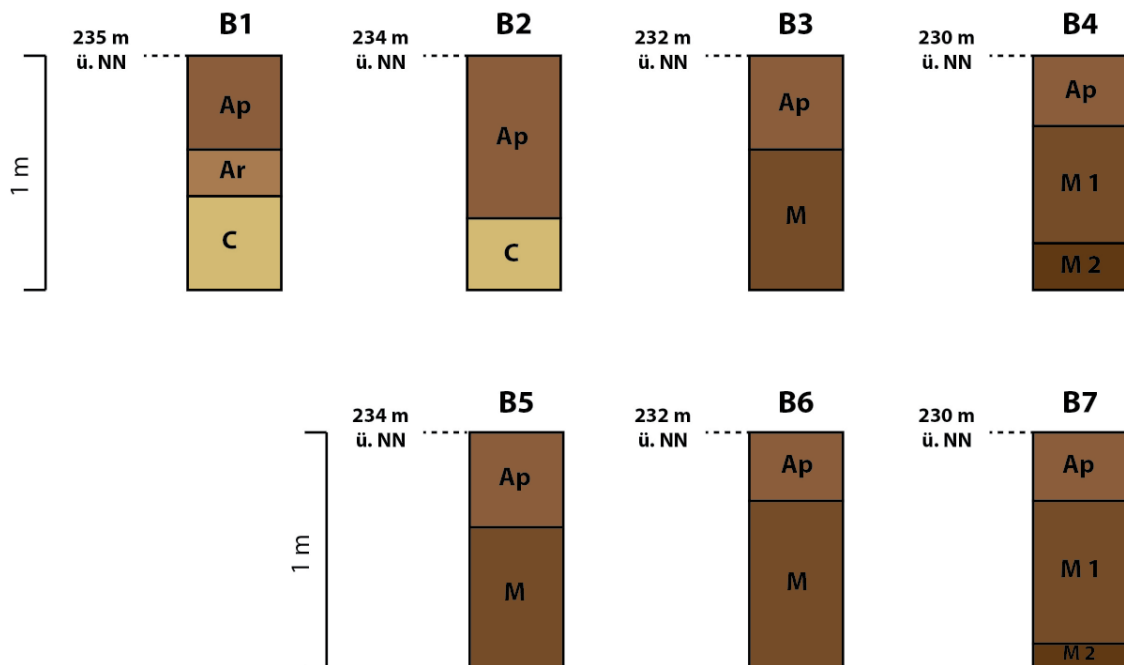


Abbildung 5-17: Schematische Darstellung der Bodenprofile bei Offenheim. Lage der Profile siehe Abbildung 5-14.

In welcher Form die geologischen Übergänge zwischen Löss, Schleichsand und Auensedimenten eine Rolle für die Qualität der Prospektionsergebnisse spielen, bleibt weitestgehend unklar. Der Übergang von Löss zu Schleichsand ist besonders in ERT-Profil OH 2 mit einer linearen Farbskala sichtbar (Abb. 5-16), jedoch spielt hier die Geologie im Vergleich zum Erhaltungszustand der archäologischen Strukturen nur eine untergeordnete Rolle. Die Auensedimente, bzw. Kolluvien am Hangfuß, beeinflussen zudem die Ergebnisse der Magnetometer-Prospektion. Im südlichen Bereich der Prospektionsfläche sind flächenhaft höhere Messergebnisse sichtbar. Dies hängt zum einen mit der Akkumulation von tonreichem und organischem Material in den Kolluvien zusammen, die eine höhere magnetische Suszeptibilität besitzen. Zum anderen wurde vermutlich auch Siedlungsmaterial vom Bereich des Hauptgebäudes in Richtung Hangfuß verlagert, was die magnetische Suszeptibilität der Kolluvien zusätzlich erhöht hat. Das südwestliche Nebengebäude befindet sich genau in diesem Bereich mit einer flächenhaft höheren magnetischen Suszeptibilität und wird weniger deutlich durch die Magnetometer-Prospektion abgebildet. In diesem Fall liegt vermutlich eine Maskierung durch eine über der archäologischen Struktur liegende Schicht vor.

5.2.2.3 Elektrisches Widerstandsmodell für Offenheim

Das elektrische Widerstandsmodell für Offenheim ist in den Maßen identisch mit dem in Kapitel 5.2.1.3 beschriebenen Modell für Mauchenheim. Das Modell wurde erstellt, um die trotz positiver Luftbildbefunde negativen Prospektionsergebnisse mit der elektrischen Widerstandskartierung im Bereich des westlichen Teils des Hauptgebäudes zu untersuchen. Als Hintergrundwiderstand wurde ein ρ_m von $60 \Omega\text{m}$ verwendet, der ρ_m der Mauerstruktur wurde sukzessive von $250 \Omega\text{m}$ bis auf $70 \Omega\text{m}$ reduziert. Der Hintergrundwiderstand von $60 \Omega\text{m}$ ist an die im ERT-Profil OH 2 über dem westlichen Bereich des Hauptgebäudes gemessenen Werte angepasst.

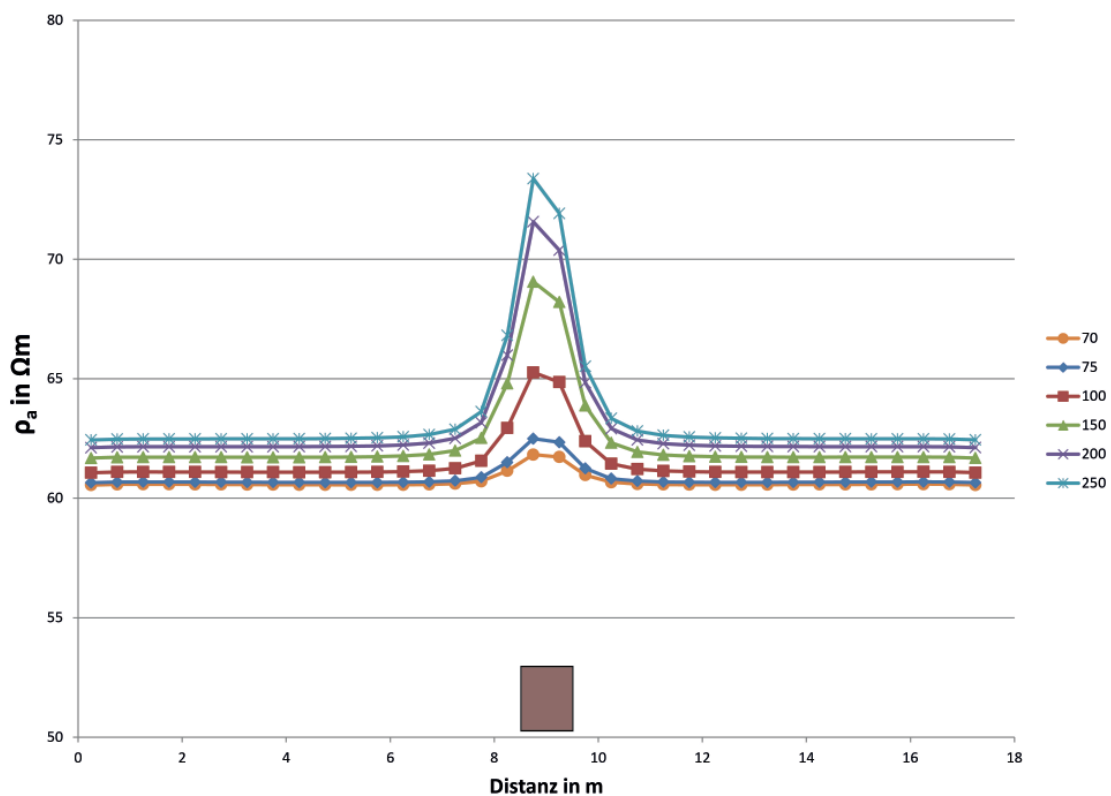


Abbildung 5-18: Ergebnisse der modifizierten Pol-Pol-Konfiguration bei verschiedenen ρ_m -Werten der Mauerstruktur.

In Abbildung 5-18 ist das Ergebnis einer elektrischen Widerstandskartierung mit einer Pol-Pol-Elektrodenkonfiguration entlang des elektrischen Widerstandsmodells dargestellt. Der Kontrast nimmt wie zu erwarten mit abnehmendem ρ_m der Mauerstruktur ab, was bei einem ρ_m von 75 bzw. $70 \Omega\text{m}$ nur noch einen Kontrast von $< 2 \Omega\text{m}$ bei einer elektrischen Widerstandskartierung mit der Pol-Pol-Elektrodenanordnung hervorruft (Abb. 5-18). Da es sich bei dieser Betrachtung um einen Idealfall ohne Fehlmessungen und Hintergrundrauschen handelt, wäre die Mauerstruktur theoretisch noch als Anomalie sichtbar. Hierbei ist jedoch nicht

berücksichtigt, dass bei Messungen im Gelände eine Vielzahl an Faktoren, wie z.B. Elektrodenkontakt, zu Abweichungen bei den Messungen führen können.

Um das Ausmaß des Hintergrundrauschens im Gelände zu verifizieren, wurden zwei Messpunkte im Umfeld der archäologischen Fundstelle ausgewählt, bei denen von einer geringfügigen Störung durch archäologische Strukturen ausgegangen werden konnte. An beiden Messpunkten wurden jeweils zwei Serien von Messungen mit dem Twin-Probe-Array durchgeführt, wobei jede Serie 30 Messungen umfasste. Bei der ersten Serie wurden die Messungen an der gleichen Stelle mit gleicher Ausrichtung der mobilen Elektroden wiederholt, während bei der zweiten Serie die beiden mobilen Elektroden bei jeder Messung um den Messpunkt um wenige Grad rotiert wurden. An Messpunkt 1 ergab sich für die wiederholten Messungen ein Mittelwert von $38.29 \Omega\text{m}$ mit einer Standardabweichung von 2.47, während bei der rotierten Messreihe an Messpunkt 1 ein Mittelwert von $37.55 \Omega\text{m}$ mit einer Standardabweichung von 2.27 ermittelt wurde. Für den Messpunkt 2 lag der Mittelwert bei der wiederholten Messung bei $35.19 \Omega\text{m}$ mit einer Standardabweichung von 0.81 und bei der rotierten Messung bei $34.91 \Omega\text{m}$ mit einer Standardabweichung von 0.97 (Abb. 5-19). Während die Messungen an Messpunkt 2 weitestgehend konsistent sind, liegen die Abweichungen bei Messpunkt 1 in einem Bereich, der eine durch archäologische Strukturen ausgelöste Anomalie maskieren könnte. Daraus ergibt sich aber auch, dass das Hintergrundrauschen für eine archäologische Fundstelle nicht unbedingt homogen sein muss, sondern räumlich variiert. Fundstellen mit Mauerstrukturen nehmen sicherlich eine besondere Stellung ein, da durch die Strukturen der Steingehalt im Boden häufig erhöht ist. Daraus resultiert ein schlechterer Elektrodenkontakt, der sich in einem stärkeren Hintergrundrauschen äußern kann.

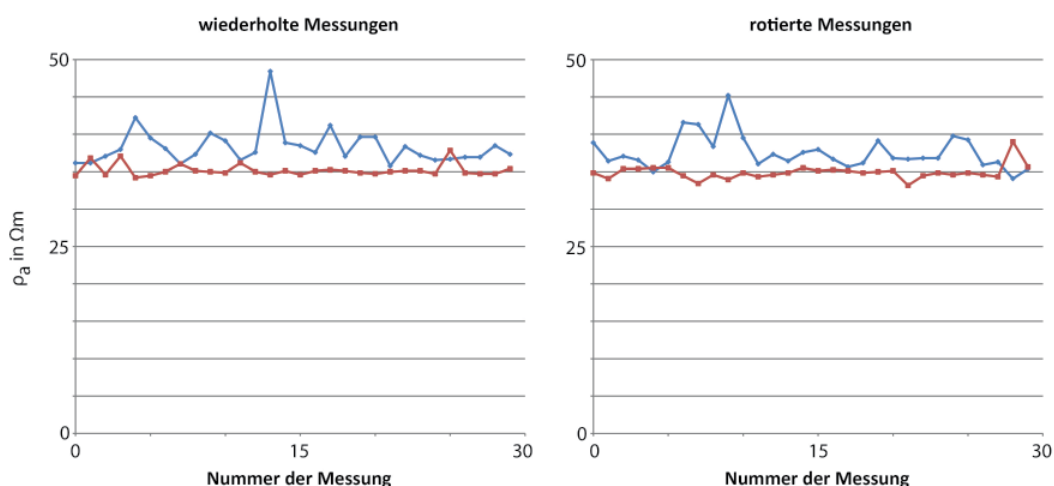


Abbildung 5-19: Elektrische Widerstandsmessungen zur Bestimmung des Hintergrundrauschens bei Offenheim.

Um die Auswirkungen dieses Hintergrundrauschens auf die Gegebenheiten in Offenheim (niedriger Kontrast zwischen Mauerstruktur und Bodenmaterial) zu untersuchen, wurde das zu Anfang des Kapitels beschriebene Widerstandsmodell mit einem Hintergrundrauschen von 2% erweitert. In Abbildung 5-20 sind die Messergebnisse einer Pol-Pol-Elektrodenkonfiguration bei unterschiedlichen ρ_m -Werten der Mauerstruktur dargestellt. Bei einem ρ_m der Mauer von 100 Ωm kann die verursachte Anomalie noch angesprochen werden (Abb. 5-20), während bei Werten von 75 bzw. 70 Ωm die durch die Mauerstruktur verursachte Anomalie nicht mehr von den umliegenden Messwerten unterschieden werden.

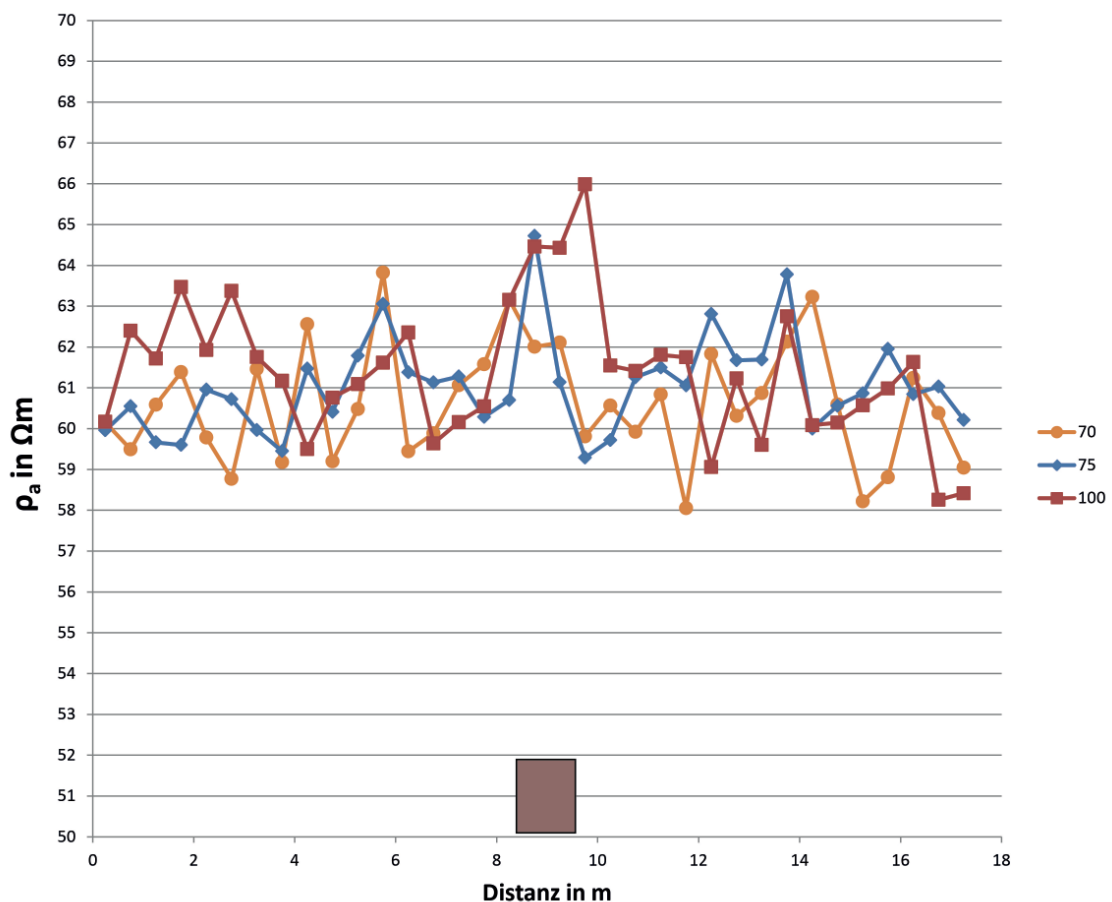


Abbildung 5-20: Einfluss des Hintergrundrauschens auf Messungen mit der Pol-Pol-Konfiguration bei verschiedenen ρ_m -Werten der Mauerstruktur.

5.2.3 Zusammenfassung

Die Analyse der geophysikalischen Prospektionsergebnisse von Mauchenheim und Offenheim im Kontext mit den bodenkundlichen, geomorphologischen und geologischen Gegebenheiten zeigt die Probleme bei der Anwendung von geophysikalischen Prospektionsmethoden.

Die geophysikalischen Prospektionsergebnisse können von den lokalen Gegebenheiten so stark beeinflusst werden, dass sich die durch die archäologischen Strukturen hervorgerufenen Anomalien einer einzelnen Fundstelle auf kleinem Raum sehr unterschiedlich in den Prospektionsergebnissen abzeichnen. Das Fallbeispiel Mauchenheim zeigt, dass durch das unterschiedliche Substrat und die hydrologischen Bedingungen im Boden die Prospektion mit elektrischen Widerstandsmethoden und Bodenradar extrem unterschiedliche Ergebnisse im östlichen und westlichen Teil der Prospektionsfläche liefert. Die Grenze zwischen den beiden Bereichen korreliert mit den Grenzen der geologischen Kartierung.

Die geophysikalischen Prospektionsergebnisse weichen von der Interpretation der Luftbilder ab. Besonders gravierend ist dies im Fall von Offenheim, da durch die Luftbilder nahezu der gesamte Grundriss des Hauptgebäudes sichtbar gemacht wurde, während die elektrische Widerstandskartierung und die Magnetik die Strukturen nur teilweise abbilden konnten. Dies ist vermutlich durch den Erhaltungszustand begründet, der zwar noch zur Ausprägung von Bewuchsmerkmalen führt, aber aus geophysikalischer Sicht nur einen geringen Kontrast zum umliegenden Bodenmaterial darstellt. In den ERT-Profilen äußert sich der schlechtere Erhaltungszustand der Mauern durch einen geringeren ρ , was sich auf die Interpretation der Widerstandskartierung und der Magnetik übertragen lässt.

Die unterschiedlichen geophysikalischen Methoden liefern voneinander abweichende Ergebnisse. Dies ist in Offenheim vor allem im Vergleich der Magnetik-Ergebnisse und der elektrischen Widerstandskartierung bzw. ERT anhand der T-förmigen Struktur im nördlichen Teil des Hauptgebäudes ersichtlich. Die elektrischen Widerstandsmethoden zeigen, dass es sich um eine massive Struktur handeln muss. Diese Struktur ist in der Magnetik nur ansatzweise erkennbar und lässt vermuten, dass es sich um eine Struktur aus Steinmaterial mit geringer magnetischer Suszeptibilität handelt. Dieses Fallbeispiel zeigt erneut, dass bei der Anwendung von nur einer Methode immer eine erhöhte Gefahr besteht, dass vorhandene archäologische Strukturen nicht oder nur teilweise abgebildet werden können und es folglich zu einer fehlerhaften Interpretation kommen kann.

Geomorphologische und bodenkundliche Untersuchungen und Konzepte erhöhen das Verständnis von geophysikalischen Prospektionsergebnissen und der prospektierten archäologischen Fundstellen. Konkret lässt sich dies am Fallbeispiel von Offenheim zeigen, da durch die geomorphologische und bodenkundliche Analyse von Bodenprofilen eine Unterteilung des Untersuchungsgebiets in verschiedene Prozessbereiche möglich wurde, die auf den Erhaltungszustand und die damit verbundenen Prospektionsergebnisse angewendet werden konnten.

Elektrische Widerstandsmodelle können verwendet werden, um Hypothesen zum Erhaltungszustand oder der Bauweise von Steinstrukturen in archäologischen Kontexten zu prüfen. Dabei spielt das Hintergrundwissen zu den bodenphysikalischen und bodenchemischen Gegebenheiten eine tragende Rolle. Am Beispiel von Offenheim konnte dargelegt werden, dass die Abschätzung des ρ von Böden und archäologischen Strukturen auf Grundlage von invertierten ERT-Profilen fehleranfällig ist.

5.3 Der römische vicus bei Eisenberg

Die römische Straßensiedlung südlich von Eisenberg (Pfalz) ist durch Zufallsfunde bereits seit dem 18. Jahrhundert bekannt, mit der Ausbreitung des modernen Eisenberg wurden im 19. und frühen 20. Jahrhundert immer wieder römische Funde freigelegt. Die ersten systematischen Grabungen fanden im 20. Jahrhundert statt, wobei das heutige Wissen über die Fundstelle maßgeblich durch die Grabungen in den 1990er und 2000er Jahren entstand. Der Gründungszeitraum der Siedlung wird um 15 n. Chr. vermutet und bestand zumindest in Form des spätantiken Burgus bis ca. 350 n. Chr. (BERNHARD et al. 2007). Durch Luftbildbefunde sind eine Reihe von Gebäuden und Straßenzügen als negative Bewuchsmerkmale sichtbar, wobei lineare Anomalien den Grundriss des spätantiken Burgus abbilden (BERNHARD et al. 2007). Dieser wurde teilweise ausgegraben, wodurch der Aufbau der Mauerstrukturen bekannt ist. Es handelt sich dabei um massive Mauern aus einer Kombination von opus caementitium und Sandstein, die an der Mauerkrone noch bis zu 1.90 m breit ist und im Bereich der Fundamente eine Breite von bis zu 3.00 m erreicht (BERNHARD et al. 2007). Die massiven Mauern sind ein Hinweis auf die Verteidigungsfunktion des Gebäudes.

In mehreren Streifenhäusern des vicus wurde festgestellt, dass sich die Fundstelle in einigen Bereichen stark abgesenkt hat, was zu einer komplexen archäologischen Stratigraphie führt. Haus 12, das sich heute unter einem markanten Schutzbau befindet, ist im westlichen Bereich um bis zu 2.00 m abgesunken. Die Absenkungen werden auf das Einstürzen von ehemaligen Stollen eines nahegelegenen Bergwerks zurückgeführt, was bei den sehr kleinräumlichen Senkungen im Bereich der Streifenhäuser plausibel erscheint. Im Gelände sind jedoch auch weitaus größere Senken sichtbar, die das Ausmaß eines eingestürzten Stollens überschreiten (Abb. 5-21 A und Abb. 5-23). Im Bereich der aktuellen Grabungen konnten zudem Absenkungen festgestellt werden, die vermutlich nicht auf den Einsturz von unterirdischen Hohlräumen zurückzuführen sind, sondern im Zusammenhang mit der lokalen Geologie stehen. Die in diesen Senken befindlichen archäologischen Befunde werden von einer Schicht aus umgelagertem Löss und einer von den Landwirten zum Ausgleich des Geländes eingebrachten Schicht

aus Boden- und Schuttmaterial überdeckt (Abb. 5-21 B). Auf Grund der mächtigen Überlagerung der archäologischen Strukturen konnten die geophysikalischen Methoden diese nur selten detektieren, wohingegen in den Bereichen außerhalb der Senken die geophysikalischen Methoden erfolgreich eingesetzt werden konnten (Kapitel 5.3.2). Dieser Bereich erschien hinsichtlich der Absenkungsproblematik besonders interessant, da sich Teilbereiche des Burgus bis in den Randbereich der Senke erstrecken (Abb. 5-23).



Abbildung 5-21: Großflächige Senkungsbereiche im Untersuchungsgebiet (A) und Bodenprofil im Grabungsareal (B). FOTOS: P. BRENGEL.

5.3.1 Geologie Eisenberg

Die oberflächennahe Geologie im Raum Eisenberg ist hauptsächlich aus eozänen Sedimenten aufgebaut und bildet räumlich einen Teilbereich des Mainzer Beckens (SCHÄFER 2012). Im Gegensatz zu den marinen Ablagerungen des Mainzer Beckens dominieren hier terrestrische Sande und Tone („Unreine Sand- und Tonschichten“) (PLASS 1966) und limnische Tonablagerungen („Ältere Eisenberger Sande“) den Aufbau des tieferliegenden Untergrundes und werden von Schuttfächerablagerungen („Eisenberger Klebsande“) überlagert. Die Klebsande werden in einigen Sandgruben abgebaut und sind von wirtschaftlicher Bedeutung für die Region. Hinzu kommen marine Küstensedimente („Eisenberger Meeressand“), die den tertiären Meeressanden der Alzey-Formation im Mainzer Becken entsprechen (LGB-RLP 2005; SCHÄFER 2000). Die eozänen und tertiären Sedimente werden häufig von Löss überlagert, der mit Mächtigkeiten von bis zu 7.00 m auftreten kann (SCHÄFER 2000).

Im Eisenberger Becken verlaufen zudem mehrere Störungszonen, die vor allem im nördlichen Beckenbereich zum Versatz der Sedimente geführt haben. Im Umfeld des vicus sind bislang keine Störungszonen bekannt, die möglicherweise im Zusammenhang

mit den in Kapitel 5.3 beschriebenen Absenkungen stehen könnten.

5.3.2 Geophysikalische Prospektion

Die geophysikalischen Prospektionen konzentrierten sich auf den Bereich des spätantiken Burgus. Der Burgus wurde mit dem Bodenradar (RIS MF Hi-Mod mit 200- und 600-MHz Antenne von IDS), der elektrischen Widerstandskartierung (RM 15 von Geoscan Research) und der elektrischen Widerstandstomographie (Syscal Pro von IRIS Instruments) prospektiert. Aus organisatorischen Gründen konnten die Rammkernsondierungen leider nicht zeitgleich durchgeführt werden, so dass die aus den Bohrungen ermittelten bodenphysikalischen und bodenchemischen Werte nicht jenen Werten zum Zeitpunkt der Prospektion mit der elektrischen Widerstandskartierung und elektrischen Widerstandstomographie entsprechen. Die gemessenen Daten sind dennoch nützliche Informationen zur Erstellung von elektrischen Widerstandsmodellen für komplexe archäologische und geologische Fundstellen.

Im Umfeld des vicus wurden weitere Prospektionen mit elektrischer Widerstandskartierung und Magnetometern (Caesium-Magnetometer G-858 von Geometrics) mit positiven Resultaten durchgeführt. Diese tragen jedoch nur bedingt zum Forschungszweck der vorliegenden Arbeit bei und werden deshalb nicht dargestellt.

5.3.2.1 Bodenradar

Die Prospektion mit dem Bodenradar diente der genauen Lokalisierung des Burgus. Die Positionierung der Prospektionsdaten wurde über die Verknüpfung von Bodenradar mit GPS-Daten durchgeführt. Der Grundriss des Burgus ist als lineare Anomalie in den Timeslices ansprechbar (Abb. 5-22). Am westlichen Bereich der Außenmauer konnten die Überreste von zwei vorgelagerten Türmen identifiziert werden. In der südlichen Außenmauer könnte eine Lücke in der Mauer einem Durchgang entsprechen. Der nordöstliche Bereich der Außenmauer wurde bereits im frühen 20. Jahrhundert vollständig zerstört und konnte dementsprechend nicht mehr vom Bodenradar erfasst werden. Die Innenbebauung wurde nur in kleinen Teilen prospektiert, da sie sich größtenteils unter dichter Vegetation befand. Die erfassten Bereiche deuten auf Grund starker Reflektionen ebenfalls auf eine Steinbebauung hin, was im Einklang mit den Grabungsergebnissen steht (BERNHARD et al. 2007)



Abbildung 5-22: Ergebnisse der Prospektion mit dem Bodenradar (600 MHz-Antenne). Timeslice für die Tiefe von 30-40 cm unter der Bodenoberfläche. Luftbild: Google Earth.

5.3.2.2 Elektrische Widerstandskartierung

Die elektrische Widerstandskartierung wurde im Juni 2012 im Bereich des Burgus und dem östlich anschließenden Senkungsbereich durchgeführt. Zur Anwendung kam eine Twin-Probe-Konfiguration mit einem Elektrodenabstand von 0.5 m zwischen den beiden mobilen Elektroden. Die horizontale Messauflösung lag bei 1 m.

Die Außenmauer und die im östlichen Bereich vorgelagerten Türme sind als Anomalien mit hohem ρ_a zu erkennen (Abb. 5-23). Im Senkungsbereich sind, mit Ausnahme einer durch eine neuzeitliche Feldgrenze verursachten linearen Struktur, keine als archäologische Strukturen ansprechbaren Anomalien sichtbar, obwohl durch die archäologischen Ergebnisse für diese Bereiche weitere Streifenhäuser erwartet werden können. Die Eindringtiefe der elektrischen Widerstandskartierung wird hauptsächlich durch den Abstand der beiden mobilen Elektroden limitiert (Kapitel 2.1). Die archäologischen Strukturen werden im Senkungsbereich teilweise von bis zu 90 cm mächtigen Kolluvien und modernen Aufschüttungen überdeckt (Abb. 5-21 B).

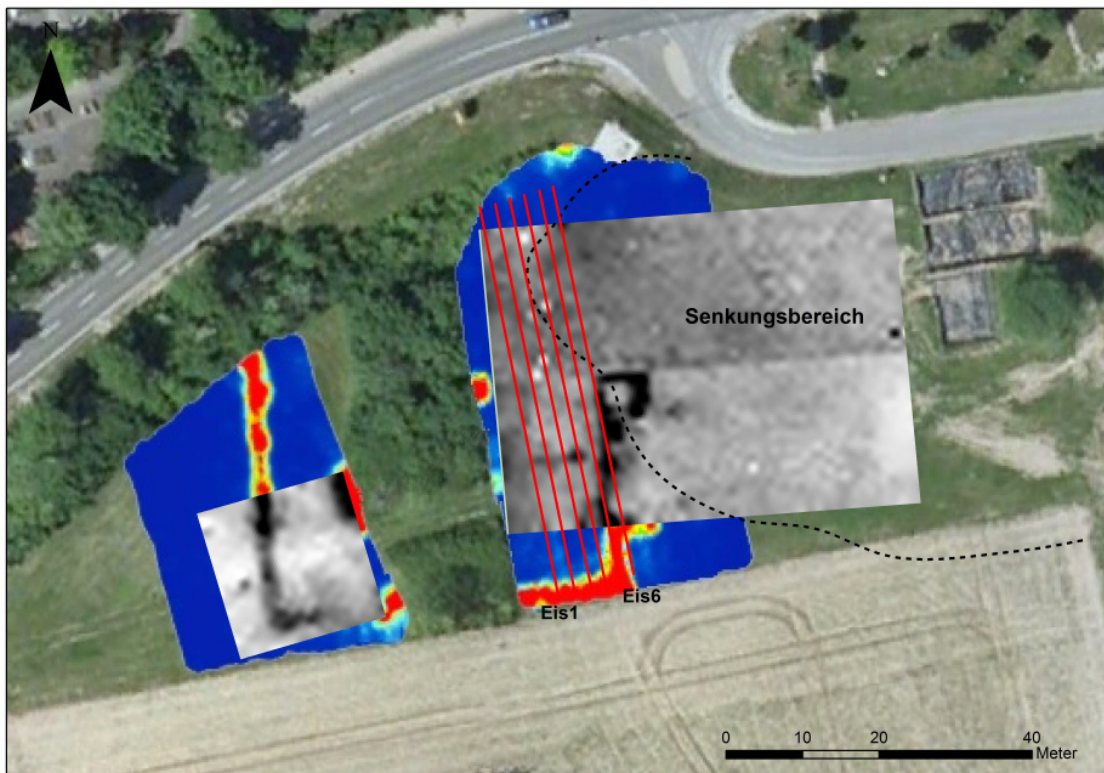


Abbildung 5-23: Ergebnis der elektrischen Widerstandskartierung bei Eisenberg und Lage der ERT-Profile. Wertebereich der elektrischen Widerstandskartierung: 16 bis 32 Ω . Luftbild: Google Earth.

5.3.2.3 Elektrische Widerstandstomographie

Die ERT-Profile (Schlumberger-Konfiguration mit 1 m Elektrodenabstand) von Juni 2012 decken den östlichen Bereich des Burgus ab und erstrecken sich bis in den Senkungsbereich (Abb. 5-23). Die ERT-Profile Eis1 bis Eis6 verlaufen von Süden (A) nach Norden (B) und sind in ihrer Abfolge von Osten nach Westen angeordnet. Um die Vergleichbarkeit der ERT-Profile zu ermöglichen, wurden die Farb- und Wertebereiche der Inversionsergebnisse angeglichen. In den ERT-Profilen zeigt sich durch Unterschiede im ρ eine Gliederung des Untergrundes bis in eine Tiefe von ca. 8,00 m (Abb. 5-24). Der oberflächennahe Bereich ist sehr heterogen ausgeprägt, die ρ -Werte reichen von ca. 60 bis 100 Ωm (L1). In diesen Bereichen wirken sich vor allem die Überreste der Mauern des Burgus durch eine erhöhte Steinkonzentration auf den ρ aus. Die Mauerstrukturen lassen sich als Anomalien mit Werten $> 150 \Omega\text{m}$ erkennen. Die höchsten ρ -Werte im oberflächennahen Bereich wurden in den ERT-Profilen Eis5 und Eis6 gemessen, da diese auf der östlichen Außenmauer des Burgus verlaufen. Die in Eis2 sichtbare Mauerstruktur unter Elektrodenposition 8 ist einer innerhalb des Burgus verlaufenden Mauerstruktur zuzuordnen, die zwar in der elektrischen Widerstandskartierung sichtbar (Abb. 5-23), aber nicht in den Prospektionsergebnissen des Bodenradars ansprechbar ist (Abb. 5-22).

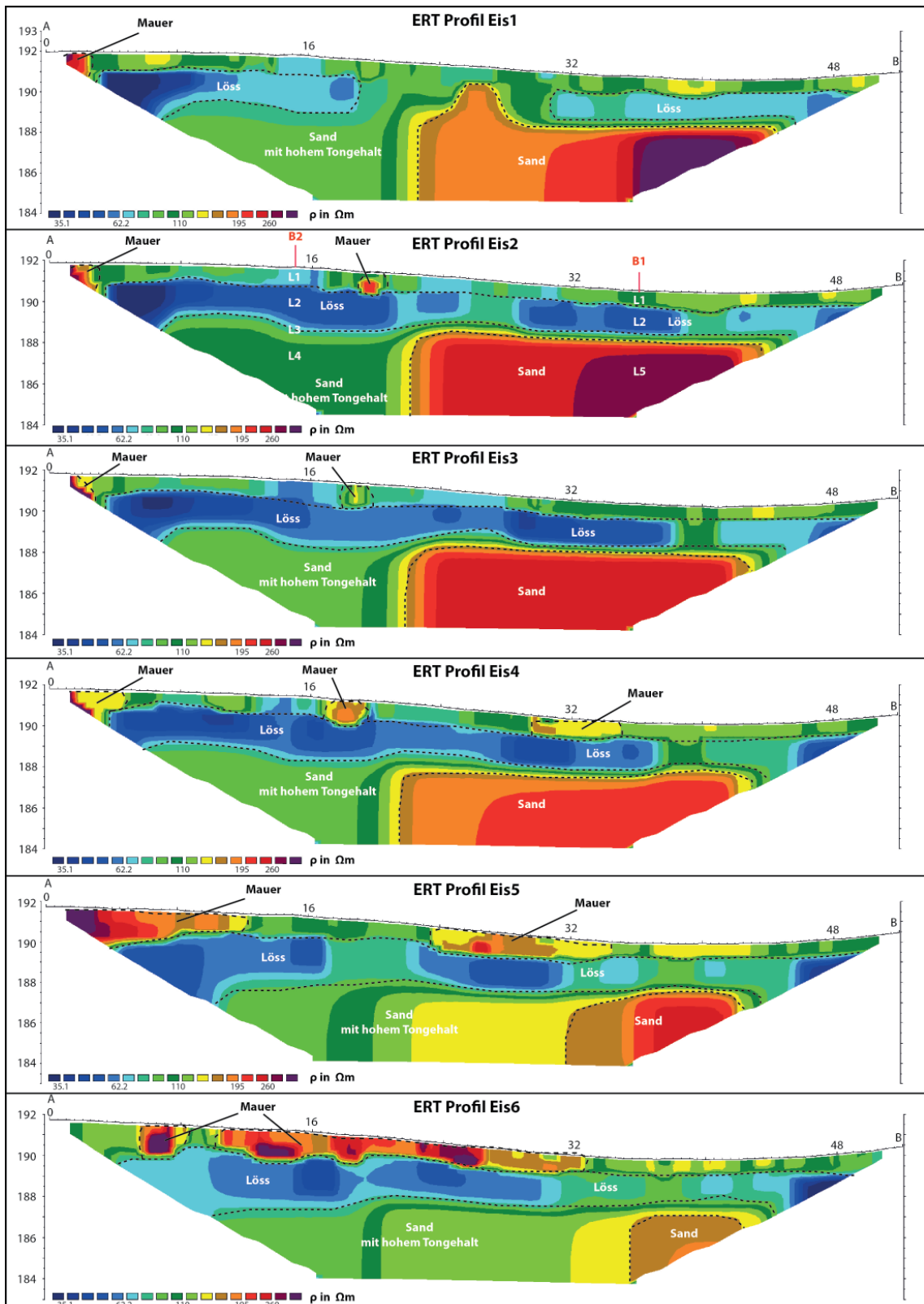


Abbildung 5-24: ERT-Profil Eis1 bis Eis6 bei Eisenberg.

Ab einer Tiefe von 1.00 m erfolgt ein scharfer Übergang in einen leitfähigeren Bereich mit Werten zwischen 35 und 46 Ωm (L2). Diese Schicht lässt sich in allen ERT-Profilen ansprechen, ist ca. 2.00 m mächtig und wird gelegentlich von Bereichen mit höheren ρ -Werten unterbrochen. Der Bereich unter der leitfähigen Schicht kann in zwei Bereiche gegliedert werden. Im Norden treten hohe ρ -Werte $> 200 \Omega\text{m}$ auf (L5), die nach Süden hin abrupt in einen Wertebereich von 90 bis 110 Ωm übergehen (L3 und L4). Mit zunehmender Absenkung der Oberfläche nach Osten nimmt auch der Bereich mit den hohen ρ -Werten $> 200 \Omega\text{m}$ ab und ist in ERT-Profil Eis6 nur noch am nördlichen Grenzbereich des ERT-Profiles vorhanden.

5.3.3 Rammkernsondierungen

Da die archäologischen Grabungen nur Teilbereiche des vicus aufschließen, wurden im Bereich der ERT-Profile im Januar 2013 zwei Rammkernsondierungen durchgeführt (Abb. 5-25 und Abb. 5-26). Ziel dieser Sondierungen war die Verifizierung der ERT-Profile und die Entnahme von Bodenproben, aus denen durch bodenkundliche Analysen die Eingangsparameter für die RHOADES-Formel (Kapitel 4.3.1) zur Berechnung des ρ und die VAN GENUCHTEN-Formel (Kapitel 4.6.3) zur Berechnung des Wasserrückhaltevermögens mit HYDRUS ermittelt werden konnten.

Der in ERT-Profil Eis2 angesprochene oberflächennahe Bereich entspricht in Bohrung B1 einem neuzeitlichen Ap mit größeren Steinblöcken und Ziegelbruch und geht ab einer Tiefe von 1.00 m in einen zu Beginn noch durch Bioturbation gestörten Löss über, der sich aber mit zunehmender Tiefe als sehr homogen erweist. Die Korngrößenverteilung zeigt, dass es sich vermutlich um ein Umlagerungsprodukt handelt, da der Anteil der Sandfraktion sehr hoch ausfällt. In einer Tiefe von 3.00 m folgt ein abrupter Übergang zu einem kalkfreien Quarzsand mit stellenweise rötlicher Bänderung. Der Übergang von Löss zu Quarzsand wird durch eine Lage von kantengerundeten Kiesen gekennzeichnet. Der Quarzsand entspricht vermutlich den Eisenberger Meeressanden.

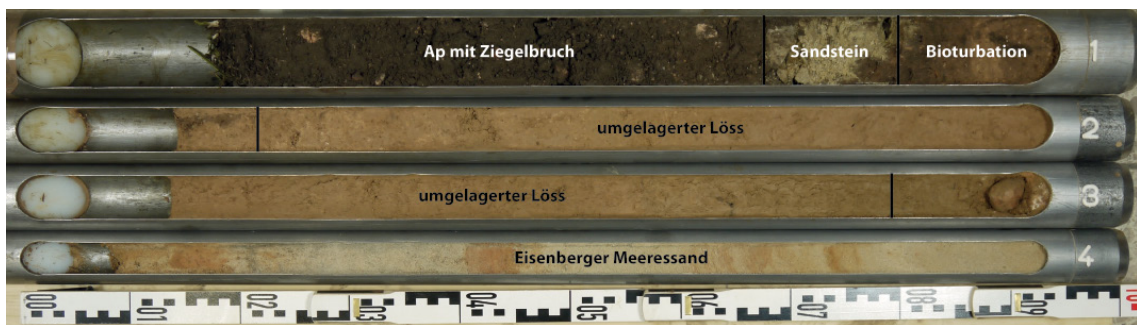


Abbildung 5-25: Bohrung B1 bei Eisenberg. Foto: P. FISCHER.

Die aus Bohrung B1 gewonnenen Informationen zum Aufbau des Untergrundes lassen sich auf die Inversionsergebnisse von ERT-Profil Eis2 übertragen. Der Ap-Horizont mit Ziegelbruch und Sandsteinblöcken entspricht dem oberflächennahen Bereich L1 mit Werten von ca. 60 bis 100 Ωm . Der darunter liegende Löss besitzt durch seine Korngrößenverteilung ein höheres Wasserrückhaltevermögen, was sich zum Zeitpunkt der Sondierung durch einen volumetrischen Wassergehalt von bis zu 28 % äußerte (Abb. 5-27) und zu einem niedrigen ρ -Wert führt (L2). Für den Eisenberger Meeressand konnte lediglich ein volumetrischer Wassergehalt von maximal 5 % gemessen werden. Da die Sandkörner keinen Beitrag zur elektrischen Leitfähigkeit leisten und das Porenvolumen auf Grund des niedrigen volumetrischen Wassergehalts größtenteils von Luft ausgefüllt wird, ergibt sich für den Eisenberger Meeressand ein hoher ρ (L5).

In Bohrung B2 kann der Aufbau des Untergrundes in den ersten 3.00 m als nahezu identisch mit den Ergebnissen aus B1 festgestellt werden. Danach erfolgt jedoch nicht der Übergang in einen Quarzsand, sondern in eine tonige Verwitterungslage (L3). Vermutlich handelt es sich um einen tertiären Paläoboden, der nur noch reliktsch erhalten ist und sich mit Einsetzen der Meeresregression unter wärmeren Klimabedingungen gebildet hat. Ähnliche tertiäre Bodenbildungen sind auf marinen Sedimenten und Küstenformen im nördlichen Mainzer Becken bekannt (BRENDEL 2012). Die gerundeten Kiese in diesem Bereich belegen die Zugehörigkeit zu den Eisenberger Meeressanden. Mit zunehmender Tiefe nimmt der Tongehalt ab (L4), liegt aber um bis zu 10 % höher als in den Quarzsanden (L5) in B1.

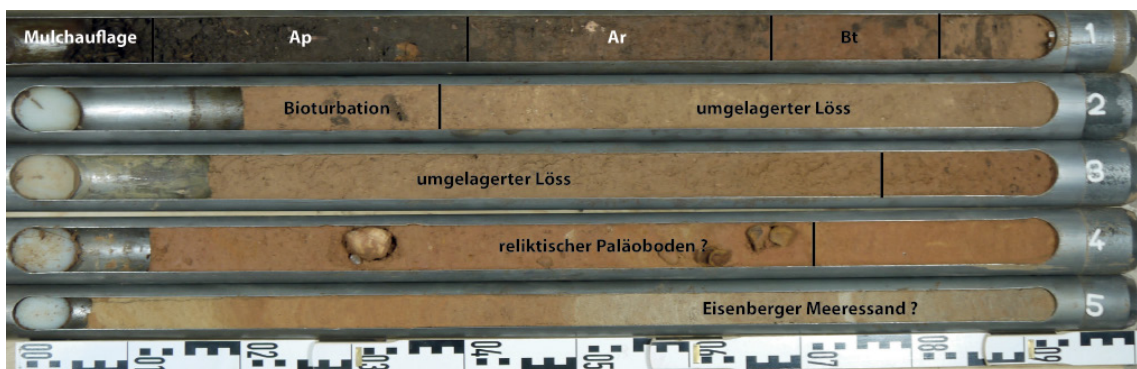


Abbildung 5-26: Bohrung B2 bei Eisenberg. Foto: P. FISCHER.

5.3.3.1 Ergebnisse der RHOADES-Formel für Eisenberg

Die zur Berechnung des ρ mit der RHOADES-Formel verwendeten Bodenproben stammen aus den Rammkernsondierungen B1 und B2. Die Lagerungsdichte wurde mit den von SAXTON et al. (1986) postulierten Pedotransfer-Funktionen über die Korngrößenverteilung berechnet. Da sich die Stratigraphie aus einer Abfolge von Bodenprofil, Sedimenten

und reliktschen Paläoböden zusammensetzt, wurde die Stratigraphie mit den Bezeichnungen Schicht L1 bis L5 vereinfacht. Weil der oberflächennahe Untergrund bis in eine Tiefe von ca. 2.50 m in beiden Bohrungen ähnlich ist, können in diesen Bereichen nur geringe Abweichungen in den Eingangsparametern der RHOADES-Formel ausgemacht werden (Abb. 5-27).

Die elektrische Leitfähigkeit des Bodenwassers nimmt mit zunehmender Tiefe ab, was durch eine stärkere Beeinflussung der oberflächennahen Schichten durch Regenwasser und anthropogene Einbringung von landwirtschaftlichen Düngemitteln begründet werden kann. Das Sättigungspotential nimmt ebenfalls mit zunehmender Tiefe ab, jedoch ist hierbei nicht die Tiefenlage ausschlaggebend, sondern die Korngrößenverteilung. Die größten Unterschiede ergeben sich im Tongehalt und daraus resultierend im volumetrischen Wassergehalt. Die Korngrößenverteilung des umgelagerten Löss ergibt das höchste Wasserrückhaltevermögen (Tab 5-1) und einen volumetrischen Wassergehalt im Bereich zwischen 25 % und 30 %. Der höchste Tongehalt konnte für die tonige Verwitterungslage (L3) gemessen werden.

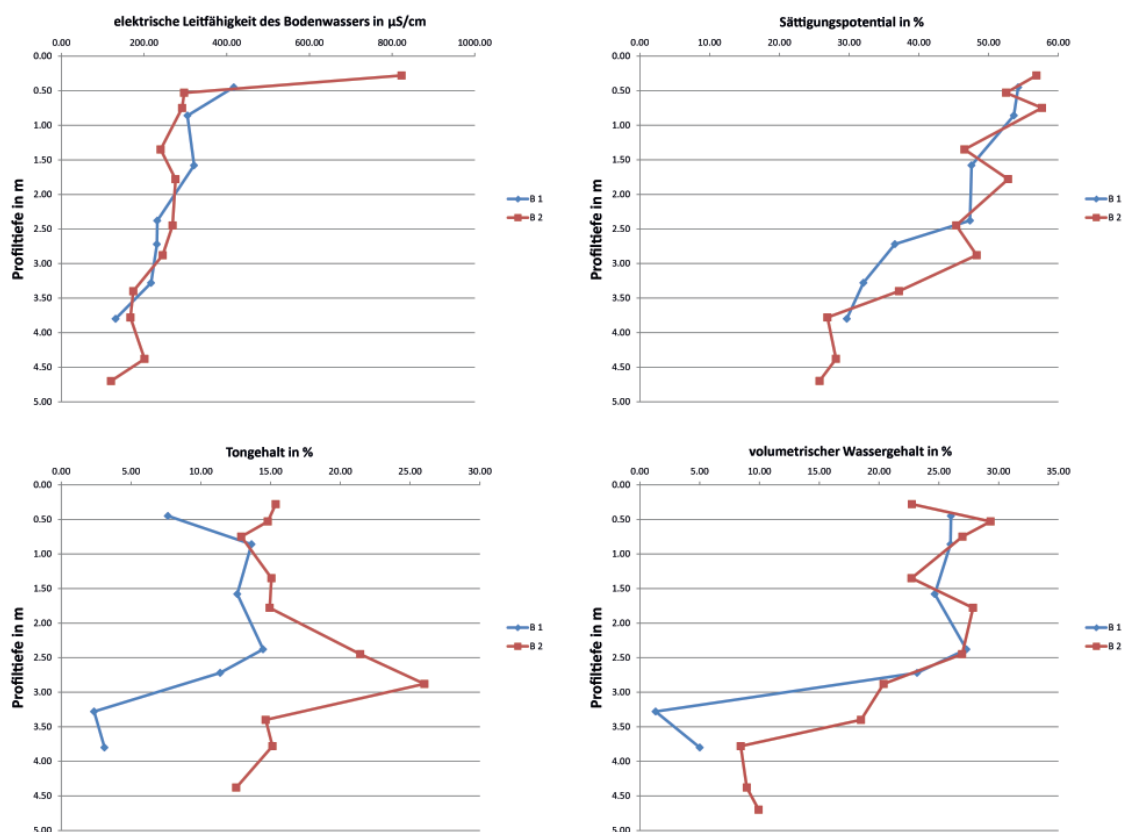


Abbildung 5-27: Eingangsparameter der RHOADES-Formel aus den Bohrungen B1 und B2.

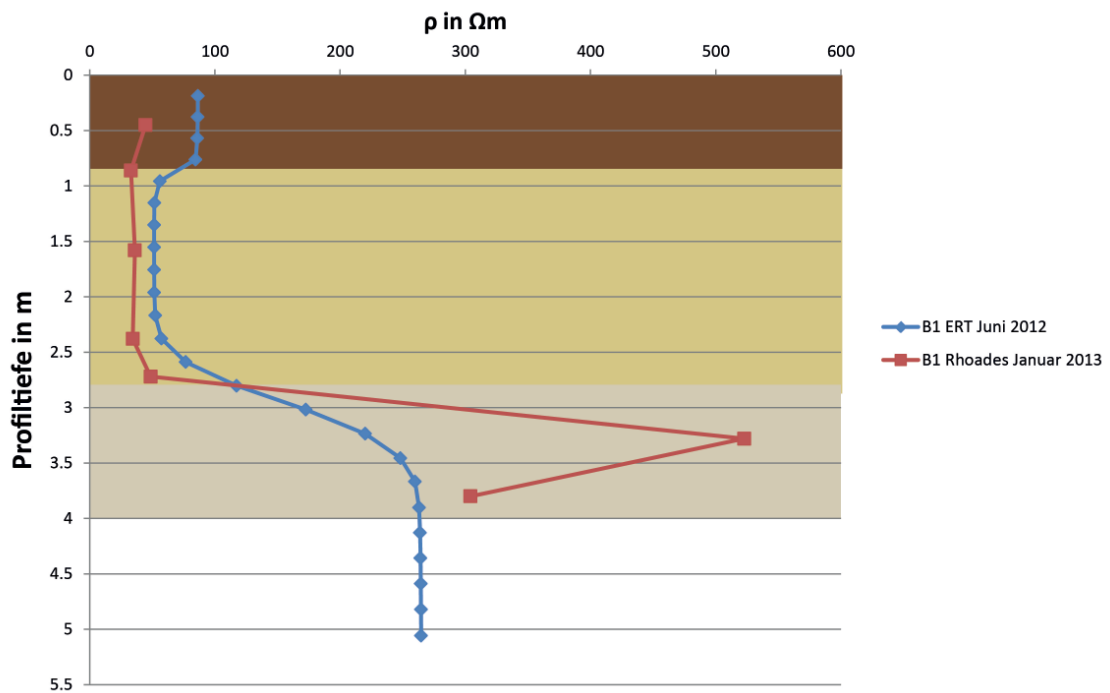


Abbildung 5-29: Ergebnisse der RHOADES-Formel für B1 im Vergleich mit den Inversionsergebnissen von ERT-Profil Eis2.

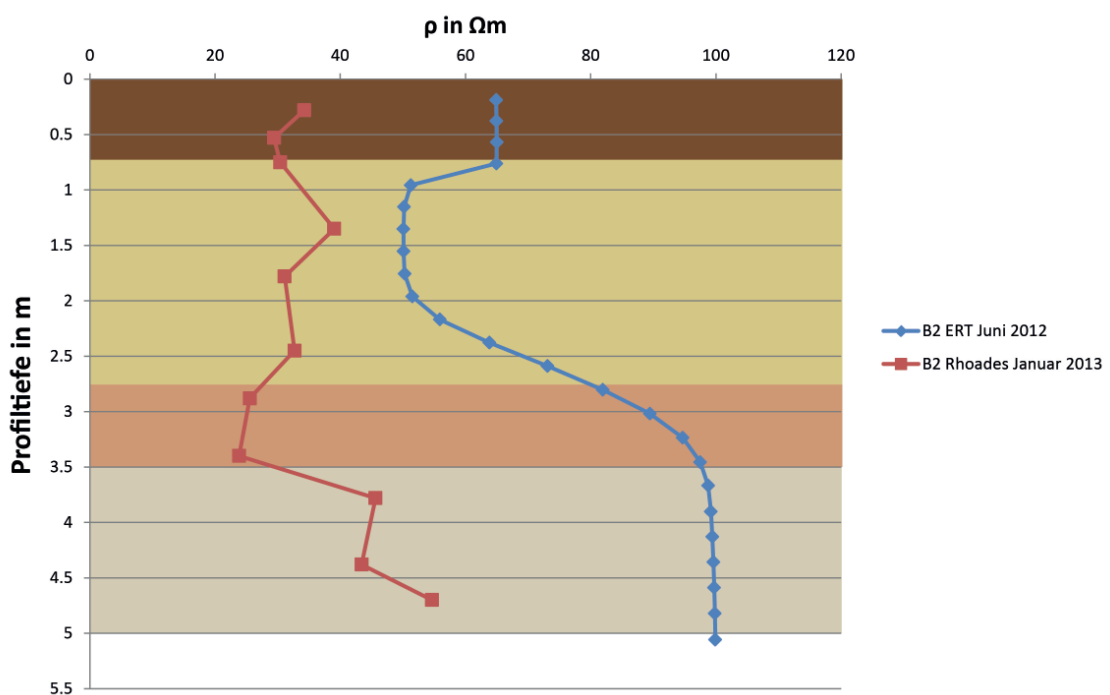


Abbildung 5-30: Ergebnisse der RHOADES-Formel für B2 im Vergleich mit den Inversionsergebnissen von ERT-Profil Eis2.

Die bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften (insbesondere der Wassergehalt) von L4 unterscheiden sich möglicherweise zum Zeitpunkt der

elektrischen Widerstandsmessungen und Bohrungen so stark, dass tatsächlich eine starke Abweichung des ρ zu den beiden Zeitpunkten vorliegt. Die Ergebnisse der RHOADES-Formel für B1 deuten jedoch darauf hin, dass die Relation der vertikalen Verteilung des ρ gleich bleibt, d.h. die saisonale Veränderung der bodenphysikalischen und bodenchemischen Parameter in allen Bereichen des untersuchten Untergrundes relativ gleichmäßig abläuft. Möglicherweise unterschätzt die RHOADES-Formel den ρ von L3 und L4, da die Sensitivität der Formel bei höherem Tongehalt abnimmt (BORÚS 1999). Die Korngrößenzusammensetzung für L4 zeigt einen Anteil der Tonfraktion 12 % bis 15 % und einen Anteil der Sandfraktion von ca. 79 % bis 83 %. Es ist möglich, dass durch diese relativ hohen Tongehalte der Einfluss der Sandfraktion als isolierendes Medium auf den ρ von L4 von der RHOADES-Formel nicht korrekt abgebildet werden kann. Der Effekt des erhöhten Tongehaltes wird vermutlich zusätzlich durch die höhere Lagerungsdichte in diesen Bereichen unterstützt, da sich die elektrische Leitfähigkeit mit zunehmender Verdichtung erhöht. Durch die archäologischen Grabungen am vicus Eisenberg wurden zusätzlich Bereiche des Untergrunds aufgeschlossen, zu denen bislang auf Grund ihrer Tiefenlage nur Zugang durch Bohrungen bestand. Dies ermöglichte die Entnahme von ungestörten Proben in den für die elektrischen Widerstandsmessungen verwendeten Zylindern (Kapitel 4.1.2). Die Proben wurden aus einer Löss-Lage (Löss ungestört) und einer tonigen Löss-Lage (Ton ungestört) entnommen, wobei es sich vermutlich um einen Bt-Horizont handelt. Die ungestörten Proben unterscheiden sich von dem in den Bohrungen vorgefundenen Löss, da die Sandfraktion in der Korngrößenverteilung geringer ausfällt. Vermutlich handelt es sich bei dem in den Bohrungen angesprochenem Löss um ein Umlagerungsprodukt, das sich mit den marinen Ablagerungen des Eisenberger Beckens vermischt hat, während die in der Grabung aufgeschlossenen Schichten in situ angetroffen wurden. Zusätzlich zu den ungestörten Bodenproben wurde gestörtes Probenmaterial aus den entsprechenden Schichten entnommen, das in den Messzylindern so verdichtet wurde, dass die im Gelände angetroffene Lagerungsdichte erreicht wurde. Die Verdichtung der Probe „Ton gestört“ auf eine Lagerungsdichte von 1.57 g/cm^3 erwies sich als problematisch, da diese Lagerungsdichte nur durch die Anwendung mechanischer Hilfsmittel erreicht werden konnte, deren Druck jedoch die Beschädigung des Messzylinders zur Folge hatte. Ohne Anwendung mechanischer Hilfsmittel konnte nur eine Verdichtung auf 1.45 g/cm^3 erreicht werden. Die Verdichtung der Probe „Löss gestört“ auf die für die ungestörte Probe ermittelte Lagerungsdichte war unproblematisch und konnte mit einer Abweichung von 0.02 g/cm^3 erreicht werden. Die Bodenproben wurden mit destilliertem Wasser gesättigt und dann bei einer Temperatur von 25°C getrocknet. Durch die konstante Temperatur von 25°C wurden die Bodenproben zudem auf die

Referenztemperatur für elektrische Widerstandsmessungen gebracht, so dass eine Korrektur der elektrischen Widerstandsmessungen nicht durchgeführt werden musste. In regelmäßigen Abständen wurden elektrische Widerstandsmessungen an den Proben durchgeführt und gleichzeitig der volumetrische Wassergehalt der Probe ermittelt.

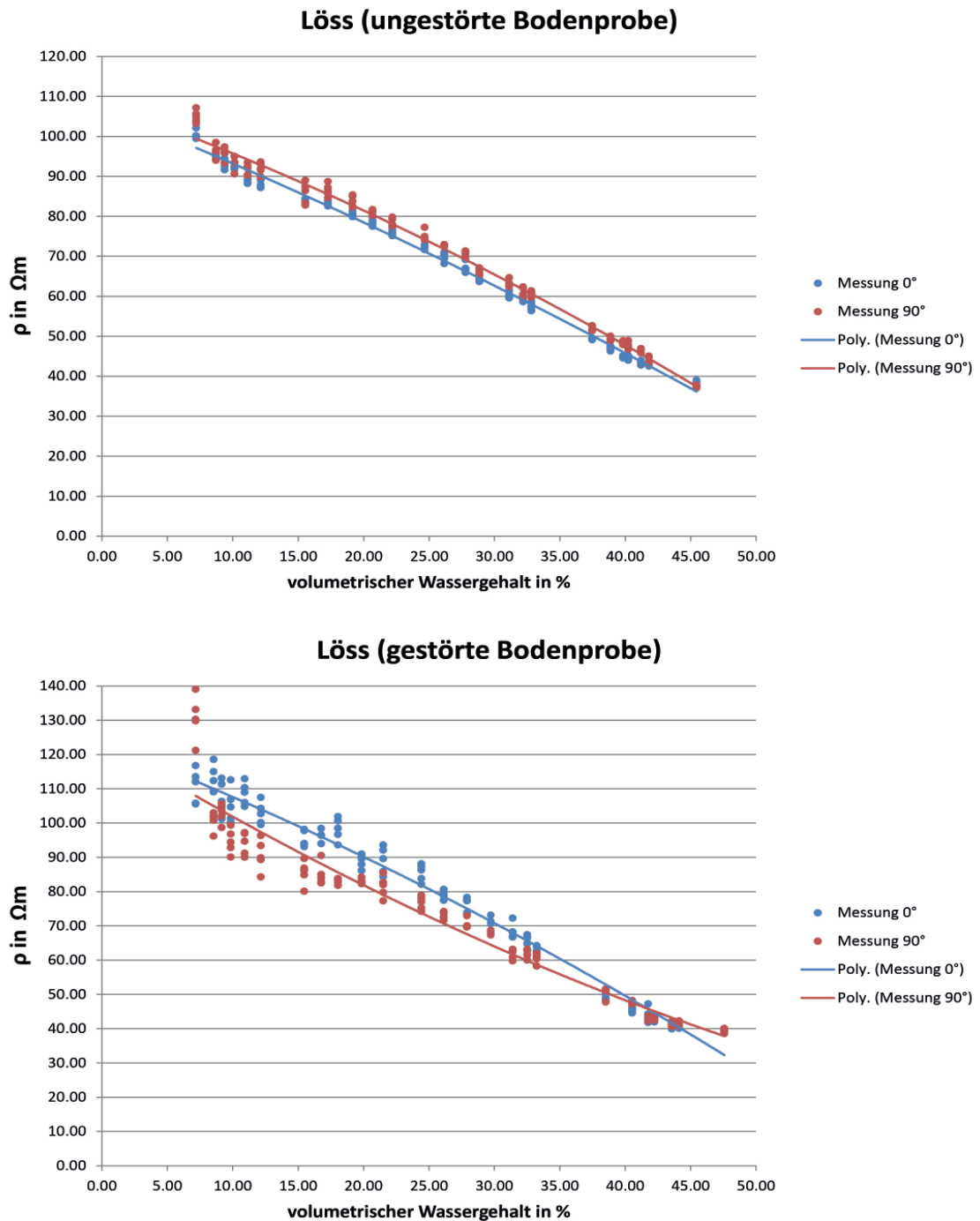


Abbildung 5-31: Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessungen an der ungestörten und gestörten Löss-Probe im Vergleich mit dem volumetrischen Wassergehalt.

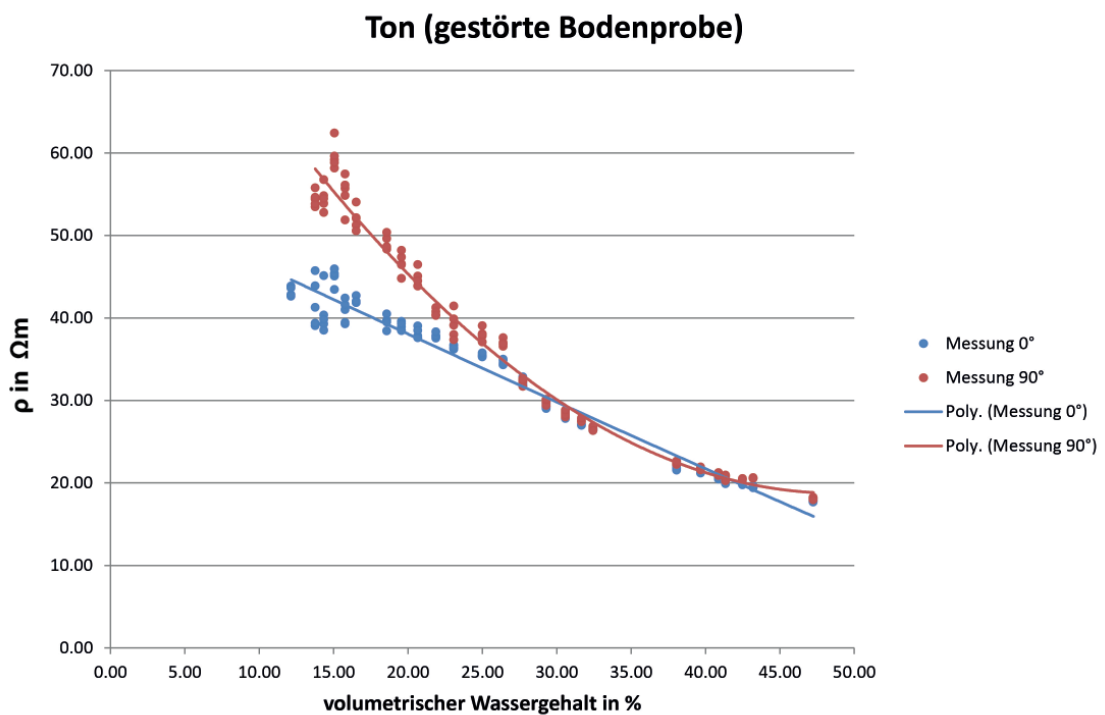
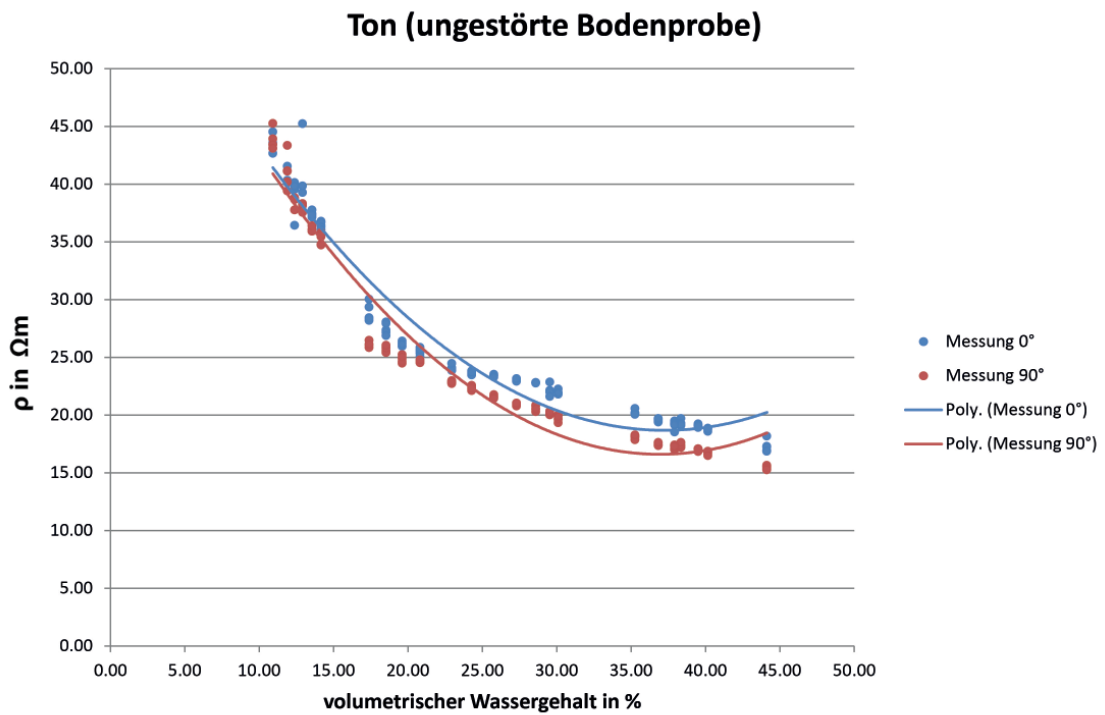


Abbildung 5-32: Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessungen an der ungestörten und gestörten Ton-Probe im Vergleich mit dem volumetrischen Wassergehalt.

Beim Vergleich der elektrischen Widerstandsmessungen mit der Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes (Abb. 5-31 und Abb. 5-32) kann festgestellt werden,

dass eine lineare Beziehung zwischen dem volumetrischen Wassergehalt und dem ρ der Bodenproben besteht. Bei den ungestörten Bodenproben zeigt sich zudem eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen bei der Änderung der Elektrodenposition (0° und 90° , Kapitel 4.1.2). Bei den gestörten Bodenproben können stärkere Abweichungen zwischen den beiden Elektrodenanordnungen festgestellt werden, insbesondere bei der gestörten Ton-Probe treten starke Abweichungen zwischen den beiden Konfigurationen ab einem volumetrischen Wassergehalt von unter 25 % auf. Während des Trocknungsprozesses konnte in allen Bodenproben die Ausbildung von Trockenrissen beobachtet werden. Vor allem in den gestörten Bodenproben traten diese Risse entlang der Innenwand des Messzylinders auf. Dadurch wurde der Elektrodenkontakt mit der Bodenprobe verschlechtert, was zu stärkeren Abweichungen der ρ -Werte innerhalb einer Messserie führte. Diese Abweichungen können in einzelnen Messserien der gestörten Bodenproben bei bis zu $10 \Omega\text{m}$ liegen. Die starke Abweichung im Bereich 10 % bis 25 % zwischen den beiden Messserien an der gestörten Ton-Probe wurde vermutlich durch einen besonders stark ausgeprägten und nicht gleichmäßig auf die Bodenprobe verteilten Trockenriss verursacht. Aus diesen Beobachtungen geht allerdings auch hervor, dass der in den Messungen beobachtete Anstieg des ρ nicht nur auf den gleichzeitig sinkenden Wassergehalt zurückgeführt werden kann, sondern auch durch die Veränderung der Bodenstruktur bedingt ist. Der Einfluss der Bodenstruktur wird meistens durch die Lagerungsdichte abgebildet (BESSON et al. 2004; COUSIN 2007). Jedoch kann die Lagerungsdichte nicht zur Darstellung von Trockenrissen genutzt werden, da diese lokale Anomalien mit hohem ρ darstellen (TABBAGH et al. 2007).

Dementsprechend ergibt sich keine Übereinstimmung zwischen den elektrischen Widerstandsmessungen und den Berechnungen der RHOADES-Formel (Abb. 5-33), da die Bodenstruktur in diese Formel als Lagerungsdichte einfließt (Kapitel 4.3.1). Für die wassergesättigte Bodenprobe unterscheiden sich die Werte der RHOADES-Formel und die an den Bodenproben gemessenen Werte nur um $4 \Omega\text{m}$, im Verlauf des Trocknungsprozesses kann aber keine weitere Übereinstimmung festgestellt werden, da die Trockenrisse die Widerstandsmessungen beeinflussen, aber nicht als Veränderung der Bodenstruktur in die RHOADES-Formel einfließen. Insbesondere bei oberflächennahen Horizonten, die auf Grund ihrer Korngrößenverteilung zur Ausbildung von Trockenrissen neigen und in längeren Trockenphasen konstant höheren Temperaturen ausgesetzt werden, muss die Anwendung der RHOADES-Formel zur Berechnung des ρ kritisch betrachtet werden.

Das durchgeführte Experiment zeigt außerdem, dass die Verdichtung von ungestörten Bodenproben auf die im Gelände vorgefundene Lagerungsdichte bei wassergesättigten

Bodenproben für elektrische Widerstandsmessungen durchaus zulässig scheint und bestätigt die von NADLER (1991) durchgeführten Experimente. Bei Böden mit ausgeprägter Heterogenität scheint dieses Vorgehen jedoch nicht anwendbar zu sein, so dass die Entnahme von ungestörten Bodenproben favorisiert werden sollte.

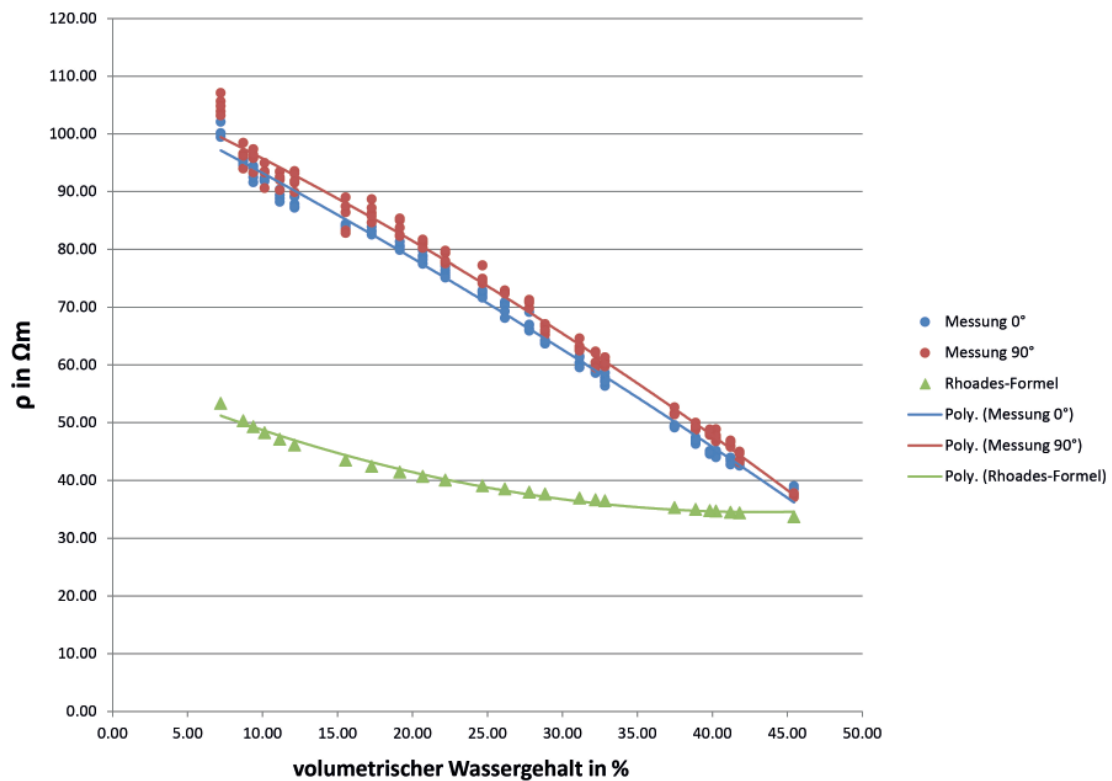


Abbildung 5-33: Vergleich der elektrischen Widerstandsmessung an der ungestörten Löss-Probe mit den Ergebnissen der RHOADES-Formel bei unterschiedlichem Wassergehalt.

5.3.3.2 Perkolationstheorie und Effective Medium Theory

Die Analyse der Bodenproben aus den Bohrungen B1 und B2 zeigen lediglich für die Ap-Horizonte einen volumetrischen Anteil des Bodenskeletts, der den ρ des Bodens beeinflussen könnte. Mit Ausnahme der Transgressionskiese im Übergangsbereich von Löss zu den Eisenberger Meeressanden (Abb. 5-26), tritt das Bodenskelett in den übrigen Schichten mit Werten $< 1\%$ auf und ist dementsprechend vernachlässigbar. Da es sich bei den Transgressionskiesen um eine lokale Konzentration handelt, die somit nicht auf die komplette Mächtigkeit einer Schicht verteilt ist, wurden die in diesen Bereichen ermittelten Werte nicht zur Korrektur des ρ der gesamten Schicht verwendet. Da die Auflösung des ERT-Profiles in dieser Tiefe zu gering ist, um diesen Transgressionskies zu detektieren, wurde dieser Bereich im elektrischen Widerstandsmodell auch nicht dargestellt. Im Bereich des Ap-Horizonts, bzw. in Schicht L1 ergab sich aus der Perkolationstheorie bzw.

Effective Medium Theory eine Erhöhung des ρ durch den Einfluss des Bodenskeletts von ca. $8 \Omega\text{m}$.

5.3.4 Elektrisches Widerstandsmodell für Eisenberg

Für die Fallstudie Eisenberg wurden zwei Methoden zur Erstellung eines elektrischen Widerstandsmodells getestet. Die am häufigsten in der aktuellen Literatur angewendete Methode verwendet die in den ERT-Profilen erkannten Geometrien und ρ -Werte, um die mutmaßliche Verteilung des ρ im Untergrund modellhaft zu rekonstruieren und die Ergebnisse der Anwendung spezifischer Elektrodenanordnungen oder Prospektionsmethoden zu simulieren. Abbildung 5-34 zeigt diesen Ablauf für ERT-Profil Eis2 mit den ρ -Werten zum Zeitpunkt der Messung im Juni 2012. Wie aus diesen Ergebnissen ersichtlich, kann diese Methode sehr effektiv ähnliche Inversionsergebnisse rekonstruieren. Die Modelle können zur Überprüfung von Hypothesen oder zur Berechnung des Einflusses des Hintergrundrauschens auf das Erscheinungsbild der Messergebnisse verwendet werden. Sie sind jedoch stark vereinfacht und stellen nicht notwendigerweise den realen Aufbau des Untergrundes dar.

Das Widerstandsmodell in Abbildung 5-34 verfügt z.B. nicht über die Schicht L3, da diese auf Grundlage des ERT-Profiles nicht angesprochen werden konnte. Potentiell kann die saisonale Veränderung des ρ von L3 jedoch dazu führen, dass diese Schicht zu einem anderen Zeitpunkt im Jahr in den ERT-Profilen sichtbar ist und dementsprechend auch in das elektrische Widerstandsmodell abstrahiert wird. Außerdem sind die verwendeten ρ_m -Werte im Modell lediglich Schätzwerte, die aus den ERT-Profilen abgeleitet wurden.

Das zweite für Eis2 erstellte elektrische Widerstandsmodell wurde auf Grundlage der Stratigraphie der Bohrungen B1 und B2 sowie der Berechnung der ρ -Werte durch die RHOADES-Formel und Perkolationstheorie, bzw. Effective Medium Theory für den Zeitpunkt der Bohrungen im Januar 2013 erstellt (Abb. 5-35). Der Vergleich mit ERT-Profil Eis2 ermöglicht auf Grund der unterschiedlichen Zeitpunkte der Messungen zwar keine Verifizierung der ρ -Werte, jedoch ergibt sich die beste Übereinstimmung der Geometrie der Schichten L1 bis L5 aus diesem Modell.

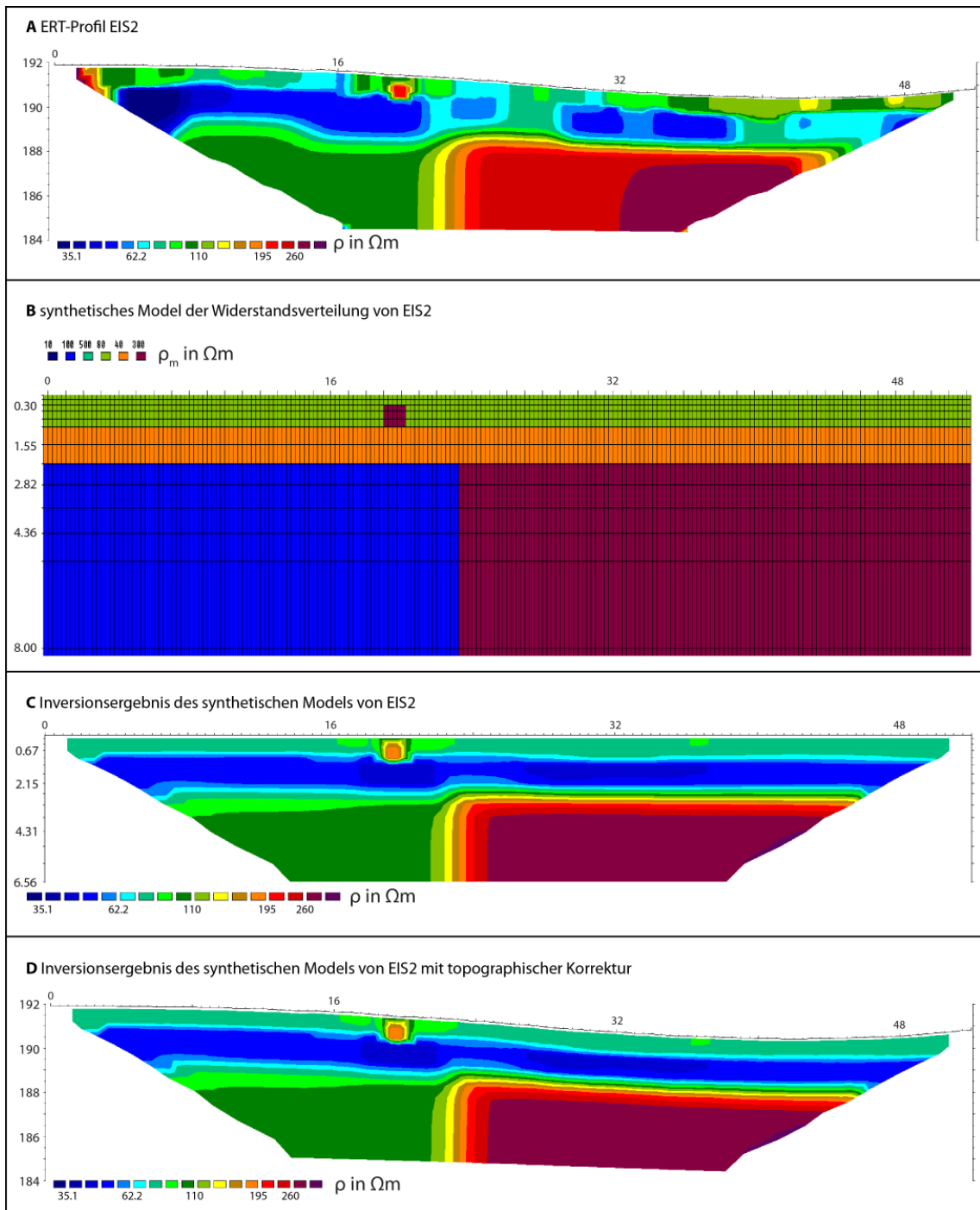


Abbildung 5-34: Elektrisches Widerstandsmodell 1 für den Zeitpunkt der ERT-Messungen im Juni 2012 auf Grundlage von ERT-Profil Eis2.

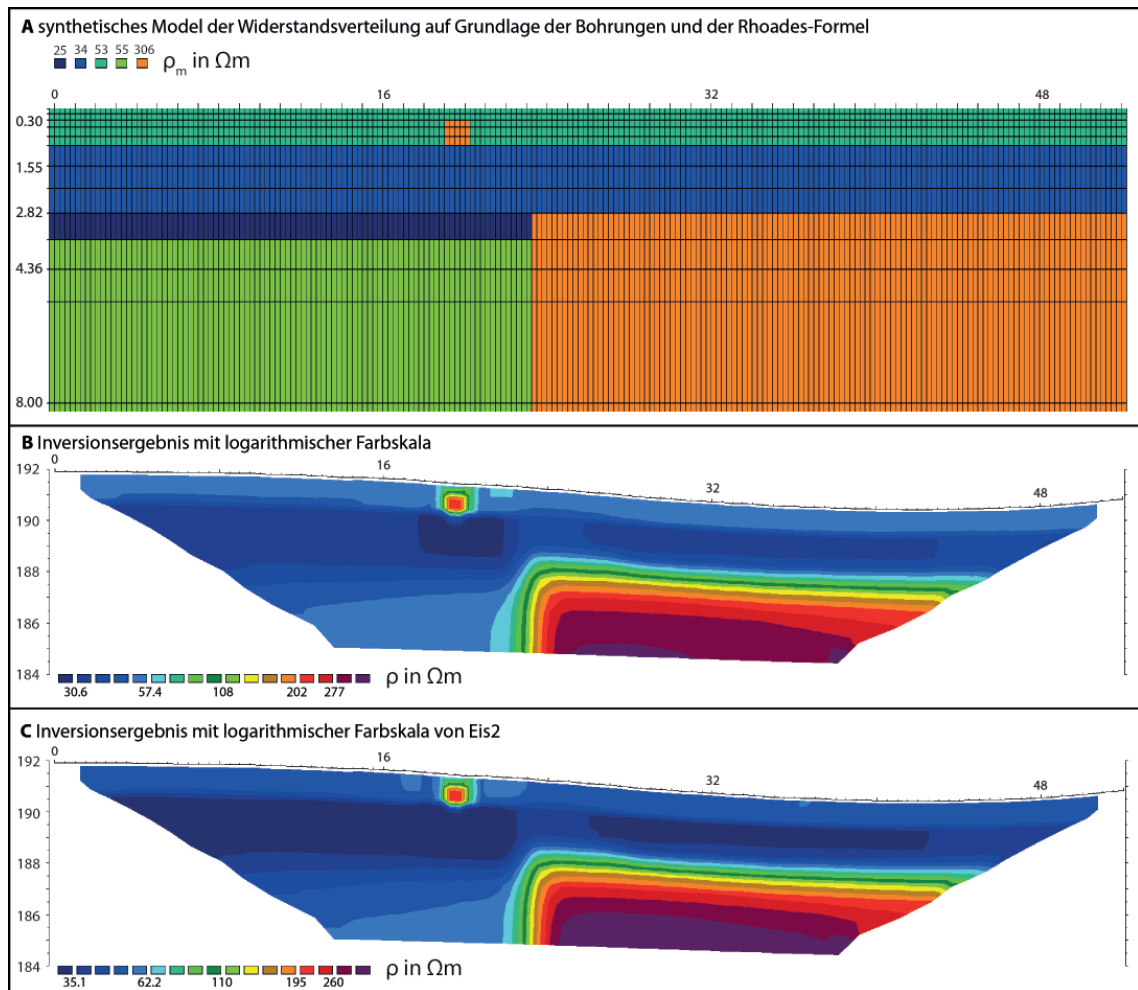


Abbildung 5-35: Elektrisches Widerstandsmodell 2 für den Zeitpunkt der Bohrungen im Januar 2013 auf Grundlage der Stratigraphie und Ergebnissen der RHOADES-Formel.

Ein weiteres Modell (Modell 3) ermöglicht die Überprüfung der negativen Prospektionsergebnisse im Senkungsbereich (Kapitel 5.3.2.2). Dazu wurde die Tiefenlage einer vereinfachten Mauerstruktur ausgehend von 0.28 m unter der Erdoberfläche sukzessiv um 0.1 m vergrößert (Abb. 5-36). Die verwendeten ρ_m -Werte für Bodenhorizonte und Mauerstruktur wurden in diesem Fall geschätzt. Die Anwendung einer modifizierten Pol-Pol-Konfiguration auf jedes der Modelle zeigt, dass die von der Mauerstruktur verursachte Anomalie mit zunehmender Tiefe geringer ausfällt. Durch die Grabungen bei Eisenberg konnten Tiefenlagen von ca. 0.9 m unter der Erdoberfläche für die archäologischen Befunde dokumentiert werden, was nur noch eine Anomalie von $< 1 \Omega m$ hervorrufen würde (Abb. 5-37). Wie in Kapitel 5.2.2 dargestellt können Anomalien von solch geringem Ausmaß selbst bei niedrigem Hintergrundrauschen nur noch bedingt mit der elektrischen Widerstandskartierung detektiert werden.

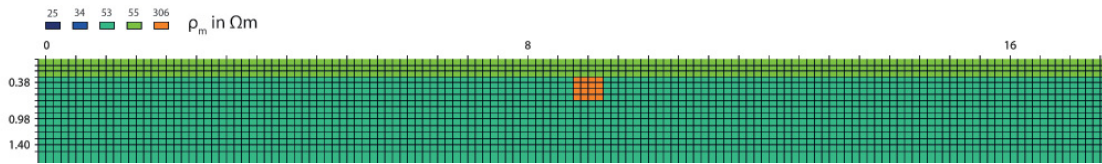


Abbildung 5-36: Elektrisches Widerstandsmodell 3 zur Berechnung des Einfluss der Tiefenlage der Mauerstruktur auf die Prospektionsergebnisse der elektrischen Widerstandskartierung.

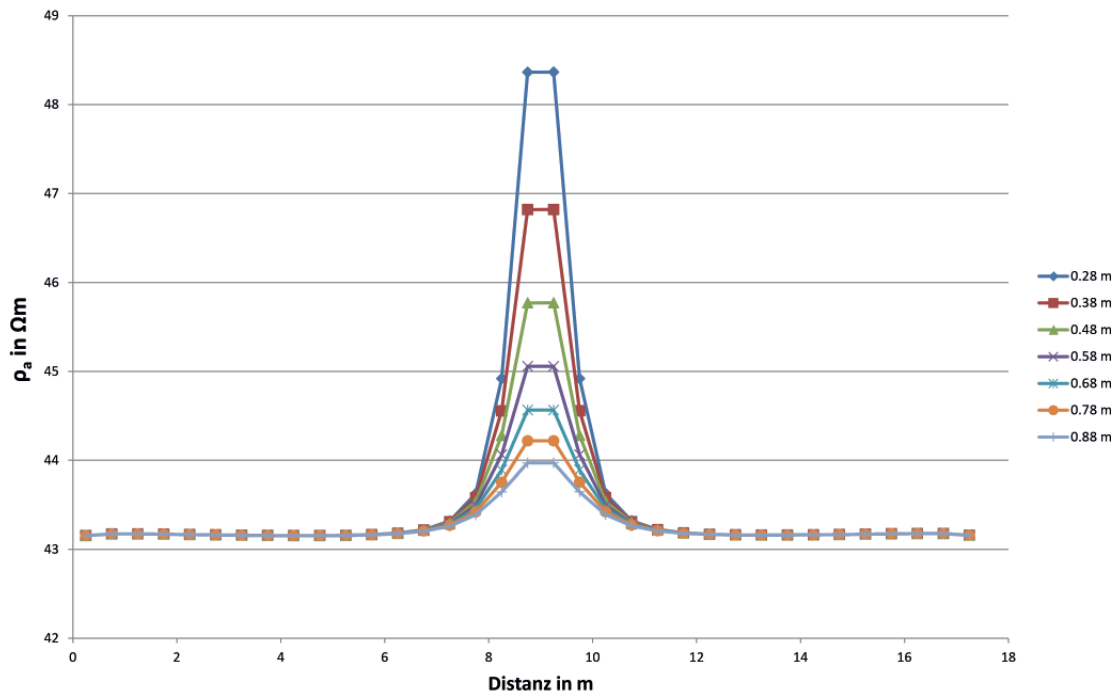


Abbildung 5-37: Ergebnis der Anwendung einer modifizierten Pol-Pol-Konfiguration mit einem Elektrodenabstand von 0.5 m auf Mauerstrukturen mit unterschiedlichen Tiefenlagen.

5.3.5 HYDRUS Modell für Eisenberg

Das HYDRUS-Modell für Eisenberg wurde auf Grundlage der Verteilung der ρ -Werte in ERT-Profil Eis2 und der Stratigraphie der Bohrungen B1 und B2 erstellt. Das Modell stellt den vertikalen Aufbau des Untergrundes und sein Wasserrückhaltevermögen auf einer Länge von 52 m und bis in eine Tiefe von 8 m vereinfacht dar (Abb. 5-38). Das Modell verfügt über eine durchlässige untere Grenze, so dass das an der Oberfläche in das System eingebrachte Niederschlagswasser das Modell auch wieder verlassen kann.

Die Schichten L1 bis L5 entsprechen den in den Bohrungen angesprochenen Schichten. Die hydraulischen Eigenschaften wurden über die an die HYDRUS-Software gekoppelte Pedotransfer-Funktionen aus der Korngrößenverteilung und der Lagerungsdichte berechnet (Tab. 5-1). Für die Schichten L2 und L3 ergibt sich ein hoher maximaler volumetrischer Wassergehalt (θ_s) in Kombination mit einer niedrigen hydraulischen

Leitfähigkeit (K_s), was zu einem potentiell hohen Wasserrückhaltevermögen führt. Im Gegensatz dazu stehen die Schichten L4 und L5, die zwar durch einen ähnlichen Wert für θ_s charakterisiert werden, aber über eine höhere hydraulische Leitfähigkeit verfügen.

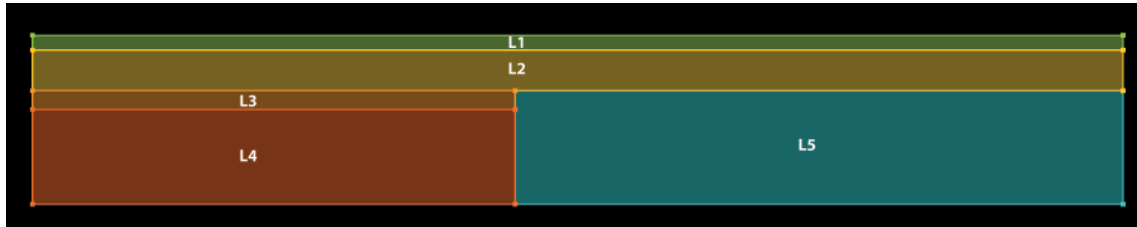


Abbildung 5-38: HYDRUS-Modell für ERT-Profil Eis2.

Schicht	θ_r	θ_s	α	n	K_s	l
L1	0.0423	0.3960	3.60	1.5456	0.7880	0.5
L2	0.0472	0.3897	2.47	1.4392	0.3561	0.5
L3	0.0653	0.4049	2.11	1.3689	0.1857	0.5
L4	0.0593	0.3976	2.83	1.6898	0.8449	0.5
L5	0.0560	0.4201	3.19	3.4796	9.3980	0.5

Tabelle 5-1: Materialeigenschaften der im HYDRUS-Modell verwendeten Geometrien.

Der zeitliche Ablauf des Modells erstreckte sich über den Zeitraum von Februar 2013 bis Januar 2014 mit einer Auflösung von einem Tag. Die Wetterdaten (Niederschlag in mm und Temperatur in °C) stammen von einer nahegelegenen Wetterstation und wurden ebenfalls mit einer Auflösung von einem Tag als Eingangsparameter verwendet. Um den Einfluss von Abweichungen des saisonalen Niederschlags- und Temperaturverlaufs auf das Modell zu erkennen, wurde ein Klimadiagramm für den Modellierungszeitraum mit den Werten des vierteljährigen Mittels verglichen (Abb. 5-39).

Da die Auswertung von allen Tagesergebnissen des Modellierungsprozesses als nicht zielführend angesehen wurde, wurden die Ergebnisse immer zur Mitte des jeweiligen Monats exportiert, um einen beispielhaften Einblick in die saisonale Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes im Untergrund von ERT-Profil Eis2 zu erhalten. In Abbildung 5-40 ist die monatliche Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes für die Schichten L1 bis L4 dargestellt. Die saisonale Veränderung des θ von L5 wurde nicht dargestellt, da in dieser Schicht auf Grund der hohen hydraulischen Leitfähigkeit die Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes nur gering ist und sehr schnell abläuft. Dargestellt sind die Mittelwerte und die in den einzelnen Schichten zum Zeitpunkt des Exports aufgetretenen Minima und Maxima.

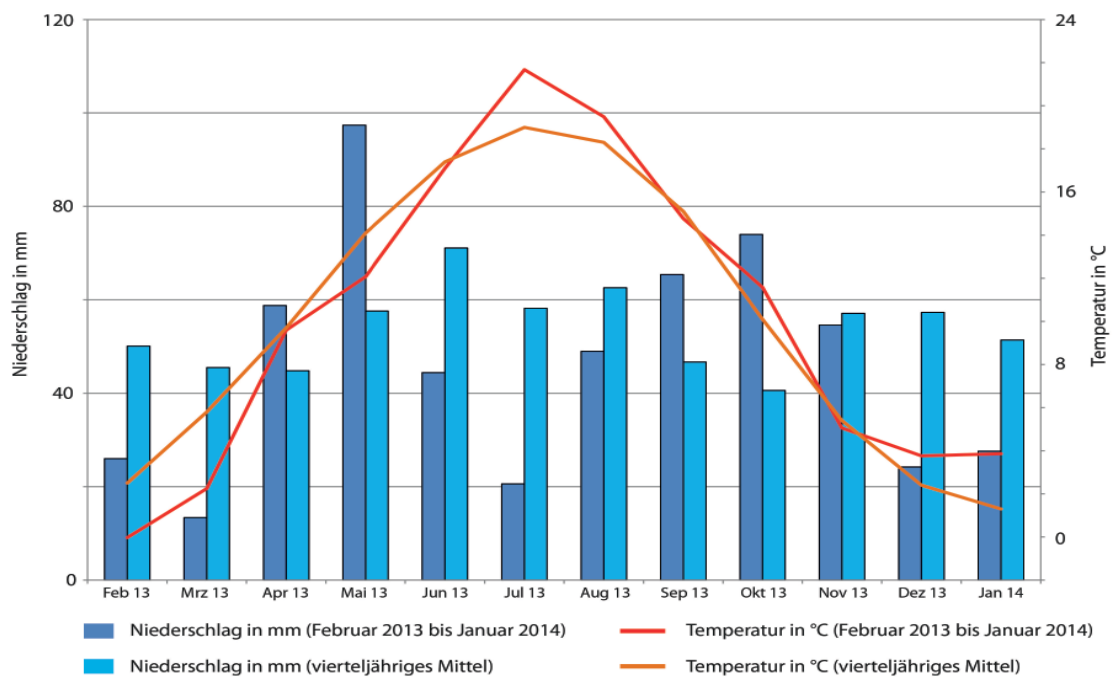


Abbildung 5-39: Klimadiagramm Eisenberg. Quelle: Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinland-Pfalz.

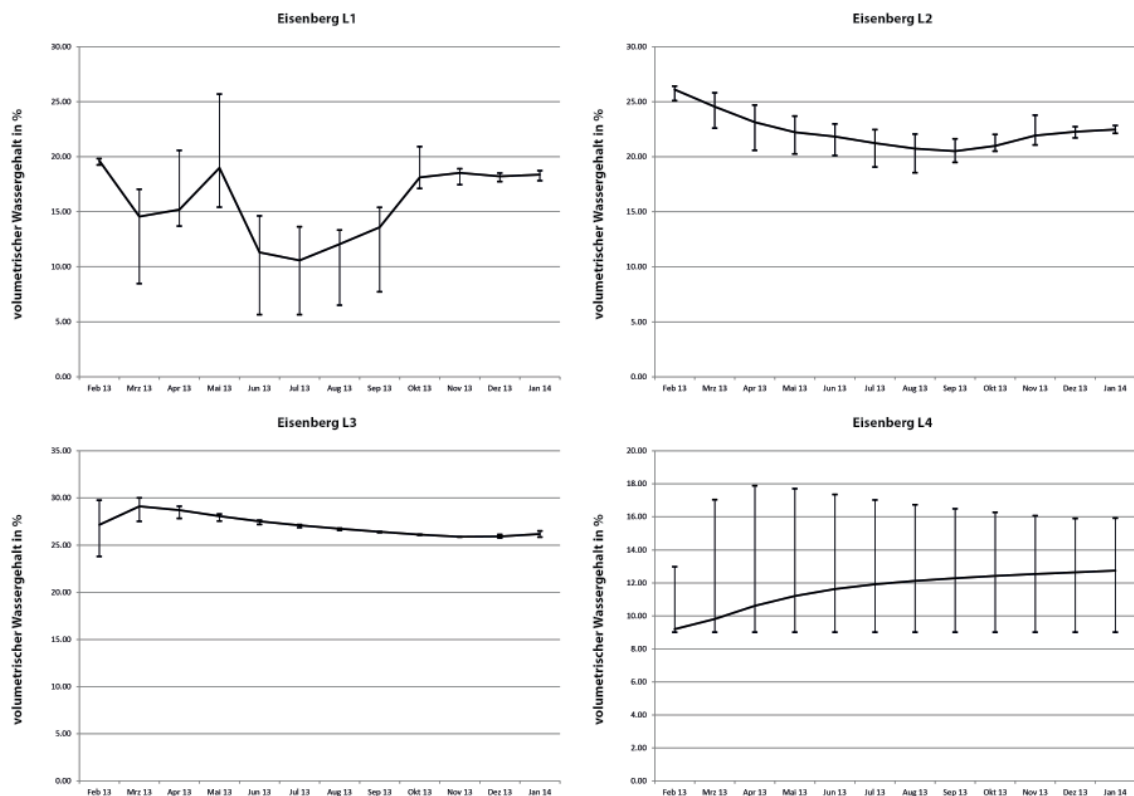


Abbildung 5-40: Saisonale Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes in den Schichten L1 bis L4 (Berechnung durch HYDRUS).

Der volumetrische Wassergehalt der oberflächennahen Schicht L1, in der sich auch die Mauerüberreste des Burgus befinden, ist stark an den saisonalen Ablauf des Wetters gebunden. Beim Vergleich der Ergebnisse für L1 mit dem Klimadiagramm (Abb. 5-39) kann der starke Einfluss der Niederschläge erkannt werden, was besonders im Mai 2013 deutlich wird. In diesem Monat ergibt sich aus ungewöhnlich vielen Niederschlagsereignissen ein hoher volumetrischer Wassergehalt in L1, während die Schichten L2 bis L4 davon nur geringfügig beeinflusst werden. Offensichtlich führt die hohe Wasserspeicherkapazität von L2 dazu, dass nur ein geringer Teil des Niederschlages die Schichten L3 und L4 auch tatsächlich erreicht. Daraus resultiert eine geringe saisonale Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes der tieferliegenden Schichten.

5.3.6 Kombination der HYDRUS-Ergebnisse mit dem elektrischen Widerstandsmodell

Die Ergebnisse der Modellierung mit HYDRUS wurden verwendet, um die saisonale Veränderung des elektrischen Widerstandes der Schichten L1 bis L4 durch die Kombination von RHOADES-Formel und Effective Medium Theory zu berechnen (Abb. 5-41). Bei der Berechnung des ρ -Werts wurde der Wassergehalt als einziger variabler Eingangsparameter der RHOADES-Formel angenommen. Aus diesem Grund verläuft die saisonale Veränderung des berechneten ρ der Schichten L1 bis L4 parallel zur Veränderung Modellierungsergebnisse von HYDRUS aus Kapitel 5.3.5.

Die modellierten ρ -Werte für Juni 2013 wurden im elektrischen Widerstandsmodell 2 (Kapitel 5.3.4) verwendet und mit den ERT-Profilen von Juni 2012 verglichen. Ausgehend davon, dass sich die Verteilung des Wassergehaltes im Untergrund im Juni 2012 und Juni 2013 relativ ähnlich sein sollten, müsste die vertikale Verteilung des ρ ebenfalls ähnlich ausgeprägt sein. Abbildung 5-42 zeigt die Inversionsergebnisse für Modell 2 mit den Werten für Juni 2013. Die oberflächennahe Schicht L1 weist ρ -Werte von 63 bis 68 Ωm auf, die von den Werten in ERT-Profil Eis2 (59-84 Ωm) teilweise abweichen. Da die im Gelände gemessenen Daten zusätzlich durch das verpflügte Steinmaterial der Mauerstrukturen beeinflusst werden, können in den realen Daten vor allem Abweichungen der Maximalwerte auftreten. Die ρ -Werte für L2, L3 und L5 sind weitestgehend ähnlich, die größten Abweichungen können jedoch für L4 festgestellt werden und müssen im Zusammenhang mit der Limitierung der RHOADES-Formel bei ungewöhnlichen Korngrößenverteilungen betrachtet werden.

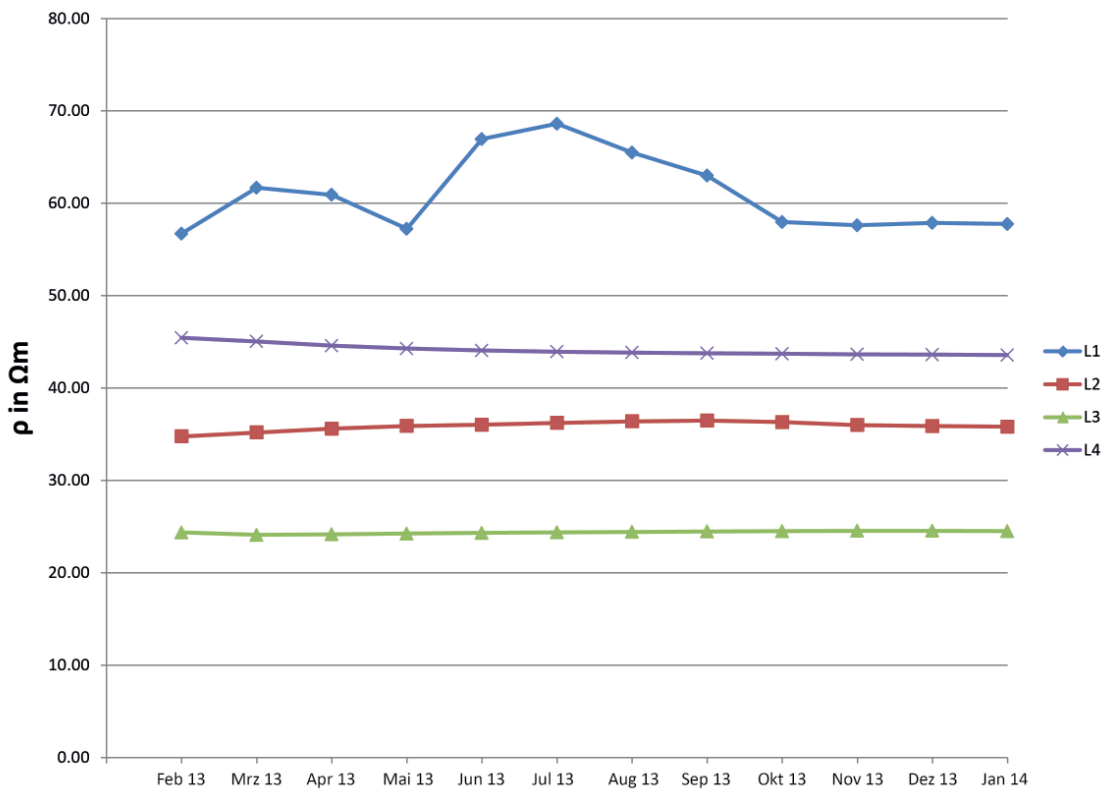


Abbildung 5-41: Berechnung der saisonalen Veränderung des ρ der Schichten L1 bis L4 aus der Kombination von HYDRUS, RHOADES-Formel und Effective Medium Theory.

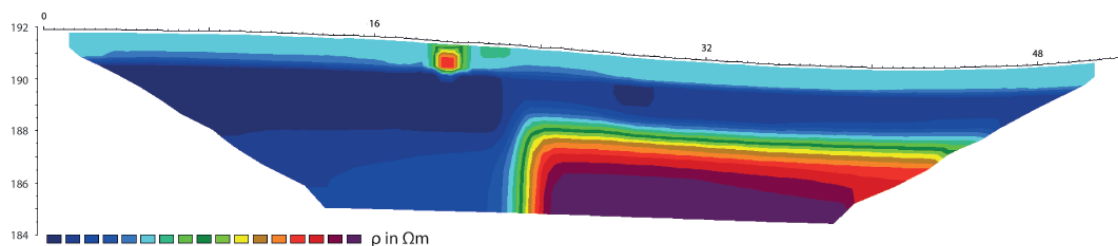


Abbildung 5-42: Inversionsergebnis für Widerstandsmodell 2 mit den ρ_m -Werten für Juni 2013.

5.3.7 Zusammenfassung

Die archäologische Stratigraphie in Eisenberg wird durch anthropogen und natürlich bedingte Absenkungen beeinflusst und wirkt sich folglich auch auf die Prospektionsergebnisse der elektrischen Widerstandskartierung und elektrischen Widerstandstomographie aus. Diese Auswirkungen auf die Prospektionsergebnisse können mit elektrischen Widerstandsmodellen überprüft werden und liefern somit einen Hinweis auf die zu erwartenden Ergebnisse und Erfolgsaussichten der Methoden. Durch Bohrungen konnten Informationen zur Stratigraphie des Untergrundes gewonnen werden, welche die Genauigkeit der elektrischen Widerstandsmodelle verbessern

können.

Die Berechnung des ρ durch die RHOADES-Formel muss kritisch hinterfragt werden, da die Methode offensichtlich den Einfluss von Evaporation auf die Bodenstruktur nicht oder nur unzureichend abbilden kann. In Kombination mit der geringen Sensitivität der RHOADES-Formel bei hohem Tongehalt kann der ρ von Bodenproben stark unterschätzt werden.

Die Modellierung des volumetrischen Wassergehaltes mit HYDRUS zeigte die stärksten Veränderungen des Wassergehaltes in den oberflächennahen Bereichen des Modells. Da sich in diesem Bereich auch archäologische Strukturen befinden, kann von einer Beeinflussung der Prospektionsergebnisse für diese Strukturen durch eine Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes ausgegangen werden. In den Schichten L2 bis L4 konnte nur eine geringe saisonale Veränderung des ρ festgestellt werden, was vermutlich im Zusammenhang mit dem hohen Wasserrückhaltevermögen der Löss-Schicht L2 steht. Für Schicht L5 konnte eine hohe hydraulische Leitfähigkeit festgestellt werden, wodurch das in diese Schicht gelangende Niederschlagswasser sehr schnell abgeleitet wird. Denkbar ist ein Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen hydraulischen Leitfähigkeiten der Sedimentkörper und den natürlichen Senkungsbewegungen.

5.4 Die villa rustica „Im Falkensaß“ bei Katzenbach/Donnersbergkreis

Die archäologische Forschungsgeschichte im Raum Katzenbach kann bis ins späte 19. Jahrhundert zurückverfolgt werden. In den Ortsakten der Landesarchäologie Speyer werden Zeitungsartikel aus dem Jahr 1898 erwähnt, die den Fund von römischen Fundamenten und Münzen beschreiben. Erste strukturierte Forschungsansätze in der Region sind eng mit der Fundstelle „Im Falkensaß“ verknüpft. Der Fund der römischen Brunnenanlage an der Quelle des Beerbach im Jahr 1910 wird überregional wahrgenommen (SPRATER 1930; HÄSSEL 1962) und legte den Grundstein für die genauere Untersuchung der Umgebung. Dass sich in unmittelbarer Umgebung eine römische Siedlungsstelle befindet, war bereits vor der Entdeckung der Brunnenanlage bekannt (BRANDSTETTNER 1908). Bis in die 1960er Jahre beruhte die Lokalisierung und das Wissen über die Fundstelle auf Lesefunden (SPRATER 1930), bis durch die Hinweise des Heimatforschers J. Grogro eine Grabung durch die Landesarchäologie Speyer durchgeführt wurde (SCHULZE 2001). Im Zeitraum von 1967 bis 1972 wurde das Hauptgebäude der villa rustica fast vollständig freigelegt (WALLING 1971). Die Funde der Ausgrabung werden momentan im Rahmen einer Dissertation untersucht und ausgewertet (SCHULZE 2001).

Durch die Grabung konnten mindestens zwei unterschiedliche Steinbauphasen identifiziert werden. Von der älteren Steinbauphase sind nur wenige Strukturen (ein Hypokaust sowie mehrere Kanäle) erhalten, so dass nur wenige Aussagen über diese Phase möglich sind. Der Grundriss der jüngeren Steinbauphase hingegen konnte vollständig erfasst werden. Es handelt sich dabei um ein Hauptgebäude mit zwei Risaliten, die durch einen Säulengang verbunden wurden. Dahinter befanden sich der eigentliche Wohnbereich sowie verschiedene funktionale Räume, die dem Bad und Lagerräumen zugeordnet werden können. Zeitlich werden die beiden Phasen zwischen dem 1. Jahrhundert n. Chr. und dem 4. Jahrhundert n. Chr. eingeordnet (WALLING 1971). Diese Datierung wird durch die Untersuchung der Keramik aus den Grabungen und den Münzfunden an der Brunnenanlage bestätigt (SCHULZE 2001). Neben der Brunnenanlage wird auch der Fund einer Aschekiste im Osten der Fundstelle der villa rustica zugeordnet (CÜPPERS 2005), was jedoch nach Auswertung der Ortsakten nicht als gesichert gelten kann. Im Umfeld der Gemeinde Katzenbach sind weitere römische Siedlungsstellen bekannt, die jedoch noch nicht näher untersucht wurden. Bislang ruhen die Interpretationen als villa rusticae auf Lesefunden, Ziegelstreuungen und Fundamentresten. Die Fundstelle „Im Oberen Moorborn“ befindet sich wie die Fundstelle „Im Falkensaß“ südlich des Katzenbachs auf einem flachen Hangrücken in der Nähe einer Quelle (Abb. 5-43). Bislang sind lediglich Berichte von Heimatforschern über verschiedene Fundamentreste und Steinstrukturen bekannt (SCHITTER 1987). Eine ähnliche Befundlage gilt für die Fundstelle „In der Fehlersheck“ auf der Nord-Ost Flanke des Stahlbergs (FEHR 1972).



Abbildung 5-43: Übersichtskarte der Fundstellen bei Katzenbach. Luftbild: Google Earth 2012.

5.4.1 Luftbilder der Fundstelle

Die Fundstelle „Im Falkensaß“ wurde bereits in den 1990er Jahren von Luftbildarchäologen der Landesarchäologie Speyer befliegen. Zu diesem Zeitpunkt wurden die Felder im Umkreis der Fundstelle bereits als Weidefläche genutzt, so dass keine perfekten Bedingungen für die Entstehung von Bewuchsmerkmalen vorlagen. Dennoch sind in der Luftbildserie die Grundrisse der Nebengebäude 1 und 3 zu erkennen (Abb. 5-44). Bei Nebengebäude 3 ist außerdem eine Unterteilung in zwei Räume erkennbar. Östlich von Nebengebäude 3 ist der Verlauf einer modernen Wasserleitung als dunkelgrüne Verfärbung sichtbar. Sie verläuft von einem Wasserbehälter im Bereich der Baumreihe in Richtung des Beerbach, dessen Quelle durch die römische Brunnenanlage gefasst wurde. Der Grundriss von Nebengebäude 1 ist zwar ersichtlich, jedoch wird das Gebäude von der modernen Straße geschnitten und ist vermutlich nur noch teilweise erhalten. Während Nebengebäude 1 und 3 eine deutliche Anomalie erzeugen, können bei Nebengebäude 2 nur einzelne Mauerzüge relativ vage erkannt werden, der Grundriss bleibt weitestgehend unerkannt. Zwischen Nebengebäude 1 und 2 verläuft eine dunklere Anomalie, die vermutlich durch einen Erosionskanal hervorgerufen wird. Neben den archäologischen Strukturen wird auch die moderne Überprägung des Geländes erkennbar. Südöstlich von Nebengebäude 1 wurde anthropogenes Material aufgeschüttet, das heute die ursprüngliche Fundstelle der Brunnenanlage überdeckt.



Abbildung 5-44: Luftbild der Fundstelle „Im Falkensaß“ bei Katzenbach. Luftbild: GDKE RLP, Direktion Landesarchäologie Speyer.

5.4.2 Topographie und Hydrologie im Raum Katzenbach

Die Ortschaft Katzenbach liegt aus naturräumlicher Sicht im Nordpfälzer Bergland, welches sich durch eine den Mittelgebirgen ähnelnde Topographie auszeichnet. Diese wird von einer Vielzahl kleinerer Bachläufe dominiert, die über die Alsenz an das Flusssystem der Nahe angeschlossen sind. Die Bach- und Flussläufe bilden auf Grund der hohen Reliefenergie Steilhänge aus, die mit zunehmender Höhenlage in ein abgeflachtes Hügelland übergehen (Abb. 5-43).

Katzenbach liegt im Tal des gleichnamigen Bachlaufs nördlich von Rockenhausen. Der Katzenbach entspringt in der Nähe des Stahlbergs und fließt ca. 3 km von Westen nach Osten bevor er in die Alsenz mündet. Aus Süden entwässern mehrere kleine Bäche (Beerbach, Rammelbach und Moorborner Graben) in Richtung des Katzenbachs und bilden Täler zwischen leicht abgeflachten Hangrücken aus. Diese länglichen Hangrücken werden als sogenannte Riedel bezeichnet. Nördlich des Katzenbachs ist das Relief weniger stark ausgeprägt, da aus dieser Richtung keine weiteren Bachläufe einmünden und die Geologie des Stahlbergs die Reliefgenese beeinflusst.

5.4.3 Geologie im Raum Katzenbach

Die Geologie im Raum Katzenbach sowie im Donnersbergkreis wird hauptsächlich durch zwei geologische Großstrukturen aus dem Permokarbon geprägt. Zum einen liegt Katzenbach sehr zentral im Saar-Nahe-Becken, das sich über einen großen Teil von Rheinland-Pfalz und des Saarlandes erstreckt. Zum anderen grenzt der Untersuchungsraum an die jüngere Donnersberg-Formation, deren Namensgeber mit einer Höhe von 686.5 m über NN das Erscheinungsbild der ganzen Region prägt.

Das Saar-Nahe-Becken ist ein intermontanes Becken, das sich südlich des Hunsrück von Südwesten nach Nordosten erstreckt. Seine Entstehungsgeschichte ist im Zusammenhang mit der variskischen Orogenese zu betrachten, eine Analogie zum Saar-Nahe-Becken ist die kleinere und nördlich des Hunsrücks gelegene Wittlicher Senke. Die im Untersuchungsraum aufgeschlossenen Gesteine werden größtenteils der im Rotliegend beheimateten Meisenheim-Formation zugerechnet. Während der Ablagerung der Meisenheim-Formation findet im Saar-Nahe-Becken unter tropischen Klimabedingungen fluvio-lakustrine Sedimentation statt (LGB-RLP 2005).

Während im frühen Rotliegend das Saar-Nahe-Becken durch relativ stabile Sedimentationsbedingungen geprägt ist (Glan-Subgruppe), setzt danach eine Phase erhöhter vulkanischer Aktivität ein. Resultat dieser Aktivität sind das Rhyolithmassiv des Donnersbergs sowie eine Vielzahl von Basaltgängen. Neben der vulkanischen

Aktivität setzt sich die Sedimentation im Saar-Nahe-Becken fort, jedoch beeinflussen wechselnde klimatische sowie tektonische Prozesse die Bildung der Sedimente. Sie werden als die Donnersberg-Formation bezeichnet (LGB-RLP 2005).

Die Geologie des Untersuchungsraums bei Katzenbach lässt sich auf kleinräumiger Ebene gut durch seine Bach- und Flussläufe abgrenzen. Als Abgrenzung der älteren Glan-Subgruppe von der jüngeren Nahe-Subgruppe lässt sich die von Norden nach Süden verlaufende Alsenz heranziehen. Die Sedimente der Nahe-Subgruppe kommen auf dem Kartenblatt Rockenhausen nur östlich der Alsenz vor. Westlich der Alsenz dominiert die Glan-Subgruppe, besonders die Jeckenbach-Subformation der Meisenheim-Formation ist dort aufgeschlossen. Die Jeckenbach-Subformation besteht aus einer Wechsellagerung von Ton- und Siltsteinen, in die gelegentlich gelbliche oder rötliche Feinsandsteinbänder eingeschaltet sind. In einer Baugrube nördlich der Römersiedlung „Im Falkensaß“ konnte eine ca. 20 cm mächtige, gelbliche Feinsandeinschaltung dokumentiert werden.

Der Katzenbach selbst ermöglicht eine weitere Abgrenzung innerhalb des Untersuchungsraums. Er fließt von Westen nach Osten und mündet nördlich von Rockenhausen in die Alsenz. Nördlich des Katzenbachs befindet sich der Stahlberg, der aus der bereits beschriebenen Jeckenbach-Subformation mit gelegentlichen Einschaltungen von rötlichen Sandsteinen besteht. Die Besonderheit des Stahlbergs ist die hydrothermale Alteration der Jeckenbach-Subformation, die zur Bildung von Eisenerzlagerstätten führte. Der Stahlberg wurde bereits mittelalterlich und auch neuzeitlich als Bergbaurevier genutzt, zahlreiche Bergbaustrukturen sind im Gelände und LIDAR-Scans sichtbar. Im Zusammenhang mit der hydrothermalen Veränderung der Gesteine stehen vermutlich auch die zahlreichen pleistozänen Rutschungen, die im Untersuchungsgebiet nur an den Flanken des Stahlbergs vorkommen. Der historische Bergbau in der Region ist insofern interessant, da durch diese Aktivitäten starke Erdmassenbewegungen zustande kommen. Der Aushub repräsentiert nicht notwendigerweise das aufgeschlossene Gestein, sondern kann aus tiefer liegenden Schichten bestehen. Aus Abbildung 5-45 geht hervor, dass Bergbaustrukturen in der Nähe der archäologischen Fundstellen liegen und somit eine Beeinträchtigung der archäologischen Stratigraphie stattgefunden haben könnte, was sich auf geophysikalische Messungen auswirken kann.

Südlich des Katzenbachs wird die Jeckenbach-Subformation von einer Vielzahl an Basaltgängen durchbrochen. Es handelt sich dabei hauptsächlich um basaltische Andesite und tholeytische Basalte mit einer feinkörnigen Matrix. Die Basalte spielen auch aus archäologischer und geophysikalischer Sicht eine besondere Rolle, da sie

als Baumaterial verwendet wurden und ihre geophysikalischen Eigenschaften von der übrigen Geologie im Untersuchungsraum abweicht. Neben den Basaltgängen treten südlich des Katzenbachs gelegentlich Gänge des Basis-Sandsteins an die Oberfläche, die sich von den Ton- und Siltsteinen unterscheiden lassen.

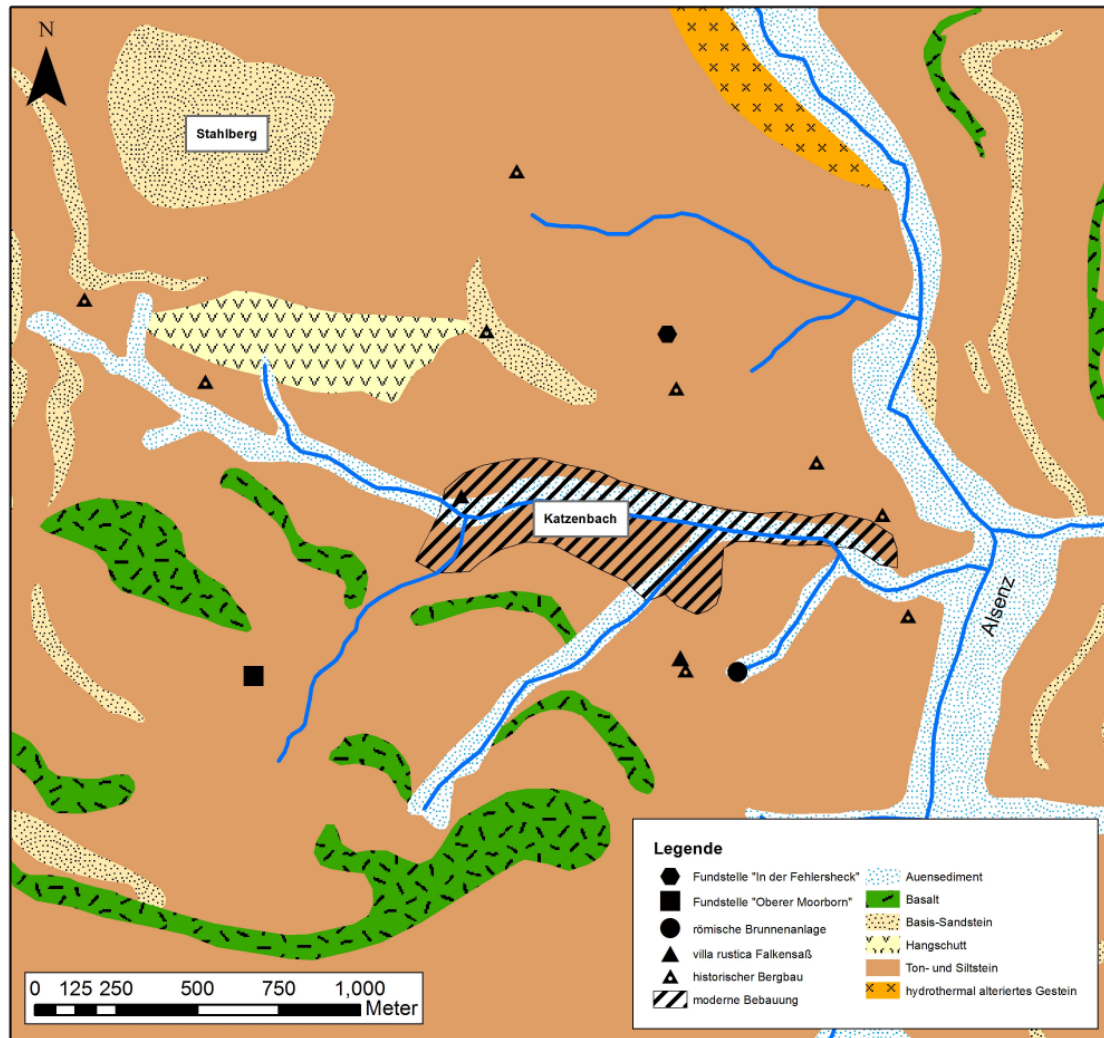


Abbildung 5-45: Geologie im Raum Katzenbach. Quelle: LGB-RLP (2010).

5.4.4 Geophysikalische Prospektion

Die geophysikalischen Untersuchungen wurden zwischen 2011 und 2013 durchgeführt. In einer ersten Kampagne im Dezember 2011 wurden die Nebengebäude 1 und 2 durch elektrische Widerstandskartierung (BRENGEL 2012) und Bodenradar lokalisiert. Zum Einsatz kamen ein RM15 Widerstandsmessgerät der Firma Geoscan Research und ein RIS MF Hi-Mod der Firma IDS mit einer 200 und 600 MHz-Antenne. Beide Methoden wurden im Mai 2012 erneut zur Prospektion von Nebengebäude

3 eingesetzt. Kurz vor Beginn der Grabungskampagne im Juli 2013 wurden beide Flächen mit der elektrischen Widerstandskartierung prospektiert, um Daten zu erhalten, die mit den bodenphysikalischen und bodenchemischen Parametern zum Zeitpunkt der Grabung korrelieren. Zusätzlich wurden Testmessungen mit einem Cäsium-Magnetometer G-858G der Firma Geometrics durchgeführt, wobei jedoch zu beachten ist, dass durch die starke Störung des Areals durch metallische Weidezäune nur eine sehr punktuelle Anwendung möglich war. Nach der eindeutigen Lokalisierung der Strukturen durch horizontale Kartiermethoden wurde im Juli 2013 die elektrische Widerstandstomographie eingesetzt, um Informationen über die vertikale Ausdehnung der archäologischen Strukturen sowie deren Erhaltungszustand zu gewinnen. Zum Einsatz kam eine SYSCAL Pro der Firma IRIS Instruments.

5.4.4.1 Elektrische Widerstandskartierung

Die elektrische Widerstandskartierung (Abb. 5-46) ergab Widerstandswerte im Bereich von 13.52 bis 37.52 Ω . Prospektiert wurden die Flächen nordöstlich des Hauptgebäudes, da sich dort durch die Luftbildauswertung Hinweise auf Nebengebäude ergaben. Zum Zeitpunkt der Prospektion wurden die Prospektionsflächen östlich und westlich des Weges als Weidefläche genutzt, so dass nur eine niedrige Vegetation aus Gräsern bestand.

Unmittelbar nordöstlich des Hauptgebäudes zeichnen sich die Grundrisse der Nebengebäude 1 und 2 als hohe Widerstandsanomalien ab, wobei die Strukturen von Nebengebäude 1 einen höheren elektrischen Widerstand erzeugen und sich somit vom umgebenden Bodenmaterial besser unterscheiden lassen. Der Grundriss von Nebengebäude 1 konnte auf einer Länge von 15 m und einer Breite von 10 m nachgewiesen werden. Außerdem deutet ein innerhalb des Grundrisses verlaufender Mauerzug auf eine Unterteilung in mindestens zwei Räume hin. Der nordöstliche Teil des Gebäudes ist überbaut und wurde vermutlich dabei zerstört.

Der Grundriss von Nebengebäude 2 wird von der Widerstandskartierung heterogen erfasst. Der südwestliche Bereich des Gebäudes weist höhere Widerstandswerte auf, während die beiden Außenmauern nur sehr undeutlich abgebildet werden konnten. Möglicherweise ist dies mit Unterschieden im Erhaltungszustand der archäologischen Strukturen zu erklären. Die nordöstliche Ecke des Gebäudes wird zudem von einer leitfähigeren Schicht überlagert, was vermutlich im Zusammenhang mit der im Luftbild angesprochenen Erosionsrinne steht. Das Gebäude konnte auf einer Länge von 28 m und einer Breite von 22 m prospektiert werden. Flächenmäßig übertrifft das Gebäude somit den Zentralbereich des Hauptgebäudes. Der südwestliche Teil des

Grundrisses konnte durch keine der Prospektionsmethoden erfasst werden. Es ist davon auszugehen, dass dieser Bereich nicht erhalten ist. Die südliche Außenmauer wird am südwestlichen Ende von einer großflächigen Widerstandsanomalie geschnitten, die als moderner Bergwerksschacht oder Pinge identifiziert werden konnte (SCHITTER 1987). Entsprechende Grabungsbefunde sind auch im Grabungstagebuch der Ausgrabung in den 1970ern vermerkt. WALLING beschreibt die Struktur als eine Mulde mit ca. 12 m Durchmesser, deren Sohle durch einen 1.8 Meter tiefen Grabungsschnitt nicht erreicht wurde. Die Pinge ist verfüllt mit einer unregelmäßigen Mischung aus lockeren Erd- und Steinschichten. Der hohe elektrische Widerstand wird vermutlich durch die Verfüllung der Pinge durch den bei Ausschachtung entstandenen Aushub mit hohem Steingehalt verursacht. Auch die nördliche Außenmauer wird durch eine hohe Widerstandsanomalie unterbrochen, jedoch ist in diesem Fall keine Identifizierung der Anomalie möglich. Das Nebengebäude selbst weist verschiedene interne Strukturen auf. Der nordöstliche Bereich besteht aus vier großen, länglichen Räumen. Möglicherweise bestand eine weitere Unterteilung in einen fünften Raum, jedoch kann hier nur noch eine Mauerstruktur angesprochen werden. Der südwestliche, interne Bereich ist leicht asymmetrisch zu den übrigen Mauerzügen angeordnet, was eventuell auf eine andere Bauphase schließen lässt. An der nördlichen Ecke befindet sich außerdem ein Anbau aus zwei Mauerzügen, die am aussagekräftigsten durch das Bodenradar abgebildet wurden. Möglicherweise handelt es sich um Stützmauern, da in diesem Bereich die Hangneigung stark zunimmt.

Die Ausrichtung der beiden Nebengebäude nimmt klaren Bezug auf die Außenmauern der Risalite des Hauptgebäudes. Während die nördliche Außenmauer von Nebengebäude 2 auf die Außenmauer des nördlichen Risalits gefluchtet werden kann, ist Nebengebäude 1 parallel zu den Außenmauern von Nebengebäude 2 ausgerichtet.

Im Umfeld von Nebengebäude 1 und 2 können weitere Widerstandsanomalien identifiziert werden. Im Bereich um die nördliche Ecke von Nebengebäude 2 sind mehrere Anomalien mit hohem elektrischem Widerstand sichtbar, allerdings ist eine Ansprache aus archäologischer Sicht schwierig. An die südliche Ecke von Nebengebäude 1 schließt sich ebenfalls eine hohe Widerstandsanomalie an, möglicherweise handelt es sich um verstürztes Steinmaterial von Nebengebäude 1, aber auch eine moderne Störung ist in diesem Fall denkbar.

Östlich der Straße konnte das bereits aus dem Luftbild bekannte Nebengebäude 3 ebenfalls mit der elektrischen Widerstandskartierung prospektiert werden. Im Gegensatz zu den Nebengebäuden 1 und 2 ist dieses Nebengebäude mit der länglichen Seite (18 m Länge) parallel zur Portikus des Hauptgebäudes ausgerichtet. Im Süden schließt eine Mauerstruktur an, die auf den südlichen Risaliten gefluchtet werden kann. Eventuell

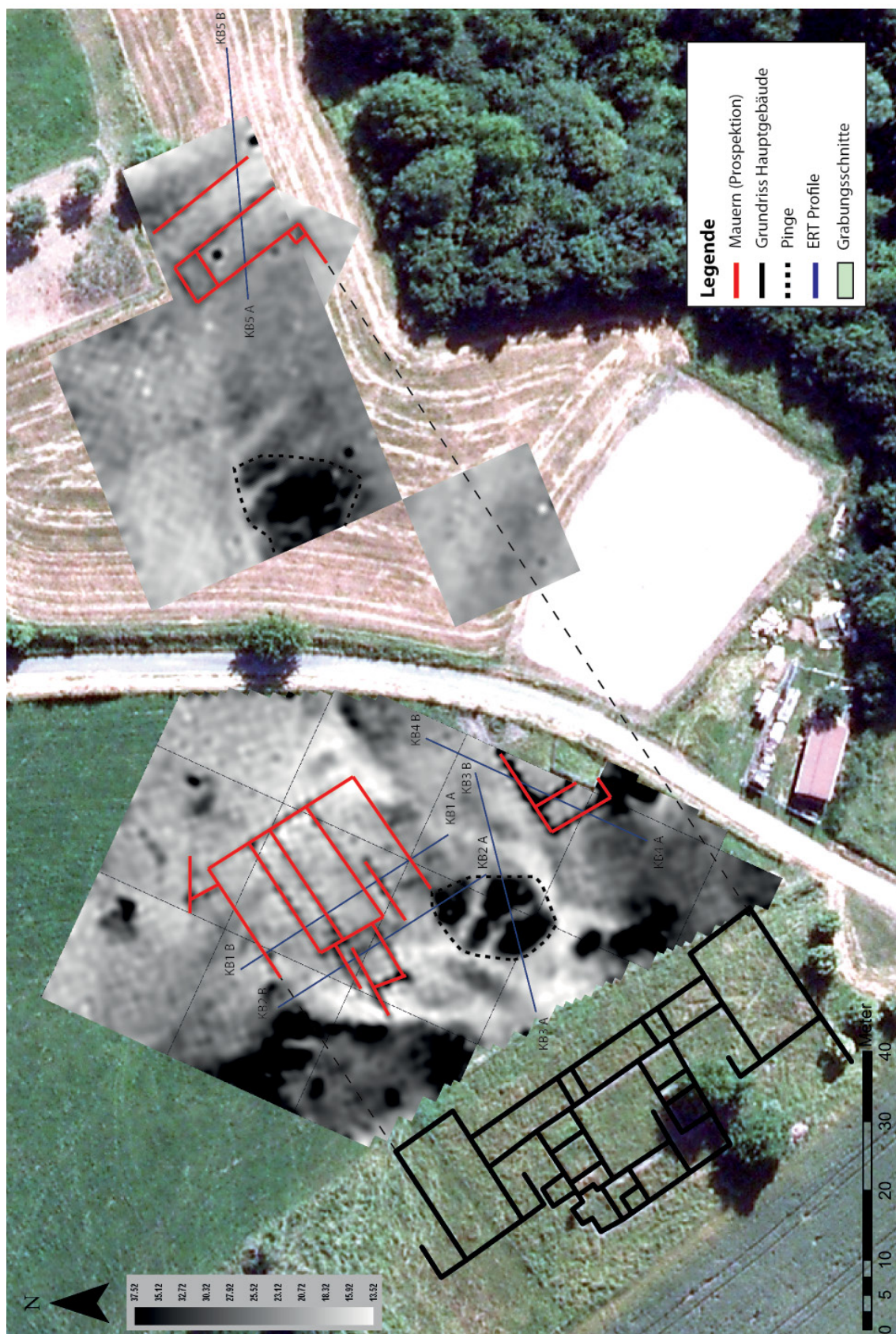


Abbildung 5-46: Prospektionsergebnisse der elektrischen Widerstandskartierung auf der Fundstelle „Im Falkensaß“ bei Katzenbach. Luftbild: Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation RLP.

handelt es sich um Überreste der Hofmauer, die auch an den südlichen Risalit anschließt und teilweise in der Grabung nachgewiesen wurde. Der Verlauf konnte jedoch nicht durch weitere Prospektionen bestätigt werden. Das Gebäude selbst ist 18 m lang und 7 m breit. Intern ist eine Unterteilung in mindestens zwei Räume sichtbar. Die beiden punktuellen Anomalien sind fehlerhafte Messwerte, die bei der archäologischen Interpretation nicht berücksichtigt wurden. Nordöstlich verläuft eine weitere lineare Anomalie parallel zu Nebengebäude 3, die vermutlich einen weiteren Abschnitt der Hofmauer darstellt. Der Abschluss des Gebäudes in südöstlicher Richtung konnte nicht erfasst werden.

Auch im Umfeld von Nebengebäude 3 sind weitere Anomalien sichtbar. Am auffälligsten ist eine flächenhafte Widerstands-anomalie westlich des Gebäudes. In Form und Größe ähnelt diese Anomalie stark der durch die Pinge verursachten Anomalie bei Nebengebäude 2. Beide Strukturen werden zudem von einer linearen Anomalie mit niedrigerem Widerstand durchzogen.

5.4.4.2 Elektrische Widerstandstomographie

Die ERT-Profile (Schlumberger-Konfiguration mit 0.5 m Elektrodenabstand) orientieren sich an den Prospektionsergebnissen der elektrischen Widerstandskartierung und wurden so angelegt, dass die Mauerstrukturen orthogonal geschnitten werden. Die ERT-Profile KB1 bis KB4 befinden sich westlich des Weges und haben die Nebengebäude 1 und 2 sowie die Pinge als Ziel (Abb. 5-46). KB5 liegt östlich des Weges und schneidet die Mauerstrukturen von Nebengebäude 3. Alle Profile sind 35.5 m lang, der Elektrodenabstand beträgt 0.5 m. Die Inversion sowie topographische Korrektur wurde mit der Software Res2DInv durchgeführt und mit den Ergebnissen der Software ERTLab verglichen. Die ERT-Profile KB1 und KB2 auf Nebengebäude 2 können grundsätzlich in drei Bereiche unterschieden werden (Abb. 5-47):

- Oberflächennaher Bereich mit ρ im Bereich 30 bis 60 Ωm .
- Mittlerer Bereich mit ρ im Bereich 13.3 bis 20 Ωm (tonige Verwitterungslage B).
- Unterer Bereich mit ρ im Bereich 25 bis 32 Ωm (Anstehendes C).

Die von den beiden ERT-Profilen geschnittenen Mauerstrukturen verursachen Anomalien mit ρ -Werten im Bereich 57.5 bis 103 Ωm und liegen größtenteils im oberflächennahen Bereich, greifen teilweise aber auch in den mittleren Bereich ein.

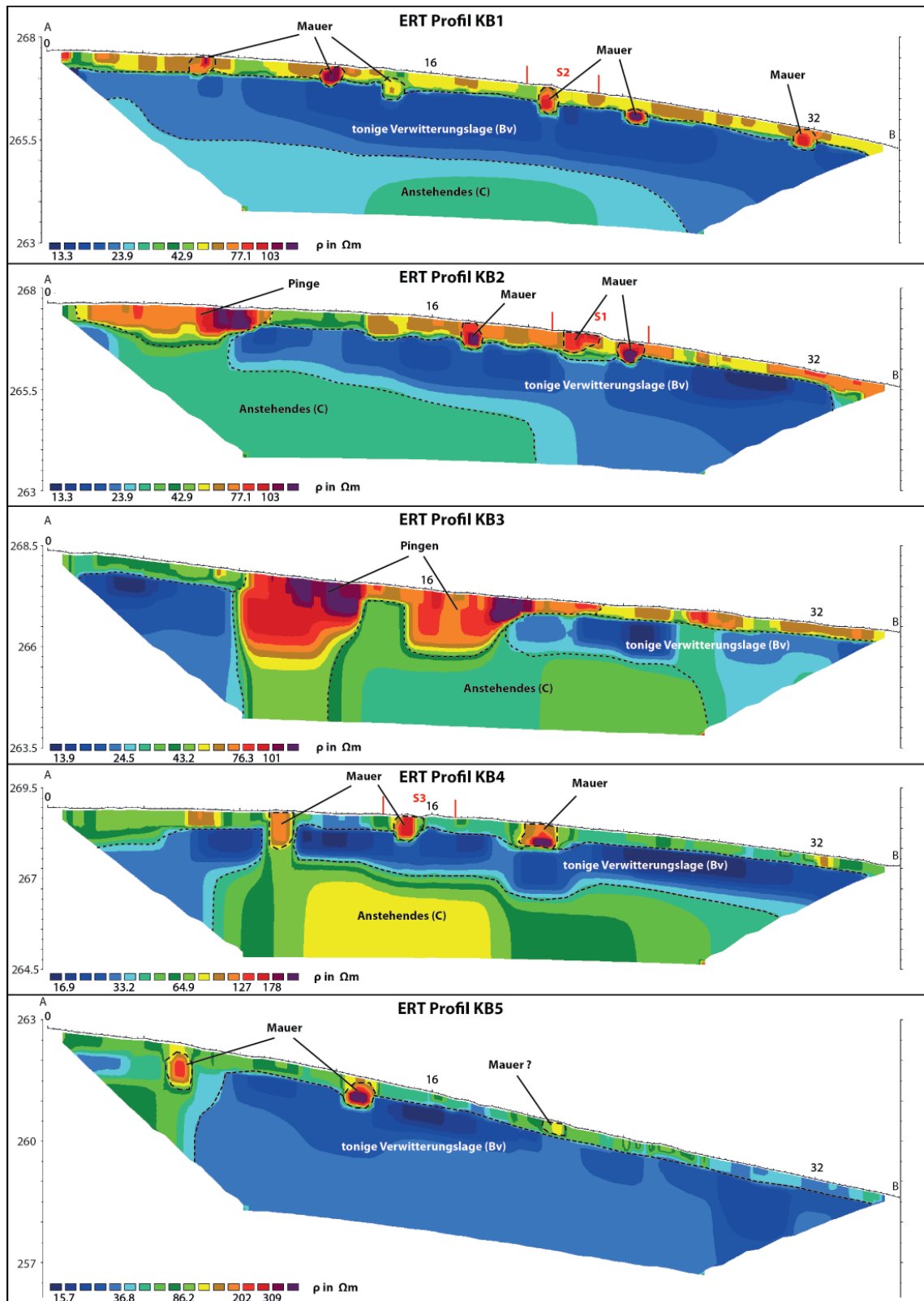


Abbildung 5-47: Inversionsergebnisse der ERT-Profile bei Katzenbach.

ERT-Profil KB1 schneidet insgesamt sechs Mauerstrukturen, die sich als Anomalien mit hohem ρ ansprechen lassen. Jedoch unterscheiden sich die von den Mauern produzierten Anomalien in ihren Werten. Während zwei Mauern einen sehr hohem ρ (ca. 103 Ωm , bei Meter 12 und Meter 25) verursachen, liegt der ρ der Mauern bei den Elektrodenpositionen bei Meter 7, Meter 21 und Meter 32 unter 100 Ωm . Dies kann möglicherweise auf den Erhaltungszustand oder das verwendete Baumaterial zurückgeführt werden.

Die Inversionsergebnisse von ERT-Profil KB2 zeigen eine ähnliche vertikale Verteilung des ρ wie ERT-Profil KB1. Insgesamt sind drei Mauerstrukturen identifizierbar, wobei die Mauer bei Meter 22 in Form und ρ abweicht. Zwischen den Mauerstrukturen ist der ρ des oberflächennahen Untergrundes höher, was durch einen erhöhten Steingehalt aus der Zerstörung der Mauerstrukturen verursacht wird. Zusätzlich wurde zwischen Meter 0 und 9 der nördliche Rand der Pinge geschnitten. Die verfüllte Struktur der Pinge ist durch einen hohen ρ im Bereich von 77.1 bis 103 Ωm erkennbar. In ERT-Profil KB3 wird die Struktur der Pinge noch einmal verdeutlicht. Es handelt sich dabei nicht um eine Struktur, sondern um eine Kombination aus mehreren Schürfversuchen. Zwischen Meter 8 und 13 ist eine Anomalie sichtbar, welche die tonige Verwitterungslage Bv durchteuft und bis ins Anstehende C reicht, während zwischen Meter 15 und 20 eine Struktur mit ähnlicher Form jedoch nur noch bis an die Obergrenze des Anstehenden C reicht. Getrennt werden die beiden Strukturen von einer Schwelle, die sich durch einen niedrigeren ρ auszeichnet. Diese Lage der Schwelle korreliert mit den in Kapitel 5.4.4.1 beschriebenen linearen Anomalien mit niedrigem elektrischem Widerstand innerhalb des durch die Pinge gestörten Bereiches. Das ERT-Profil KB4 wurde zur Prospektion von Nebengebäude 1 angelegt und schneidet zwei Außenmauern und eine interne Mauer. Auch in diesem Fall ist die Unterteilung des Untergrunds in die drei Bereiche möglich. Im Gegensatz zu den ERT-Profilen KB1 und KB2 liegt der ρ der Mauerstrukturen jedoch im Bereich zwischen 127 und 178 Ωm , was mit den Ergebnissen der elektrischen Widerstandskartierung korreliert. Östlich des Feldweges schneidet ERT-Profil KB5 das Nebengebäude 3 sowie eine bislang nicht weiter identifizierte Struktur. In diesem Profil verursachen die Überreste der Außenmauern des Gebäudes den höchsten ρ (200 bis 300 Ωm), obwohl die Lage des Gebäudes im Gelände durch die starke Hangneigung eine durch die Erosion bedingte, schlechtere Erhaltung erwarten lässt. Die als Hofmauer angesprochene Struktur lässt sich bei Meter 21 nur als sehr undeutlicher Bereich mit erhöhtem ρ identifizieren. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die ERT-Profile überraschend klar die Überreste der Mauern als Anomalien mit hohem ρ abbilden. Die dabei angesprochenen Unterschiede im ρ können als Hinweise auf verschiedene Erhaltungszustände oder Baumaterialien gedeutet werden und korrelieren mit den

Ergebnissen der elektrischen Widerstandskartierung und den Luftbildbefunden. Die Nebengebäude 1 und 3, deren Grundrisse auch als Bewuchsmerkmale in den Luftbildern sichtbar sind, zeigen in den ERT-Profilen den höchsten ρ im Bereich der Mauern.

5.4.4.3 Bodenradar

Die Bodenradarmessungen wurden ergänzend zu den elektrischen Widerstandsmessungen durchgeführt. Die in Abbildung 5-48 dargestellten Daten repräsentieren die archäologischen Strukturen in einer Tiefe von 34 bis 41 cm und bestätigen die in der elektrischen Widerstandskartierung angesprochenen Grundrisse der Nebengebäude 1 und 2. Eine wichtige Zusatzinformation für die bodenkundliche Ansprache und numerischen Modelle stellen die großflächigen Reflektionen (schwarze Markierung) dar, die vermutlich durch Steinkonzentrationen verursacht werden, die im Zusammenhang mit den archäologischen Strukturen stehen. Einzelne stärkere Reflektionen (rote Markierung) in dieser Tiefe, die jedoch weitestgehend isoliert von den Mauerstrukturen auftreten, sind potentiell in einem archäologischen Kontext zu interpretieren.

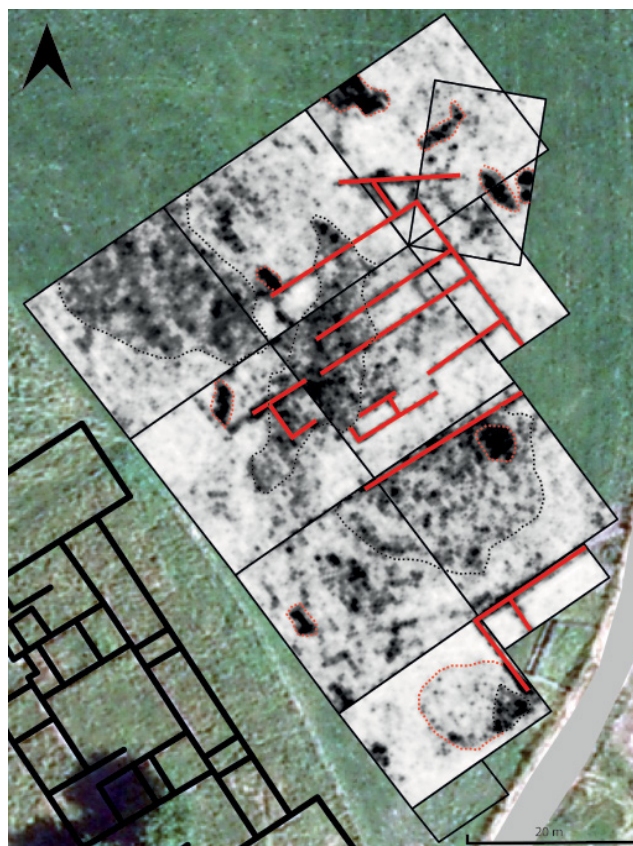


Abbildung 5-48: Prospektionsergebnisse mit dem Bodenradar (600 MHz-Antenne) auf der Fundstelle „Im Falkensaß“ bei Katzenbach. Timeslice für die Tiefe 20 bis 30 cm unter Bodenoberfläche.

5.4.4.4 Magnetometer

Die Magnetometermessungen (Abb. 5-49) wurden am östlichen Rand stark durch den angrenzenden Metallzaun gestört, hinzu kommt eine starke Anomalie im Zentrum der Prospektionsfläche. Dennoch sind die Grundrisse der Nebengebäude 1 und 2 sichtbar. Auffällig ist, dass die Mauerreste von Nebengebäude 1 am unteren Bildrand eine starke positive Anomalie verursachen, während vor allem die internen Mauerzüge von Nebengebäude 2 nur eine schwache negative Anomalie hervorrufen. Die Gründe hierfür konnten im Baumaterial ausgemacht werden, welches Unterschiede in der magnetischen Suszeptibilität aufweist. Außer den Grundrissen der Nebengebäude konnte auch die in Kapitel 5.4.4.2 beschriebene Pinge identifiziert werden (gestrichelte Markierung).

Sie kennzeichnet sich wie in der elektrischen Widerstandskartierung durch eine flächenhafte Anomalie, die von zwei linearen Anomalien durchlaufen wird. Während die linearen Anomalien in der elektrischen Widerstandskartierung einen niedrigen elektrischen Widerstand erzeugten, zeigen sie sich in der Magnetik als negative Anomalien. Vermutlich wurde die Pinge mit dem bei ihrer Entstehung gewonnenen Aushub wieder verfüllt. Möglicherweise wurde durch die Pinge Gestein aus einer tieferliegenden Schicht gefördert, das sich in seinen Materialeigenschaften, insbesondere der magnetischen Suszeptibilität, von dem an der Erdoberfläche vorhandenen Material unterscheidet.

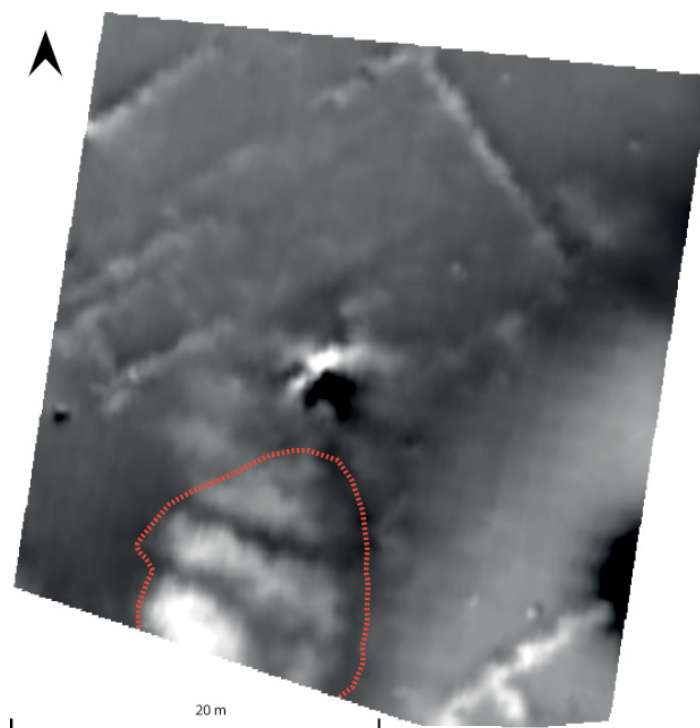


Abbildung 5-49: Ergebnisse der Testmessungen mit dem Caesium-Magnetometer auf Nebengebäude 3.

5.4.5 Grabungsergebnisse

Im Anschluss an die geophysikalische Prospektion der Fundstelle wurde eine Reihe an Testschnitten geplant, um den Erhaltungszustand zu verifizieren und eine geoarchäologische und bodenkundliche Analyse der Strukturen zu ermöglichen. Die Grabungen fanden unter Leitung von Dr. Philip Kiernan von der University at Buffalo im Rahmen einer Lehrgrabung im Juni 2013 statt. Die Grabungsschnitte wurden so angelegt, dass die Bereiche, in denen die ERT-Profile die Überreste der Mauern schneiden, auf einer Fläche von 3 x 1.5 m (S1) und 2 x 1.5 m (S2 und S3) freigelegt wurden (Abb. 5-50). Die Grabungen beschränken sich auf die Flächen im unmittelbaren Anschluss an das Hauptgebäude westlich des Weges.

In Schnitt 1 konnten, wie durch die geophysikalische Prospektion prognostiziert, die Fundamente von zwei parallel verlaufenden Mauern von Nebengebäude 2 angetroffen werden (Abb. 5-51 A). Die Fundamente liegen in einem Abstand von 2 m zueinander und sind ca. 0.8 m breit. Das südliche Fundament wurde durch die landwirtschaftliche Bearbeitung bereits stark zerstört. Ein Teil der obersten Steinlage wurde durch den Pflug in nördlicher Richtung von der Mauer weg transportiert (Abb. 5-51 A und Abb. 5-51 B). Pflugspuren an einzelnen Steinen belegen die Verlagerung (Abb. 5-51 C). Die Beeinträchtigung des Erhaltungszustandes lässt sich auch in den ERT-Profilen durch niedrigere ρ -Werte erkennen.

Das betreffende Fundament in ERT-Profil KB2 ist im Vergleich zu den übrigen Fundamenten durch einen niedrigeren ρ gekennzeichnet und auch das nach Norden verlagerte Material ist erkennbar (Abb. 5-47). Die Zerstörung der Fundamente durch die landwirtschaftliche Bearbeitung ermöglicht außerdem einen Einblick in den internen Aufbau der Fundamente. Die oberste Lage der Überreste besteht aus dem lokal anstehenden Basalt, während der darunter liegende Teil des Fundamentes hauptsächlich aus dem lokalen Sandstein konstruiert wurde. Die einzelnen Gesteinsarten lassen sich sehr gut durch die Messung der magnetischen Suszeptibilität unterscheiden. Für den Basalt wurden Werte von 150 bis 200 gemessen, während der Sandstein nur eine magnetische Suszeptibilität von 15 bis 20 besitzt. Ob es sich bei der Basallage bereits um einen Teil des aufgehenden Mauerwerkes handelt, konnte durch die Grabung nicht abschließend geklärt werden, da kein Mörtel zwischen den Steinen vorhanden war. Dieser Aufbau ist im Bezug auf die Ergebnisse der Magnetometer-Prospektion interessant, da, wie in Kapitel 5.4.4.4 festgestellt, einige der Fundamente eine starke positive Anomalie hervorrufen, während andere Fundamentreste der nur eine sehr schwache negative Anomalie bei den Magnetometermessungen erzeugen. Für das Fallbeispiel Katzenbach bedeutet dies, dass sich auf Grund der Magnetometer-Prospektion Aussagen über den

Erhaltungszustand und/oder das verwendete Baumaterial treffen lassen. Im Fundament in Schnitt 1 konnten keine Beeinträchtigungen durch das Pflügen festgestellt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich um einen ähnlichen Erhaltungszustand wie im verpflügten Teil des südlichen Fundamentes handelt. In Schnitt 2 wurde ein weiteres Fundament von Nebengebäude 2 identifiziert, das in seinem Aufbau und Erhaltungszustand dem nördlichen Fundament in Schnitt 1 gleicht. An der Oberkante der Mauer konnten fast ausschließlich die lokalen Sandsteine angetroffen werden (Abb. 5-52 A), so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Lage aus Basalten nicht erhalten ist. Das Fundament wurde für einen Profilschnitt durch das Fundament ausgewählt, da auf beiden Seiten der Struktur der Zugang zum umliegenden Boden gewährleistet ist (Abb. 5-52 B).

Schnitt 3 wurde zur Untersuchung von Nebengebäude 1 angelegt und zeigt das Fundament der internen Mauer des Nebengebäudes (Abb. 5-50). Der für die anderen Fundamente festgestellte Aufbau aus Sandsteinen im unteren Bereich und Basalten an der Oberkante der Fundamente konnte auch in diesem Fall festgestellt werden. Im Vergleich zu den anderen Fundamenten konnte in diesem Fall ein besonders guter Erhaltungszustand verzeichnet werden, der sich auch in der geophysikalischen Prospektion widerspiegelt. In der elektrischen Widerstandskartierung und den ERT-Profilen verursachten die Fundamente von Nebengebäude 1 einen höheren elektrischen Widerstand und höheren ρ als die Fundamente von Nebengebäude 2. Daraus ergibt sich der gleiche Rückschluss auf die Nutzbarkeit der elektrischen Widerstandsmethoden zur Erfassung des Erhaltungszustandes für das Fallbeispiel Katzenbach: je höher der elektrische Widerstand oder ρ in den Prospektionsergebnissen, desto besser ist in diesem Fall der Erhaltungszustand der Mauern und Fundamente. Der gute Erhaltungszustand wird zusätzlich durch relativ große Ziegelbruchstücke und Tierknochen im unmittelbaren Bereich der Mauern repräsentiert (Abb. 5-53 B). Hierbei handelt es sich vermutlich um die Verfüllung des Fundamentgrabens mit Siedlungsmaterial. In den Schnitten 1 und 2 konnte diese Verfüllung auf Grund des schlechteren Erhaltungszustandes nicht mehr angetroffen werden. Aus archäologischer Sicht ist außerdem eine Aussparung in der Mauer interessant, die vermutlich nicht auf Grund einer Beschädigung durch das Pflügen entstanden ist, da der Schaden zu punktuell und regelmäßig ausgeprägt ist. An den Rändern sind zudem zwei flache Steine vertikal gesetzt, was sicherlich mit einer Intention geschehen ist (Abb. 5-53 C). Vermutlich handelt es sich um ein in die Mauer integriertes Pfostenloch. Der Pfosten könnte Teil einer Fachwerkkonstruktion gewesen sein und zur Stabilisierung der Mauer beigetragen haben. Allerdings konnten keine optischen Anhaltspunkte für organische Überreste in der Verfüllung des potentiellen Pfostenlochs gefunden werden.

Die archäologischen Funde in den Schnitten 1 und 2 sind als äußerst dürftig einzustufen. Die Ziegelbruchstücke besitzen nur in wenigen Fällen eine Kantenlänge von mehr als 10 cm, als Keramikfunde sind nur wenige sehr kleine Bruchstücke von terra sigillata ansprechbar. Komplettiert wird das Fundmaterial der beiden Schnitte durch nicht weiter identifizierbare Nägel und ein tönernes Spindelgewicht. Wie bereits angesprochen unterscheidet sich Schnitt 3 durch größere Ziegelbruchstücke (imbrices und tegulae) im Fundamentgraben und Bruchstücke von Tierknochen von den Schnitten 1 und 2.

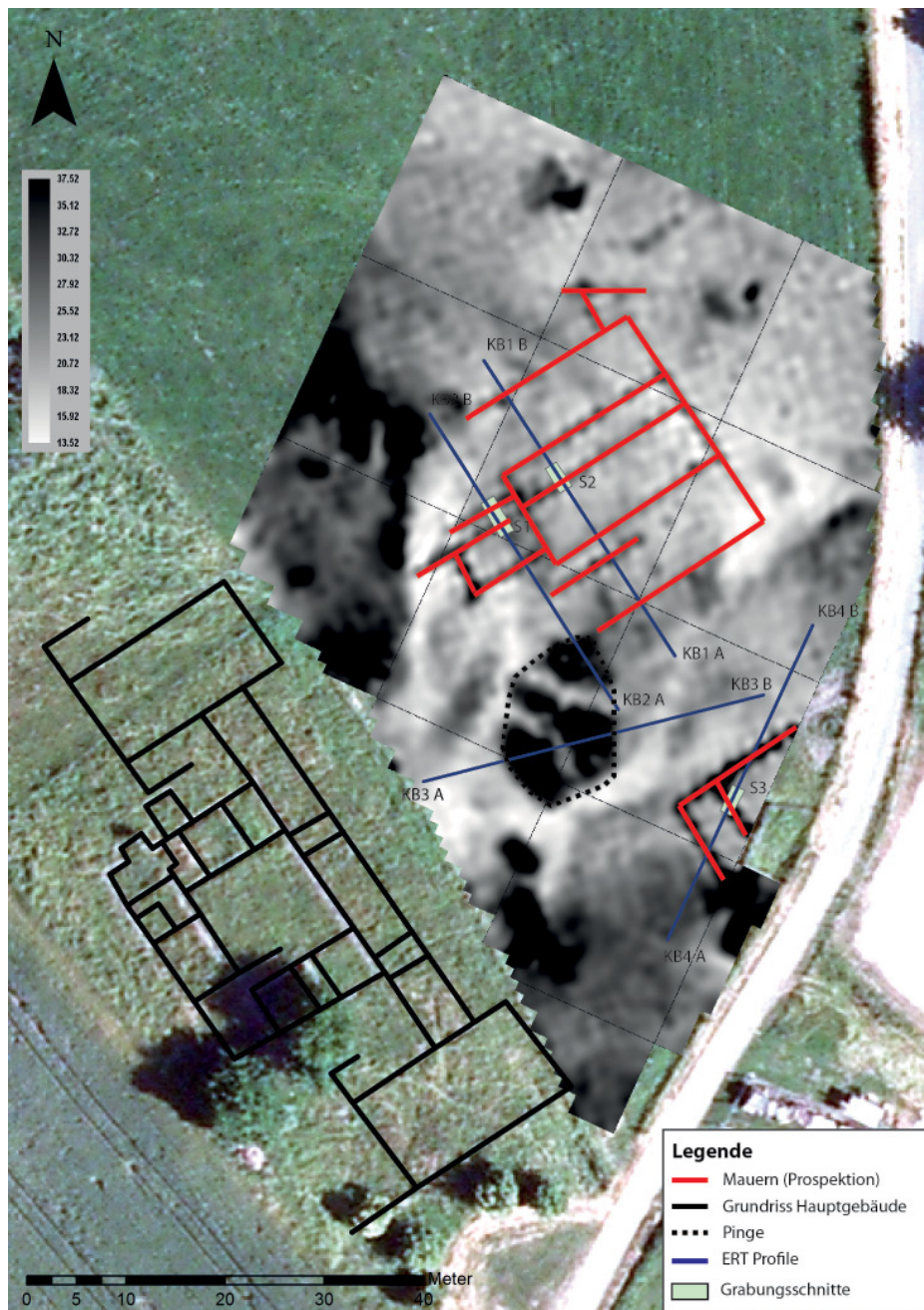


Abbildung 5-50: Lage der Grabungsschnitte im Bezug zur elektrischen Widerstandskartierung und den ERT-Profilen. Luftbild: Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation RLP.



Abbildung 5-51: Grabungsergebnisse Schnitt 1. Fotos: P. KIERNAN.



Abbildung 5-52: Grabungsergebnisse Schnitt 2. Fotos: P. KIERNAN.



Abbildung 5-53: Grabungsergebnisse Schnitt 3. Fotos: P. KIERNAN.

5.4.6 Bodenkundliche und geoarchäologische Analyse von Schnitt 2

Der in Schnitt 2 vorgefundene Erhaltungszustand der archäologischen Strukturen repräsentiert zum einen den minimalen Erhaltungszustand der Nebengebäude, zum anderen den erwarteten Erhaltungszustand von archäologischen Steinstrukturen in Gebieten mit intensiver landwirtschaftlicher Bewirtschaftung. Außerdem wurde Schnitt 2 aus logistischen Gründen für die Anlegung eines tieferen Profils favorisiert, da hier der Zugang zum umliegenden Bodenprofil möglich war. Das Profil wurde nach archäologischen Grabungsmethoden angelegt. Danach wurde die Profilwand um 50 cm zurückverlegt, da sich die bodenphysikalischen und bodenchemischen Parameter während der Grabung verändert haben könnten. Insbesondere besteht die Gefahr, dass das Profil bei einer relativ warmen Witterung schnell austrocknet und somit keine repräsentativen Werte des volumetrischen Wassergehaltes im Boden ermittelt werden können. Das Profil durch das Fundament wurde auf einer Länge von 1.5 m und einer Tiefe von 0.85 m angelegt (Abb. 5-52 C).

Die Probenentnahme erfolgte im Bezug auf die Bodenhorizonte. Es handelte sich dabei um Entnahmen von Bodenproben zur Herstellung von Dünnschliffen (K1-K4, Abb. 5-55), ungestörten Stechzylinderproben (BD1-BD4) und eine zusätzliche Entnahme von gestörten Bodenproben im Bereich der Dünnschliffproben (B1-B4) (Abb. 5-54).

Das Bodenmaterial im Fundament wurde ebenfalls beprobt.

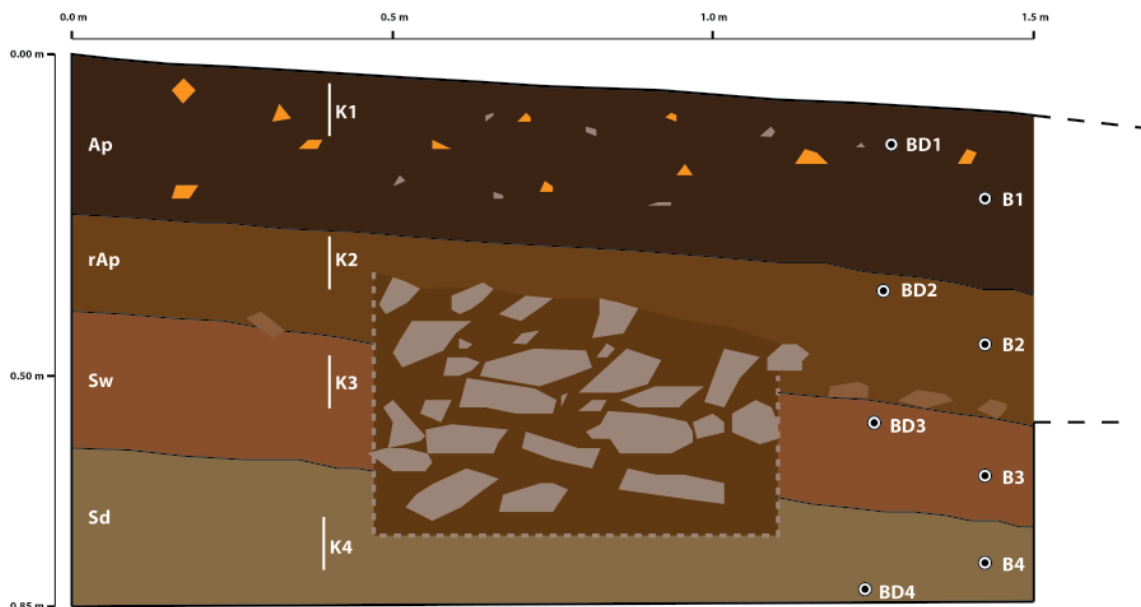


Abbildung 5-54: Schematische Darstellung des Profils und Entnahme der Bodenproben in Schnitt 2.

Die bodenkundliche Ansprache des Profils erfolgte nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung und gliedert sich wie folgt:

- Rezenter Ap-Horizont von 0.00 bis 0.25 m Profiltiefe, mit einer großen Anzahl an Ziegelbruch und hohem Gehalt an organischem Material. Hoher prozentualer Anteil des Bodenskeletts.
- Reliktischer rAp-Horizont von 0.25 bis 0.40 m Profiltiefe, mit Inklusionen aus verwittertem Sandstein an der Unterkante. Geringerer Gehalt an organischem Material als im rezenten Ap.
- Toniger Sw-Horizont von 0.40 bis 0.60 m Profiltiefe, rötliche Färbung mit schwarzen Mangankonkretionen.
- Toniger Sd-Horizont von 0.60 bis 0.85 m Profiltiefe, gelbliche Farbe mit hydromorph bedingten rötlichen Bänderungen.

Das anstehende Ausgangsmaterial C wurde nicht erreicht, die ERT-Profile lassen auf eine Tiefe von mindestens 2.50 m für die Oberkante eines anstehenden Festgesteins annehmen. Vermutlich handelt es sich dabei um Ton- und Siltsteine mit Sandsteineinschaltungen, die auch in einer nördlich gelegenen Baugrube angetroffen werden konnten.

Durch die anthropogene Störung des Bodenprofils ist eine Ansprache als Bodentyp

schwierig, jedoch liefert die Analyse der Dünnschliffe einen detaillierten Einblick in die bei der Bodengese beteiligten Prozesse (Abb. 5-55). Die tonhaltigen B-Horizonte mit redoximorphen Merkmalen sprechen für eine Eingliederung in die Klasse der Stauwasserböden. Während im BI-Horizont durch Oxidation Mangan ausgefällt wird und generell eine rötliche Bodenfarbe mit diesem Prozess in Verbindung gebracht werden kann (Dünnschliff K3), herrscht in Horizont BII ein reduktives Milieu. Die Reduktion unter hohem Wassergehalt lässt sich gut an der grauen Verfärbung im Bereich um die Porensysteme erkennen (Dünnschliff K4). Dementsprechend können beide B-Horizonte als S-Horizonte klassifiziert werden, was eine Assoziation mit einem Pseudogley ergibt. Die Analyse der Dünnschliffe legt jedoch nahe, dass die hydrologischen Bedingungen komplexer und nicht identisch mit den hydrologischen Bedingungen eines typischen Pseudogley-Profiles sind. Vermutlich ist ein Zusammenspiel mit aus dem Grundwasserbereich episodisch bis in den BI-Horizont aufsteigenden Wasser in Kombination mit den wasserstauenden Eigenschaften der dicht gepackten Tonminerale in beiden B-Horizonten ausschlaggebend für die hydromorphen Merkmale.

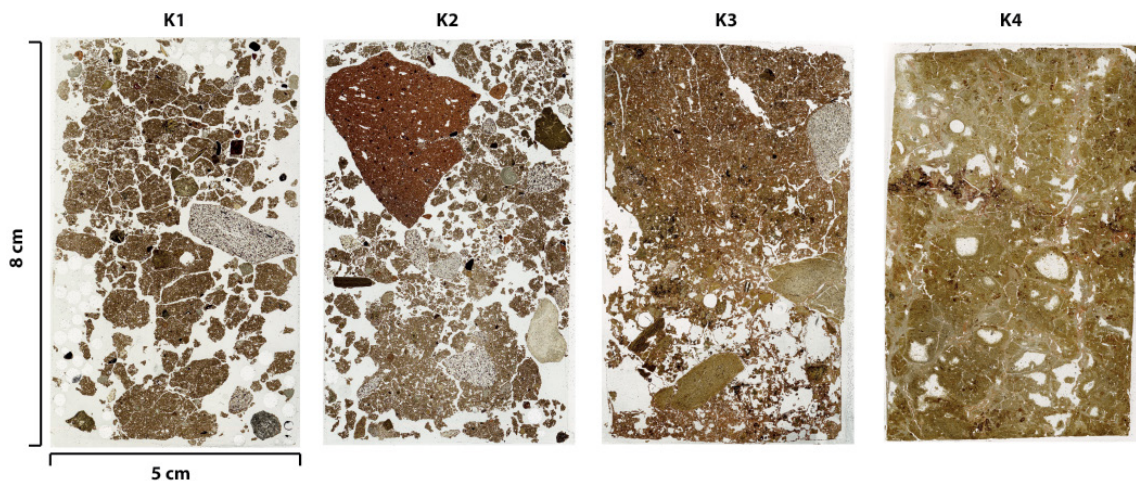


Abbildung 5-55: Dünnschliff der Bodenproben K1 bis K4 aus Schnitt 2.

Dieses Verhältnis lässt sich auch sehr gut an Hand des volumetrischen Wassergehaltes im untersuchten Bodenprofil ansprechen (Abb. 5-56). Dargestellt ist der kalkulierte volumetrische Wassergehalt aus der Analyse der Bodenproben (weiß) sowie direkte Messungen des volumetrischen Wassergehaltes durch einen WET-Sensor (schwarz). Beide Messmethoden zeigen eine zunehmende Bodenfeuchte mit der Profiltiefe. Während in den A-Horizonten der volumetrische Wassergehalt im Bereich zwischen 10.92 % und 17.0 % liegt (ausgenommen der Bereich direkt über dem Fundament), steigt der Wert im Sw-Horizont auf 28.29 % bis 41.2 % und im Sd-Horizont auf 28.41 % bis 35.1 %. Als Schlussfolgerung musste festgestellt werden, dass die für den WET-Sensor bereitgestellte Kalibrierung nicht für stark tonhaltige Bodenhorizonte

ausgelegt ist, da die Ergebnisse höher sind als die aus den Bodenproben gewonnenen volumetrischen Wassergehalte (Abb. 5-56). Die Modellierung der saisonalen Veränderung des Wassergehaltes im Bodenprofil (Kapitel 5.4.8) zeigt zudem, dass die aus den Bodenproben gewonnenen Werte realistischer sind und deshalb für die weiteren Berechnungen verwendet wurden.

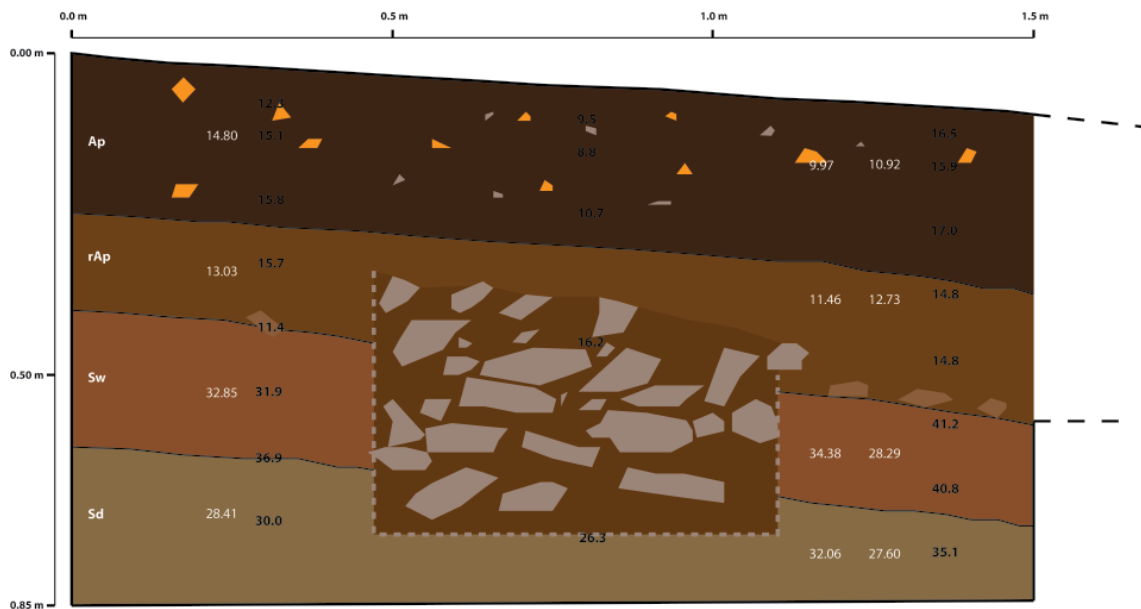


Abbildung 5-56: Verteilung des volumetrischen Wassergehaltes (%) in Schnitt 2 aus Messungen mit dem WET-Sensor (schwarz) und der Analyse von Bodenproben (weiß).

Die Korngrößenanalyse stützt die Interpretation der Bodenhorizonte, da im Sw- und Sd-Horizont der Tongehalt im Vergleich zum Ap- und Ar-Horizont bis zu zehn Mal höher ist (Abb. 5-60). Bei dem Ton handelt es sich vermutlich nicht um eine sedimentäre Ablagerung, sondern um ein Verwitterungsprodukt, das sich aus den lokal anstehenden Sandsteinen gebildet hat. Der Entstehungszeitraum könnte in das Tertiär datieren, da für die verwitterungsbedingte Bildung von Tonmineralen die notwendigen klimatischen Bedingungen in diesem Zeitraum in der Region vorhanden waren.

Eine problematische bodenkundliche Analyse der Profile von archäologischen Fundstellen mit Steinstrukturen stellt das Bodenskelett dar. Wie durch die Ergebnisse der Prospektion mit dem Bodenradar festgestellt wurde, können im Umfeld der römischen Gebäude Bereiche mit erhöhtem Bodenskelett auftreten. Bei der traditionellen bodenkundlichen Beprobung, deren Priorität häufig der Feinboden darstellt, kann es zur Unterschätzung des Bodenskeletts kommen. Vermutlich wird der volumetrische Anteil der Inklusionen im Größenbereich von 2 bis 63 mm durch die traditionelle bodenkundliche Beprobung korrekt dargestellt, während die Inklusionen > 63 mm unterrepräsentiert sind. In Abbildung 5-65 ist der volumetrische Anteil des

Bodenskeletts in den Bodenhorizonten aufgeführt. Wie zu erwarten grenzen sich die beiden A-Horizonte durch einen erhöhten Steingehalt von den S-Horizonten ab, was im Einklang mit den optischen Ansprüchen im Gelände und der Analyse der Dünnschliffe steht.

Der WET-Sensor verfügt zusätzlich über einen Temperaturfühler, der unabhängig von den zur Berechnung des volumetrischen Wassergehaltes durchgeführten Messungen arbeitet. Die Temperaturprofile zeigen eine Abnahme der Temperatur mit zunehmender Tiefe (Abb. 5-57). Die beiden Temperaturprofile links und rechts der Mauerstruktur zeigen einen deutlichen Unterschied im Ap-Horizont und rAp-Horizont. Ab der Untergrenze des rAp-Horizontes liegen die Temperaturen der beiden Profile in ähnlichen Wertebereichen. Da im unvollständigen Temperaturprofil im Bereich der Mauerstruktur die Werte des linken Profils bestätigt wurden, handelt es sich bei den hohen Werten im rechten Temperaturprofil vermutlich um eine lokale Anomalie. Von der Oberfläche bis in eine Tiefe von 0.8 m nimmt die Temperatur um ca. 3.6 °C ab. Theoretisch kann dieses Temperaturprofil genutzt werden, um die Messungen des ρ auf eine Referenztemperatur zu kalibrieren (Kapitel 4.1.3) oder durch HYDRUS den saisonalen Verlauf der Bodentemperatur zu berechnen.

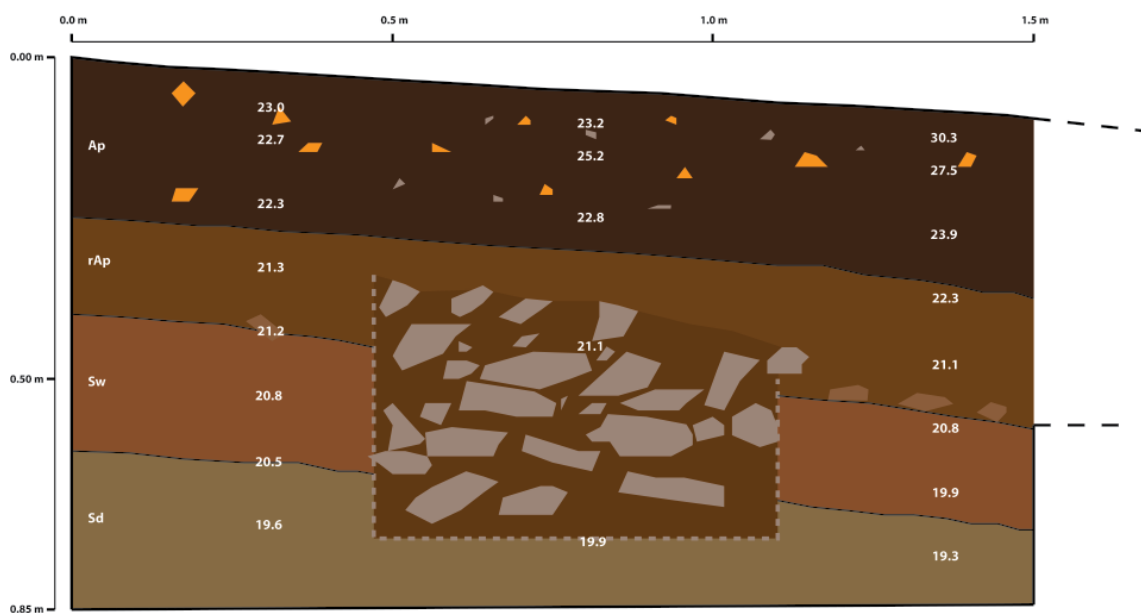


Abbildung 5-57: Mit dem WET-Sensor gemessene Temperaturen (in °C) in Schnitt 2.

Das römische Fundament liegt im Zentrum des Bodenprofils. Die Oberkante liegt in einer Profiltiefe von 0.35 m und setzt sich bis in eine Tiefe von 0.75 m fort. Somit erstreckt sich das Fundament über einen relativ kleinen Bereich des rAp-Horizontes bis in den Sd-Horizont. Das Bodenmaterial zwischen den einzelnen Steinen des

Fundamentes wurde als eigenständiges Material aufgenommen, jedoch wurde keine Horizontbezeichnung der Bodenkundlichen Kartieranleitung zugewiesen. Da es sich um eine anthropogene Verfüllung bei der Einbringung der Fundamentsteine in den Boden handelt, konnten vereinzelt Ziegelbruch und Holzkohlereste identifiziert werden. Die anthropogene Verfüllung kann auch durch eine leicht erhöhte magnetische Suszeptibilität nachgewiesen werden, die sich von den Werten im BI- und BII-Horizont unterscheidet (Abb. 5-58). Zwei hohe Messwerte im Bereich des Fundamentes wurden durch einzelne Basalte verursacht, die gelegentlich an der Oberkante der Fundamente angetroffen wurden und vermutlich dem aufgehenden Mauerwerk zuzurechnen sind. Generell nimmt die magnetische Suszeptibilität in diesem Bodenprofil mit zunehmender Tiefe ab, da die größte anthropogene Beeinflussung im Ap- und Ar-Horizont stattgefunden hat.

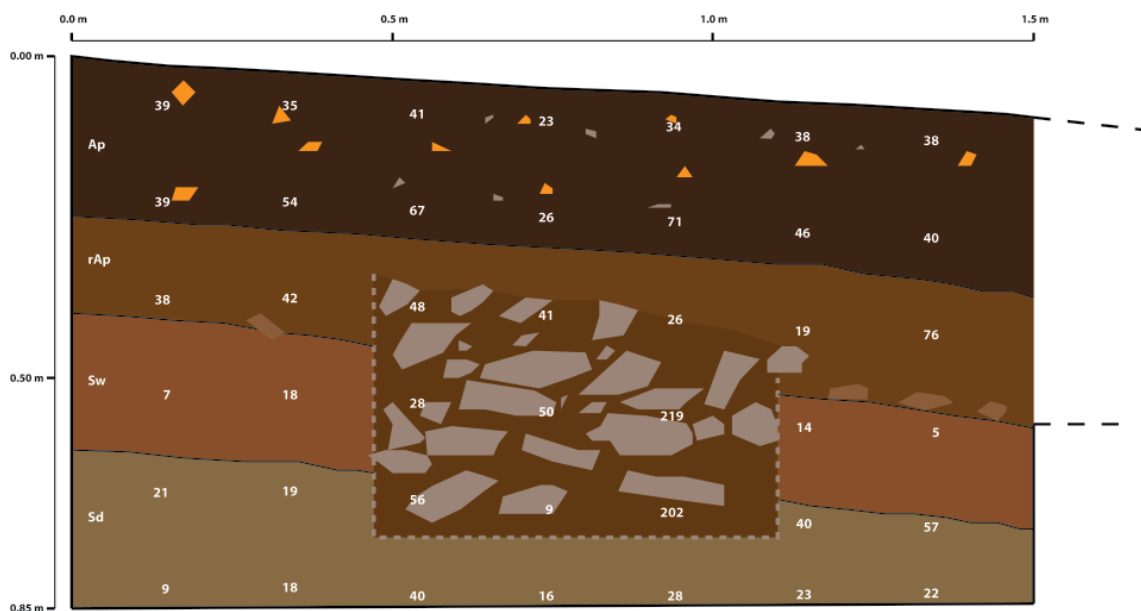


Abbildung 5-58: Verteilung der magnetischen Suszeptibilität in Schnitt 2.

Die direkten elektrischen Widerstandsmessungen mit der in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Elektrodenanordnung ergaben sehr hohe ρ -Werte im Ap- und rAp-Horizont (Abb. 5-59), die von den Ergebnissen der Potentialmessungen bei der Anwendung von ERT (Abb. 5-64) und den durch die Transferfunktionen errechneten ρ -Werten (Kapitel 5.4.6.1) abweichen. Dies geht vermutlich auf die in den Dünnschliffen erkannten Porenstrukturen und den hohen Anteil an Inklusionen zurück, die bei einem kleinen Elektrodenabstand, wie bei der direkten Messung am Profil verwendet, einen größeren Einfluss auf die Messung haben (HESSE 1966b; SCOLLAR et al. 1990). Mit abnehmendem Porenvolumen und Bodenskelett im Sw- und Sd-Horizont korrelieren die Ergebnisse der direkten Messungen und die der Potentialmessungen. Die Analyse der für die Berechnung des ρ

durch Pedotransfer-Funktionen benötigten Parameter ist in Kapitel 5.4.6.1 aufgeführt.

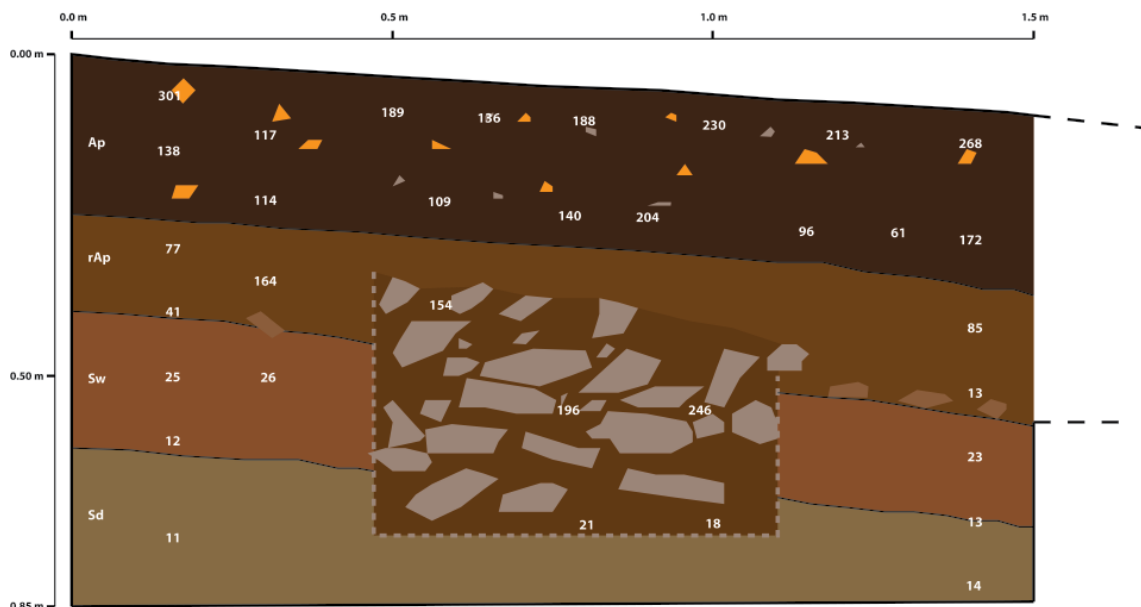


Abbildung 5-59: Verteilung des ρ in Ωm in Schnitt 2 durch direkte elektrische Widerstandsmessungen.

5.4.6.1 Ergebnisse der RHOADES-Formel für Katzenbach

Die Entnahme der Bodenproben zur Ermittlung der für die RHOADES-Formel benötigten Eingangsparameter erfolgte horizontbezogen. Es handelt sich dabei um eine Serie von ungestörten Bodenproben aus einer Stechzylinderentnahme, die zur Ermittlung der Lagerungsdichte verwendet wurden, und zwei Serien von gestörten Bodenproben. Die Entnahmepunkte sind in Abbildung 5-54 dargestellt. Mit Ausnahme der elektrischen Leitfähigkeit des Bodenwassers ist die Ausprägung der Eingangsparameter an die Horizonte gebunden (Abb. 5-60). Das Sättigungspotential und der volumetrische Wassergehalt korrelieren mit den Tongehalten der einzelnen Horizonte. Die elektrische Leitfähigkeit des Bodenwassers verändert sich mit der Profiltiefe. Vermutlich kann diese Beobachtung durch den stärkeren Einfluss des Regenwassers und der anthropogenen Einbringung von Düngemitteln auf die oberflächennahen Bereiche erklärt werden. Die Lagerungsdichte zeigt einen ähnlichen tiefenbezogenen Trend, der in diesem Fall aber eine Zunahme der Lagerungsdichte mit der Tiefe bedeutet (Abb. 5-61). Dies spricht gegen eine anthropogen verursachte Verdichtung, da sich diese stärker auf die oberflächennahen Schichten auswirken würde. Die ermittelten Daten der einzelnen Serien sind weitestgehend konsistent, jedoch können die Abweichungen der Tongehalte der einzelnen Serien für die S-Horizonte bis zu 22 % ausmachen. Ob es sich hierbei um eine durch die Bodenstruktur bedingte Abweichung im Tongehalt handelt, konnte nicht abschließend geklärt werden.

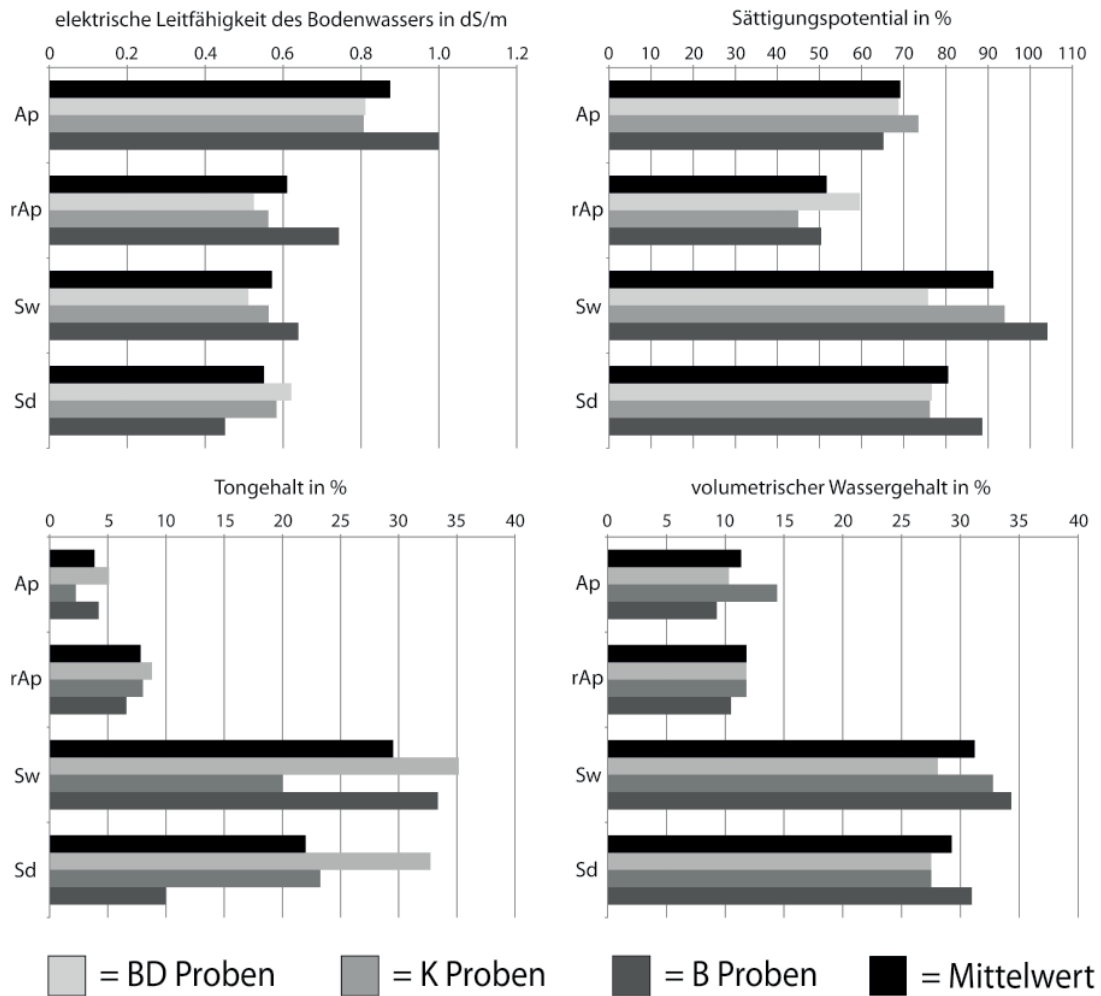


Abbildung 5-60: Aus den Bodenproben ermittelte Eingangsparameter der RHOADES-Formel für Schnitt 2.

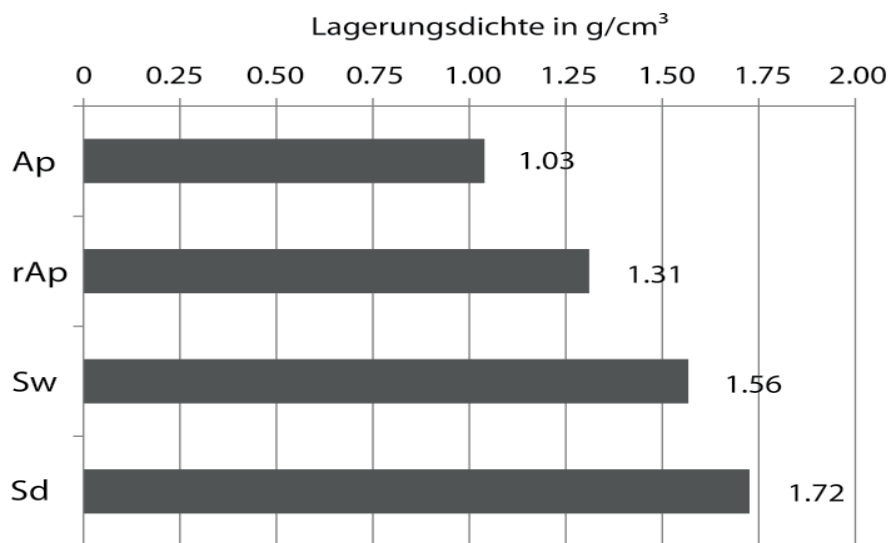


Abbildung 5-61: Horizontbezogene Verteilung der Lagerungsdichte in Schnitt 2.

Als Eingangsdaten für die Pedotransfer-Funktionen wurden die Daten aller Probenserien und einem zusätzlichen Datenset aus berechneten Mittelwerten verwendet. Zur Berechnung des ρ wurde die Formel von RHOADES (1989) eingesetzt. Die Ergebnisse der RHOADES-Formel liegen für beide A-Horizonte im Bereich von 50 Ωm , die Abweichungen zwischen den einzelnen Probenserien ist gering (Abb. 5-62). Die errechneten Werte für die beiden S-Horizonte liegen im Bereich zwischen 10 und 25 Ωm , wobei die Abweichungen hauptsächlich aus den bereits beschriebenen Unterschieden im Tongehalt resultieren. Die Dominanz des Tongehalts in der Pedotransfer-Funktion von RHOADES wird auch durch eine lineare Beziehung zwischen Tongehalt und dem berechneten ρ deutlich (Abb. 5-63) und steht im Einklang mit aus der Literatur bekannten Sensitivitätsanalysen (BORÚS 1999). Eine Abhängigkeit des errechneten ρ ist auch beim Wassergehalt zu erkennen, während die elektrische Leitfähigkeit des Bodenwassers und das Sättigungspotential weniger bedeutungsvoll sind.

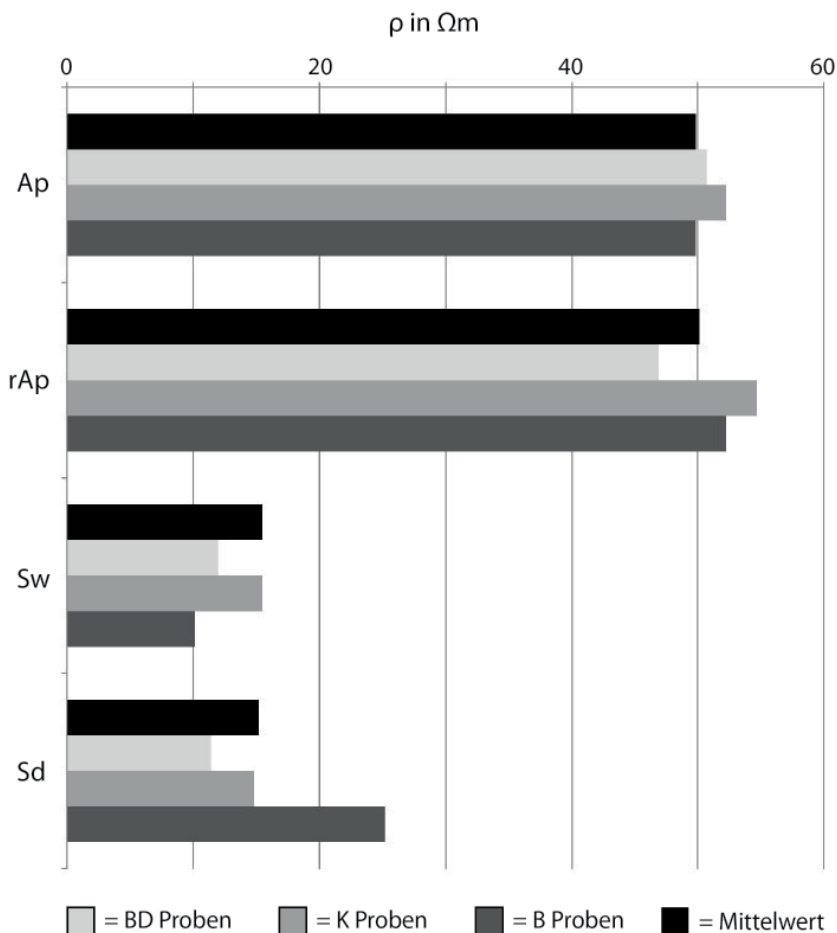


Abbildung 5-62: Ergebnisse der RHOADES-Formel für Schnitt 2.

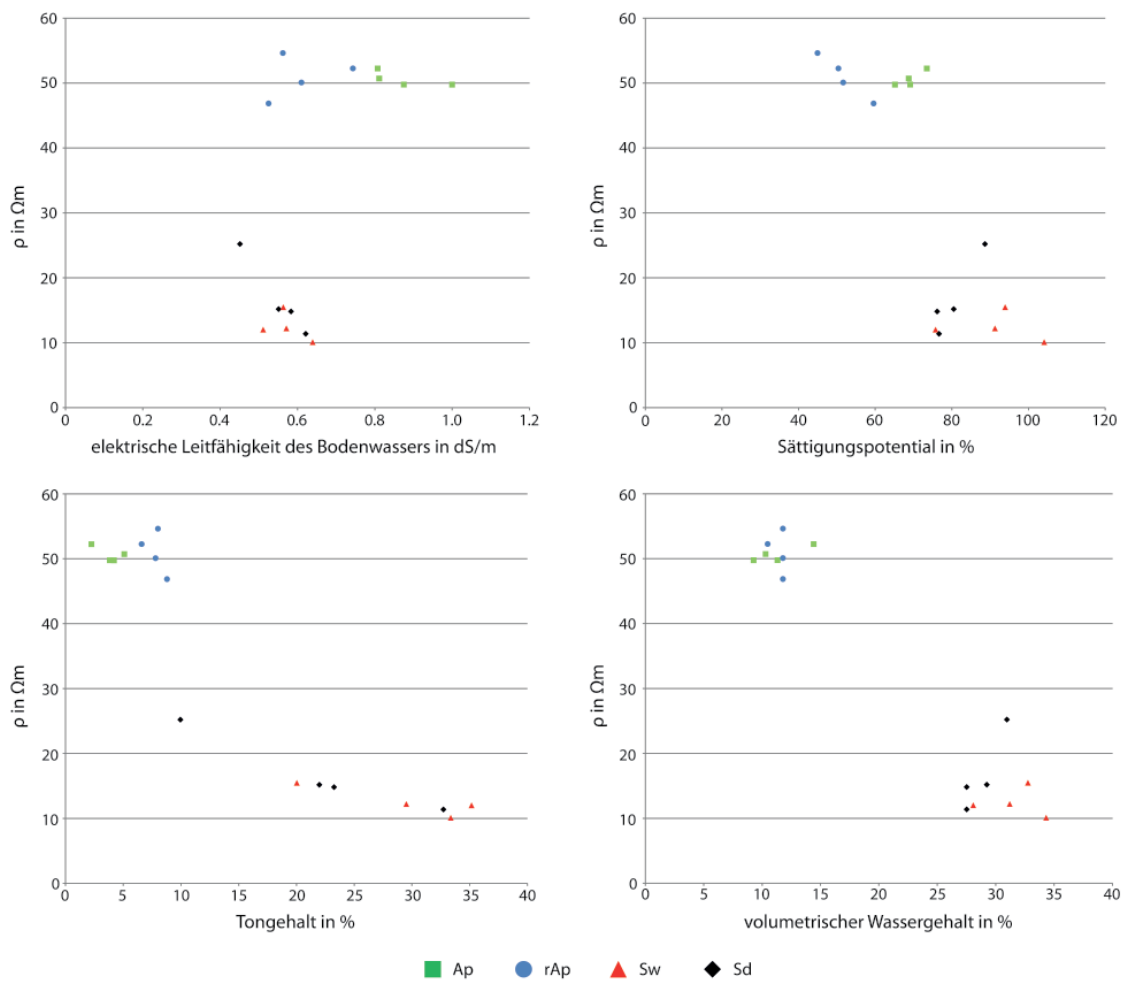


Abbildung 5-63: Einfluss der Eingangsparameter der RHOADES-Formel auf die Berechnung des elektrischen Widerstandes der Bodenhorizonte in Schnitt 2.

Als Vergleich zu den berechneten ρ -Werten ist in Abbildung 5-64 die Verteilung der durch Potentialmessungen ermittelten und durch die Inversionssoftware Res2DInv berechneten ρ -Werte in Schnitt 2 dargestellt. Da im direkten Umfeld des Fundamentes der ρ erhöht ist, begrenzt sich der Vergleich auf die äußeren Bereiche des Profils. Die abgebildeten Werte korrelieren mit den aus der Pedotransfer-Funktion erhaltenen Werten, wobei berücksichtigt werden muss, dass sich die Berechnung auf den Feinboden beschränkt und der Einfluss von Inklusionen im Boden bis zu diesem Schritt nicht berücksichtigt wurde.

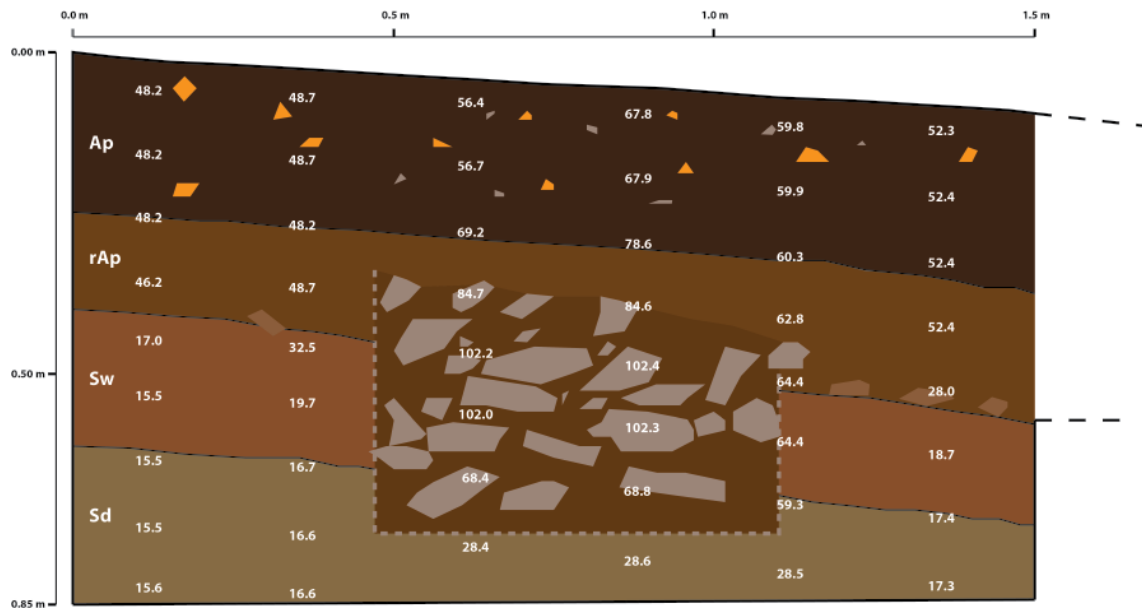


Abbildung 5-64: Verteilung des ρ in Ωm in Schnitt 2 aus ERT-Profil KB1.

5.4.6.2 Perkolationstheorie und Effective Medium Theory

Die beiden in Kapitel 4.4 vorgestellten Methoden zur Berechnung des ρ von mehrphasigen Medien werden in diesem Kapitel zu zwei Zwecken angewendet:

- Berechnung des elektrischen Gesamtwiderstandes der Feinbodenmatrix mit Inklusionen.
- Berechnung des elektrischen Gesamtwiderstandes einer Steinstruktur mit leitfähigem Feinboden zwischen den einzelnen Steinen.

Die Ergebnisse beider Berechnungsmethoden werden mit den Ergebnissen von Laborexperimenten verglichen.

Die in Kapitel 4.4 beschriebenen Formeln der Perkolationstheorie und der Effective Medium Theory wurden auf alle Bodenproben angewendet. Zur Berechnung des ρ durch die Perkolationstheorie wurde für die Inklusionen ein ρ von $5000 \Omega\text{m}$ angenommen, um eine Vergleichbarkeit zu der in der Effective Medium Theory verwendeten Annahme von elektrisch isolierenden Inklusionen zu ermöglichen. Die aus den Bodenproben gewonnenen Werte für das Bodenskelett zeigen eine Abnahme des volumetrischen Anteils mit der Profiltiefe (Abb. 5-65). Da die Verteilung der Inklusionen in der Feinbodenmatrix nicht gleichmäßig ist, waren auch die Abweichungen zwischen den einzelnen Probenreihen zu erwarten.

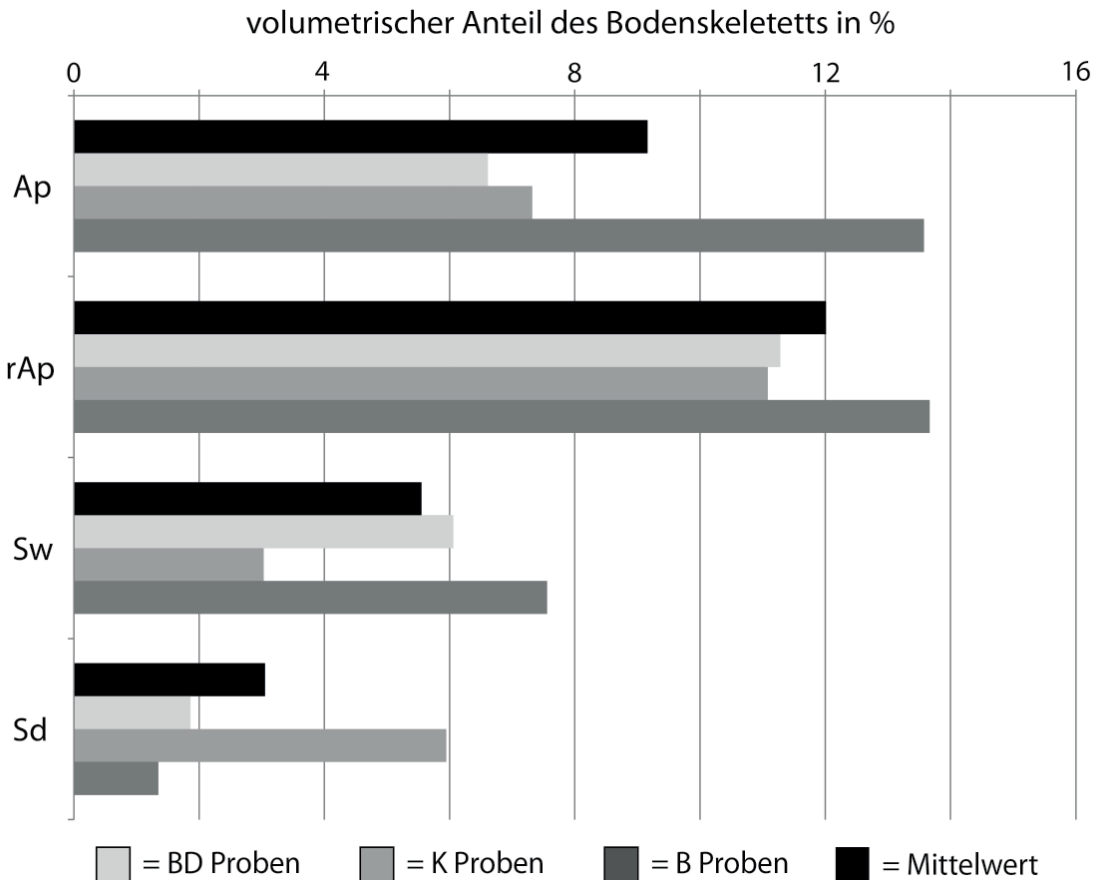


Abbildung 5-65: Verteilung des volumetrischen Steingehaltes in Schnitt 2.

Bodenprobe	volum. Steingehalt in %	RHOADES-Formel in Ω_m	Perkolationstheorie in Ω_m	Effective Medium Theory in Ω_m
Ap (Mittelwert)	9.16	49.77	56.22	57.48
rAp (Mittelwert)	12.01	50.09	58.95	60.69
Sw (Mittelwert)	5.55	15.49	16.67	16.88
Sd (Mittelwert)	3.05	15.18	15.79	15.91
Ap (BD1)	6.61	50.71	55.29	56.19
rAp (BD2)	11.28	46.86	54.58	56.08
Sw (BD3)	6.06	12.02	13.03	13.20
Sd (BD4)	1.86	11.38	11.65	11.71
Ap (K1)	7.32	52.25	57.52	58.56
rAp (K2)	11.08	54.63	63.41	65.16
Sw (K3)	3.03	15.48	16.1	16.21
Sd (K4)	5.95	14.82	16.03	16.25
Ap (B1)	13.57	49.76	59.93	61.94
rAp (B2)	13.67	52.26	63.03	65.15
Sw (B3)	7.56	10.10	11.18	11.36
Sd (B4)	1.35	25.21	25.65	25.73

Tabelle 5-2: Berechnung des Einflusses des Bodenskeletts auf den ρ der Bodenhorizonte.

Um den Einfluss der volumetrischen Konzentration von Inklusionen in einer Feinbodenmatrix auf den elektrischen Gesamtwiderstand eines zweiphasigen Mediums zu untersuchen, wurde eine Reihe von Experimenten durchgeführt. Beim ersten Experiment kam die in Kapitel 4.1.2 beschriebene Box für elektrische Widerstandsmessungen zum Einsatz. Die Box wurde mit einem zuvor homogenisierten Löss gefüllt, dessen bodenphysikalische und bodenchemische Parameter über die Dauer des Experimentes konstant bleiben sollten. Der Anteil der Inklusionen (Glaskugeln mit einem Durchmesser von 3 mm) wurde schrittweise erhöht und nach jeder Erhöhung eine Reihe an elektrischen Widerstandsmessungen durchgeführt. Nach dieser ersten Erhöhung wurden das Bodenmaterial und die Glaskugeln entnommen, homogenisiert und erneut in die Box gefüllt. Danach erfolgte eine weitere Serie von elektrischen Widerstandsmessungen. Dieser Zwischenschritt ohne eine Erhöhung der Konzentration der Inklusionen wurde durchgeführt, um eine Beeinflussung der Messungen durch unterschiedliche Befüllung der Box auszuschließen. Die Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessungen wurden auf eine Referenztemperatur von 25°C korrigiert. Der erste gemessene ρ bei einer volumetrischen Konzentration von Inklusionen = 0 wurde als Eingangsparameter für die Perkolations-theorie nach BIGALKE (2000a) und die Effective Medium Theory nach MCLACHLAN et al. (1990) verwendet.

Beim Vergleich der Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessungen mit den berechneten ρ -Werten konnte nur eine Übereinstimmung bei einer Konzentration von ca. 5 % festgestellt werden. Im weiteren Verlauf lagen die berechneten Werte unter den gemessenen Werten (Abb. 5-66). Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass während der Durchführung des Experimentes die bodenphysikalischen Parameter, insbesondere die Porosität, nicht konstant gehalten werden konnten. Mit zunehmendem Anteil der Inklusionen im Boden wurde eine Zunahme der Porosität festgestellt, was auf die schwer durchführbare Verdichtung einer Mischung aus plastischem Bodenmaterial und festen Glaskugeln zurückzuführen ist. Da gleichzeitig der volumetrische Wassergehalt unverändert blieb, wurde das zusätzlich entstandene Porenvolumen als ungesättigt und dementsprechend isolierend angenommen und das berechnete Porenvolumen auf das Volumen der Inklusionen addiert (Abb. 5-66). Diese Daten zeigen eine Korrelation zwischen der Perkolations-theorie und den Widerstandsmessungen im Wertebereich von 10 % bis 18 %, während für die Effective Medium Theory die beste Übereinstimmung zwischen 22 % und 35 % erkennbar ist.

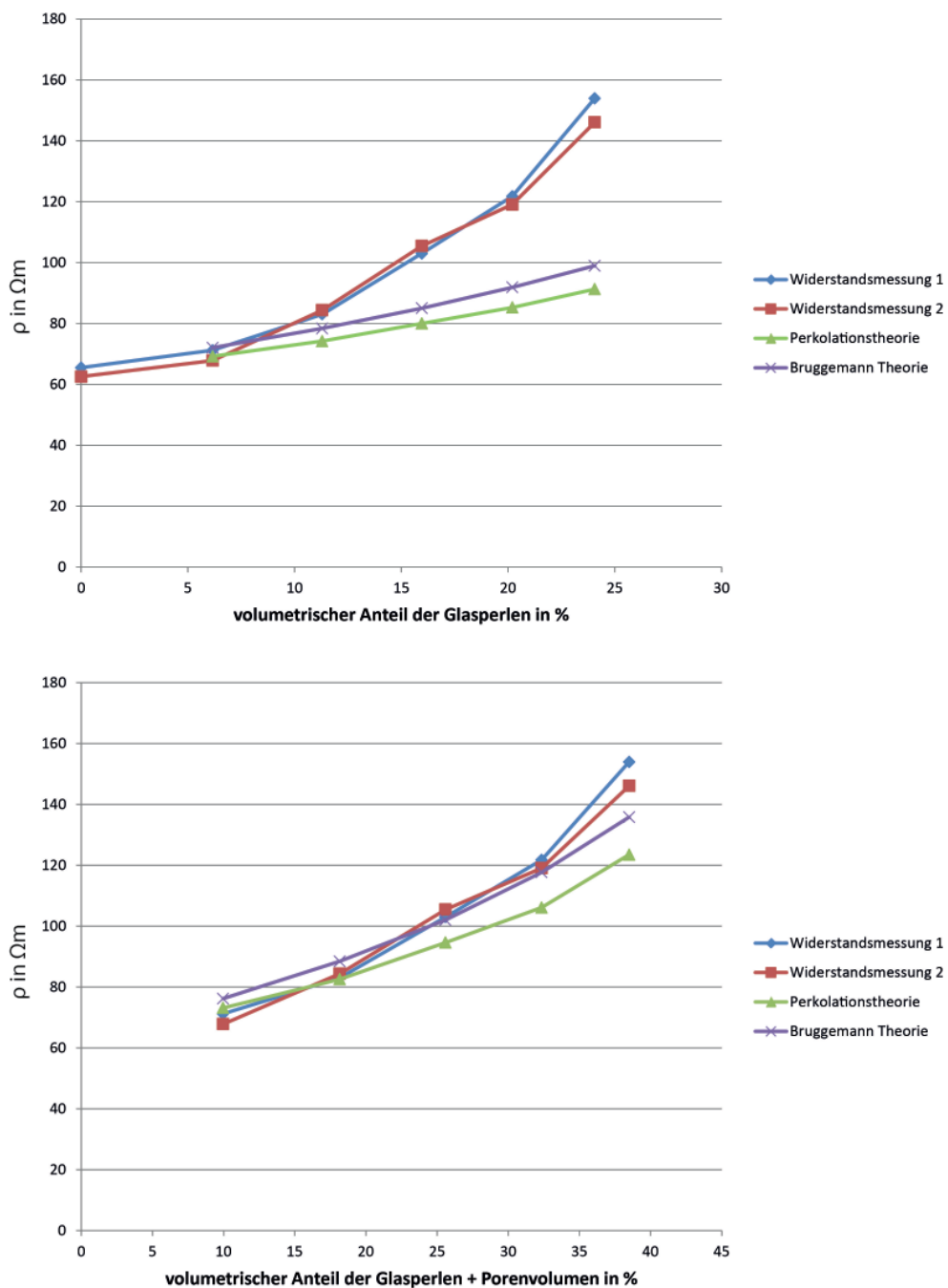


Abbildung 5-66: Vergleich der elektrischen Widerstandsmessungen an einem zweiphasigen Medium mit den Berechnungen durch die Perkolationstheorie und Effective Medium Theory.

Zusätzlich wurde der gravimetrische Anteil der Inklusionen als Eingangsparameter für die Berechnungen verwendet (Abb. 5-67), da die Bestimmung des gravimetrischen Anteil des Bodenskeletts in Bodenproben sehr einfach durchzuführen ist. Überraschenderweise ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Werten. Da beide Theorien aber auf Grundlage des volumetrischen Verhältnisses zwischen den beiden Phasen des Mischmediumes konzipiert wurden, muss bezweifelt

werden, dass hierbei ein kausaler Zusammenhang besteht. Möglicherweise entspricht der gravimetrische Anteil der Glasperlen durch Zufall der Summe aus volumetrischem Anteil der Glasperlen und volumetrischem Porenvolumen.

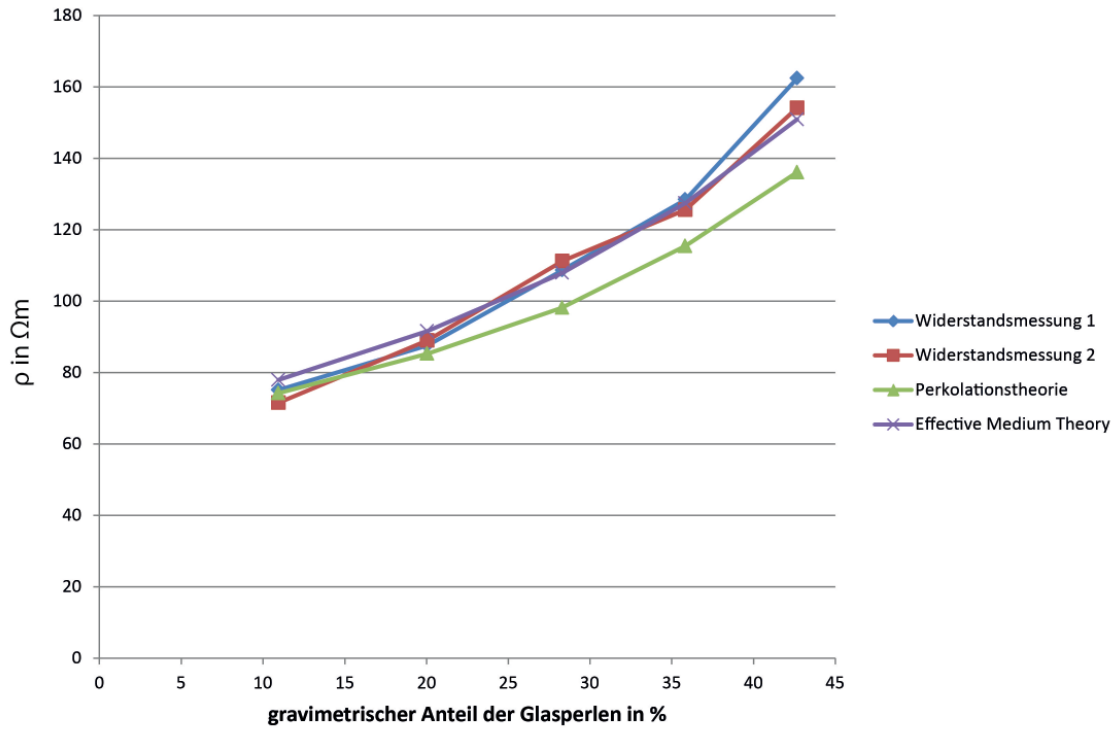


Abbildung 5-67: Vergleich der elektrischen Widerstandsmessungen an einem zweiphasigen Medium mit den Berechnungen durch die Perkolationsstheorie und Effective Medium Theory bei einer Verwendung des gravimetrischen Anteils der Inklusionen.

Die in Schnitt 2 freigelegte und orthogonal geschnittene Mauerstruktur muss aus geophysikalischer Sicht als zweiphasiges Medium behandelt werden. Während die einzelnen Steine, die überwiegend aus lokalem Sandstein und vereinzelt Basalten bestehen, einen sehr hohen ρ besitzen, kann der ρ des Bodenmaterials zwischen den Steinen Werte ähnlich denen des umliegenden Bodenmaterials aufweisen. In den elektrischen Widerstandsmodellen (Kapitel 5.4.7) soll die Mauerstruktur aus technischen Überlegungen als eine homogene Struktur mit einem ρ_m -Wert dargestellt werden.

Wie in Kapitel 5.4.6.1 beschrieben kann der ρ des Bodenmaterials annäherungsweise durch die Pedotransfer-Funktionen berechnet werden. Die Steine werden als elektrisch isolierend angenommen, was durch einen konstanten elektrischen Widerstand von 5000 Ωm dargestellt wird. Zusätzlich wird angenommen, dass die Anordnung der Steine keinen Einfluss auf den ρ hat, da ERT den elektrischen Widerstand eines zweiphasigen Mediums mit zufälliger Anordnung der beiden Phasen korrekt homogenisiert (REY et al. 2006). Daraus folgt, dass sich der ρ der Mauerstruktur nur durch eine Veränderung

der Leitfähigkeit des Bodenmaterials verändern kann.

Um den Einfluss der Leitfähigkeit des Bodenmaterials auf den elektrischen Gesamtwiderstand zu untersuchen, wurden unter kontrollierten Bedingungen experimentelle Widerstandsmessungen an einem synthetischen, zweiphasigen Medium durchgeführt. Die Leitfähigkeiten der beiden Phasen war dabei bekannt. Dazu wurde die in Kapitel 4.1.2 beschriebene Box mit Glaskugeln mit einem Durchmesser von 3 mm befüllt, wodurch die Box zu 58.02 % mit isolierenden Glaskugeln gefüllt war. Die Zwischenräume wurden mit einer Lösung mit bekannter elektrischer Leitfähigkeit gefüllt, die das Feinbodenmaterial repräsentierte. Die Leitfähigkeit der Lösung wurde schrittweise erhöht und bei jeder Erhöhung eine Serie von elektrischen Widerstandsmessungen durchgeführt. Das gleiche Experiment wurde zusätzlich in dem in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Messzylinder durchgeführt (57.79 % durch Glaskugeln gefüllt), um eine Beeinflussung der Messergebnisse durch die Geometrie der Behälter auszuschließen. Die Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessungen wurden auf eine Referenztemperatur von 25°C korrigiert.

Die elektrischen Widerstandsmessungen in beiden Behältern korrelieren mit den Berechnungen der Perkolationstheorie und Effective Medium Theory, wobei jedoch Abweichungen bei den höheren ρ -Werten auftreten (Abb. 5-68). Diese können durch den Aufbau der elektrischen Widerstandsmessungen verursacht werden, da der Kontaktwiderstand mit zunehmendem ρ der NaCl-Lösung steigt. Dies hat eine größere Abweichung der elektrischen Widerstandsmessungen in einer Serie von Messungen zur Folge. Bei der Bewertung des Experimentes muss auch darauf hingewiesen werden, dass hierbei nur ein Maßstab berücksichtigt wurde. Eine Durchführung des Experimentes in einem größeren Behältnis mit größeren Inklusionen könnte das Wissen über den ρ von Mauerstrukturen verbessern.

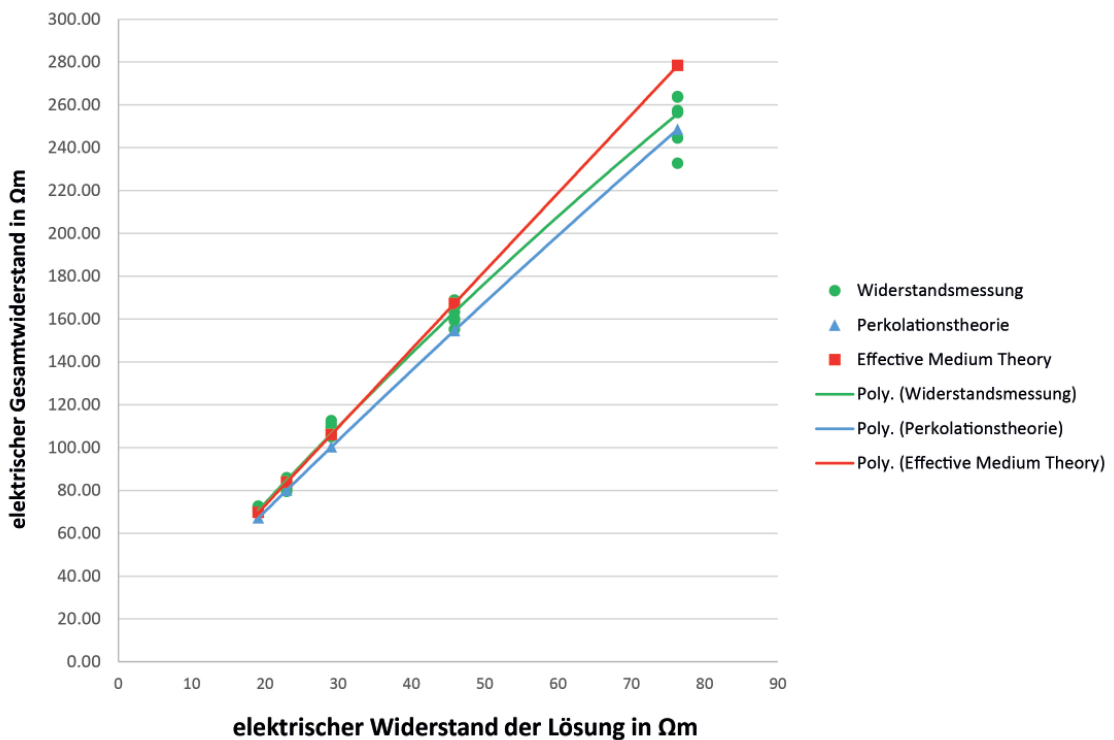
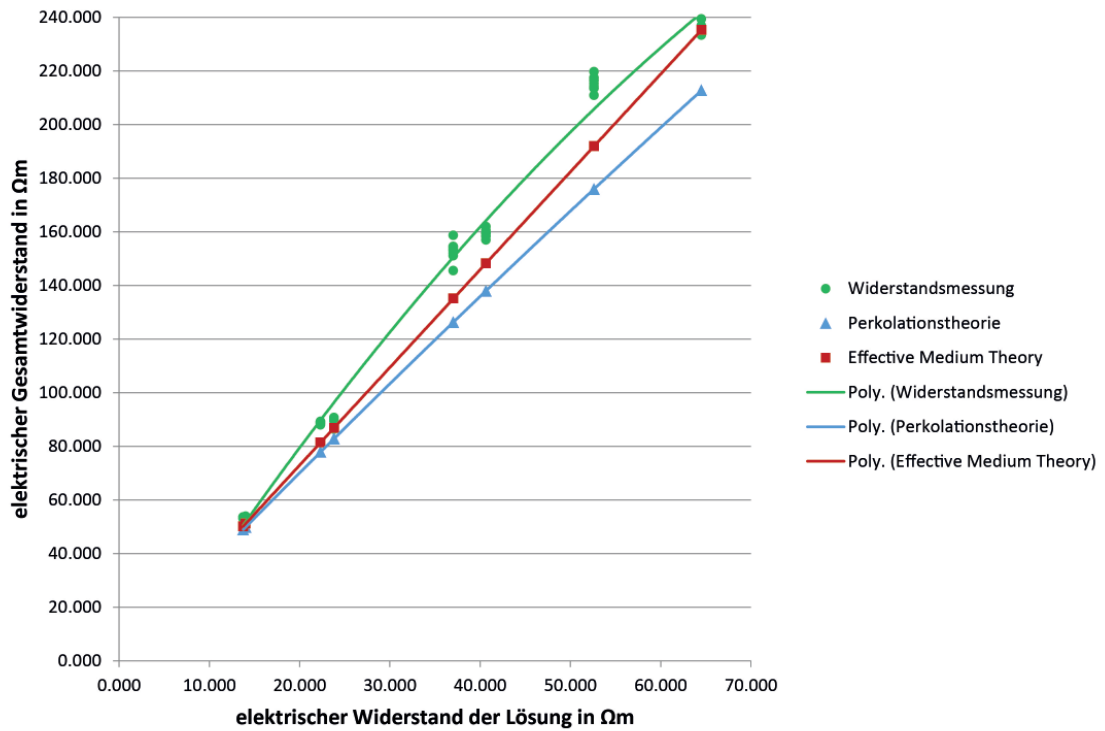


Abbildung 5-68: Vergleich der elektrischen Widerstandsmessungen mit den Berechnungen der Perkolationstheorie und Effective Medium Theory bei Veränderungen der Leitfähigkeit einer NaCl-Lösung. Oberer Teil: Messungen in der Box. Unterer Teil: Messungen im Messzylinder.

Für die Berechnung des ρ der Mauerstruktur aus Schnitt 2 wurde als ρ der Steine ein Wert von $5000 \Omega\text{m}$ verwendet. Der ρ des Bodenmaterials zwischen den Steinen wurde durch die RHOADES-Gleichung berechnet ($25.91 \Omega\text{m}$).

In Abbildung 5-69 ist die Veränderung des ρ der Mauerstruktur mit zunehmendem Steingehalt dargestellt. Während die beiden Methoden im Bereich von 5 % bis 15 % nahezu identische Ergebnisse liefern, liegen die durch die Effective Medium Theory berechneten Werte zwischen 20 % und 65 % leicht höher als die Ergebnisse der Perkolationsstheorie. Ab einer Konzentration von 65 % dreht sich dieses Verhältnis um. Dieser Wertebereich konnte durch die Experimente nicht abgedeckt werden, da die Konzentration der Glaskugeln durch die Größe und Form limitiert war.

Das volumetrische Verhältnis zwischen den beiden Phasen wurde in der Grabung optisch bestimmt und zusätzlich durch die Auswertung von Zeichnungen und Fotos berechnet. Der Wert sollte allerdings als Näherungswert betrachtet werden. Je nach Berechnungsweise liegt die Steinkonzentration der Mauer zwischen 70 % und 75 %. Aus der Berechnung durch die Perkolationsstheorie ergibt sich für eine Steinkonzentration von 70 % ein ρ von $167.98 \Omega\text{m}$ durch die Perkolationsstheorie und $157.67 \Omega\text{m}$ durch die Effective Medium Theory. Bei einem Steingehalt von 75 % werden ρ -Werte von $246.17 \Omega\text{m}$ durch die Perkolationsstheorie und $207.26 \Omega\text{m}$ durch die Effective Medium Theory berechnet.

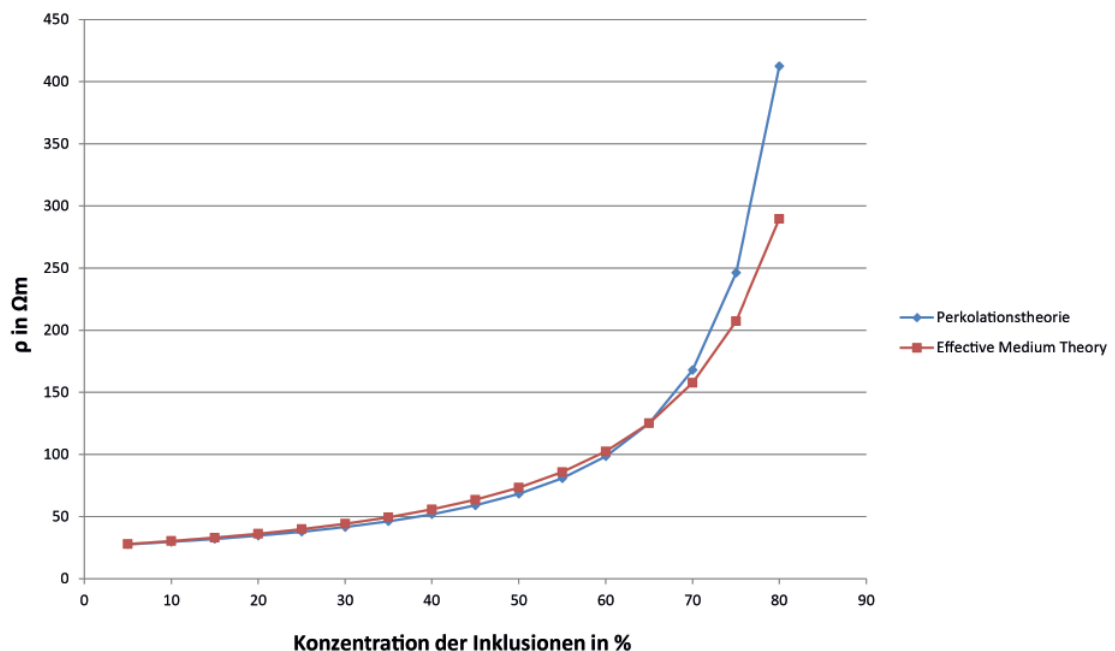


Abbildung 5-69: Berechnung des ρ der Mauerstruktur bei verschiedenen Steinkonzentrationen mit der Perkolationsstheorie und der Effective Medium Theory.

5.4.7 Elektrisches Widerstandsmodell für Schnitt 2

Das elektrische Widerstandsmodell (Abb. 5-70) für Schnitt S2 wurde mit der Software Res2DMod erstellt und orientiert sich an den im Grabungsprofil erfassten Maßen aus Abbildung 5-54. Da die Software bei der Erstellung des Modelles keine Topographie verwendet (was jedoch bei der späteren Bearbeitung in Res2DInv theoretisch hinzugefügt werden kann), wurde diese vorerst nicht berücksichtigt.

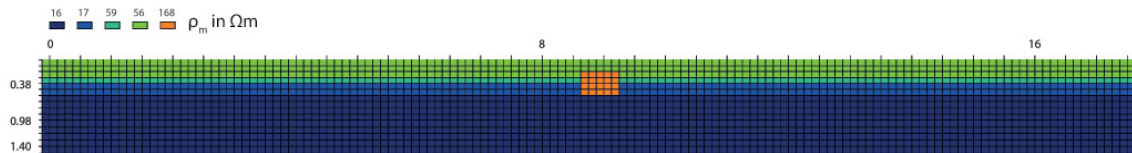


Abbildung 5-70: Elektrisches Widerstandsmodell für Schnitt 2.

Als Eingangsparameter (ρ_m) wurden die Ergebnisse aus den Pedotransfer-Funktionen und der Perkolationstheorie bzw. Effective Medium Theory verwendet (Tab. 5-2). Die Werte sind Mittelwerte und basieren auf der Berechnung der bodenphysikalischen und bodenchemischen Parameter der Bodenproben.

Der ρ_m der Mauerstruktur wurde in Modell 1 mit 167.98 Ωm (Perkolationstheorie) und 157.67 Ωm (Effective Medium Theory) gewählt, ein weiteres Modell (Modell 2) beinhaltet die aus der Ungenauigkeit der Bestimmung der volumetrischen Steinkonzentration der Mauer resultierenden Höchstwerte von 246.17 Ωm und 207.26 Ωm . Auf Grundlage des Modelles wurden die Ergebnisse einer Prospektion mit ERT (Schlumberger-Konfiguration) und einer Kartierung mit ER (modifizierte Pol-Pol-Konfiguration) berechnet und mit den realen Ergebnissen von Juni 2013 verglichen.

In Abbildung 5-71 sind die Ergebnisse der Anwendung der modifizierten Pol-Pol-Konfiguration entlang des synthetischen Modelles dargestellt. Die Eingangsparameter aus der Kombination von RHOADES-Formel und Perkolationstheorie bzw. RHOADES-Formel und Effective Medium Theory erzeugen eine gute Übereinstimmung mit den im Gelände gemessenen ρ_a -Werten. Im Bereich des ungestörten Bodenprofils liegen die auf Grundlage des Modelles berechneten Werte nur ca. 3 Ωm unter den im Gelände gemessenen Daten, was einer Abweichung von $< 8 \%$ entspricht. Die Abweichung zwischen den beiden kombinierten Methoden ist zudem sehr gering. Die durch die Mauerstruktur verursachte Anomalie ist nahezu identisch mit den im Gelände gemessenen Werten, jedoch ergibt sich durch die niedrigeren ρ_a -Werte für das Bodenmaterial aus der Modellberechnung ein größerer Kontrast zwischen Boden und Mauerstruktur. Ein möglicher Erklärungsansatz, neben einer Ungenauigkeit des Modelles, liegt in der Anwendung der Prospektionsmethode im Gelände. Da die Messungen im Gelände in

regelmäßigen Abständen von 1 m durchgeführt wurden, besteht die Möglichkeit, dass die Messungen nicht direkt auf der Mauerstruktur durchgeführt wurden, sondern an den Rändern der Mauer. Daraus würde ein niedrigerer ρ_a -Wert resultieren. Aus diesem Grund wurden die modifizierten Pol-Pol-Messungen in Abständen von 50 cm am Widerstandsmodell simuliert. Hieraus ergibt sich ein zweiter simulierter Messpunkt im Randbereich der Mauerstruktur, der einen niedrigeren ρ_a -Wert hervorruft.

Auffällig ist der in den Geländemessungen sichtbare Anstieg des ρ_a auf beiden Seiten der Mauerstruktur. Durch die Grabungsergebnisse konnte im Umfeld der Mauerstrukturen ein höherer Wert für das Bodenskelett festgestellt werden, der durch die mechanische Zerstörung der Mauern beim Pflügen entstanden ist. Da dieser erhöhte Zustand im Umfeld der Mauer im Modell nicht dargestellt werden konnte, kann dieser Effekt auch nicht in den synthetischen Ergebnissen beobachtet werden.

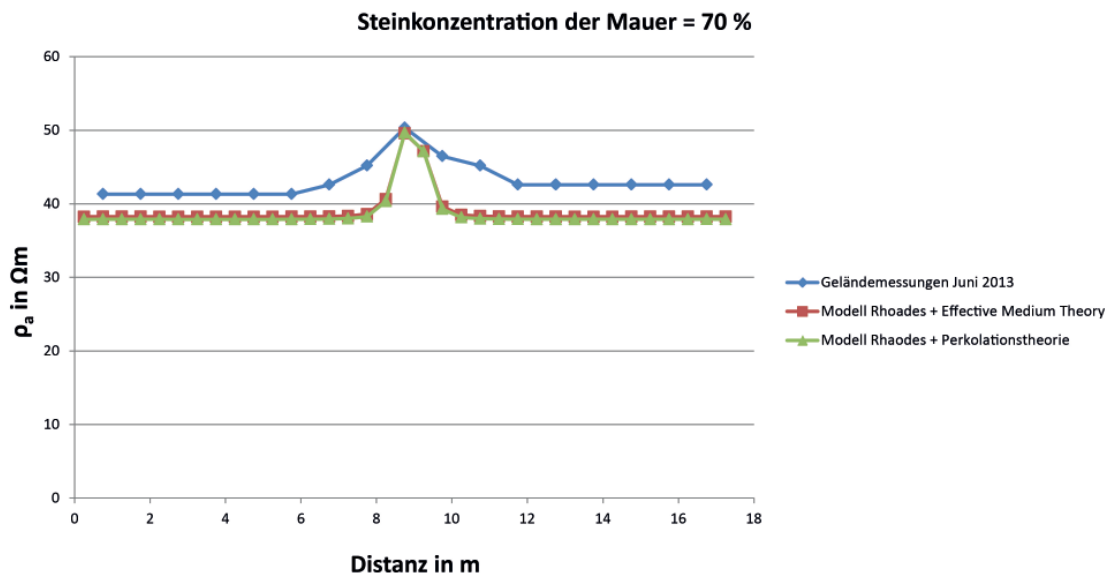


Abbildung 5-71: Ergebnis der Anwendung der modifizierten Pol-Pol-Konfiguration auf das Widerstandsmodell für den Zeitpunkt der Grabung im Juni 2013 bei einer Steinkonzentration von 70 % in der Mauerstruktur.

Da bei der Bestimmung der Steinkonzentration der Mauerstruktur eine Ungenauigkeit von bis zu 5 % angenommen wurde, musste das elektrische Widerstandsmodell mit ρ_m -Werten der Mauerstruktur von 246.17 Ωm (Perkolations-theorie) bzw. 207.26 Ωm (Effective Medium Theory) getestet werden. Die ρ_m -Werte des Bodenmaterials blieben unverändert. Im Vergleich mit den im Gelände gemessenen Werten ergibt sich aus dem synthetischen Modell 2 eine höhere, durch die Mauerstruktur verursachte Anomalie (Abb. 5-72). Auffällig ist der Anstieg der ρ_a -Werte in den ungestörten Bereichen des Modelles im Vergleich mit den Ergebnissen aus Modell 1, obwohl keine Veränderung der Modellstruktur oder der ρ_m -Werte des Bodenmaterials stattgefunden hatte. Es muss

also davon ausgegangen werden, dass die Veränderung des ρ_m der Mauerstruktur diesen Effekt ausgelöst hat. Die Abweichung zwischen den Ergebnissen von Modell 1 und Modell 2 im Bereich des ungestörten Bodenprofils liegt unter 3 %, so dass keine ernstzunehmende Beeinflussung vorliegt.

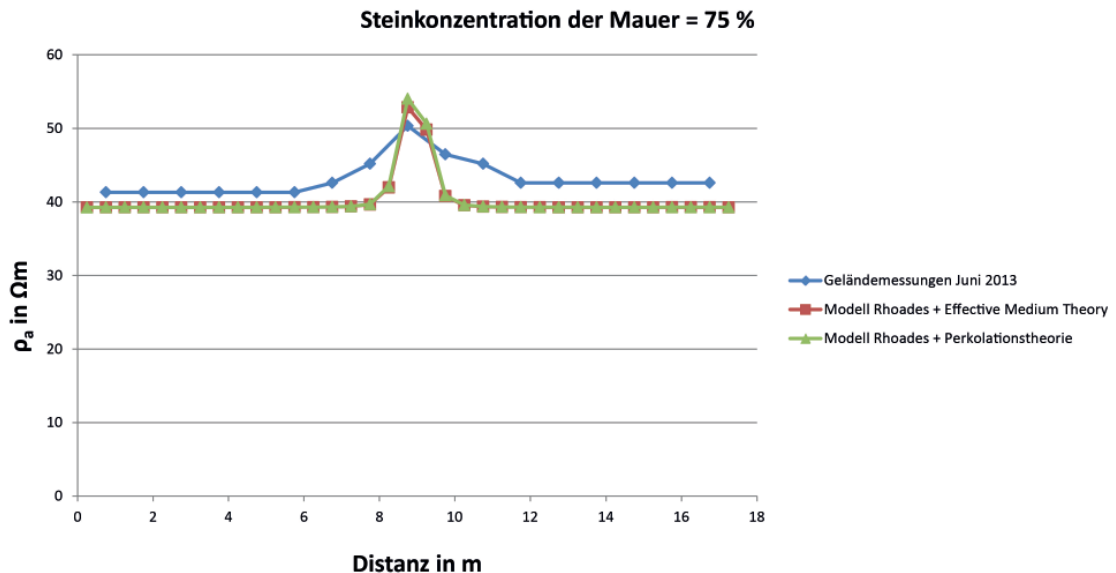


Abbildung 5-72: Ergebnis der Anwendung der Pol-Pol-Konfiguration auf das Widerstandsmodell für den Zeitpunkt der Grabung im Juni 2013 bei einer Steinkonzentration von 75 % in der Mauerstruktur.

Die Ergebnisse der Anwendung der Schlumberger-Konfiguration auf die Modelle 1 und 2 (Abb. 5-71 und Abb. 5-72) wurden mit der Software Res2DInv invertiert. Der optische Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung mit den in ERT-Profil KB1 vorgefundenen Strukturen (Abb. 5-73 und Abb. 5-74). Die Ergebnisse wurden zur Analyse als X, Y, Z-Datei exportiert und zur Erstellung von vertikalen ρ -Profilen verwendet. In Abbildung 5-75 sind ρ -Profile aus ERT-Profil KB1 und die ρ_m -Werte der Modelle 1 und 2 dargestellt. Im oberen Profilbereich sind die berechneten ρ_m -Werte höher als die gemessenen ρ -Werte. Die Erklärung hierfür liegt in der Heterogenität der A-Horizonte, insbesondere in der Verteilung des Bodenskeletts. Mit zunehmender Profiltiefe, bzw. in den B-Horizonten, können nur geringe Abweichungen zwischen den ρ_m - und ρ -Werten beobachtet werden. Der Vergleich der Inversionsergebnisse der Modelle 1 und 2 (Abb. 5-76) mit den Ergebnissen aus den Geländemessungen zeigt eine gute Übereinstimmung der ρ -Profile, wobei kleinere Abweichungen beobachtet werden können. In den A-Horizonten liegen die Modellwerte höher als die Geländemessungen und auch der scharfe Übergang von rAp-Horizont zu Sw-Horizont wird von den Modellergebnissen nicht korrekt wiedergegeben. Da bei einer optischen Interpretation der ERT-Profile dieser Unterschied kaum sichtbar ist und anscheinend auch keinen Einfluss auf die Interpretation der archäologischen Strukturen ausübt, kann diese Abweichung in der

vorliegenden Fallstudie als vernachlässigbar eingestuft werden (Abb. 5-76).

Die in Schnitt 2 untersuchte Mauerstruktur verursacht in ERT-Profil KB1 eine Anomalie mit Werten von 64 bis 102 Ωm . Die Höchstwerte ergaben sich im Zentrum der Struktur, an den Rändern der Mauerstruktur nehmen die ρ -Werte ab. Die in den elektrischen Widerstandsmodellen dargestellte Mauerstruktur ruft je nach Berechnungsmethode des ρ und der verwendeten Steinkonzentration unterschiedliche ρ -Werte hervor. Die beste Übereinstimmung ergab sich bei der Verwendung der Perkolationsmethode mit einer Steinkonzentration von 70 %. Die Abweichungen von dem im Gelände gemessenen Minimum und Maximum liegen bei 8.5 % bzw. 2.9 %.

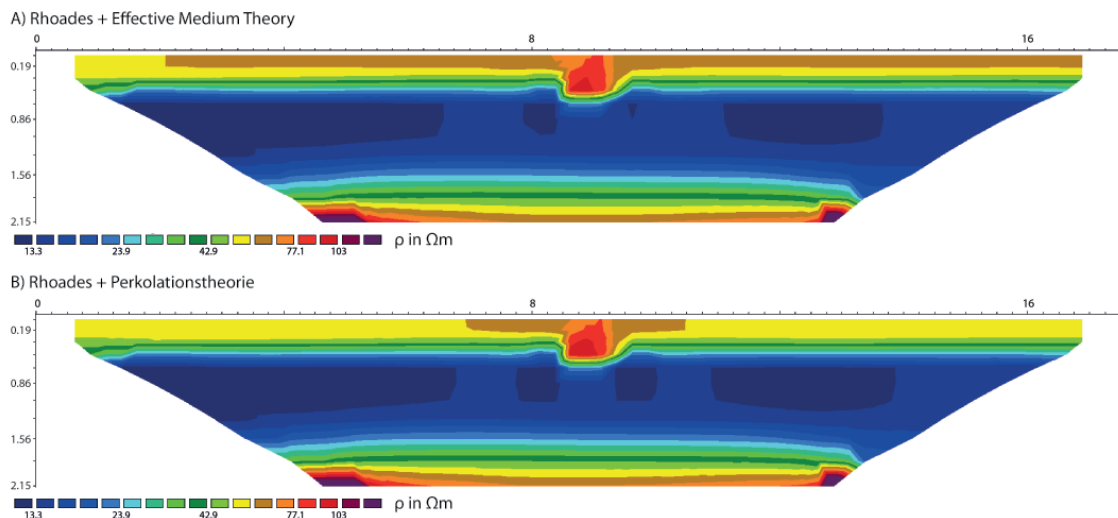


Abbildung 5-73: Ergebnis der Anwendung der Schlumberger-Konfiguration auf das Widerstandsmodell für den Zeitpunkt der Grabung im Juni 2013 bei einer Steinkonzentration von 70 % in der Mauerstruktur.

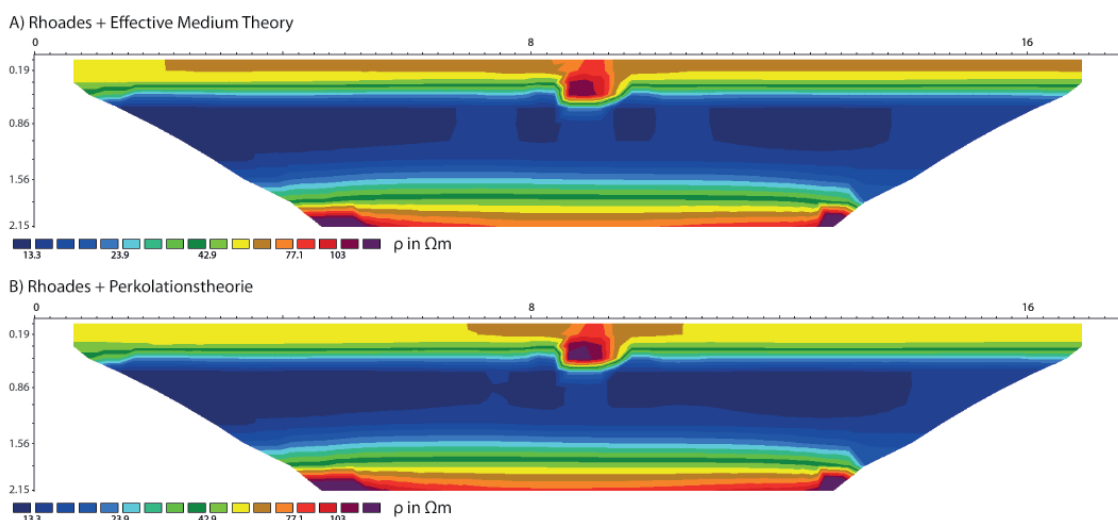


Abbildung 5-74: Ergebnis der Anwendung der Schlumberger-Konfiguration auf das Widerstandsmodell für den Zeitpunkt der Grabung im Juni 2013 bei einer Steinkonzentration von 75 % in der Mauerstruktur.

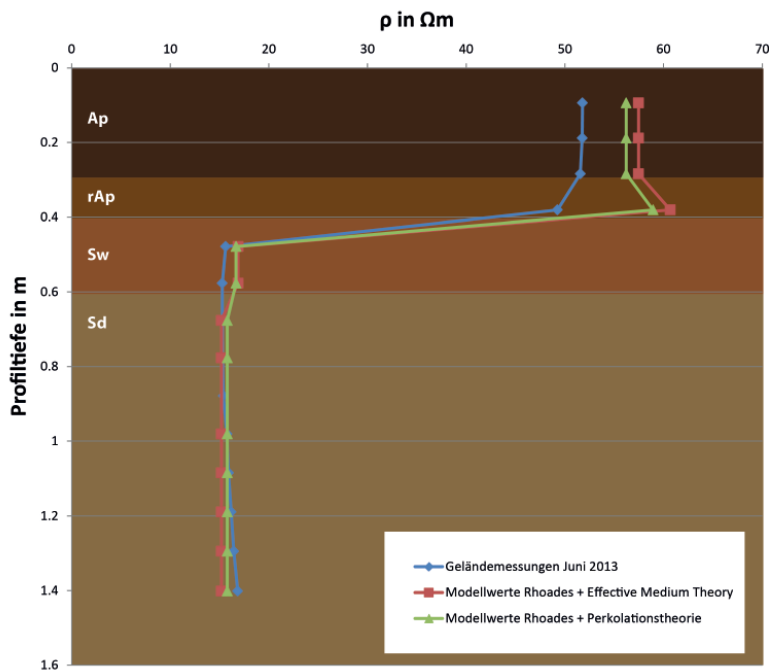


Abbildung 5-75: Vergleich der Verteilung des ρ aus ERT-Profil KB1 mit den verwendeten ρ_m -Werten im elektrischen Widerstandsmodell.

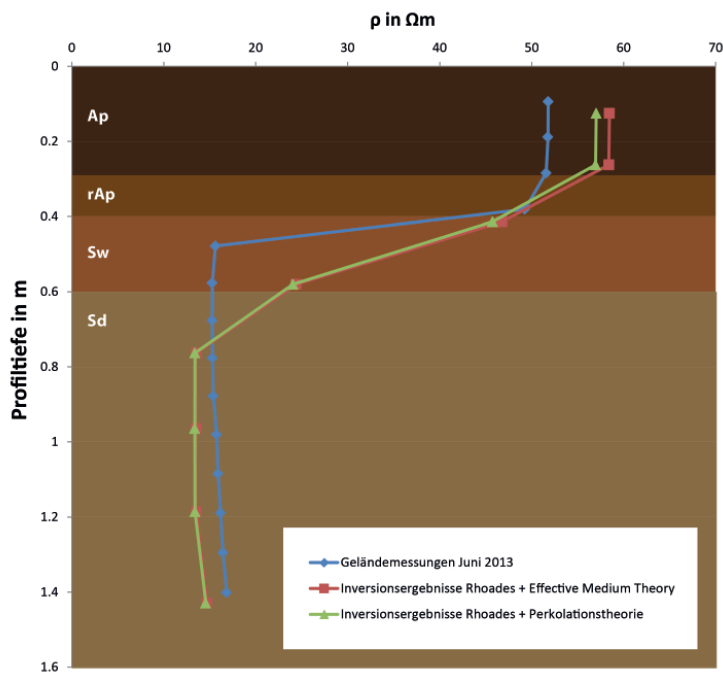


Abbildung 5-76: Vergleich der Verteilung des ρ aus ERT-Profil KB1 mit den Inversionsergebnissen des elektrischen Widerstandsmodells.

5.4.8 HYDRUS-Modell für Katzenbach

Das 2D-HYDRUS-Modell für den Grabungsschnitt S2 wurde durch die bodenkundliche und geoarchäologische Analyse des Profils erstellt (Abb. 5-77). Die Erstellung eines 2D-Modells für eine in Realität dreidimensionale archäologische Struktur erfordert eine Abstraktion der vorgefunden Gegebenheiten, die in einigen Fällen nur durch die Annahme von identischen Prozessabläufen in 2D und 3D vertretbar ist. Zudem wurde die relativ gering ausgeprägte Topographie auf der Profilstrecke als vernachlässigbar angesehen und nicht in das Modell übernommen.

Um eine Beeinflussung der Hydrologie durch ein zu kleines Modell auszuschließen, wurden die Grenzen des Modells nach links und rechts erweitert. Das Modell ist insgesamt 2.5 m lang, die Mauerstruktur befindet sich genau in der Mitte. Die seitlichen Grenzen des Modells sind als undurchlässig definiert, so dass an diesen Bereichen kein Wasser in das System gelangen oder es verlassen kann. An der Bodenoberfläche befindet sich eine atmosphärische Grenze, die es ermöglicht, Wasser in das System einzubringen (Niederschlag) oder es aus dem System zu entfernen (Evaporation). Die untere Grenze des Modells wird durch eine freie Grenze dargestellt, damit das Bodenwasser hier das System verlassen kann. Diese Grenze wird vor allem dann verwendet, wenn keine Informationen über die Tiefe der grundwasserführenden Schicht verfügbar sind.

Der Aufbau des Modells orientiert sich an den in Kapitel 5.4.6 analysierten Bodenhorizonten. Zur Berechnung der hydraulischen Eigenschaften der einzelnen Bodenhorizonte wurden die Korngrößenverteilung und die Lagerungsdichte verwendet. Die durch die Pedotransfer-Funktionen ermittelten Parameter zum Wasserrückhaltevermögen sind in Tabelle 5-3 dargestellt. Mit zunehmender Profiltiefe nimmt der zur Sättigung benötigte Wassergehalt θ_s ab, was durch die mit der Tiefe zunehmenden Lagerungsdichte begründet ist. Zeitgleich nimmt aber auch die hydraulische Leitfähigkeit K_s ab, was die für den Wasserdurchfluss durch die Horizonte BI und BII benötigte Zeitspanne vergrößert.

Die Geometrie der Steine im Fundamentrest der römischen Mauerstruktur wurde von der vereinfachten Profilzeichnung übernommen. Hierbei konnten einige kleinere Steine aus technischen Gründen nicht im Modell dargestellt werden, da zwischen den einzelnen Objekten ein Mindestabstand eingehalten werden musste, um eine Lösung der Funktionen an diesen Stellen zu ermöglichen. Außerdem müssen die Steine als Objekte in einer einzigen Geometrie eines Bodenhorizontes verortet sein, da sonst ein Konflikt mit den Geometrien der Bodenhorizonte entstehen würde. Die hydraulische Leitfähigkeit der Steine wurde manuell so niedrig eingestellt, dass in ihnen kein

Wasserfluss stattfinden kann (Tab. 5-3). Die initialen Bedingungen des volumetrischen Wassergehaltes bei Start des Modells wurden aus den bei der Grabung gewonnenen Bodenproben ermittelt (Abb. 5-56).

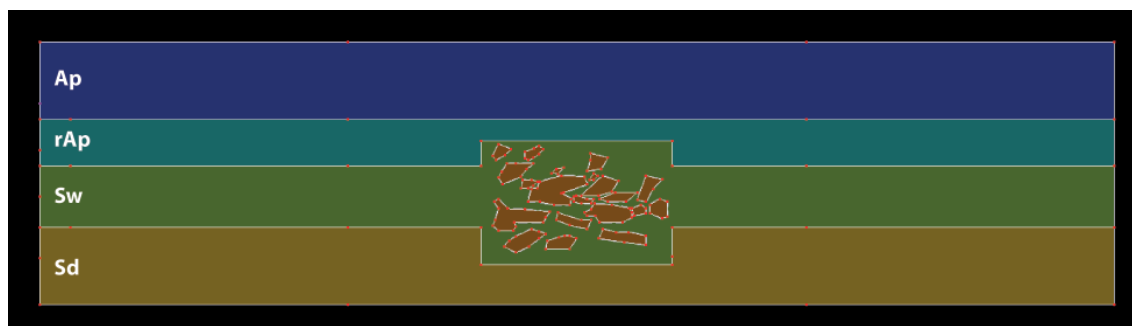


Abbildung 5-77: Geometrie des HYDRUS-Modells für Schnitt 2 bei Katzenbach.

Schicht	θ_r	θ_s	α	n	K_s	l
Ap	0.0420	0.5048	0.0465	1.5449	345.590	0.5
rAp	0.0433	0.4309	0.0343	1.5177	125.130	0.5
Sw	0.0580	0.3839	0.0238	1.3606	17.270	0.5
Sd	0.0539	0.3337	0.0131	1.3601	3.190	0.5
Steine	0.0050	0.0100	0.0080	1.0010	0.001	0.5

Tabelle 5-3: Materialeigenschaften der im HYDRUS-Modell verwendeten Geometrien.

Das zur räumlichen Lösung der hydraulischen Funktionen nötige FEM wurde so angelegt, dass im Bereich der Steine ein dichteres FEM vorhanden ist, um der Software möglichst viele Lösungspunkte und Flexibilität bei den Berechnungsschritten zu ermöglichen. Dies zeigt sich auch in dem kleinen minimalen Berechnungsschritt von ca. 0.00001 Tagen pro Schritt. Die Software verfügt damit über den nötigen Handlungsspielraum, um bei komplexen Prozessen (z.B. starker Niederschlag oder längere Trockenphase) die hydraulischen Funktionen räumlich zu lösen. Der externe Input erfolgte mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag, die Daten für Niederschlag pro Tag in mm und Evaporation in mm stammen von einer lokalen Wetterstation. Zum Vergleich mit den Ergebnissen von HYDRUS wurde ein Klimadiagramm für den Zeitraum von Juli 2013 bis Juni 2014 mit monatlichen Werten für Niederschlag in mm und einem Mittelwert für den Temperaturverlauf in °C erstellt und mit den Werten des vierteljährigen Mittels verglichen (Abb. 5-78). Hierbei wurde ersichtlich, dass sich im Modellierungszeitraum einige Unregelmäßigkeiten in Niederschlag und Temperatur ereignet haben, die sich vermutlich im Wasserhaushalt des Bodens bemerkbar machen würden. Nach einer vergleichsweise trockenen Phase in den Sommermonaten 2013 folgte ein überdurchschnittlich feuchter Zeitraum bis November 2013. Nach einer ungewöhnlich

trockenen Phase im März und April 2014 verlief der restliche Modellierungszeitraum mit kleineren Abweichungen im Bereich des vierteljährigen Mittels. Der Temperaturverlauf von Juli 2013 bis Juni 2014 lag konstant über dem des vierteljährigen Mittels.

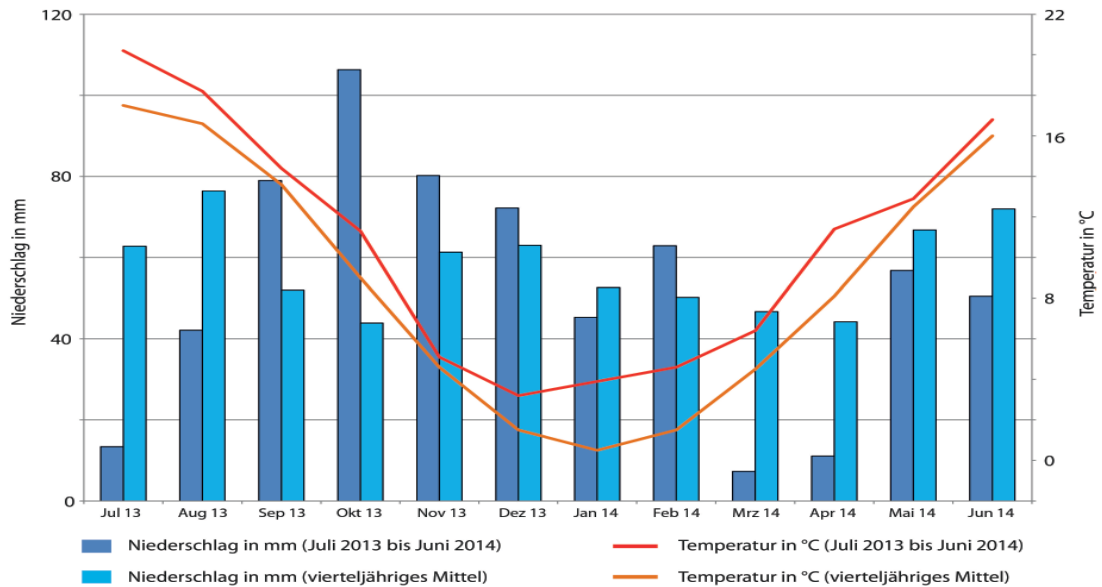


Abbildung 5-78: Klimadiagramm für den Raum Katzenbach aus den für das HYDRUS-Modell verwendeten Eingangsdaten. Quelle: Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinland-Pfalz.

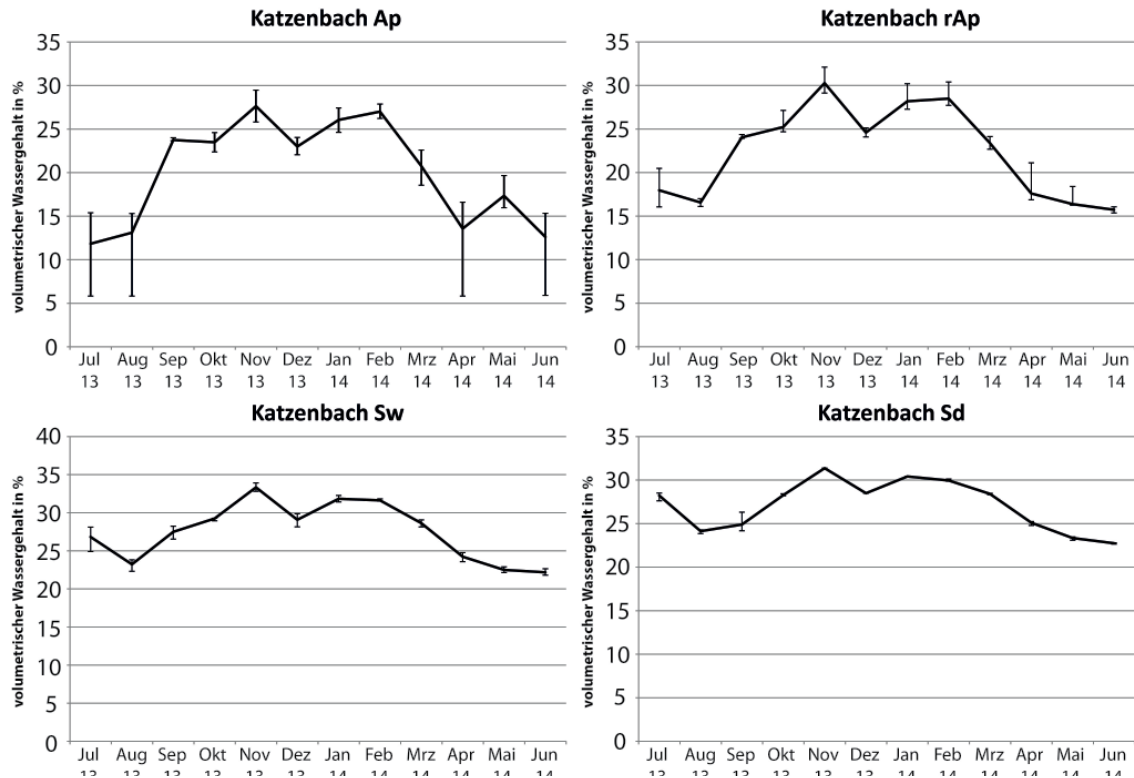


Abbildung 5-79: Saisonale Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes in den Bodenhorizonten in Schnitt 2 bei Katzenbach (Berechnung durch HYDRUS).

Das Ergebnis des Modellierungsprozesses ist die Verteilung des volumetrischen Wassergehaltes im Bodenprofil für einen zeitlichen Ablauf von 365 aufeinanderfolgenden Tagen. Der Export der Daten erfolgte mittels einer Profilfunktion, die eine hohe räumliche Auflösung der Daten ermöglichte. Jeder Monat wird durch die Daten des volumetrischen Wassergehaltes zur Monatsmitte dargestellt (Abb. 5-79). Da die Verteilung des Bodenwassers in den spezifischen Bodenhorizonten nicht immer homogen ist, wurde in die Abbildung der minimale und maximale Wassergehalt im entsprechenden Bodenhorizont zum Zeitpunkt des Modells als Abweichungsbalken dargestellt. Der Verlauf der Linie entspricht dem Mittelwert des volumetrischen Wassergehaltes im Bodenhorizont.

Im Ap-Horizont kann für Juli und August 2013 sowie April und Juni 2014 eine große Spannbreite des volumetrischen Wassergehaltes von bis zu 10 % festgestellt werden. Dies deutet auf ein vor dem Export der Messdaten stattgefundenenes extremes Wetterereignis, wie z.B. starken Niederschlag oder eine bereits länger andauernde Trockenperiode, hin. Dies konnte durch einen Vergleich mit den Eingangswerten bestätigt werden. Nach Niederschlagsereignissen bildet sich häufig nahe der atmosphärischen Grenze an der Oberfläche des Modells ein hoher volumetrischer Wassergehalt, während in den tieferliegenden Regionen des Ap-Horizontes noch ein niedrigerer volumetrischer Wassergehalt vorhanden ist. Ein Abgleich mit den folgenden Tagen des Modells zeigte jedoch, dass der errechnete Mittelwert für den volumetrischen Wassergehalt repräsentativ ist und die Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes einer langfristigen Veränderung unterliegt. Generell zeigen der Ap- und Ar-Horizont im Jahresverlauf eine feuchte Phase von September bis März und eine trockene Phase von April bis August an, was auch mit dem vierteljährigen Mittel für Niederschlag und Temperatur der lokalen Wetterstation übereinstimmt. In der feuchten Phase pendelt sich der volumetrische Wassergehalt zwischen 23 % und 27 % im Ap-Horizont und 24 % und 30 % im rAp-Horizont ein. Diese Werte liegen unter den von HYDRUS berechneten Werten, die zur Wassersättigung benötigt werden. In der Trockenphase von April bis Juli sinkt der volumetrische Wassergehalt unter 15 % im Ap-Horizont und auf 15 % bis 18% im rAp-Horizont.

Die saisonale Veränderung des volumetrischen Wassergehalts im Sw- und Sd-Horizont ist weniger stark ausgeprägt als in den A-Horizonten. Auch die Abweichungen vom Mittelwert am Tag des Datenexportes fällt niedriger aus, was auf eine geringere Beeinflussung des volumetrischen Wassergehaltes im Sw- und Sd-Horizont durch kurzfristige Veränderungen an der atmosphärischen Oberfläche des Modells hindeutet. Im BI-Horizont liegt der volumetrische Wassergehalt in der feuchten Phase nur 4 %

unter dem von HYDRUS berechneten Wert für die Wassersättigung und nimmt in der Trockenphase um bis zu 10% ab, was die in Kapitel 5.4.6 beschriebenen redoximorphen Merkmale verursachen könnte. Der Jahresgang des volumetrischen Wassergehaltes im Sd-Horizont gleicht stark dem des Sw-Horizontes, mit dem Unterschied, dass der zur Sättigung benötigte Wert für den Sd-Horizont niedriger ist (Tab. 5-3) und in der feuchten Phase des Jahres fast erreicht wird.

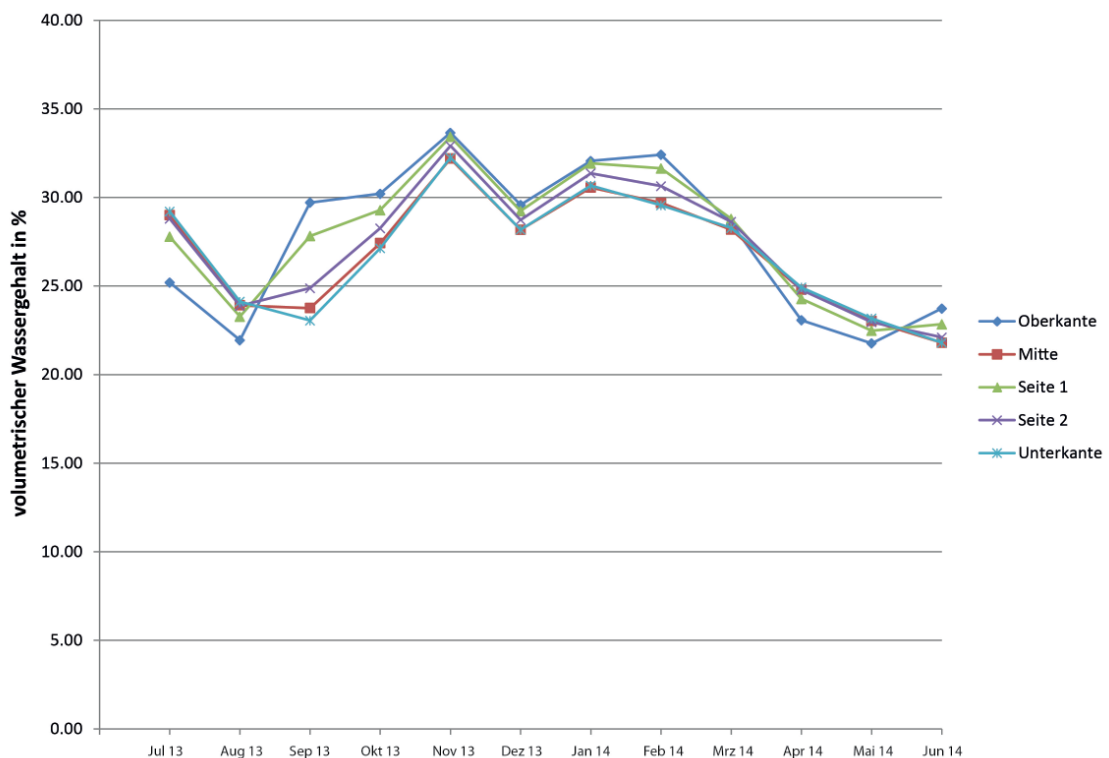


Abbildung 5-80: Saisonale Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes in verschiedenen Bereichen der Mauerstruktur (Berechnung durch HYDRUS).

Der Einfluss der Mauerstruktur auf den Wasserfluss wird bei Betrachtung der Verteilung des volumetrischen Wassergehaltes nach Niederschlagsereignissen deutlich. Im Bereich über der Mauer staut sich das Wasser, da die Steine ein Hindernis für den Wasserfluss darstellen. Daraus folgt, dass der volumetrische Wassergehalt im Zentrum und an der Unterkante der Struktur niedriger sein muss, als in der gleichen Tiefenlage des ungestörten Bodenprofils. Es stellt sich die Frage, an welcher Stelle der Mauerstruktur der Wassergehalt exportiert werden sollte. In Abbildung 5-80 ist der jahreszeitliche Verlauf des volumetrischen Wassergehaltes im Bereich der Mauerstruktur für fünf verschiedene Bereiche extrahiert. Dabei wird ersichtlich, dass die langfristige Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes in allen Mauerbereichen relativ ähnlich ist.

Die angesprochene Trockenphase von April bis August und die feuchte Phase von September bis März zeichnen sich auch in der Mauerstruktur ab. Auffällige Abweichungen existieren im Juli und September 2013, sowie im Februar 2014. Nach Kontrolle des Modellablaufes konnte für Juli 2013 eine Trockenphase ausgemacht werden, die einen niedrigen volumetrischen Wassergehalt an der Oberkante der Mauerstruktur zur Folge hatte. Die umgekehrten Voraussetzungen ergaben sich für September 2013 und Februar 2014, da sich in den fünf Tagen vor dem Export der Daten stärkere Niederschläge in den Eingangsdaten abzeichneten und als Folge an der Oberkante ein erhöhter Wassergehalt auftrat.

5.4.9 Kombination der HYDRUS-Ergebnisse mit dem elektrischen Widerstandsmodell

Die aus der Verwendung der HYDRUS-Software erhaltene Verteilung des volumetrischen Wassergehaltes für den Zeitraum von Juni 2013 bis Juni 2014 wurde verwendet, um die Veränderung des ρ in Schnitt 2 durch die Kombination der RHOADES-Formel und der Perkolationstheorie zu berechnen (Abb. 5-81). Die aus diesen Schritten erhaltenen ρ_m -Werte wurden in das in Kapitel 5.4.7 vorgestellte elektrische Widerstandsmodell eingesetzt und mittels Forward Modeling die Ergebnisse einer elektrischen Widerstandskartierung und Widerstandstomographie simuliert.

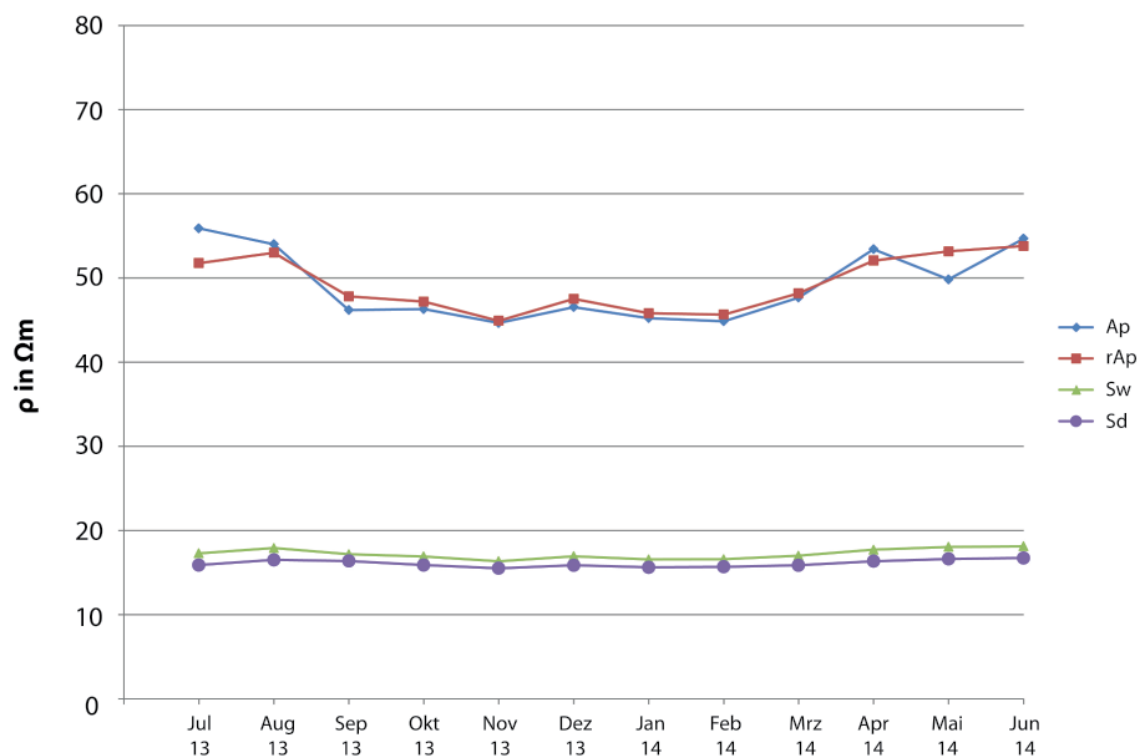


Abbildung 5-81: Berechnung der saisonalen Veränderung des ρ der Bodenhorizonte durch die Kombination von RHOADES-Formel, Perkolationstheorie und HYDRUS.

Die aus diesen Schritten erhaltenen Werte wurden mit den im Gelände gemessenen ρ_a -Werten von Juni 2013 und Dezember 2011 (Abb. 5-83 und Abb. 5-84) verglichen, um die Korrektheit der Darstellung des Einflusses der saisonalen Veränderungen im Wasserhaushalt auf die elektrischen Widerstandsmessungen zu überprüfen. Dieser Ansatz ist als Versuch einer nicht an ein Gelände-Monitoring gebundenen Modellierung des Einflusses der saisonalen Veränderung des Wassergehaltes auf die elektrische Widerstandskartierung zu verstehen und erhebt keinen Anspruch auf einen vollständigen Modellierungsansatz für saisonale Einflüsse. Vielmehr handelt es sich um einen Ansatz, der zukünftig durch die Anwendung bei gleichzeitigem und hochauflösendem Gelände-Monitoring der bodenphysikalischen und bodenchemischen Parameter sowie des ρ untersucht werden muss.

Die aus HYDRUS erhaltene Verteilung des Wassergehaltes im Boden wurde zur Berechnung des ρ des Feinbodens durch die RHOADES-Formel verwendet und anschließend mit der Effective Medium Theory und Perkolationsstheorie angepasst. Dabei wurde lediglich der Wassergehalt als variabel angenommen, während alle anderen Parameter der RHOADES-Formel konstant blieben. In Abbildung 5-81 ist die saisonale Veränderung des ρ der einzelnen Horizonte dargestellt, wobei nur die Kombination von RHOADES-Formel und Perkolationsstheorie abgebildet ist, da die Unterschiede zu den Ergebnissen der Kombination von RHOADES-Formel und Effective Medium Theory sehr gering sind. Deutlich können an der Veränderung des ρ in den A-Horizonten im Jahresverlauf eine trockenere Phase zwischen April und August und eine feuchtere Phase zwischen September und März festgestellt werden. Der ρ des Feinbodens in den beiden A-Horizonten verändert sich relativ einheitlich, anzumerken sind größere Unterschiede zwischen den beiden Horizonten in der Trockenphase. In dieser entstehen im Ap-Horizont kleinere Abweichungen des ρ , da sich die Niederschlagsereignisse und Evapotranspiration im HYDRUS-Modell stärker auf die oberflächennahen Schichten auswirken. Der ρ des Feinbodens der B-Horizonte verändert sich im Jahresverlauf nur sehr geringfügig. Dies steht zum einen im Zusammenhang mit einer geringeren saisonalen Veränderung des Wassergehaltes (Abb. 5-81), zum anderen spielt die geringe Sensitivität der RHOADES-Formel bei hohen Tongehalten vermutlich eine Rolle.

Die Ergebnisse der Modellierung mit HYDRUS wurden außerdem verwendet, um die saisonale Veränderung des ρ der Mauerstruktur bei einer Steinkonzentration von 70 % zu berechnen (Abb. 5-82). Der Jahresgang zeigt die bereits beschriebene Unterteilung in eine trockene Phase mit Höchstwerten im August 2013 und Mai 2014 und in eine feuchte Phase mit dem niedrigsten Wert im November 2013.

Bei einem Vergleich der im Gelände gemessenen Daten von Juni 2013 mit

den Modellergebnissen für Juni 2013 und Juni 2014 lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung feststellen (Abb. 5-83). HYDRUS berechnet offenbar korrekt die an die Jahreszeiten gebundene Veränderung des Wassergehaltes im Boden. Positiv ist außerdem zu bewerten, dass die Verteilung des Wassergehaltes im Boden für Juni 2013 und Juni 2014 relativ ähnlich ist.

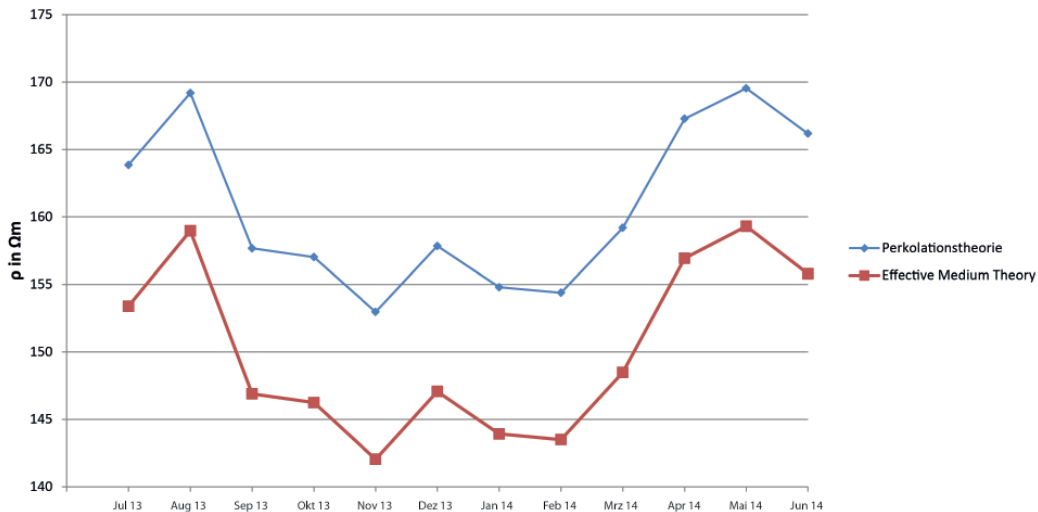


Abbildung 5-82: Berechnung der saisonalen Veränderung des p der Mauerstruktur durch die Kombination von RHOADES-Formel, Perkolationstheorie bzw. Effective Medium Theory und HYDRUS. Steinkonzentration der Mauerstruktur = 70 %.

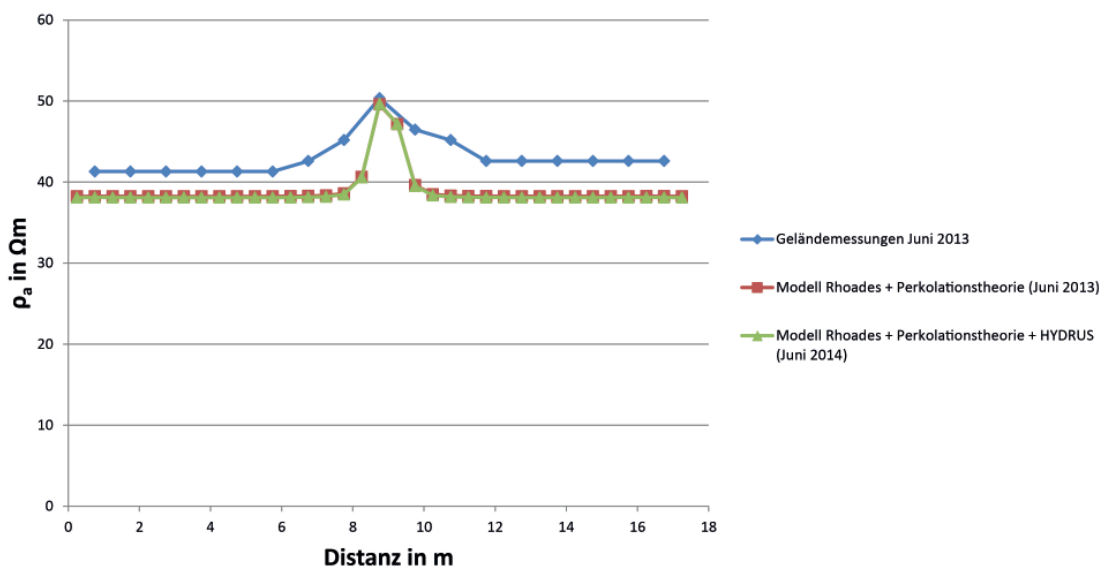


Abbildung 5-83: Ergebnis der Anwendung der modifizierten Pol-Pol-Konfiguration auf das Widerstandsmodell mit den aus der Kombination von RHOADES-Formel, Perkolationstheorie und HYDRUS berechneten Eingangswerten für Juni 2013 und Juni 2014. Steinkonzentration der Mauerstruktur = 70 %.

Bei der Anwendung der elektrischen Widerstandskartierung auf das elektrische Widerstandsmodell für S2 mit den vorgestellten ρ_m -Werten für Bodenhorizonte und Mauerstruktur ergibt sich der beste Kontrast in der Trockenphase von April bis August (Abb. 5-85). Es muss jedoch angemerkt werden, dass sich der Kontrast in der Trockenphase nur um ca. 2 Ωm vom Kontrast in der feuchteren Phase von September bis März unterscheidet. Dementsprechend kann bei einer Prospektion mit ER auf der Fundstelle „Im Falkensaß“, unabhängig von der Jahreszeit, von einer erfolgreichen Prospektion der Mauerstrukturen ausgegangen werden.

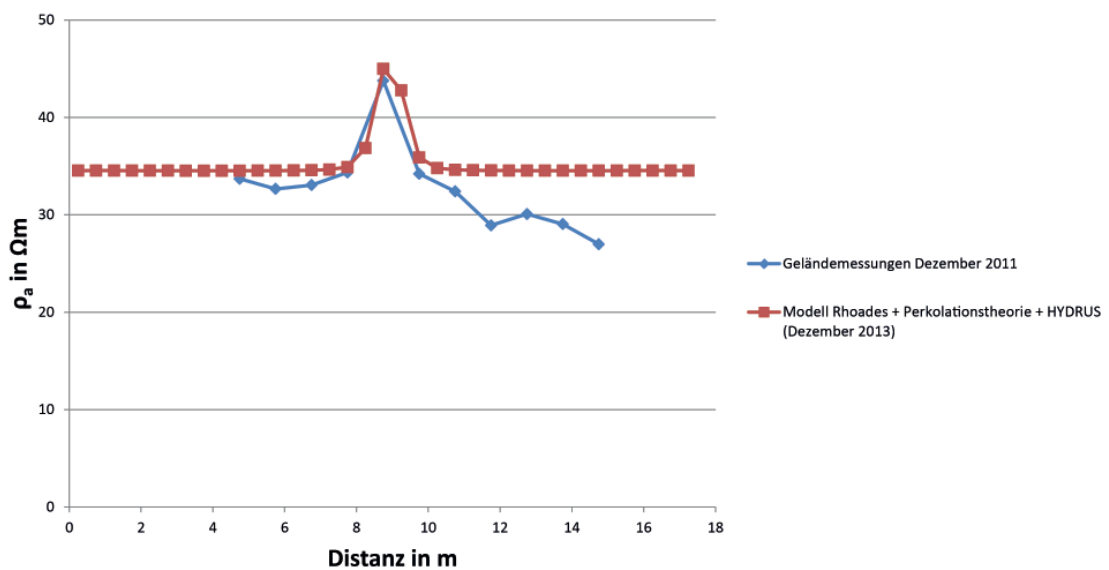


Abbildung 5-84: Ergebnis der Anwendung der modifizierten Pol-Pol-Konfiguration auf das Widerstandsmodell mit den aus der Kombination von RHOADES-Formel, Perkolationsstheorie und HYDRUS berechneten Eingangswerten für Dezember 2013. Steinkonzentration der Mauerstruktur = 70 %.

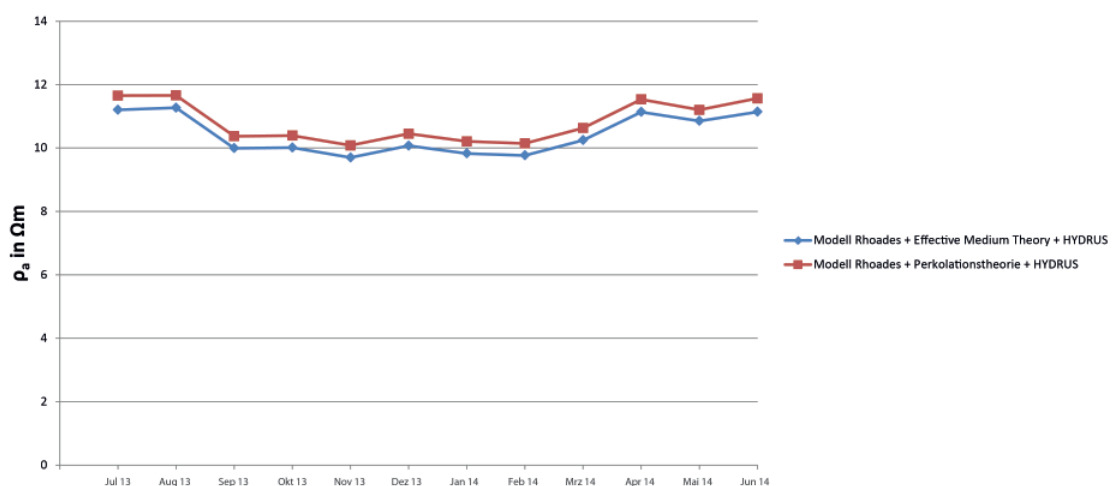


Abbildung 5-85: Saisonale Veränderung des Kontrast zwischen Mauerstruktur und Bodenmaterial bei einer Messung mit der modifizierten Pol-Pol-Konfiguration.

Da für den Modellierungszeitraum keine weiteren Geländemessungen durchgeführt werden konnten, ist lediglich ein Vergleich mit Geländemessungen vom Dezember 2011 möglich. Sofern keine extremen Abweichungen der Wetterereignisse stattgefunden haben, sollte der volumetrische Wassergehalt im Boden in den Monaten Dezember 2011 und Dezember 2013 relativ ähnlich sein und dementsprechend auch eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen des elektrischen Widerstandsmodells und den Geländemessungen ergeben. Abbildung 5-84 ermöglicht einen Vergleich zwischen den modellierten Ergebnissen und den Geländemessungen. Wie vermutet kann eine gute Übereinstimmung festgestellt werden, insbesondere im Bezug auf die von der Mauerstruktur verursachte Anomalie. Im Bereich der ungestörten Bodenprofile liegen die ρ_a -Werte der Geländemessungen stellenweise unter den durch das Modell berechneten Werten, mit Abweichungen von bis zu 5 Ωm .

Bei der Anwendung von ERT auf die monatlichen Modelle ergibt sich ein ähnlicher saisonaler Ablauf (Abb. 5-86 und Abb. 5-87). In den ERT-Profilen kann die Trockenphase von April bis August vor allem durch höhere Widerstände in den oberflächennahen Bereichen und der Mauerstruktur erkannt werden. Mit Beginn der feuchteren Phase nimmt der elektrische Widerstand der Mauerstruktur und aller Bodenhorizonte ab, wobei die größten Veränderungen in den oberflächennahen Bereichen anzutreffen sind.

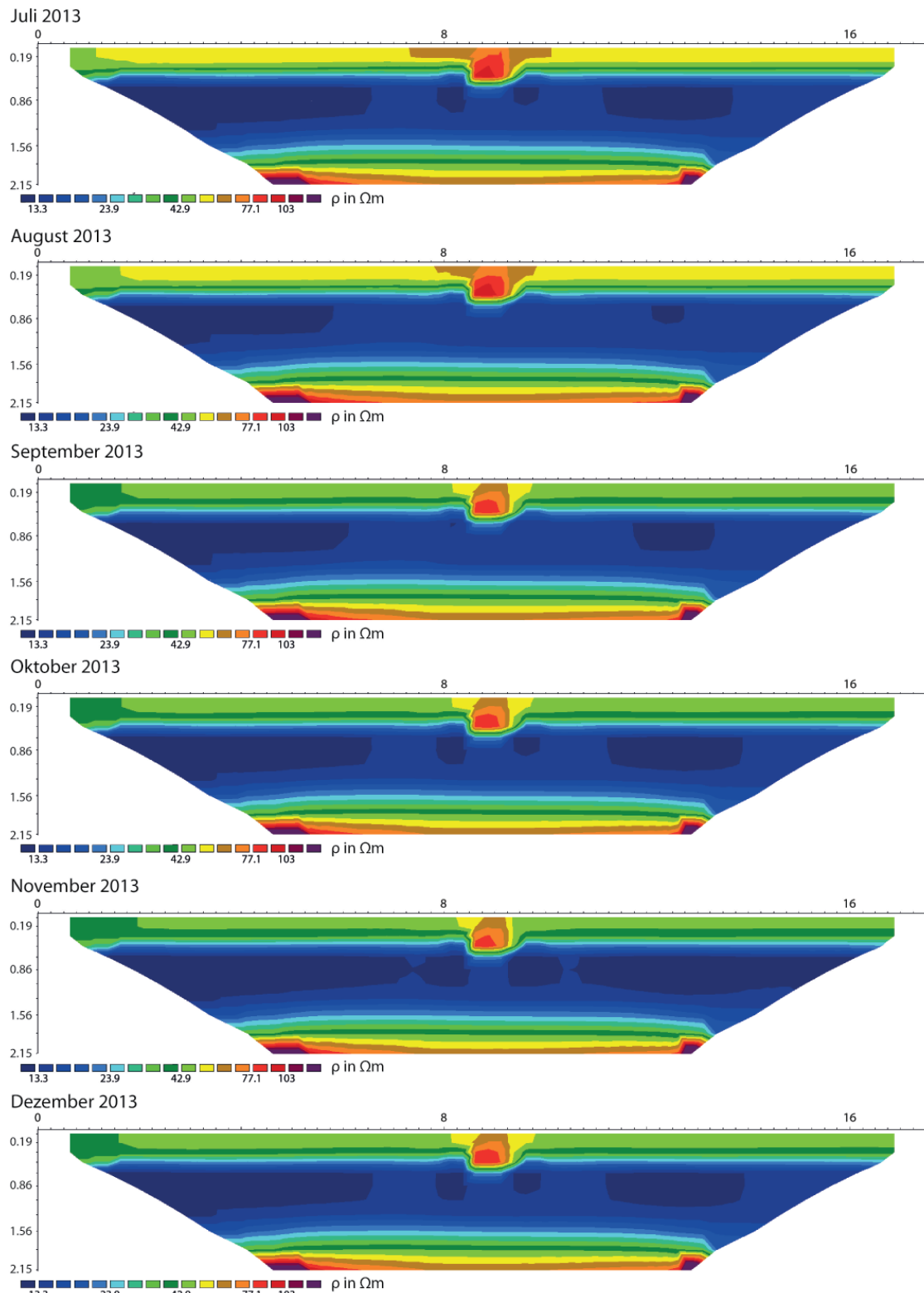


Abbildung 5-86: Berechnung des Einflusses der saisonalen Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes im Boden auf die Prospektionsergebnisse mit ERT für Juli 2013 bis Dezember 2013.

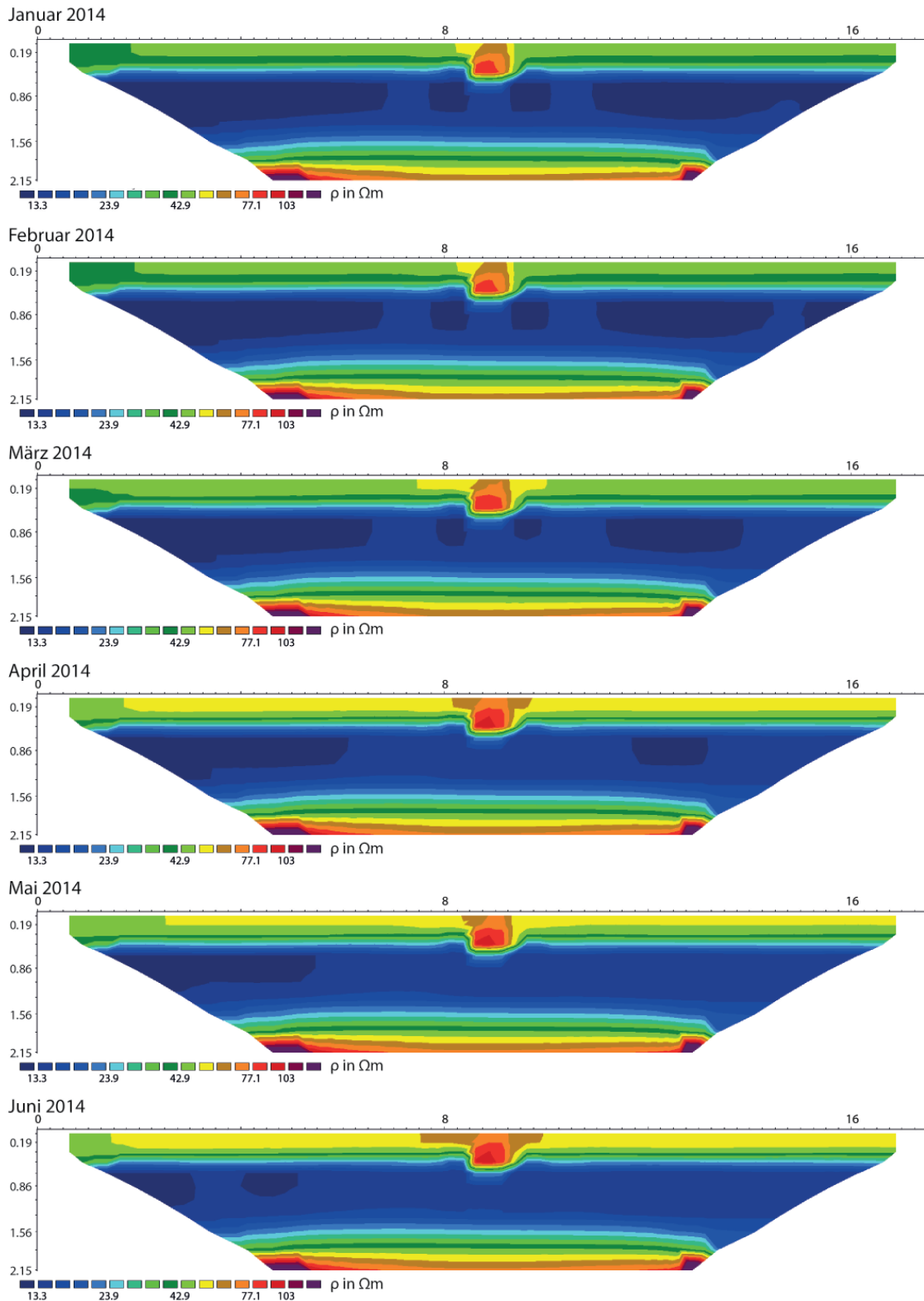


Abbildung 5-87: Berechnung des Einflusses der saisonalen Veränderung des volumetrischen Wassergehaltes im Boden auf die Prospektionsergebnisse mit ERT für Januar 2014 bis Juni 2014.

5.4.10 Zusammenfassung

Die geophysikalischen Prospektionsergebnisse bei Katzenbach bilden die Grundrisse der Nebengebäude der villa rustica zuverlässig als Anomalien mit unterschiedlich starker Ausprägung ab und ermöglichen eine detaillierte Rekonstruktion des Hofareals und Einschätzung des Erhaltungszustandes. Durch die archäologischen Grabungen konnte der Erhaltungszustand und Aufbau der Mauerstrukturen verifiziert werden. Die bodenkundliche und geoarchäologische Analyse von Grabungsschnitt 2 ermöglichte die Erstellung eines Widerstandsmodells mit ρ_m -Werten aus der Kombination von RHOADES-Formel und Perkolationsstheorie bzw. Effective Medium Theory. Die Perkolationsstheorie und Effective Medium Theory wurden außerdem zur Berechnung des ρ der Mauerstruktur eingesetzt. Das volumetrische Verhältnis von Steinen zu Bodenmaterial in der Mauerstruktur wurde auf Grundlage von Fotos optisch bestimmt. Eine Abweichung von 5 % bei dieser Bestimmung scheint die Ergebnisse nur gering zu beeinflussen, so dass diese Methode als zuverlässig angesehen werden kann. Der Vergleich der berechneten Werte mit den Ergebnissen der elektrischen Widerstandskartierung und der elektrischen Widerstandstomographie für Juni 2013 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

Ebenfalls auf Grundlage von Grabungsschnitt S2 wurde ein hydraulisches Modell der Bodenhorizonte und Mauerstruktur mit der Software HYDRUS erstellt. Die Wetterdaten einer lokalen Klimastation ermöglichten die Modellierung der saisonalen Veränderung der Verteilung des Wassergehaltes im Boden und der Mauerstruktur. Die Ergebnisse wurden verwendet, um die saisonale Veränderung des ρ von Boden und Mauerstruktur in Abhängigkeit vom Wassergehalt zu berechnen. Der Vergleich zwischen den berechneten Widerständen für Dezember 2013 und den im Gelände gemessenen Werten für Dezember 2011 zeigt eine gute Übereinstimmung, da sich die Verteilung des Wassers im Boden zu beiden Zeitpunkten auf Grund des zyklisch ablaufenden Klimas vermutlich ähnelt. Aus der Modellierung ergibt sich die stärkste Ausprägung der durch die Mauer verursachten Anomalie in der Trockenphase von April bis August, jedoch liegt der Unterschied zur feuchten Phase von September bis März nur bei ca. $2 \Omega\text{m}$. Die Mauerstrukturen bei Katzenbach können folglich trotz schlechtem Erhaltungszustand zu jeder Jahreszeit erfolgreich mit elektrischen Widerstandsmethoden prospektiert werden.

6. Synthese

Elektrische Widerstandsmethoden werden weitestgehend routinemäßig zur archäologischen Prospektion eingesetzt und liefern meist zuverlässige und leicht zu interpretierende Ergebnisse. Die Verwendung der elektrischen Widerstandskartierung zur kommerziellen Prospektion ist konstant zurückgegangen und wurde durch effektivere Methoden, wie z.B. das Bodenradar und Magnetometer, ersetzt. In der Forschung hat sich vor allem ERT als zuverlässige Methode zur Analyse von komplexen archäologischen Befunden etabliert (Kapitel 2.5).

Der ρ von Böden und archäologischen Strukturen wird durch größtenteils bekannte physikalische und chemische Parameter bestimmt, die als mehr oder weniger konstant (Textur, Bodenskelett), saisonal variierend (Wassergehalt, Temperatur) und unter bestimmten Umständen veränderlich (Struktur, Salinität) einzustufen sind (Kapitel 3). Hierbei scheint der Wassergehalt als dominanter und saisonal stark variierender Faktor eine zentrale Rolle bei der Ausprägung des ρ darzustellen. Der Einfluss von anderen saisonal variierenden Faktoren, wie z.B. der Temperatur, auf den ρ wird zwar in der Literatur diskutiert, jedoch weichen die Aussagen zum Ausmaß des Einflusses auf den ρ von archäologischen Strukturen voneinander ab. In der vorliegenden Arbeit wurde der Wassergehalt als dominanter, saisonal variierender Faktor angenommen (Kapitel 3.1).

Der elektrische Widerstand von Steinstrukturen ist ebenfalls abhängig von den physikalischen und chemischen Parametern der Struktur. Je nach Aufbau der Struktur ergibt sich der ρ durch eine Kombination von verschiedenen Phasen (Kapitel 5.1). Der ρ von Steinstrukturen kann sich unter Umständen langfristig (Kapitel 5.1.4), aber auch saisonal bedingt verändern (Kapitel 5.4).

Mögliche Faktoren die zur Nicht-Detektion von archäologischen Steinstrukturen durch elektrische Widerstandsmethoden führen könnten, wurden analysiert (Kapitel 2.4) und die Anwendung von elektrischen Widerstandsmodellen zur Überprüfung dieser Problemstellungen untersucht. Dabei zeigte sich, dass elektrische Widerstandsmodelle auf Grundlage von Geländemessungen in Kombination mit Hintergrundinformationen verwendet werden können, um die Erfolgsaussichten und Ergebnisse von elektrischen Widerstandsmethoden bei stark heterogenen Bodenverhältnissen (Kapitel 5.2.1), geringem Kontrast zwischen Steinstruktur und umgebenden Boden (Kapitel 5.2.2) und mächtiger Überdeckung der Steinstrukturen durch Kolluvien (Kapitel 5.3) abzuschätzen.

Die elektrischen Widerstandsmodelle wurden auf Grundlage von Informationen mit unterschiedlicher Qualität erstellt. Getestet wurde die Anwendung von ERT und ER in Kombination mit Hintergrundwissen aus geologischen Karten (Mauchenheim, Kapitel 5.2.1), ERT und ER mit Hintergrundwissen aus geologischen Karten und oberflächennahen Bohrprofilen (Offenheim, Kapitel 5.2.2), ERT in Kombination mit der detaillierten Analyse von Rammkernsondierungen (Eisenberg, Kapitel 5.3) sowie ERT und ER in Kombination mit der detaillierten Analyse von archäologischen Grabungen (Katzenbach, Kapitel 5.4). Der Maßstab der Modelle variiert und ist an die jeweiligen Fragestellungen angepasst. Die beste Übereinstimmung der Ergebnisse des elektrischen Widerstandsmodells mit den im Gelände gemessenen Werten ergab sich für die Fallstudie Katzenbach, da das Modell auf Grundlage von Grabungsergebnissen und detaillierten bodenkundlichen Analysen erstellt wurde. Bei der Erstellung der Modelle haben sich vor allem die korrekte Geometrie und realistische ρ_m -Werte der oberflächennahen Bodenhorizonte als besonders sensibel erwiesen. Geringe Abweichungen der Mächtigkeit der überlagernden Schicht können zu starken Abweichungen des Modellierungsergebnisses führen.

Die Berechnung des ρ des Feinbodens erfolgte mittels der empirisch abgeleiteten Pedotransfer-Funktion von RHOADES et al. (1989). Die Methode ergab eine zuverlässige Einschätzung des ρ von Böden mit niedrigem bis mittlerem Tongehalt (Katzenbach, Kapitel 5.4). Die RHOADES-Formel ist nicht dazu geeignet, um den Einfluss von lokalen Strukturanomalien, wie z.B. Trockenrissen, auf den ρ von Böden zu berechnen (Kapitel 5.3.3.1). Da Trockenrisse häufig im oberflächennahen Bereich auftreten, kann sich der ρ in diesen Bereichen besonders während länger anhaltenden Trockenperioden stark erhöhen.

Die Wahl der korrekten und effektivsten Pedotransfer-Funktion ist eine in der Literatur ausführlich diskutierte Fragestellung. Die RHOADES-Formel ist vor allem auf Grund ihrer einfach zu bestimmenden Eingangsparameter eine attraktive Methode, jedoch ergibt sich aus der geringen Sensitivität bei hohem Tongehalt des Bodens möglicherweise eine starke Unterschätzung des ρ . Generell kann die RHOADES-Formel in dem vorgeschlagenen Modellierungsablauf durch andere Pedotransfer-Funktionen ersetzt werden, sofern diese den Wassergehalt im Boden als Variable berücksichtigen.

Die Software HYDRUS konnte erfolgreich eingesetzt werden, um die saisonale Veränderung des Wassergehaltes in Bodenprofilen und geologischen Profilen auf Grundlage der hydraulischen Eigenschaften des Bodens zu modellieren. Die Verwendung von niedrigen hydraulischen Leitfähigkeiten in den als Steine definierten Geometrien ermöglichte die Abgrenzung dieser Objekte von dem im Modell

stattfindenden Wasserfluss. Der mit HYDRUS berechnete Wassergehalt wurde dazu verwendet, um die Veränderung des ρ von Bodenmaterial und Steinstrukturen durch den Einfluss des saisonal variierenden Wassergehaltes zu berechnen.

Der vorgestellte Modellierungsansatz muss möglicherweise um weitere Ebenen ergänzt werden. Insbesondere der Einfluss von saisonal bedingten Temperatur- und Strukturveränderungen im Boden kann die Prospektionsergebnisse beeinflussen. Neben einem klassischen Gelände-Monitoring in Kombination mit wiederholten elektrischen Widerstandsmessungen könnte die Software HYDRUS dazu genutzt werden, um den Wärmefluss in einem Bodenprofil auf Grundlage der hydraulischen Eigenschaften und lokalen Wetterdaten als Eingangsparameter zu modellieren. Diese Ergebnisse können möglicherweise als Grundlage dienen, um den ρ durch die in Kapitel 4.1.3 vorgestellte Formel zur Temperaturkorrektur anzupassen. Eine indirekt durch das Wetter ausgelöste saisonale Veränderung der Bodenstruktur, z.B. durch Trockenrisse und Ausbildung von Gefügestrukturen, kann ebenfalls als nicht zu vernachlässigender Faktor bei der Ausprägung des ρ angesehen werden. Auch in diesem Fall muss eine Einbindung der Strukturveränderungen als eigenständige Modellierungsebene überdacht werden. Mögliche Ansätze ergeben sich aus Modellierungen mit Inversions-Programmen (TABBAGH et al. 2007).

Im Fall von aus geophysikalischer Sicht mehrphasigen Mauerstrukturen (Katzenbach, Kapitel 5.4.8) ist bislang wenig über die saisonale Veränderung der physikalischen und chemischen Parameter bekannt. Die Ergebnisse der Fallstudie Katzenbach legen nahe, dass auch hierbei die Veränderung des Wassergehaltes eine wichtige Rolle spielt und eine Modellierung mit HYDRUS realistische Werte ergibt. Diese Hypothese muss maßstabsgetreu überprüft werden. Möglicherweise ist die Rekonstruktion von Steinstrukturen unter kontrollierten Bedingungen in großen Messboxen (REY et al. 2006; AL HAGREY & MÜLLER 2000) bei gleichzeitigem Monitoring des Wassergehaltes ein Ansatz zur Bestätigung der korrekten Berechnung des Wasserflusses durch HYDRUS.

Die Modellierung der Veränderung des Wassergehaltes im Boden kann möglicherweise auch zur Vorhersage der Erfolgsaussichten von anderen Prospektionsmethoden verwendet werden, sofern ein Zusammenhang zwischen der Methode und dem Wassergehalt besteht. In Kombination mit bodenkundlichen Informationen kann der Wassergehalt z.B. zur Berechnung der Dielektrizitätskonstante verwendet werden, was Aufschluss über die Erfolgsaussichten des Bodenradars ermöglicht. Eine weitere Anwendung ist im Bereich der Luftbildarchäologie denkbar, um den Zeitpunkt von durch den Wasserhaushalt hervorgerufenen Stressreaktionen der Pflanzen

vorherzusagen, die im Bereich von archäologischen Strukturen zu Bewuchsmerkmalen führen würden.

Der vorgestellte Modellierungsablauf beleuchtet verschiedene Methoden zur Gewinnung von Datensets, die zur Berechnung des ρ von Böden und archäologischen Steinstrukturen verwendet werden können. Das genaueste Modell konnte aus den Ergebnissen der archäologischen Grabung bei Katzenbach erstellt werden. Möglicherweise kann die Dokumentation von archäologischen Grabungen in Kombination mit bodenkundlichen Informationen zur Erstellung von realistischen geophysikalischen Modellen genutzt werden. Denkbar wäre auch die Verwendung von bodenkundlichen Informationen aus Datenbanken, wie z.B. der Soil Profile Database (SPADE) des European Soil Portal.

Literaturverzeichnis

- AALTONEN, J. (2001): Ground Monitoring using Resistivity Measurements in Glaciated Terrains. Dissertation, Royal Institute of Technology Stockholm.
- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart.
- AKBAR, F., KHAN, G., KHAN, M., HAQ, I., KHAN, S. & SALEH, A. (2014): Seasonal Variations in Soil Conditions, Ist Classification and Mapping of Dry Sub Tropical Region of Uthal, District Lasbela. *Journal of Natural Sciences Research* **4** (7): 17-21.
- AL CHALABI, M. & REES, A. (1962): An experiment on the effect of rainfall on electrical resistivity anomalies in the near surface. *Bonner Jahrbücher* **162**: 266-271.
- ALLEN, R., PEREIRA, L., RAES, D. & SMITH, M. (1998): Crop evaporation. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome.
- APPEL, E., WILHELM, J. & WALDHÖR, M. (1997): Archaeological Prospection of Wall Remains using Geoelectrical methods and GPR. *Archaeological Prospection* **4**: 219-229.
- ARCHIE, G. (1942): The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Trans. AIME* **146**: 54-62.
- ARGOTE-ESPINO, D., TEJERO-ANDRADE, A., CIFUENTES-NAVA, G., IRIARTE, L., FARIAS, S., CHÁVEZ, R. & LÓPEZ, F. (2013): 3D electrical prospection in the archaeological site of El Pahñù, Hidalgo State, Central Mexico. *Journal of Archaeological Science* **40**: 1213-1223.
- ASPIANLL, A. & GAFFNEY, C. (2001): The Schlumberger Array – Potential and Pitfalls in Archaeological Prospection. *Archaeological Prospection* **8**: 199-209.
- ASTIN, T., ECKARDT, H. & HAY, S. (2007): Resistivity Imaging Survey of the Roman Barrows at Bartlow, Cambridgeshire, UK. *Archaeological Prospection* **14**: 24-37.
- BAHR, K. (1997): Electrical anisotropy and conductivity distribution functions of fractal random networks and of the crust. The scale effect of connectivity. *Geophysical Journal International* **130**: 649-660.
- BAŞOKUR, A. & AKCA, I. (2011): Object-based model verification by a genetic algorithm approach: Application in archaeological targets. *Journal of Applied Geophysics* **74**: 167-174.

- BEAR, J. (1979): *Hydraulics of Groundwater*. New York.
- BERGE, M. & DRAHOR, M. (2011): Electrical Resistivity Tomography Investigations of Multilayered Archaeological Settlements: Part I – Modelling. *Archaeological Prospection* **18**: 159-171.
- BERNHARD, H., BRAUN, A., HIMMELMANN, U., KRECKEL, T. & STICKL, H. (2007): *Der römische Vicus von Eisenberg. Ein Zentrum der Eisengewinnung in der Nordpfalz*. Speyer.
- BESCOBY, D. & BOWDEN, W. (2013): The Detection and Mapping of Saxon Sunken-featured Buildings at Caistor St Edmund, Norfolk. *Archaeological Prospection* **20**: 53-57.
- BESSON, A. (2007): *Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la teneur en eau des sols à l'échelle parcellaire par la méthode de résistivité électrique*. Unpublizierte Dissertation, Université d'Orléans.
- BESSON, A., COUSIN, I., DORIGNY, A., DABAS, M. & KING, D. (2008): The Temperature Correction for the Electrical Resistivity Measurements in Undisturbed Soil Samples. Analysis of the Existing Conversion Models and Proposal of a New Model. *Soil Science* **173** (10): 707-720.
- BESSON, A., COUSIN, I., SAMOUËLIAN, A., BOIZARD, H. & RICHARD, G. (2004): Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. *Soil & Tillage Research* **79**: 239-249.
- BEVAN, B. (2000): An Early Geophysical Survey at Williamsburg, USA. *Archaeological Prospection* **7**: 51-58.
- BHATTACHARYA, S. & CHAKLADER, A. (1982): Review on Metal-Filled Plastics. Part 1. Electrical Conductivity. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **19** (1): 21-36.
- BIGALKE, J. (2000a): A Study Concerning the Conductivity of Porous Rock. *Physics and Chemistry of the Earth A* **25** (2): 189-194.
- BIGALKE, J. (2000b): Derivation of an equation to calculate the average conductivity of random networks. *Physica A* **285**: 295-305.
- BIRD, N. R. A. & PERRIER, E. (2010): Multiscale percolation properties of a fractal pore network. *Geoderma* **160**: 105-110.

- BODDICE, D., FRY, R., BECK, A., GAFFNEY, C., METJE, N. & SCHMIDT, A. (2013): The impact of environmental dynamics on multiple sensor responses over archaeological features, examples from the DART project. In: NEUBAUER, W. et al. (Hrsg.) (2013): *Archaeological Prospection. Proceedings of the 10th International Conference – Vienna*.
- BONGIOVANNI, M.V., DE LA VEGA, M. & BONOMO, N. (2011): Contribution of the resistivity method to characterize mud walls in a very dry region and comparison with GPR. *Journal of Archaeological Science* **38**: 2243-2250.
- BORÚS, H. (1999): Einsatz geophysikalischer Meßverfahren zur Abschätzung der hydraulischen Durchlässigkeit tonhaltiger Sedimente. Ein Beitrag zum Grundwasserschutz. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- BOSSUET, G., THIVET, M., TRILLAUD, S., MARMET, E., LAPAIGE, C., DABAS, M., HULLIN, G., FAVARD, A., COMBE, L., BARRES, E., LACAZE, S., AUBRY, L., CHASSANG, M., MOUROT, A. & CAMERLYNCK, C. (2012): City Map of Ancient Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, France-Comté, Eastern France). Contribution of Geophysical Prospecting Techniques. *Archaeological Prospection* **19**: 261-280.
- BRANDSTETTNER, L. (1908): Versuch einer Ortsgeschichte von Katzenbach. *Nordpfälzer Geschichtsblätter* **5**: 57-62.
- BRENGEL, P. (2012): Oligozäne Küstenformen und Sedimente im nördlichen Mainzer Becken. In: VÖTT, A. & VENZKE, J.-F. (Hrsg.) (2012): Beiträge der 29. Jahrestagung des Arbeitskreises „Geographie der Meere und Küsten“, 28. bis 30. April 2011 in Bremen. *Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung* **44**: 49-59.
- BRENGEL, P. (2012): Prospektion mit geoelektrischen Widerstandsverfahren in der Archäologie. *Berichte zur Archäologie in Rheinhessen und Umgebung* **5**: 119-137.
- BRENGEL, P. (2013): Prospection des fortifications de l'oppidum de Bibracte par la technique de la tomographie de résistivité électrique. In: *Rapport intermédiaire 2013 du programme quadriennal de recherché 2013-2016 sur le Mont Beuvray*.
- BRENGEL, P., JORDAN, D. & THIERRY-HILDEBRAND, B. (2013): Electrical resistivity of stone built structures. Approaches to technique, interpretation and modelling. In: NEUBAUER, W., TRINKS, I., SALISBURY, R. & EINWÖGERER, C. (Hrsg.) (2013): *Archaeological Prospection. Proceedings of the 10th International Conference – Vienna*.

- BREVIK, E., FENTON, T. & HORTON, R. (2004): Effect of Daily Soil Temperature Fluctuations on Soil Electrical Conductivity as Measured with the Geonics EM-38. *Precision Agriculture* **5**: 145-152.
- BRUGGEMAN, D. (1935): Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Annalen der Physik* **5** (24): 636-664.
- BRUNET, P., CLÉMENT, R. & BOUVIER, C. (2010): Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT). A case study in the Cevennes area, France. *Journal of Hydrology* **380**: 146-153.
- CANDANSAYAR, M. & BAŞOKUR, A. (2001): Detecting small-scale targets by the 2D inversion of two-sided three-electrode data: applications to an archaeological survey. *Geophysical Prospecting* **49**: 13-25.
- CAPUTO, R., PISCITELLI, S., OLIVETO, A., RIZZO, E., LAPENNA, V. (2003): The use of electrical resistivity tomographies in active tectonics. Examples from the Tyrnavos Basin, Greece. *Journal of Geodynamics* **36**: 19-35.
- CARDARELLI, E. & DI FILIPPO, G. (2009): Integrated geophysical methods for the characterization of an archaeological site (Massenzio Basilica – Roman forum, Rome, Italy). *Journal of Applied Geophysics* **68**: 508-521.
- CARDARELLI, E. & FISCHANGER, F. (2006): 2D data modelling by electrical resistivity tomography for complex subsurface geology. *Geophysical Prospecting* **54**: 121-133.
- CARDARELLI, E., CERCATO, M., CERRETO, A. & DI FILIPPO, G. (2010): Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. *Geophysical Prospecting* **58**: 685-695.
- CATT, L., WEST, J. & CLARK, R. (2009): The use of reference models from *a priori* data to guide 2D inversion of electrical resistivity tomography data. *Geophysical Prospecting* **57**: 1035-1048.
- CHANG, P.-Y., CHEN, C.-C., CHANG, S.-K., WANG, T.-B., WANG, C.-Y. & HSU, S.-K. (2012): An investigation into the debris flow induced by Typhoon Morakot in the Siaolin Area, Southern Taiwan, using the electrical resistivity imaging method. *Geophysical Journal International* **188**: 1012-1024.

- CHRÉTIEN, M., LATASTE, J., FABRE, R. & DENIS, A. (2014): Electrical resistivity tomography to understand clay behavior during seasonal water content variations. *Engineering Geology* **169**: 112-123.
- CLARK, A. (1990): *Seeing Beneath the Soil. Prospecting methods in archaeology*. London.
- COLLIER, L., HOBBS, B., NEIGHBOUR, T. & STRACHAN, R. (2003): Resistivity imaging survey of Capo Long Barrow, Aberdeenshire. Scottish Archaeological Internet Report 6. Internet: <http://archaeologydataservice.ac.uk/archives/archiveDownload?t=arch-310-1/dissemination/pdf/sair6.pdf> (14.01.2014).
- CORWIN, D. & LESCH, S. (2003): Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture. Theory, Principles, and Guidelines. *Agronomy Journal* **95**: 455-471.
- COSKUN, N. & SZYMANSKI, J. (1999): A Discussion on the Resolution of Two-Dimensional Resistivity Modelling. *Archaeological Prospection* **6**: 179-186.
- COUSIN, I. (2007): *Structure et propriétés hydriques des sols. Hétérogénéité spatiale et variabilité temporelle, de l'horizon à la parcelle agricole*. Habilitationsschrift, Université d'Orléans.
- COZZOLINO, M., MAURIELLO, P. & PATELLA, D. (2013): Resistivity Tomography Imaging of the Substratum of the Bedestan Monumental Complex at Nicosia, Cyprus. *Archaeometry* **56** (2): 331-350.
- CÜPPERS, H. (2005): *Die Römer in Rheinland-Pfalz*. Stuttgart.
- DABAS, M., TABBAGH, A. & TABBAGH, J. (1994): 3-D inversion in subsurface electrical surveying. I. Theory. *Geophysics Journal International* **119**: 975-990.
- DAHLIN, T. & LOKE, M. (1998): Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of Applied Geophysics* **38**: 237-249.
- DAHLIN, T. & ZHOU, B. (2006): Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics* **4**: 113-123.
- DE SMEDT, P., SAEY, T., LEHOUCK, A., STICHELBAUT, B., MEERSCHMAN, E., ISLAM, M., VAN DE VIJVER, E. & VAN MEIRVENNE, M. (2013): Exploring the potential of multi-receiver EMI survey for geoarchaeological prospection. A 90 ha dataset. *Geoderma* **199**: 30-36.

-
- DIAMANTI, N., TSOKAS, G., TSOURLOS, P. & VAFIDIS, A. (2005): Integrated Interpretation of Geophysical Data in the Archaeological Site of Europos (Northern Greece). *Archaeological Prospection* **12**: 79-91.
- DOGAN, M. & PAPAMARINOPOULOS, S. (2003): Geoelectric Prospection of a City Wall by Multi-electrode Resistivity Image Survey at the Prehistoric Site of Asea (Southern Greece). *Archaeological Prospection* **10**: 241-248.
- DRAHOR, M. (2006): Integrated geophysical studies in the upper part of Sardis archaeological site, Turkey. *Journal of Applied Geophysics* **59**: 205-223.
- EL-GAMILI, M., EL-MAHMOUDI, A., OSMAN, S., HASSANEEN, A. & METWALY, M. (1999): Geoelectric Resistance Scanning on Parts of Abydos Cemetery Region, Sohag Governorate, Upper Egypt. *Archaeological Prospection* **6**: 225-239.
- ELWASEIF, M & SLATER, L. (2010): Quantifying tomb geometries in resistivity images using watershed algorithms. *Journal of Archaeological Science* **37**: 1424-1436.
- FAUL, M. (2013): Studien zu römischen Einzelsiedlungen in Rheinhessen. *Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie* 233.
- FEHR, H. (1972): Die Vor- und Frühgeschichtliche Besiedlung der Kreise Kaiserslautern und Rockenhausen. *Veröffentlichungen der Pfälzischen Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften in Speyer*, Band 61.
- FRIEDMAN, S. (2005): Soil properties influencing apparent electrical conductivity. A review. *Computers and Electronics in Agriculture* **46**: 45-70.
- FRY, R. (2014): Time-lapse Geophysical Investigations over Known Archaeological Features Using Electrical Resistivity Imaging and Earth Resistance. Unpublizierte Dissertation, University of Bradford.
- FRY, R., BODDICE, D., STOTT, D., BECK, A., GAFFNEY, C., METJE, N. & SCHMIDT, A. (2012): What a difference a year makes. The impact of environmental dynamics on multiple sensor responses over archaeological features, an example from Cherry Copse, Cirencester. In: NSGG, *Recent Work in Archaeological Geophysics 2012*: 27-31.
- GAFFNEY, V. & GATER, J. (2003): *Revealing the Buried Past. Geophysics for Archaeologists.* Gloucestershire.

- GAFFNEY, V., PATTERSON, H., PIRO, S., GOODMAN, D. & NISHIMURA, Y. (2004): Multimethodological Approach to Study and Characterize Forum Novum (Vescovio, Central Italy). *Archaeological Prospection* **11**: 201-212.
- GARRÉ, S., GÜNTHER, T., DIELS, J. & VANDERBORGH, J. (2012): Evaluating Experimental Design of ERT for Soil Moisture Monitoring in Contour Hedgerow Intercropping Systems. *Vadose Zone Journal* **11** (4): o. S.
- GIAO, P., CHUNG, S., KIM, D. & TANAKA, H. (2003): Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. *Journal of Applied Geophysics* **52**: 157-175.
- GIBSON, P. & GEORGE, D. (2006): Geophysical Investigation of the Site of the Former Monastic Settlement, Clonard, County Meath, Ireland. *Archaeological Prospection* **13**: 45-56.
- GLOVER, P. (2010): The Discovery of an Anglo-Saxon *Grubenhaus* at New Bewick, Northern UK using Electrical Surveying and Predictive Deconvolution. *Archaeometry* **52**: 320-342.
- GOLDBERG, P. & MACPHAIL, R. (2006): *Practical and Theoretical Geoarchaeology*. Oxford.
- GREINWALD, S. & THIERBACH, R. (1997): Elektrische Eigenschaften der Gesteine. In: BEBLO, M. (Hrsg.) (1997): *Umweltgeophysik*. Berlin: 89-96.
- GRIFFITHS, D. & BARKER, R. (1994): Electrical Imaging in Archaeology. *Journal of Archaeological Science* **21**: 153-158.
- GÜNTHER, T., RÜCKER, C. & SPITZER, K. (2006): Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – II. Inversion. *Geophysical Journal International* **166**: 506-517.
- HÄSSEL, H. (1962): Die Vor- und Frühgeschichtlichen Fundes des Landkreises Rockenhausen/Pfalz. Sonderdruck des Nordpfälzer Geschichtsverein **22**: 28-30.
- HAUCK, C. & SCHEUERMANN, A. (2005): Comparing time domain reflectometry and electrical resistivity tomography measurements for estimating soil water distribution. In: *Proceedings of the 6th Conference on “Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances”*, ISEMA 2005, Weimar, Germany, May29 – June 1: 511-518.

- HAUCK, C. (2001): Geophysical methods for detecting permafrost in high mountains. Dissertation ETH Zürich. Internet: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:24084/eth-24084-02.pdf> (28.01.2014).
- HAUCK, C., VONDER MÜHLL, D. & MAURER, H. (2003): Using DC resistivity tomography to detect and characterize mountain permafrost. *Geophysical Prospecting* **51**: 273-284.
- HAYASHI, M. (2003): Temperature-Electrical Conductivity Relation of Water for Environmental Monitoring and Geophysical Data Inversion. *Environmental Monitoring and Assessment* **96**: 119-128.
- HE, B., CAI, Y., RAN, W. & JIANG, H. (2014): Spatial and seasonal variations of soil salinity following vegetation restoration in coastal saline land in eastern China. *Catena* **118**: 147-153.
- HECHT, S. & FASSBINDER, J. (2006): Der Blick in den Untergrund. Magnetometrie und Geoelektrische Tomographie in der Geoarchäologie. *Geographische Rundschau* **58** (4): 38-45.
- HEINZELMANN, M. & JORDAN, D. (2012): Approaching a Sabine-Roman Town and its Territory. In: Vermeulen, F., Burgers, G.-J., Keay, S. & C. Corsi (Hrsg.) (2012): *Urban Landscape Survey in Italy and the Mediterranean*: 23-33.
- HESSE, A. (1966a): The importance of climatologic observations in archaeological prospecting. *Prospezioni Archeologiche* **1**: 11-13.
- HESSE, A. (1966b): *Prospections géophysiques à faible profondeur*. Paris.
- HESSE, A., BARBA, L., LINK, K. & ORTIZ, A. (1997): A Magnetic and Electrical Study of Archaeological Structures at Loma Alta, Michoacan, Mexico. *Archaeological Prospection* **4**: 53-67.
- HLAVÁČIKOVÁ, H., NOVÁK, V. & RODNÝ, M. (2013): Infiltration Into a Stony Soil. Modeling of the Process Using HYDRUS Codes. In: ŠIMUNEK, J., VAN GENUCHTEN, M. & R. KODEŠOVÁ (Hrsg.) (2013): *Proceedings of the 4th International Conference „HYDRUS Software Applications to Subsurface Flow and Contaminant Transport Problems“*, March 21-22, 2013: 127-134.

- HORNUNG, S. & BRAUN, A. (2010): Neue Forschungen zur Besiedlung des Dollbergplateaus in der Frühlatènezeit. Gedanken zu Datierung und Funktion der ältesten Abschnittsbefestigung im Bereich des „Hunnenrings“ von Otzenhausen, Lkr. St. Wendel. In: HORNUNG, S. (Hrsg.) (2010): Mensch und Umwelt I - Archäologische und naturwissenschaftliche Forschungen zum Wandel der Kulturlandschaft um den „Hunnenring“ bei Otzenhausen, Gem. Nonnweiler, Lkr. St. Wendel. Universitätsforsch. Prähist. Arch. 192.
- HOSSAIN, L., HOSSAIN, M., SALAM, M. & RUBAIYAT, A. (2012): Seasonal variation of soil salinity in coastal areas of Bangladesh. *International Journal of Environmental Science, Management and Engineering Research* **1** (4): 172-178.
- HUNT, A. (2005): Basic Transport Properties in Natural Porous Media. *Continuum Percolation Theory and Fractal Model. Complexity* **10** (3): 22-37.
- JACOBS, F. & MEYER, H. (1992): *Geophysik. Signale aus der Erde*. Leipzig.
- JORDAN, D. (2009a): *The Electrical Resistivity of Archaeological Remains*. Unpublizierte Dissertation, University of Reading.
- JORDAN, D. (2009b): Hof Effective is Geophysical Survey? A Regional Review. *Archaeological Prospection* **16**: 77-90.
- KELLER, G. & FRISCHKNECHT, F. (1966): *Electrical methods in geophysical prospecting*. Oxford.
- KERTZ, W. (1999): *Geschichte der Geophysik*. In: KERTZ, R. & K.-H. GLASSMEIER (Hrsg.) (1999): *Zur Geschichte der Wissenschaften, Band 3*. Hildesheim.
- KNÖDEL, K., LANGE, G. & VOIGT, H.-J. (2007): *Environmental Geology. Handbook of Field Methods and Case Studies*. Berlin.
- KOCH, K.-H. & SCHINDLER, R. (1994): *Vor- und frühgeschichtliche Burgwälle des Regierungsbezirkes Trier und des Kreises Birkenfeld*. Mainz.
- KRIESEL, O. (1978): *Zur vorgeschichtlichen Besiedlung des Kreises Kirchheimbolanden (Pfalz)*. *Veröffentlichungen der Pfälzischen Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften in Speyer*, Band 66.
- LALOY, E., JAVAUX, M., VANCLOOSTER, M., ROISIN, C. & BIELDERS, C. (2011): Electrical Resistivity in a Loamy Soil. Identification of the Appropriate Pedo-Electrical Model. *Vadose Zone Journal* **10** (3): 1023-1033.

- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ (=LGB-RLP) (1998):
Geologische Karte von Rheinland-Pfalz 1:25.000. Blatt 6214, Alzey. Mainz.
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ (=LGB-RLP) (2005):
Geologie von Rheinland-Pfalz. Stuttgart.
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ (=LGB-RLP) (2010):
Geologische Karte von Rheinland-Pfalz 1:25.000. Blatt 6312, Rockenhausen.
Mainz.
- LEOPOLD, M., GANNAWAY, E., VÖLKELE, J., HAAS, F., BECHT, M., HECKMANN, T., WESTPHAL,
M. & ZIMMER, G. (2011): Geophysical Prospection of a Bronze Foundry on the
Southern Slope of the Acropolis at Athens, Greece. *Archaeological Prospection*
18: 27-41.
- LEUCCI, G., GRECO, F., DE GIORGI, L. & MAUCERI, R. (2007): Three-dimensional image of
seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography survey in the
castle of Occhiola (Sicily, Italy). *Journal of Archaeological Science* **34**: 233-242.
- LI, Y. & SPITZER, K. (2002): Three-dimensional DC resistivity forward modelling using
finite elements in comparison with finite-difference solutions. *Geophysical Journal
International* **151**: 924-934.
- LINDE, N., BINLEY, A., TRYGGVASON, A., PEDERSEN, L. & REVIL, A. (2006): Improved
hydrogeophysical characterization using joint inversion of cross-hole electrical
resistance and ground-penetrating radar travelttime data. *Water Resources Research*
42: 1-16.
- LOKE, M. & BARKER, R. (1996): Rapid least-squares inversion of apparent resistivity
pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* **44**: 131-152.
- LOKE, M. & DAHLIN, T. (2002): A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton
methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics* **49**: 149-
162.
- LOKE, M. (1994): The inversion of two-dimensional resistivity data. Unpublizierte
Dissertation, University of Birmingham.
- LOKE, M. (2002): Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite-difference and
finite-element methods. RES2DMOD ver. 3.01 Manual.

- LOKE, M., ACWORTH, I. & DAHLIN, T. (2003): A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, **34**: 182-187.
- MATTHES, B. (2012): Die geoelektrische Widerstandstomographie als Methode zur Abbildung archäologischer Strukturen. Eine vergleichende methodische Studie aus Südwestdeutschland. Dissertation Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. Internet: http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/14000/3/Matthes_Dissertation.pdf (28.01.2014).
- MAURIELLO, P., MONNA, D. & PATELLA, D. (1998): 3D geoelectric tomography and archaeological applications. *Geophysical Prospecting* **46**: 543-570.
- McLACHLAN, D., BLASZKIEWICZ & NEWNHAM, R. (1990): Electrical Resistivity of Composites. *Journal of the American Ceramic Society* **73** (8): 2187-2203.
- MOL, L. & PRESTON, P. (2010): The Writing's in the Wall. A Review of New Preliminary Applications of Electrical Resistivity Tomography within Archaeology. *Archaeometry* **52**: 1079-1095.
- MURDIE, R., GOULTY, N., WHITE, R., BARRATT, G., CASSIDY, N. & GAFFNEY, V. (2003): Comparison of Geophysical Techniques for Investigating an Infilled Ditch at Bury Walls Hill Fort, Shropshire. *Archaeological Prospection* **10**: 265-276.
- NADLER, A. (1991): Effect of Soil Structure on Bulk Soil Electrical Conductivity (EC_a) Using the TDR and 4P Techniques. *Soil Science Journal* **8**: 199-203.
- NEGRI, S., LEUCCI, G. & MAZZONE, F. (2008): High resolution 3D ERT to help GPR data interpretation for researching archaeological items in a geologically complex subsurface. *Journal of Applied Geophysics* **65**: 111-120.
- NEIGHBOUR, T., STRACHAN, R. & HOBBS, B. (2001): Resistivity Imaging of the Linear Earthworks at the Mull of Galloway, Dumfries and Galloway. *Archaeological Prospection* **8**: 157-162.
- NOEL, M. & XU, B. (1991): Archaeological investigation by electrical resistivity tomography. A preliminary study. *Geophysical Journal International* **107**: 95-102.
- NOVÁK, V., KŇAVA, K. & ŠIMUNEK, J. (2011): Determining the influence of stones on hydraulic conductivity of saturated soils using numerical method. *Geoderma* **161**: 177-181.

- NOWACZINSKI, E., SCHUKRAFT, G., HECHT, S., RASSMANN, K., BUBENZER, O. & EITEL, B. (2012): A Multimethodological Approach for the Investigation of Archaeological Ditches. Exemplified by the Early Bronze Age Settlement of Fidvár Near Vrábľe (Slovakia). *Archaeological Prospection* **19**: 281-295.
- O'ROURKE, T. & GIBSON, P. (2009): Geophysical Investigation of the Environs of Rattin Castle Tower House, County Westmeath, Ireland. *Archaeological Prospection* **16**: 65-75.
- OFENLOCH, D. (2014): Die römische Palastvilla von Offenheim (Kr. Alzey-Worms) im geophysikalischen Messbild. Unpublizierte Magister-Arbeit, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- ORLANDO, L. (2013): GPR to constrain ERT data inversion in cavity searching. Theoretical and practical applications in archaeology. *Journal of Applied Geophysics* **89**: 35-47.
- PAPADOPOULOS, N., TSOKAS, G., DABAS, M., YI, M.-J., KIM, J.-H. & TSOURLOS, P. (2009): Three-Dimensional Inversion of Automatic Resistivity Profiling Data. *Archaeological Prospection* **16**: 267-278.
- PAPADOPOULOS, N., TSOURLOS, P., PAPAACHOS, C., TSOKAS, G., SARRIS, A. & KIM, J.-H. (2011): An algorithm for fast 3D inversion of surface electrical resistivity tomography data. Application on imaging buried antiquities. *Geophysical Prospecting* **59**: 557-575.
- PAPADOPOULOS, N., TSOURLOS, P., TSOKAS, G. & SARRIS, A. (2006): Two-dimensional and Three-dimensional Resistivity Imaging in Archaeological Site Investigation. *Archaeological Prospection* **13**: 163-181.
- PAPADOPOULOS, N., YI, M.-J., KIM, J.-H., TSOURLOS, P. & TSOKAS, G. (2010): Geophysical investigation of tumuli by means of surface 3D Electrical Resistivity Tomography. *Journal of Applied Geophysics* **70**: 192-205.
- PARKYN, A. (2010): A Survey in the Park. Methodological and Practical Problems Associated with Geophysical Investigation in a Late Victorian Municipal Park. *Archaeological Prospection* **17**: 161-174.
- PASSARO, S. (2010): Marine electrical resistivity tomography for shipwreck detection in very shallow water. A case study from Agropoli (Salerno, southern Italy). *Journal of Archaeological Science* **37**: 1989-1998.

- PLASS, W. (1966): Das Tertiär des Eisenbergers Beckens und Grünstädter Berges (Nordpfalz). Unpublizierte Dissertation, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- PSOMIADIS, D., TSOURLOS, P. & ALABANAKIS, K. (2009): Electrical resistivity tomography mapping of beachrocks. Application to the island of Thassos (N. Greece). *Environmental Earth Sciences* **59**: 233-240.
- RADSTAKE, F., GEIRNAERT, W., KLEINENDORST, T. & TERHELL, J. (1991): Applications of Forward Modeling Resistivity Profiles. *Groundwater* **29** (1): 13-17.
- REVL, A. & P. GLOVER (1998): Nature of surface electrical conductivity in natural sands, sandstones and clays. *Geophysical Research Letters* **25**: 691-694.
- REY, E., JONGMANS, D., GOTTELAND, P. & GARAMBOIS, S. (2006): Characterisation of soils with stony inclusions using geoelectrical measurements. *Journal of Applied Geophysics* **58**: 188-201.
- RHOADES, J., CHANDUVI, F. & LESCH, S. (1999): Soil salinity assessment. Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. FAO Irrigation and Drainage Paper 57.
- RHOADES, J., MANTEGHI, N., SHOUSE, P. & ALVES, W. (1989): Soil electrical conductivity and soil salinity. New formulations and calibrations. *Soil Science Society of America Journal* **53**: 433-439.
- RHOADES, J., RAATS, P. & PRATHER, R. (1976): Effects of Liquid-phase Electrical Conductivity, Water Content, and Surface Conductivity on Bulk Soil Electrical Conductivity. *Soil Science Society of America Journal* **40**: 651-655.
- RICHARDS, L. (1931): Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums. *Journal of Applied Physics* **1**: 318.
- ROBERTS, J. & WILDENSCHILD, D. (2004): Electrical Properties of Sand-Clay Mixtures Containing Trichloroethylene and Ethanol. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* **9** (1): 1-10.
- ROTHE, A., WEIS, W., KREUTZER, K., MATTHIES, D., HESS, U. & ANSORGE, B. (1997): Changes in soil structure caused by the installation of time domain reflectometry probes and their influence on the measurement of soil moisture. *Water Resources Research* **33** (7): 1585-1593.

- SAEY, T., DE SMEDT, P., MEERSCHMAN, E., ISLAM, M., MEEUWS, F., VAN DE VIJVER, E., LEHOUCK, A. & VAN MEIRVENNE, M. (2012): Electrical Conductivity Depth Modelling with a Multireceiver EMI Sensor for Prospecting Archaeological Features. *Archaeological Prospection* **19**:21-30.
- SAMOUËLIAN, A., COUSIN, I., TABBAGH, A., BRUAND, A. & RICHARD, G. (2005): Electrical resistivity survey in soil science. A review. *Soil & Tillage Research* **83**: 173-193.
- SASS, O. & VILES, H. (2010): Wetting and drying of masonry walls. 2D-resistivity monitoring of driving rain experiments on historic stonework in Oxford, UK. *Journal of Applied Geophysics* **70**: 72-83.
- SASS, O. (2003): Moisture distribution in rock walls derived from 2D-resistivity measurements. In: *Geophysical applications in geomorphology (=Zeitschrift für Geomorphologie Supplement Band 132)*: 51-69.
- SAXTON, K. & RAWLS, W. (2006): Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal* **70**: 1569-1578.
- SAXTON, K., RAWLS, W., ROMBERGER, J. & PAPENDICK, R. (1986): Estimating Generalized Soil-water Characteristics from Texture. *Soil Science Society of America Journal* **50**: 1031-1036.
- SCHAAP, M., LEIJ, F. & VAN GENUCHTEN, M. (2001): Rosetta. A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* **251**: 163-176.
- SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., HARTGE, K.-H. & SCHWERTMANN, U. (¹¹1984): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Stuttgart.
- SCHÄFER, P. (2000): Zur Stratigraphie und Genese der tertiären Sedimente zwischen Eisenberg und Lautersheim im süd-westlichsten Teil des Mainzer Beckens. *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins* **82**: 175-222.
- SCHÄFER, P. (2012): *Mainzer Becken. Stratigraphie, Paläontologie, Exkursionen. (= Sammlung geologischer Führer, Band 79)*. Stuttgart.
- SCHINDLER, R. (1968): *Studien zum vorgeschichtlichen Siedlungs- und Befestigungswesen des Saarlandes*. Trier.

-
- SCHITTER, W. (1987): Katzenbach. Chronik eines Dorfes. Heimatkundliche Schriften des Donnersbergkreises, Band 2.
- SCHMIDT, A. (2013): Earth Resistance for Archaeologists. Lanham.
- SCHULZE, B. (2007): Ein repräsentativer Bauplatz in bester Lage. Der römische Gutshof auf dem Falkensaß bei Katzenbach. Donnersberg Jahrbuch **30**: 132-137.
- SCHWARTZ, B., SCHREIBER, M. & YAN, T. (2008): Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging. Journal of Hydrology **362**: 234-246.
- SCOLLAR, I., TABBAGH, A., HESSE, A. & HERZOG, I. (1990): Archaeological Prospecting and Remote Sensing. Cambridge.
- SÉGER, M., COUSIN, I., FRISON, A., BOIZARD, H. & RICHARD, G. (2009): Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using in situ 2D and 3D electrical resistivity measurements. Soil & Tillage Research **103**: 387-398.
- SELADJI, S., COSENZA, P., TABBAGH, A., RANGER, J. & RICHARD, G. (2010): The effect of compaction on soil electrical resistivity. A laboratory investigation. European Journal of Soil Science **61**: 1043-1055.
- SEN, P., GOODE, P. & SIBBIT, A. (1988): Electrical conduction in clay bearing sandstones at low and high salinities. Journal of Applied Physics **63**: 4832-4840.
- SHIMA, H. & SAKAYAMA, T. (1987): Resistivity tomography. An approach to 2-D resistivity inverse problems. In: Society of Exploration Geophysicists (Hrsg.) (1987): SEG Technical Program Expanded Abstracts 1987: 59-61.
- SIMILOX-TOHON, D., VANNESTE, K., SINTUBIN, M., MUCHEZ, P. & WAEKENS, M. (2004): Two-dimensional Resistivity Imaging. A Tool in Archaeoseismology. An Example from Ancient Sagalassos (Southwest Turkey). Archaeological Prospection **11**: 1-18.
- SIMON, F.-X., KOZIOL, A. & THIESSON, J. (2012): Investigating Magnetic Ghosts on an Early Middle Age Settlement. Comparison of Data from Stripped and Non-stripped Areas. Archaeological Prospection **19**: 191-200.
- ŠIMUNEK, J. & VAN GENUCHTEN, M. (2008): Modeling Nonequilibrium Flow and Transport Processes Using HYDRUS. Vadose Zone Journal **7** (2): 782-797.

- ŠIMUNEK, J., VAN GENUCHTEN, M. & ŠEJNA, M. (2008): Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. *Vadose Zone Journal* **7** (2): 587-600.
- SINGH, U., TIWARI, R. & SINGH, S. (2013): Neural network modeling and prediction of resistivity structures using VES Schlumberger data over a geothermal area. *Computers and Geosciences* **52**: 246-257.
- SOUTO, F., DAFONTE, J. & ESCARIZ, M. (2008): Design and air-water calibration of a waveguide connector for TDR measurements of soil electric permittivity in stony soils. *Biosystems Engineering* **101**: 463-471.
- SPRATER, F. (1924): Römische Brunnenanlage von Katzenbach. *Germania* **8**: 78-80.
- SPRATER, F. (1930): Die Pfalz unter den Römern. Veröffentlichungen der Pfälzischen Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften in Speyer, Band 8.
- SZALAI, S. & SZARKA, L. (2008): On the classification of surface geoelectric arrays. *Geophysical Prospecting* **56**: 159-175.
- TABBAGH, A. & COSENZA, P. (2007): Effect of microstructure on the electrical conductivity of clay-rich systems. *Physics and Chemistry of the Earth* **32**: 154-160.
- TABBAGH, A., DABAS, M., HESSE, A. & PANISSOD, C. (2000): Soil resistivity. A non-invasive tool to map soil structure horizonation. *Geoderma* **97**: 393-404.
- TEIXIDO, T., ARTIGOT, E., PEÑA, J., MOLINA, F., NÁJERA, T. & CARRION, F. (2013): Geoarchaeological Context of the Motilla de la Vega Site (Spain) Based on Electrical Resistivity Tomography. *Archaeological Prospection* **20**: 11-22.
- TONKOV, N. & LOKE, M. (2006): A Resistivity Survey of a Burial Mound in the Valley of the Thracian Kings. *Archaeological Prospection* **13**: 129-136.
- TÓTH, G., ADHIKARI, K., VÁRALLYAY, G., TÓTH, T., BÓDIS, K. & STOLBOVOY, V. (2008): Updated map of salt affected soils in the European Union. In: Tóth, G., L. Montanarella & E. Rusco (Hrsg.) (2008): Threats to Soil Quality in Europe. JRC Scientific and Technical Reports. Luxembourg.
- TSOKAS, G., TSOURLOS, P., STAMPOLIDIS, A., KATSONOPOULOU, D. & SOTER, S. (2009): Tracing a Major Roman Road in the Area of Ancient Helike by Resistivity Tomography. *Archaeological Prospection* **16**: 251-266.

- TSOKAS, G., TSOURLOS, P., VARGEMEZIS, G. & NOVACK, M. (2008): Non-destructive Electrical Resistivity Tomography for Indoor Investigation. The Case of Kapnikarea Church in Athens. *Archaeological Prospection* **15**: 47-61.
- TSOURLOS, P. & TSOKAS, G. (2011): Non-destructive Electrical Resistivity Tomography Survey at the South Walls of the Acropolis of Athens. *Archaeological Prospection* **18**: 173-186.
- TSOURLOS, P. (1995): Modelling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data. Unpublizierte Dissertation, University of York.
- VAN GENUCHTEN, M. (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal* **44** (5): 892-898.
- VÖTT, A., LANG, F., BRÜCKNER, H., GAKI-PAPANASTASSIOU, MAROUKIAN, H., PAPANASTASSIOU, D., GIANNIKOS, A., HADLER, H., HANDL, M., NTAGERETZIS, K., WILLERSHÄUSER, T. & ZANDER, A. (2011): Sedimentological and geoarchaeological evidence of multiple tsunamigenic imprint on the Bay of Palairos-Pogonia (Akarnania, NW Greece). *Quaternary International* **242**: 213-239.
- WAKE, T., MOJICA, A., DAVIS, M., CAMPBELL, C. & MENDIZABAL, T. (2012): Electrical Resistivity Surveying and Pseudo-Three-Dimensional Tomographic Imaging at Sitio Drago, Bocas del Toro, Panama. *Archaeological Prospection* **19**: 49-58.
- WALLING, H. (1971): Ausgrabung einer römischen villa rustica bei Katzenbach. *Nordpfälzer Geschichtsverein* **51** (3): 51-57.
- WAXMAN, M. & SMITS, L. (1968): Electrical Conductivities in Oil-Bearing Shaly Sands. *Society of Petroleum Engineers Journal* **243**: 107-122.
- WECKMÜLLER, & BURGER, D. (2013): Die Römische Palastvilla von Mauchenheim (Lkr. Alzey). *Berichte zur Archäologie in Rheinhessen und Umgebung Sonderband 1*: 29-47.
- WILKINSON, P., LOKE, M., MELDRUM, P., CHAMBERS, J., KURAS, O., GUNN, D. & OGILVY, R. (2012): Practical aspects of applied optimized survey design for electrical resistivity tomography. *Geophysical Journal International* **189**: 428-440.

- WILLERSHÄUSER, T., VÖTT, A., HALDER, H., HENNING, P. & NTAGERETZIS, K. (2012): Evidence of high-energy impact near Kato Samiko, Gulf of Kyparissia (western Peloponnese, Greece) during history. In: VÖTT, A. & J.-F. VENZKE (Hrsg.) (2012): Beiträge der 29. Jahrestagung des Arbeitskreises „Geographie der Meere und Küsten“, 28. bis 30. April 2011 in Bremen. Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung **44**: 26-36.
- WUNDERLICH, T., PETERSEN, H., AL HAGREY, S. & RABELL, W. (2013): Pedophysical Models for Resistivity and Permittivity of Partially Water-Saturated Soils. *Vadose Zone Journal* **12** (4).
- ZEEB-LANZ, A. (2008): Der Donnersberg. Eine bedeutende spätkeltische Stadtanlage. Speyer.
- ZEYEN, H., PESSEL, M., LEDÉSERT, B., HÉBERT, R., BARTIER, D., SABIN, M. & LALLEMANT, S. (2011): 3D electrical resistivity imaging of the near-surface structure of mud-volcano vents. *Tectonophysics* **509**: 181-190.