

INAUGURAL - DISSERTATION

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Naturwissenschaftlich-Mathematischen

Gesamtfakultät

der

Ruprecht-Karls-Universität

Heidelberg

vorgelegt von: Diplom-Physikerin Barbara Matthes

aus: Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung:

15.10.2012

**Die GEOELEKTRISCHE WIDERSTANDSTOMOGRAPHIE als
Methode zur Abbildung archäologischer Strukturen
- Eine vergleichende methodische Studie
aus Südwestdeutschland**

Gutachter: Prof. Dr. Bernhard Eitel
apl. Prof. Dr. Ulrich Glasmacher

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Danksagung	VIII
Zusammenfassung	IX
Abstract	X
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeine Einleitung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise bei der vergleichenden Studie	3
1.3 Aktueller Stand der Forschung	4
2 Methoden	7
2.1 Gleichstromgeoelektrik	7
2.1.1 Elektrische Eigenschaften von Böden und Gesteinen	7
2.1.2 Physikalischer Hintergrund	8
2.1.3 Vierpunktverfahren	11
2.1.4 Elektrodenkonfigurationen	14
2.1.5 Das Verfahren der Geoelektrischen Widerstandstomographie (ERT)	21
2.2 Bodenkundliche Feld- und Labormethoden	25
3 Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren	27
3.1 Einführung in das Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren	27
3.1.1 Geologie, Böden, Klima und Hydrologie	28
3.1.2 Besiedlungsgeschichte des Untersuchungsgebietes und archäologische Fundlage im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren	29
3.1.3 Bedeutung, Lage und Aufbau keltischer Viereckschanzen	32
3.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren	34
3.2.1 Bodenkundliche Untersuchungen und geoelektrische Messungen im Umfeld der keltischen Viereckschanze (off-site)	34
3.2.1.1 Identifizierung der Böden und Vorstellung der Leitprofile	36
3.2.1.2 Durchführung und Ergebnisse der Geoelektrischen Widerstandstomographie zur Erkundung des Geländes um die Viereckschanze	46
3.2.2 Modell mit unterschiedlichen geologischen Schichten	56
3.2.3 Erkundung der keltischen Viereckschanze (on-site)	56
3.2.3.1 Geomagnetische Prospektion und Kartenüberlagerung	56

3.2.3.2	Durchführung und Ergebnisse der Geoelektrischen Widerstandstomographie zur Erkundung der keltischen Viereckschanze	61
3.2.4	Vergleich der Ergebnisse der Geoelektrischen Widerstandstomographie mit den Befunden der archäologischen Grabungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren	69
3.2.4.1	Archäologische Grabung in Sinsheim-Dühren im November 2006 und Vergleich mit dem ERT-Profil 2a	69
3.2.4.2	Archäologische Grabung in Sinsheim-Dühren im März/April 2008 und Vergleich mit dem ERT-Profil 12	74
3.2.5	Modellerstellung eines simulierten Spitzgrabens	78
3.2.6	Zusammenfassung der Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren	83
4	Untersuchungsgebiet Grösseltal bei Neuenbürg, Enzkreis	85
4.1	Einführung in das Untersuchungsgebiet Grösseltal bei Neuenbürg, Enzkreis	85
4.1.1	Geologie, Böden, Klima und Hydrologie	86
4.1.2	Besiedlungsgeschichte des Untersuchungsgebietes und archäologische Fundlage	87
4.1.3	Keltische Verhüttungsmethoden und Funktionsweise der Rennöfen	88
4.2	Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Grösseltal bei Neuenbürg, Enzkreis	90
4.2.1	Bodenkundliche und geophysikalische Untersuchungen im Umfeld des eisenzeitlichen Verhüttungsplatzes im Grösseltal (off-site) . . .	90
4.2.2	Vergleich zwischen den Befunden der archäologischen Grabungen und den Ergebnissen der geoelektrischen Messungen	95
4.2.3	Modelle verschiedener Schlackenhalde	115
4.2.4	Anwendung der Geoelektrischen Widerstandstomographie zur Lokalisierung alter Bergbauspuren	120
4.2.5	Modellberechnungen verschiedener vertikaler Strukturen	126
4.2.6	Zusammenfassung der Ergebnisse des Untersuchungsgebietes Grösseltal bei Neuenbürg (Enzkreis)	131
5	Zusammenfassung der Ergebnisse beider Untersuchungsgebiete im Vergleich und Ausblick	133
	Literaturverzeichnis	136
A	Anhang Untersuchungsgebiet Sinsheim-Dühren	151
B	Anhang Untersuchungsgebiet Neuenbürg-Grösseltal	185

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der vergleichenden Studie.	2
Abb. 2	Prinzip der Widerstandsmessung mit einer Vierpolanordnung.	12
Abb. 3	Bezeichnungen der jeweiligen Abstände zwischen den Elektroden.	13
Abb. 4	Übergang an der Grenzfläche von einem guten zu einem schlechten Leiter und von einem schlechten zu einem guten Leiter.	14
Abb. 5	Konfigurationsfaktor für einige ausgewählte Elektrodenkonfigurationen.	15
Abb. 6	Messprinzip der Wenner-Anordnung.	16
Abb. 7	Messprinzip der Dipol-Dipol-Anordnung.	17
Abb. 8	Elektrodenabstände bei der Schlumberger-Anordnung.	17
Abb. 9	Messprinzip der Wenner-Schlumberger-Anordnung.	18
Abb. 10	Geometrische Veranschaulichung der Eindringtiefe zwischen den Elektroden A und B.	19
Abb. 11	Zweidimensionale Sensitivitätsverteilungen für drei verschiedene Konfigurationen.	20
Abb. 12	Geographische Lage des Untersuchungsgebietes Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren.	27
Abb. 13	Auswahl von Funden aus dem keltischen Prunkgrab im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren.	31
Abb. 14	Rekonstruktionsversuch der Viereckschanze als Teil einer Dorfsiedlung, Bopfingen.	33
Abb. 15	Querschnitt durch Wall und Graben der Viereckschanze von Pliezhäusen-Rübgarten.	34
Abb. 16	Übersichtskarte über die Geoelektrikprofile, Schürfgruben, Pürckhauer-Bohrstöcke und Rammkernsondierungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren.	35
Abb. 17	Übersichtskarte über die Schürfgruben im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren.	36
Abb. 18	Bodenkarte für das Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren.	38
Abb. 19	Dreidimensionales Modell des Untersuchungsgebietes Gewann „Steinbock“ mit den Bodentypen und der Viereckschanze.	39
Abb. 20	Schematisches Profil der Schürfgrube P1.	41
Abb. 21	Schematisches Profil der Schürfgrube P2.	42
Abb. 22	Schematisches Profil der Schürfgrube P3.	43
Abb. 23	Schematisches Profil der Schürfgrube P4.	44
Abb. 24	Rekonstruktion eines Teilbereiches einer ehemaligen Rinne am nordwestexponierten Hang im Gewann „Steinbock“.	45
Abb. 25	Lage der ERT-Profile im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren.	46
Abb. 26	ERT-Profil 1 im Gewann „Steinbock“.	49

Abb. 27	ERT-Profil 5 im Gewann „Steinbock“.	50
Abb. 28	ERT-Profil 23 im Gewann „Steinbock“.	51
Abb. 29	Rekonstruktion des Verlaufes einer inzwischen verfüllten Rinne in der Senke des Südosthanges im Gewann „Steinbock“.	52
Abb. 30	ERT-Profil 9 am Nordwesthang im Gewann „Steinbock“.	53
Abb. 31	ERT-Profil 10 im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren.	54
Abb. 32	Schematische Toposequenz des Untersuchungsgebietes Gewann „Steinbock“.	55
Abb. 33	Modell mit drei unterschiedlichen geologischen Schichten.	57
Abb. 34	Ergebnisse der geomagnetischen Prospektion im Gewann „Steinbock“.	58
Abb. 35	Gesamtplan der Grabungsaktivitäten von K. Schumacher im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren im Jahr 1889.	59
Abb. 36	Kennzeichnung der Lage des Wallgrabens der Viereckschanze im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren.	60
Abb. 37	Vergleich der ERT-Profile 2a und 2b Gewann „Steinbock“.	62
Abb. 38	ERT-Profil 16 im Gewann „Steinbock“.	63
Abb. 39	ERT-Profil 12 im Gewann „Steinbock“.	64
Abb. 40	ERT-Profil 13 im Gewann „Steinbock“.	65
Abb. 41	ERT-Profil 20 im Gewann „Steinbock“.	66
Abb. 42	ERT-Profil 24 im Gewann „Steinbock“.	67
Abb. 43	ERT-Profil 25 im Gewann „Steinbock“.	68
Abb. 44	ERT-Profil 26 im Gewann „Steinbock“.	68
Abb. 45	Archäologische Dokumentation des Profils des Wallgrabens der keltischen Viereckschanze bei der Grabung im November 2006 im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren entlang des ERT-Profiles 2.	70
Abb. 46	Fotografie des Profils des Wallgrabens der keltischen Viereckschanze in Sinsheim-Dühren.	70
Abb. 47	Direkter Vergleich zwischen dem ERT-Profil 2a und dem archäologischen Profil der Grabung im November 2006 im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren.	71
Abb. 48	Korngrößenverteilungen und Anteile an organischer Substanz und Kalk in den Proben aus der archäologischen Grabung im November 2006 im Gewann „Steinbock“.	74
Abb. 49	Archäologische Dokumentation des Profils des Wallgrabens der keltischen Viereckschanze bei der Grabung im März/April 2008 im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren entlang des ERT-Profiles 12.	75
Abb. 50	Direkter Vergleich des ERT-Profiles 12 mit den Befundgrenzen der archäologischen Grabung im Gewann „Steinbock“ im März/April 2008.	76
Abb. 51	Korngrößenverteilungen und Anteile an organischer Substanz und Kalk für die Proben aus der archäologischen Grabung im März/April 2008 im Gewann „Steinbock“.	78
Abb. 52	Modell eines Spitzgrabens.	79

Abb. 53	Widerstandsverteilungen eines Spitzgrabens (Dipol-Dipol-Konfiguration) mit Rauschen.	81
Abb. 54	Modell eines Spitzgrabens in realistischerem Untergrund.	82
Abb. 55	Geographische Lage des Untersuchungsgebietes Grösseltal bei Neuenbürg, Enzkreis.	85
Abb. 56	Quer- und Längsschnitt durch einen keltischen Rennofen.	89
Abb. 57	Magnetogramm und gesamte Grabungsflächen der drei Grabungskampagnen der Jahre 2008 bis 2010 im Grösseltal bei Neuenbürg. . .	92
Abb. 58	Übersicht über die Schürfgruben und Geoelektrikprofile im Grösseltal.	93
Abb. 59	Toposequenz des Untersuchungsgebietes Grösseltal.	94
Abb. 60	Geoelektrikprofile und Grabungsflächen auf dem Magnetogramm im Grösseltal.	96
Abb. 61	ERT-Profile 1 und 2 im Grösseltal bei Neuenbürg.	98
Abb. 62	ERT-Profile 12, 13, 14 und 10 im Grösseltal bei Neuenbürg.	99
Abb. 63	Vergleich des ERT-Profiles 12 mit den Grabungsbefunden der Flächen E 45 und F 45.	101
Abb. 64	Vergleich der ERT-Profile 13 und 14 mit den Grabungsbefunden der Flächen EF 50 bzw. EF 45.	102
Abb. 65	Südprofil der archäologischen Grabungsflächen EFG 50 und direkter Vergleich zum ERT-Profil 10 im Grösseltal.	104
Abb. 66	ERT-Profile 5a bis 5e im Grösseltal.	105
Abb. 67	Direkter Vergleich zwischen dem Ostprofil zu den Grabungsflächen D 55 und D 60 im Grösseltal zum ERT-Profil 5e.	107
Abb. 68	Korngrößenverteilungen und Humus- und Kalkgehalt für die Proben aus dem Ostprofil zu den Grabungsflächen D 55 und D 60 im Grösseltal.	107
Abb. 69	Vergleich des ERT-Profiles 18 mit den Grabungsbefunden der Fläche F 75.	109
Abb. 70	Probenentnahmestellen mit den entsprechenden Entnahmetiefen aus dem Nordprofil der Grabungsfläche E 75.	111
Abb. 71	Korngrößenverteilungen und Humus- und Kalkgehalt für die Proben aus dem Nordprofil der Grabungsfläche E 75 im Grösseltal.	111
Abb. 72	Vergleich des ERT-Profiles 8 mit den Grabungsbefunden der Flächen E/F/G90.	113
Abb. 73	ERT-Profile 16 und 17 im Grösseltal.	114
Abb. 74	Modell einer tiefer gelegenen Schlackenhalde.	116
Abb. 75	Modell einer einer höher gelegenen Schlackenhalde.	117
Abb. 76	Modell einer Schlackenhalde mit robuster Inversion.	118
Abb. 77	Modell einer Schlackenhalde mit erhöhtem horizontalen Filter.	119
Abb. 78	Dreidimensionales Modell eines Bereiches des Grösseltals mit Blick auf den Sackberg.	121
Abb. 79	ERT-Profil 1 am Hang des Sackberges oberhalb des Grabungsgeländes im Grösseltal.	122

Abb. 80	ERT-Profil 2 am Hang des Sackberges oberhalb des Grabungsgeländes im Grösseltal.	122
Abb. 81	ERT-Profil 2 ohne Topographie-Information mit verschiedenen Werten für das Verhältnis des vertikalen zum horizontalen Filters.	124
Abb. 82	ERT-Profil 3 am Hang des Sackberges oberhalb des Grabungsgeländes im Grösseltal.	125
Abb. 83	ERT-Profil 5a am Hang des Sackberges oberhalb des Grabungsgeländes im Grösseltal.	125
Abb. 84	Modell eines 3 m breiten Schachtes (Wenner-Konfiguration).	127
Abb. 85	Modell eines 3 m breiten Schachtes (Dipol-Dipol-Konfiguration).	127
Abb. 86	Modell eines 3 m breiten Schachtes (Schlumberger-Konfiguration).	128
Abb. 87	Modell eines 0,5 m breiten Schachtes.	129
Abb. 88	Modell einer Hohlform.	130

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Spezifische elektrische Widerstände für Lockersedimente, organogene und anthropogene Ablagerungen, Festgesteine und Wässer.	9
Tab. 2	Zeittafel vom Neolithikum bis zur Römischen Kaiserzeit.	30
Tab. 3	Feldansprache der Schürfgrube P1 im Gewinn „Steinbock“.	41
Tab. 4	Feldansprache der Schürfgrube P2 im Gewinn „Steinbock“.	42
Tab. 5	Feldansprache der Schürfgrube P3 im Gewinn „Steinbock“.	43
Tab. 6	Feldansprache der Schürfgrube P4 im Gewinn „Steinbock“.	44
Tab. 7	Radiokohlenstoffalter der Holzkohleprobe aus der Grabung im November 2006 Sinsheim-Dühren.	74

Danksagung

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Bernhard Eitel für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit. Auch nach seiner Ernennung zum Rektor der Universität Heidelberg und den vielzähligen damit verbundenen Aufgaben stand er mir als Gutachter zur Seite. Auch danke ich herzlich Herrn apl. Prof. Dr. Ulrich Glasmacher für sein Interesse an meiner Arbeit und die Zweitbegutachtung. Herrn Dr. Stefan Hecht danke ich vielmals für seine hilfreiche Unterstützung und für viele wertvolle Ratschläge. Auch für die Durchführung zahlreicher geoelektrischer Messungen im Rahmen mehrerer Geländepraktika danke ich ihm herzlich. Für die Durchführung der Geländepraktika, in deren Rahmen zahlreiche Daten, die für diese Arbeit wichtig waren, erhoben wurden, danke ich auch Frau Dr. Annette Kadereit, Dipl.-Geogr. Ingmar Holzhauser, Dr. Bertil Mächtle, Dipl.-Geogr. Tim Frese, Dr. Christoph Siart und Dr. Arne Egger. Herrn Dipl.-Geol. Gerd Schukraft danke ich für die Durchführung einiger Rammkernsondierungen und das Überlassen der daraus gewonnenen Daten. Außerdem danke ich ihm in seiner Funktion als Leiter des Labors für Geomorphologie und Geoökologie für wertvolle Anleitung und Hilfe bei den durchgeführten Laboranalysen.

Diese Arbeit wäre nicht möglich gewesen, ohne archäologische Ausgrabungen in den beiden Untersuchungsgebieten. Ganz herzlich danke ich Herrn Dr. Günther Wieland vom Referat für Denkmalpflege des Regierungspräsidiums Karlsruhe und Herrn Dr. Guntram Gassmann vom Landesamt für Denkmalpflege Esslingen für die wunderbare Zusammenarbeit. Erst durch die archäologischen Grabungen unter ihrer Leitung und die umfangreiche Grabungsdokumentation, die mir für die Realisierung der in dieser Arbeit durchgeführten Vergleiche zur Verfügung gestellt wurde, wurde diese Studie möglich. Bei zahlreichen, auch schwierigen Messungen konnte ich immer auf ihre Hilfe zählen. Auch danke ich beiden für viele wertvolle Gespräche und eine schöne Ausgrabungszeit. Ich habe dabei viel über archäologische Grabungs- und Dokumentationsmethoden gelernt. Für die Durchführung der geomagnetischen Messungen in beiden Untersuchungsgebieten danke ich Herrn Dr. H. von der Osten-Woldenburg. In diesem Zusammenhang danke ich auch dem Regierungspräsidium Karlsruhe und dem Landesamt für Denkmalpflege Esslingen für die zur Verfügung gestellten archäologischen Dokumentationen, Magnetogramme und Luftbilder, die für die Umsetzung dieser Arbeit nötig waren. Für die kameradschaftliche Zusammenarbeit bei den archäologischen Grabungskampagnen danke ich auch dem gesamten Grabungsteam. Für die Durchführung einer Datierung danke ich Herrn Dr. Bernd Kromer vom Radiokohlenstofflabor der Heidelberger Akademie der Wissenschaften am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg. Auch danke ich Herrn J. Spohn (Universität Tübingen) für die Überlassung einer Abschrift und für Informationen zu den Grabfunden in Sinsheim-Dühren. Dem Ortsvorsteher von Sinsheim-Dühren, Herrn Zahn, danke ich für seinen Einsatz, der die Durchführung mehrerer Geländepraktika ermöglichte.

Mein ganz herzlicher Dank gilt meinen Eltern, die mich mein ganzes Studium über mit allen Kräften unterstützt haben. Ebenso herzlich danke ich Manfred Schäfer und Jan Kohlmüller für ihr Interesse, ihre jahrelange Unterstützung und ihre Geduld.

Zusammenfassung

Die Methode der **Geoelektrischen Widerstandstomographie** (ERT) gewinnt bei der Prospektion archäologischer Standorte immer mehr an Bedeutung. Diese vergleichende Studie untersucht die Abbildung archäologischer Strukturen durch die ERT. Sie zeigt Grenzen der Methode bei verschiedenen Einsatzgebieten und mögliche Fehlerquellen bei der Interpretation der Widerstandsbilder auf. Dafür wurden an zwei Standorten in Südwestdeutschland geoelektrische Messungen über verschiedenen archäologischen Strukturen durchgeführt, deren Ergebnisse direkt mit den Befunden der anschließenden Grabungen verglichen wurden.

Die Untersuchungen an der keltischen Viereckschanze bei Sinsheim-Dühren im Kraichgau zeigten, dass sich die Umrisse des Spitzgrabens der ehemaligen Schanze bei großen Widerstandsunterschieden zwischen der Grabenverfüllung und dem anstehenden Gestein bzw. Sediment gut abgrenzen lassen. Da mit der Methode keine scharfen Begrenzungen dargestellt werden können, liegt eine Ungenauigkeit vor, die jedoch so gering ist, dass sie für die Planung des Grabungsaufwandes unerheblich ist. Artefakte in den ERT-Profilen, die zu Interpretationsschwierigkeiten führen können, lassen sich auf die Inversionsroutine zurückführen, ihre Ausprägung hängt von der für die Messung gewählten Konfiguration ab.

Im Rahmen der Arbeit entstand auch eine Bodenkarte für einen Teil des Gewannes „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren und es wurde das keltische Prunkgrab, dessen Lage innerhalb einer Viereckschanze bislang einzigartig ist, im Gelände genau lokalisiert.

Die Untersuchungen auf einem keltischen Erzverhüttungsplatz im Grösseltal bei Neuenbürg (Enzkreis) im Nordschwarzwald ergaben, dass eine Interpretation der Befunde bei geringmächtigen Schlackenhalde in z. T. grobsteinigem Umfeld nicht eindeutig möglich ist. Ebenso konnte die Lage und die Ausdehnung der Rennöfen mit der Methode der ERT nicht zuverlässig bestimmt werden.

Die Anwendung der ERT zur Lokalisierung der zum Erzverhüttungsplatz gehörenden Abbauspuren ergab, dass die Methode hierfür erfolgreich eingesetzt werden kann. Nach Geländebegehungen zum Auffinden oberflächlich sichtbarer Terrassen mit vorgelagerten Abbauhalde, können mit Hilfe der ERT Schächte, Pingen oder sonstige Hohlformen in den Terrassenbereichen identifiziert werden. Auch hierbei können Artefakte die Interpretation erschweren, die wiederum auf die Inversionsroutine zurückgeführt werden konnten.

Eine Grenze der Methode der ERT liegt in der Differenzierung verzahnter archäologischer Befunde. Schwierigkeiten bei der Interpretation entstehen vor allem durch Artefakte, die durch die Inversionsroutine zustande kommen. Gerade bei archäologischen Fragestellungen ist es wichtig, solche Artefakte von echten archäologischen Befunden unterscheiden zu können.

Abstract

Electrical resistivity tomography (ERT) is gaining in importance in the field of archeological site prospecting. This contrasting study examines the results of mapping archeological structures and the resulting archeological excavation results. The study aims to show the boundaries of interpreting ERT scans and possible sources of error in interpreting ERT scan results. To accomplish this, ERT scans were performed at two selected sites in South West Germany. The results were then compared with later archeological excavation findings at these sites. Studies at the quadrangular Celtic enclosure near Sinsheim-Dühren in the Kraichgau have shown that the perimeter of V-shaped ditches can be distinguished well from the surrounding bed rock and back-fill. The resolution of the perimeter is not without uncertainty but the uncertainty is on such a minor scale that it does not affect the planning of an archeological dig at the site in question. Artifacts in ERT measurement interpretations could be linked to computational difficulties in the inversion routines. The impact of such artifacts depend on the chosen calculation configuration though. As a result of the measurements taken at „Gewann Steinbock“ near Sinsheim-Dühren a soil map was created. More importantly though, the unique Celtic tomb was accurately localized within the quadrangular Celtic enclosure with the help of ERT.

Research at a celtic ore smelting site in the Grösseltal near Neuenbürg (Enzkreis) in the northern Black Forrest showed that the interpretation of data taken near lightly slag-rich heaps in partially rocky terrain is not possible without error. Also, localizing and determining the extent of the bloomeries could not be determined reliably via the ERT method. The ability to successfully localize the extracting traces of the celtic ore smelting site via the ERT method though were proven. After inspecting the sight for visible terraces with advancing upstream heaps, in depth ERT scans could be performed to localize access shafts, binges or other cavities in the perimeter of the terrace. Artifacts in ERT measurement could in turn be linked to computational difficulties in the inversion routines. A current limit to the ERT method lies in interlocked archeological finds in combination with the inversion routine interpretation. The ability to be able to distinguish between misinterpretations and actual archeological finds therefore is important.

1 Einleitung

1.1 Allgemeine Einleitung

Das Verfahren der **Geoelektrischen Widerstandstomographie** oder auch **Electrical Resistivity Tomography (ERT)** gewinnt in jüngster Zeit als Prospektionsmethode in der Archäologie immer mehr an Bedeutung. Mit Hilfe der Methode können archäologische Objekte im Boden lokalisiert und ihre ungefähre Lage und Ausdehnung bestimmt werden. Der Vorteil ist neben der Zerstörungsfreiheit der archäologischen Objekte auch, dass sie selbst in topographisch schwierigem Gelände und bei dichter Vegetation einsetzbar ist (SCHROTT & SASS 2008).

Zumeist werden geoelektrische Messungen ergänzend zu anderen geophysikalischen Methoden eingesetzt. Im Gegensatz zu geomagnetischen Prospektionen, die einen flächendeckenden Überblick über einen archäologisch interessanten Bereich bieten, liefern geoelektrische Messungen eine Tiefeninformation (HECHT & FASSBINDER 2006). Mit einer Kombination der beiden Verfahren kann somit ein dreidimensionales Bild des Untergrundes entworfen werden.

Zwei Anwendungsbereiche geophysikalischer Methoden sind nach HECHT (2007) die direkte Prospektion archäologischer Fundplätze (on-site studies) und die Rekonstruktion des Umfeldes archäologischer Flächen (off-site studies). Die Untersuchung des Umfeldes trägt dabei auch zum Verständnis der archäologischen Strukturen bei. Aus diesem Grund ist es wichtig, zu untersuchen, wie die Methode der ERT erfolgreich eingesetzt werden kann, um beide Aspekte zu berücksichtigen und zu einem Gesamtbild der Mensch-Umwelt-Interaktion zusammenzuführen.

Eine Schwierigkeit ist dabei die Interpretation der Ergebnisse der geoelektrischen Messung, da bei dieser nur mögliche Modelle der Widerstandsverteilung des Untergrundes entstehen. Um zu klären, ob es sich bei den Widerstandsmustern um anthropogene oder natürlich entstandene Strukturen handelt, ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Archäologen und Naturwissenschaftlern nötig (vgl. dazu auch HECHT 2007). Bei jeder geoelektrischen Messung muss im Vorfeld entschieden werden, wie sie durchgeführt werden soll, um die vermuteten archäologischen Befunde am besten erfassen zu können. Um mit möglichst geringem Messaufwand zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten, ist es hilfreich, für verschiedene archäologische Strukturen jeweils Empfehlungen für den passenden Messaufbau zu haben. Auch die anschließende Interpretation der Ergebnisse einer geoelektrischen Messung kann durch eine Sammlung von Vergleichsdaten erleichtert werden. Solche Vergleichsdaten könnten z. B. durch die Untersuchung der Ergebnisse geoelektrischer Messungen über archäologischen Strukturen und den anschließenden Vergleichen zu den Grabungsbefunden erhoben werden.

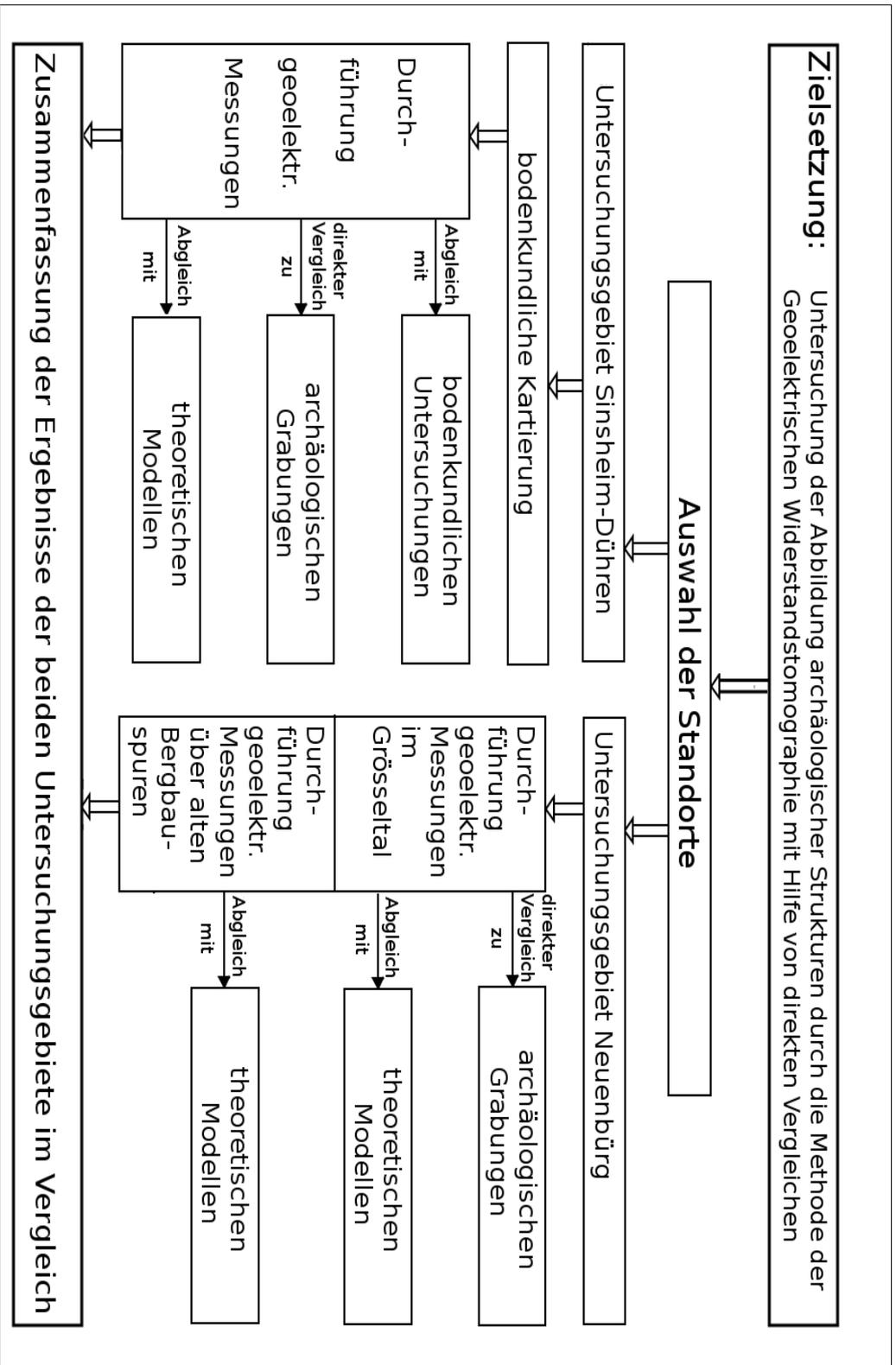


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der vergleichenden Studie. Quelle: Eigener Entwurf.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise bei der vergleichenden Studie

Die Methode der Geoelektrischen Widerstandstomographie und die Verarbeitung der Messergebnisse mit dem Programm RES2DINV liefern mögliche Modelle für die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Untergrund und somit eine Vorstellung darüber, wie dieser beschaffen sein könnte. Wie weiter unten noch erläutert werden wird, wird ein Widerstandsmodell, welches durch die geoelektrische Messung erhalten wird, durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Es kann also nie direkt von einem solchen Modell auf die Beschaffenheit des Untergrundes geschlossen werden, es sind immer begleitende z. B. bodenkundliche Untersuchungen nötig (SCHROTT & HECHT 2006).

Zielsetzung dieser vergleichenden Studie ist es zu untersuchen, wie verschiedene archäologische Strukturen durch die Methode der ERT abgebildet werden. Die Vorgehensweise dabei ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Für diese Arbeit war es erforderlich, dass geoelektrische Messungen an Lokalisationen durchgeführt werden konnten, an denen archäologische Grabungen geplant waren. Auch sollte dort die Möglichkeit bestehen, bodenkundliche Untersuchungen durchzuführen. Dies waren entscheidende Kriterien für die Auswahl der beiden Untersuchungsgebiete. Nach HECHT (2007) können Kenntnisse des Umfeldes (off-site) dazu beitragen, das Verständnis der archäologischen Strukturen (on-site) zu verbessern. Aus diesem Grund wurden auch Untersuchungen im Umfeld der archäologischen Befunde durchgeführt.

Im Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren handelt es sich bei der archäologischen Struktur um eine keltische Viereckschanze. Am Anfang der Untersuchungen stand eine systematische bodenkundliche Kartierung des Umfeldes um die Schanze, die für einen Überblick sorgen und die Auswahl geeigneter Stellen für die Durchführung geoelektrischer Messungen ermöglichen sollte. Auf Grundlage der Ergebnisse der pedologischen Untersuchungen konnte geprüft werden, wie gut die Widerstandsmodelle des Untergrundes, die mit Hilfe der ERT erhalten wurden, mit den tatsächlich vorhandenen Gegebenheiten übereinstimmten. Eine Zuordnung der verschiedenen Widerstandswerte zu den vorhandenen Gesteinen bzw. Sedimenten konnte vorgenommen werden. Durch Laboranalysen, die an ausgewählten Bodenprofilen durchgeführt wurden, konnte geprüft werden, wie sich Faktoren, wie z.B. die Korngrößenzusammensetzung, auf die Messergebnisse auswirken.

Die Untersuchung der archäologischen Struktur erfolgte durch geoelektrische Messungen, die möglichst alle Seiten des Wallgrabens der ehemaligen Schanze erfassen sollten. Um direkte Vergleiche zwischen der archäologischen Struktur und ihrer Abbildung durch die ERT durchführen zu können, wurden die Messungen so angelegt, dass sie mit den anschließenden archäologischen Grabungen deckungsgleich waren. Die mit der ERT erhaltenen Widerstandsmodelle der archäologischen Struktur konnten dadurch direkt mit den Profilskizzen der archäologischen Grabungsdokumentation verglichen werden. Durch diese direkten Vergleiche konnte auch geprüft werden, wie gut die äußere Begrenzung oder auch die Vielschichtigkeit einer Grabenverfüllung durch die ERT erfasst werden. Es wurden mit dem Programm RES2MOD stark vereinfachte Modelle der archäologischen Struktur erstellt, anhand derer untersucht wurde, welche Interpretationsschwierigkeiten sich durch die Verarbeitung der Messergebnisse mit dem Programm RES2DINV erge-

ben.

Im Untersuchungsgebiet Grösseltal bei Neuenbürg (Enzkreis) fanden auf dem eisenzeitlichen Erzverhüttungsplatz großflächige archäologische Grabungen durch das Regierungspräsidium Karlsruhe und das Landesamt für Denkmalpflege Esslingen im Rahmen des DFG-Projektes „Das Neuenbürger Erzrevier im Nordschwarzwald als Wirtschaftsraum während der Späthallstatt- und Frühlatènezeit“ statt. Somit war auch an diesem Standort gewährleistet, dass ERT-Profile gezielt an ausgewählten Stellen gemessen werden konnten, an denen archäologische Grabungen geplant waren. Dies ermöglichte wieder eine Überprüfung der geoelektrischen Messergebnisse durch die darauffolgenden Grabungen. Auch für die hier vorgefundenen archäologischen Strukturen wurden mit RES2MOD vereinfachte Modelle erstellt. Damit konnte durch gezielte Veränderung einiger Parameter der Inversionsroutine untersucht werden, wie eine Verbesserung der Darstellung der archäologischen Struktur erreicht werden kann. Die archäologische Untersuchung eisenzeitlicher Erzverhüttung ist eng verknüpft mit der Frage nach der Herkunft der Erze (GASSMANN & WIELAND 2010; GASSMANN ET AL. 2011). Aus diesem Grund wurde im Untersuchungsgebiet Grösseltal der Einsatz der ERT in topographisch schwierigem Gelände zur Lokalisierung und Untersuchung alter Bergbauspuren getestet. Da hierbei der Vergleich zu den Ergebnissen archäologischer Grabungen fehlte, wurden für die unterschiedlichsten Formen der möglichen Bergbauspuren zahlreiche Modelle mit RES2MOD erstellt und die Auswirkungen verschiedener Parameteränderungen untersucht.

Mit einer Zusammenführung der Ergebnisse in beiden Untersuchungsgebieten sollen Hilfestellungen zur Interpretation der Messergebnisse Geoelektrischer Widerstandstomographien im Zusammenhang mit archäologischen Fragestellungen gegeben werden. Da in den beiden ausgewählten Untersuchungsgebieten sehr unterschiedliche archäologische Objekte vorlagen, sind Aussagen zur Erfassung des Spitzgrabens einer keltischen Viereckschanze, eisenzeitlicher Erz-Verhüttungsplätze und der zugehörigen Erzabbaustellen möglich.

1.3 Aktueller Stand der Forschung

Geoelektrische Verfahren wurden erstmals 1912 von den Brüdern Schlumberger eingesetzt (SCHLUMBERGER 2012). Seit den Anfängen gab es eine Vielzahl an Arbeiten zur Weiterentwicklung der Methoden. Für die geoelektrischen Vierpunktverfahren wurden zahlreiche verschiedene Elektrodenkonfigurationen, von denen einige im nächsten Kapitel vorgestellt werden, entwickelt und deren Einsatzmöglichkeiten getestet (ASPINALL & GAFFNEY 2001; KELLER & FRISCHKNECHT 1966). Aus den Vierpunkt-Messverfahren entstand die Methode der Geoelektrischen Widerstandstomographie, bei der die Elektroden entlang einer geraden Linie versetzt werden, um somit ein Schnittbild des Untergrundes zu erzeugen. Der Begriff „resistivity tomography“ wurde erstmals von SHIMA & SAKAYAMA (1987) benutzt und seitdem weiterhin verwendet. Die Methode kombiniert die eindimensionale Messmethode „vertical electrical sounding“ (VES), die eine vertikale Widerstandsverteilung liefert, mit dem „electrical profiling“ (horizontale Widerstandsverteilung), so dass ein zweidimensionales Bild der Widerstandsverteilung im Boden entsteht (vgl. auch BENDER 1985 oder LANGE 2005). Dieses Bild enthält mehr

Strukturinformation als die eindimensionalen Verfahren (STORZ ET AL. 2000). Seit der Entwicklung moderner Multi-Elektrodenapparaturen und entsprechender Mess- und Auswertungssoftware (GRIFFITHS ET AL. 1990; KELLER & FRISCHKNECHT 1966) hat die ERT immer breitere Anwendung in den verschiedensten Bereichen gefunden. Neben dem Einsatz der Methode im Gelände wurden auch Labor-Simulations-Experimente durchgeführt (POWELL ET AL. 1987). Zunächst hat sich die ERT in der Geomorphologie bei der Erkundung von Permafrost etabliert (KNEISEL 2003, 2004; KNEISEL & HAUCK 2003; VON DER MÜHLL 1993). Sie wird u. a. verwendet, um hydrogeologische (DAHLIN & OWEN 1998; FLATHE 1955) oder geologische (ATZEMOGLU ET AL. 2003; CAGLAR & DUVARCI 2001) Fragestellungen zu untersuchen, z. B. auch zur Erkundung tiefer geologischer Strukturen der Erdkruste (STORZ ET AL. 2000) oder geothermaler Felder (MONTEIRO ET AL. 1997). Auch bei der Erforschung von Erdbeben kam sie in den letzten Jahren immer mehr zum Einsatz (BICHLER ET AL. 2004; PERRONE ET AL. 2004; WETZEL ET AL. 2006). Besonders gut geeignet ist die ERT auch für die Differenzierung von Lockersedimenten, da sie wichtige Hinweise über komplexe Schichtlagerungsverhältnisse im oberflächennahen Bereich liefert (SCHROTT & HECHT 2006). NITSCHKE (1992) und NITSCHKE & DANCKWARDT (1992) wendeten das Verfahren auf Bohrkernmodelle an. Weitere Einsatzgebiete sind Messungen an Behältern (GRUHNE 1999), die Vulkan- (GIUDICI & ALFANO 1997; FRIEDEL ET AL. 1998) und Meeresforschung (JUST ET AL. 2000) bzw. Messungen unter Wasser (TÄSCHNER 2008), die Untersuchung von Karsthohlformen (SIART 2010), von verschütteten Hochwassermauern (HECHT ET AL. 2008), von Schlackenhalde (ULLRICH ET AL. 2007) und das Auffinden von Altlasten (BUDÄUS 1996). In der Archäologie und in der Hohlraumerkundung wurde die ERT erstmals erfolgreich von NOEL & XU (1991) und von JACOBS ET AL. (1994) verwendet. Ein vorbereitender Feldversuch zum Einsatz der ERT zur Prospektion archäologischer Strukturen wurde von NOEL (1991) in Verulamium St. Albans durchgeführt. Der Erfolg der Methode beruht dabei auf den Unterschieden in den elektrischen Eigenschaften der archäologischen Strukturen zu deren Umgebung (PAPADOPOULOS ET AL. 2006). Die ERT wird bei archäologischen Fragestellungen zumeist zusätzlich angewendet, um die Ergebnisse anderer geophysikalischer Methoden zu bestätigen bzw. zu prüfen. Zahlreiche Arbeiten verwenden eine Kombination der verschiedenen geophysikalischen Methoden und vergleichen diese miteinander (BICHLER ET AL. 2004; DIAMANTI ET AL. 2005; GODIO & BOTTINO 2001; HECHT & FASSBINDER 2006; MAURITSCH ET AL. 2000).

Inzwischen liegt eine große Anzahl an Fallstudien zum Einsatz der ERT bei archäologischen Fragestellungen vor (CHOUKER 2001; DIAMANTI ET AL. 2005; DOGAN & PAPAMARINOPOULOS 2003; GABER ET AL. 1999; HECHT & FASSBINDER 2006; HERBICH ET AL. 1997; IBRAHIM ET AL. 1998; NEIGHBOUR ET AL. 2001; PAPADOPOULOS ET AL. 2006; PINAR & AKCIG 1997; RIZZO ET AL. 2005; TONKOV 1996; VAFIDIS ET AL. 1999; u. v. m.). Dabei wurden auch die verschiedenen Elektrodenanordnungen und deren Anwendbarkeit bei archäologischen Fragestellungen untersucht (2D: CARDARELLI & FISCHANGER 2006; CLARK 1990; 3D: ALAIA ET AL. 2008; MAURIELLO ET AL. 1998). Auch hinsichtlich der Auswertungsalgorithmen für die Messergebnisse der ERT wurden

im Verlauf der letzten Jahre zahlreiche Verbesserungen und Vereinfachungen der Routine und somit eine Verkürzung der Rechenzeit und eine Verringerung des benötigten Speicherplatzes erreicht. Die Entwicklung und Untersuchung automatischer Inversionstechniken („Inverses Modelling“) nahm ihren Anfang in den 1980er Jahren (SMITH & VOZOFF 1984; TRIPP ET AL. 1984). Es wurden zahlreiche Modifikationen der Gauss-Newton-Methode (DE GROOT-HEDLIN & CONSTABLE 1990) entwickelt (CONSTABLE ET AL. 1987; ELLIS & OLDENBURG 1994; LOKE & BARKER 1995; SASAKI 1992; TSOURLOS 1995; XU & NOEL 1993), die eine schnellere Inversionsroutine ermöglichten. Auch der Einfluss der verschiedenen Parameter der Inversionsprogramme wurde vielfach untersucht (CARDARELLI & FISCHANGER 2006; KARDEIS 2009). Dafür verwenden zahlreiche Arbeiten das Programm RES2MOD, um theoretische Modelle zu bestimmten Befunden zu erstellen (BUDÄUS 1996; CARDARELLI & FISCHANGER 2006; JOHNSON 2003; NOEL 1991; SASAKI 1992).

2 Methoden

2.1 Gleichstromgeoelektrik

2.1.1 Elektrische Eigenschaften von Böden und Gesteinen

Das Prinzip der Geoelektrischen Widerstandstomographie beruht auf Unterschieden in den elektrischen Eigenschaften verschiedener Sedimente, Böden und Gesteine. Aus diesem Grund werden, bevor das Verfahren erläutert wird, diese elektrischen Eigenschaften kurz vorgestellt (vgl. auch BEBLO 1997; GREINWALD & THIERBACH 1997; SCHÖN 1983; WEIDELT 2005).

Eine für geoelektrische Verfahren wichtige Eigenschaft der Böden ist die elektrische Leitfähigkeit σ [S/m] bzw. ihr Kehrwert, der spezifische elektrische Widerstand ρ [Ωm]. Die elektrische Leitfähigkeit eines Bodens kann nach WEIDELT (2005) im Wesentlichen drei Ursachen haben:

- Elektronische (metallische) Leitfähigkeit der Bodenmatrix: Elektronen können sich in verschiedenen Materialien unterschiedlich frei bewegen und somit Ladung transportieren. Gute Leiter sind dabei neben den Metallen die Erzminerale oder auch Kohlenstoff in hochentkohlter Form (Graphit: $\rho \approx 8 \cdot 10^{-6} \Omega m$; STÖCKER 1998, S. 551). Die Leitfähigkeit der meisten Bodenbestandteile ist jedoch sehr gering. Sie liegt bei den Silikaten, wie z. B. Quarz (SiO_2), in einer Größenordnung von 10^{-14} bis zu $10^{-10} S/m$ (WEIDELT 2005). Sie ist so gering, dass sie im Prinzip elektrische Isolatoren darstellen. Ebenfalls zu der Gruppe der Nichtleiter gehören Steinsalz, Anhydrit und Schwefel.
- Elektrolytische Leitfähigkeit: Die Hohlräume zwischen den Partikeln, die Poren, sind teilweise mit Bodenluft und teilweise mit Bodenlösung gefüllt. Bei der Bodenlösung handelt es sich um Wasser, in dem Gase und Ionen gelöst sind. Die Ionen gelöster Salze in der wässrigen Bodenlösung transportieren Ladung. Dieser Prozess macht hauptsächlich die Leitfähigkeit des Bodens aus (BENDER 1985). Ist der Boden nur teilweise mit Bodenlösung gesättigt, wird die elektrolytische Leitfähigkeit durch den isolierenden Einfluss der Luft verringert (WEIDELT 2005). Da sich die Bodenlösung im Porenraum zwischen den Bodenpartikeln bewegt, hat die Größe dieses Porenraumes einen Einfluss auf die elektrolytische Leitfähigkeit des Bodens. Diese Leitfähigkeit kann für tonfreie Gesteine durch „Archies Formel“ (ARCHIE 1942) beschrieben werden (vgl. auch WEIDELT 2005)

$$\sigma_0 = \frac{\Phi^m}{a} \cdot \sigma_w \cdot S^n \quad , \quad (1)$$

σ_0	= elektrische Leitfähigkeit des Sedimentes	$\left[\frac{S}{m}\right]$
σ_w	= elektrolytische Leitfähigkeit des Porenwassers	$\left[\frac{S}{m}\right]$
Φ	= effektive Porosität	
m	= Zementationsexponent:	$1,3 < m < 2,4$ (Tab. 7.4 in SCHÖN 1983)
a	= Proportionalitätsfaktor:	$0,5 < a < 1$ (Tab. 7.4 in SCHÖN 1983)
S	= Sättigungsgrad	
n	= Sättigungsexponent (näherungsweise 2)	.

- Grenzfächenleitfähigkeit: Nach MUNDY (1985) gilt die Formel von Archie für Tone und tonhaltige Böden nicht. Tone weisen infolge ihrer Oberflächenleitfähigkeit bzw. wegen der Kationenaustauschkapazität der Tonpartikel sehr geringe Widerstände auf. An der Oberfläche der Tone befindet sich eine Schicht adsorbierter Kationen, die mit wachsendem Abstand in eine Kationenwolke übergeht. An den Grenzflächen zwischen Gestein und Flüssigkeit bildet sich eine elektrochemische Doppelschicht aus, die einen Stromfluss an den Kornoberflächen ermöglicht, wodurch sich die elektrische Leitfähigkeit σ erhöht (MUNDY 1985). Die Grenzfächenleitfähigkeit liefert einen zum Porenwasser zusätzlichen Leitfähigkeitsbeitrag, der umso stärker zutage tritt, je geringer die Leitfähigkeit des Porenwassers selbst ist und je höher der Tongehalt ist. Sie ist somit vor allem eine Eigenschaft der Tone, kann bei geringer Mineralisation des Bodenwassers aber auch bei Sanden auftreten (BÖRNER 2005).

Die effektive Leitfähigkeit des Bodens wird hauptsächlich durch die elektrolytische Leitfähigkeit der Bodenlösung und z. T. durch die Grenzfächenleitfähigkeit bestimmt. Der spezifische elektrische Widerstand liegt für verschiedene Materialien jeweils in einem bestimmten Wertebereich (vgl. Tab. 1). Da es zwischen diesen Bereichen teilweise große Überschneidungen gibt und zahlreiche Faktoren einen Einfluss auf den spezifischen Widerstand haben, kann aus einem gegebenen Widerstandswert nie direkt auf ein bestimmtes Material geschlossen werden. Es sind begleitend immer noch bodenkundliche Methoden nötig, um Sicherheit über die tatsächliche Zusammensetzung der Bodenmatrix zu erhalten (vgl. auch HECHT & FASSBINDER 2006; SCHROTT & HECHT 2006).

2.1.2 Physikalischer Hintergrund

Es gibt zahlreiche geoelektrische Methoden, die sich in elektrische und elektromagnetische Verfahren unterteilen lassen (vgl. dazu auch BENDER 1985; BÖRNER 2005; CARA 1994; KERTZ 1992; KNÖDEL ET AL. 2005; MILITZER & WEBER 1985; MUNDY 1985; WEIDELT 2005). Die elektrischen Verfahren benutzen Gleichstrom oder niederfrequenten Wechselstrom (bis 50 Hz) und messen elektrische Potentialdifferenzen. Die elektromagnetischen Verfahren verwenden impulsartige oder periodische Anregungen und messen elektrische oder magnetische Felder (KNÖDEL ET AL. 2005).

Tabelle 1: Spezifische elektrische Widerstände für Lockersedimente, organogene und anthropogene Ablagerungen, Festgesteine und Wässer. Quelle: Nach WEIDELT 2005, Tab. 5.3, S. 92.

Material	Wertebereich (Ohmmeter)	
	Minimum	Maximum
Kies	50 (wassergesättigt)	$> 10^4$ (trocken)
Sand	50 (wassergesättigt)	$> 10^4$ (trocken)
Schluff	20	50
Geschiebemergel	30	70
Lößlehm	30	100
Lehm (als Ziegel)	500	5000
Ton (erdfeucht)	3	30
Ton (trocken)		> 1000
Torf, Humus, Schlick	15	25
Mudde, Faulschlamm	10	40
Moorböden	10	150
Braunkohle	10	150
Erdöl	10^9	10^{12}
Ölsand (trocken)	10^4	10^{15}
Haus- und Industriemüll	< 1	> 1000 (Plastik)
Sandstein	< 50 (klüftig, feucht)	$> 10^5$ (kompakt)
Kalkstein	100 (klüftig, feucht)	$> 10^5$ (kompakt)
Tonschiefer	50 (klüftig, feucht)	$> 10^5$ (kompakt)
Magmatite, Metamorphite	150 (verwittert, feucht)	$> 10^6$ (kompakt)
Schwarzschiefer	< 1	50
Steinsalz	30 (feucht)	$> 10^6$ (trocken)
Destilliertes Wasser		$> 10^3$
Schneefirn		$> 10^5$
natürliche Wässer	10	300
Meerwasser (3,5% NaCl)	0,25	
Salzlaugen	$< 0,1$	

Die grundlegenden Gleichungen, auf denen die geoelektrischen Verfahren basieren, stellen die Maxwellgleichungen dar. Nach MESCHÉDE (2010) lauten diese in differentieller Form

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \mu_r \vec{j} \quad (2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (4)$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho_{el}}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (5)$$

Dabei treten die folgenden physikalischen Größen (in SI-Einheiten) auf:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_0 &= \text{elektrische Feldkonstante} \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} && (\text{NIST 2010}) \\
 \epsilon_r &= \text{relative Permittivität (dimensionslos)} \\
 \mu_0 &= \text{magnetische Feldkonstante} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} && (\text{NIST 2010}) \\
 \mu_r &= \text{relative Permeabilitätszahl (dimensionslos)} \\
 \vec{B} &= \text{magnetische Flussdichte} && [\text{T}] \\
 \vec{E} &= \text{elektrische Feldstärke} && \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right] \\
 \vec{j} &= \text{elektrische Stromdichte} && \left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right] \\
 \rho_{el} &= \text{elektrische Ladungsdichte} && \left[\frac{\text{C}}{\text{m}^3} \right] .
 \end{aligned}$$

Die relative Permittivität ϵ_r und Permeabilität μ_r sind materialabhängige Größen, die sich durch Messungen ermitteln lassen. Verschiedene Untergründe lassen sich mit Hilfe dieser Größen unterscheiden (WEIDELT 2005).

Gleichung (2) ist das erweiterte Ampère'sche Gesetz, welches besagt, dass durch eine zeitliche Veränderung eines elektrischen Feldes und durch einen Verschiebungsstrom ein magnetisches Rotationsfeld entsteht. Gleichung (3) ist das Faraday'sche Induktionsgesetz, welches beschreibt, wie durch eine zeitliche Veränderung der magnetischen Flussdichte ein elektrisches Feld entsteht. Das negative Vorzeichen besagt, dass das entstehende elektrische Feld so gerichtet ist, dass das dadurch wiederum induzierte Magnetfeld (vgl. Gleichung (2)) dem ursprünglichen entgegengerichtet ist (Lenz'sche Regel). Gleichung (4) besagt, dass die magnetische Flussdichte keine Quellen und Senken hat und somit geschlossene Linien bildet. Dies bedeutet, dass es keine magnetischen Monopole gibt. Gleichung (5) besagt, dass von einer elektrischen Ladung elektrische Feldlinien ausgehen, sie somit die Quelle eines elektrischen Feldes ist (MESCHÉDE 2010).

Bei Gleichstromverfahren hat man es mit statischen Feldern zu tun, bei denen es keine zeitliche Veränderung gibt (vgl. dazu und zum Folgenden auch BENDER 1985; MUNDRY 1985). Für diese verschwindet die Rotation, d. h. das elektrische Feld ist wirbelfrei

$$rot \vec{E} = 0 \quad . \quad (6)$$

Aus diesem Grund handelt es sich beim elektrischen Feld um ein Gradientenfeld, die elektrische Feldstärke ist dabei der Gradient eines skalaren Potentials Φ

$$\vec{E} = -grad \Phi = -\nabla \Phi \quad . \quad (7)$$

Dabei tritt der Nabla-Operator ∇ auf, eine vektorielle Größe, die die Ableitungen in die drei Raumrichtungen enthält.

Der Zusammenhang zwischen der elektrischen Feldstärke und der elektrischen Stromdichte \vec{j} ist über die elektrische Leitfähigkeit gegeben, bzw. über ihren Kehrwert, den elektrischen Widerstand

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \vec{j} = \rho \vec{j} \quad . \quad (8)$$

Durch Integration ergibt sich daraus das *Ohm'sche Gesetz*

$$U = R \cdot I \quad . \quad (9)$$

Dabei ist U die Spannung, I die Stromstärke und R der Ohmsche Widerstand, der sich durch

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (10)$$

aus dem spezifischen elektrischen Widerstand ρ ergibt, wobei l die Länge und A die Querschnittsfläche des Leiters ist (MUNDRY 1985). Die Stromdichte \vec{j} erfüllt die Kontinuitätsgleichung

$$\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho_{el}}{\partial t} = 0 \quad . \quad (11)$$

Diese besagt, dass die Quelle der Stromdichte in einem bestimmten Raumvolumen durch die zeitliche Änderung der Ladungsdichte in diesem Volumen gegeben ist. In der Geoelektrik entspricht diese Quelle einer Elektrode, über die ein Strom I in den Boden eingespeist wird. Unter Verwendung der Gleichungen (7) und (8) wird aus der Kontinuitätsgleichung (11) die partielle Differentialgleichung (LOKE & BARKER 1996)

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla \Phi(x, y, z)] = I \delta(x) \delta(y) \delta(z) \quad . \quad (12)$$

Dabei ist $\delta(x)$ die Dirac'sche Deltadistribution, die im \pm Unendlichen verschwindet und ein sehr schmales und sehr hohes Maximum bei $x = 0$ besitzt. Diese Stelle entspricht dem Sitz der Stromquelle, der als punktförmig betrachteten Elektrode.

2.1.3 Vierpunktverfahren

Homogener Halbraum: Das Potential einer punktförmigen Stromquelle, der Elektrode A mit der Stromstärke I im homogenen Halbraum, d. h. an und unter der Bodenoberfläche, ergibt sich aus der partiellen Differentialgleichung (12) zu

$$\Phi(r) = \rho \cdot \frac{I}{2\pi r} \quad , \quad (13)$$

wobei r der Abstand zum Messpunkt ist. Dabei nimmt man an, dass die zweite Elektrode B im Unendlichen liegt (vgl. BENDER 1985; MUNDRY 1985). Bei der Betrachtung des Potentials zwischen zwei Elektroden, die sich in endlichem Abstand zueinander befinden, können diese vereinfachend als punktförmig angenommen werden und der Untergrund als bezüglich der elektrischen Leitfähigkeit homogen und unendlich ausgedehnt mit ebener Oberfläche. In Abbildung 2 ist das Messprinzip der Gleichstromgeoelektrik dargestellt. Hierbei wird über die beiden Elektroden A und B (Edelstahlspieße) ein Gleichstrom oder ein niederfrequenter Wechselstrom (max. 50 Hz) in den Erdboden eingespeist. Es baut sich ein elektrisches Feld zwischen den beiden Speiseelektroden auf, welches näherungsweise dem Feld eines elektrischen Dipols entspricht (LANGE 2005).

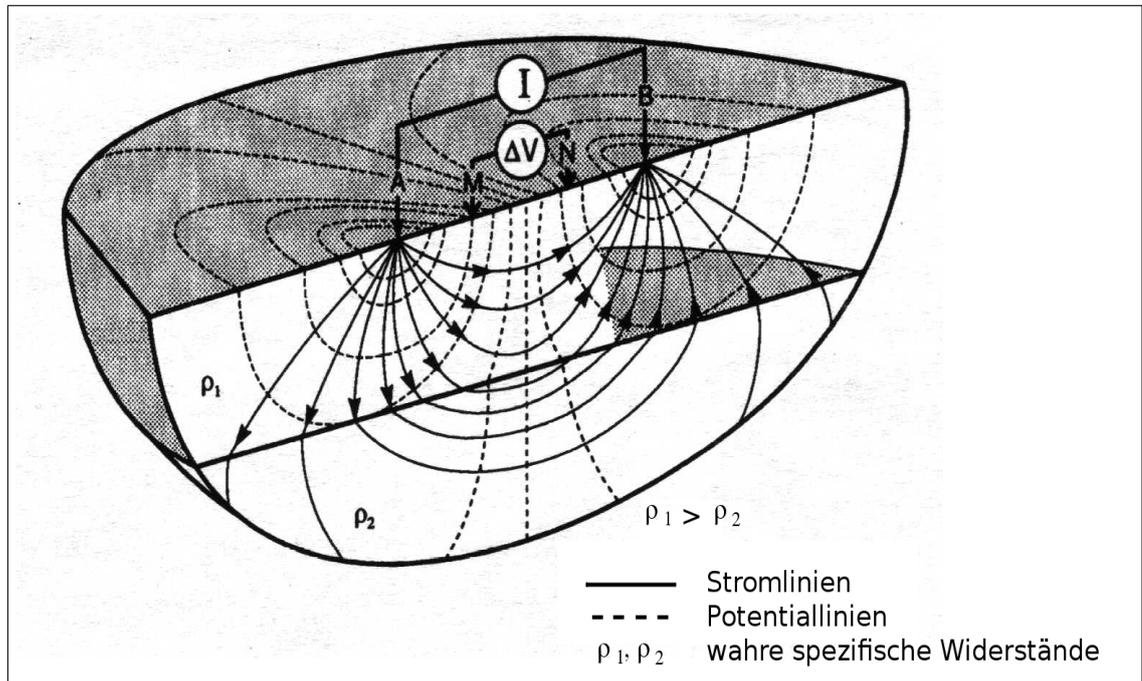


Abbildung 2: Prinzip der Widerstandsmessung mit einer Vierpolanordnung. Quelle: Leicht verändert aus LANGE 2005, S. 123.

Die Feldlinien, d. h. die Stromlinien, gehen radial von der Elektrode A aus (ZICKGRAF 1999). Orthogonal zu den Stromlinien stehen die Potentialflächen (näherungsweise Halbkugeloberflächen), an denen jeweils das gleiche Potential vorliegt, d. h. die gleiche Spannung abgreifbar ist, weswegen sie auch als Äquipotentialflächen bezeichnet werden. In der Abbildung sind deren Querschnittslinien, die Äquipotentiallinien dargestellt. Der Abgriff des Potentials erfolgt über die beiden Messelektroden M und N. Es wird die Potentialdifferenz $\Delta\Phi$, d. h. die Spannung U zwischen diesen beiden Elektroden gemessen. Für diese Potentialdifferenz ergibt sich anhand des Superpositionsprinzips aus der Überlagerung der Einzelpotentiale die Neumann'sche Formel (vgl. auch LANGE 2005; MUNDY 1985)

$$U = \Delta\Phi = \Phi_M - \Phi_N = \rho I \underbrace{\frac{1}{2\pi} \left(\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_3} \right) - \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_4} \right) \right)}_{=\frac{1}{K}} . \quad (14)$$

Dabei steht r_1 für den Abstand zwischen der Stromelektrode A und der Messelektrode M, r_2 für den Abstand zwischen den Elektroden A und N, r_3 für die Entfernung von B zu M und r_4 für die Entfernung zwischen B und N (vgl. Abb. 3).

Setzt man für den Abstandsterm zusammen mit dem Faktor $\frac{1}{2\pi}$ die Abkürzung $\frac{1}{K}$, erhält man vereinfacht

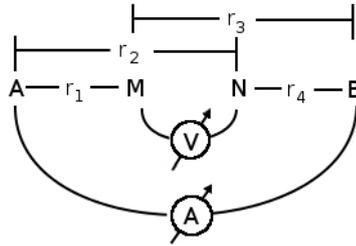


Abbildung 3: Bezeichnungen der jeweiligen Abstände zwischen den Elektroden A, B, M und N. Quelle: Eigener Entwurf nach MUNDY 1985.

$$U = \frac{\rho I}{K} \quad (15)$$

und daraus für den spezifischen Widerstand der Vierpolanordnung

$$\rho = K \cdot \frac{U}{I} \quad (16)$$

Da in den Faktor K die Abstände zwischen den Elektroden einfließen, stellt dieser einen Geometriefaktor dar, der von der jeweiligen Anordnung abhängt. Die verschiedenen gängigsten Anordnungen und deren Geometrie- bzw. Konfigurationsfaktoren werden weiter unten vorgestellt (vgl. Kap. 2.1.4).

Nach Gleichung (16) ergibt sich aus dem Verhältnis der gemessenen Potentialdifferenz (Spannung U) zum eingespeisten Strom I durch Multiplikation mit dem Konfigurationsfaktor K der entsprechende Anordnung der spezifische Widerstand ρ .

Bei der Betrachtung wurde vereinfachend von punktförmigen Elektroden ausgegangen, bei der Verwendung von Stabelektroden muss das Potential korrigiert werden (nach Sommerfeld; BÖRNER 2005)

$$\Phi_S = -\frac{I\rho}{4\pi l} \ln \left| \frac{z-l + \sqrt{r^2 + (z-l)^2}}{z+l + \sqrt{r^2 + (z+l)^2}} \right| \quad (17)$$

Dabei ist l die Länge des im Boden befindlichen Teils der Stabelektrode. Bei der Messung mit Stabelektroden werden geringere Potentiale gemessen als mit Punktelektroden (BÖRNER 2005). Die Abweichung spielt jedoch nur bei geringem Abstand (im Zentimeter- bis Dezimeterbereich) eine Rolle und liegt bereits bei einer Entfernung von einem halben Meter unter 5% (abzulesen aus Abb. 3.3 in BÖRNER 2005, S. 12).

Inhomogener Halbraum: Bei den bisherigen Betrachtungen wurde von einem homogenen Untergrund ausgegangen. In der Realität existieren keine homogenen Untergründe, die verschiedenen geologischen Schichten unterscheiden sich in ihren Widerstandswerten (MUNDY 1985). Der elektrische Widerstand ist somit keine Materialkonstante mehr,

weswegen er als „scheinbarer spezifischer Widerstand“ bezeichnet wird. Der eingespeiste Strom wird an den Grenzen dieser Schichten unterschiedlich stark gebrochen, wobei das Brechungsgesetz

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\tan(\vartheta_2)}{\tan(\vartheta_1)} \quad (18)$$

gilt (BÖRNER 2005). Dabei ist ϑ_1 der Einfallswinkel und ϑ_2 der Ausfallswinkel. Dies bedeutet, dass die Stromlinien beim Übergang von einem guten zu einem schlechten Leiter ($\rho_1 < \rho_2$) zum Lot hin gebrochen werden und beim Übergang von einem schlechten zu einem guten Leiter ($\rho_1 > \rho_2$) vom Lot weg (vgl. Abb. 4). Die Brechung der Stromlinien an den Widerstandsgrenzen kann bei einer Messung zur Artefaktausbildung führen (NOEL & XU 1991).

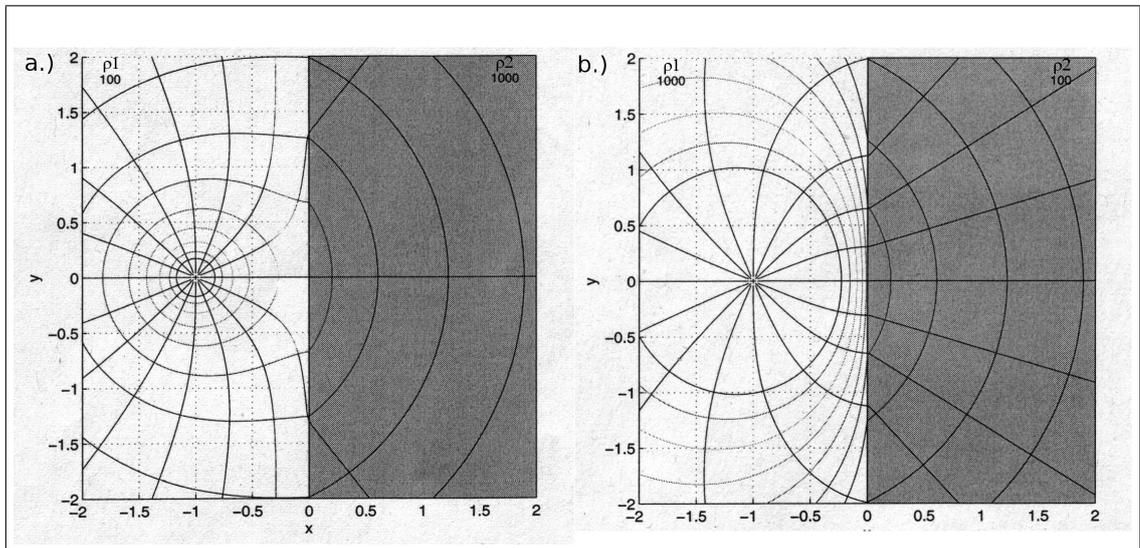


Abbildung 4: Übergang an der Grenzfläche von a.) einem guten zu einem schlechten Leiter ($\rho_1 < \rho_2$) und b.) einem schlechten zu einem guten Leiter ($\rho_1 > \rho_2$). Quelle: Leicht verändert aus BÖRNER 2005, S. 19 und S. 20.

2.1.4 Elektrodenkonfigurationen

Für Messungen mit Hilfe des Vierpunktverfahrens gibt es verschiedene Möglichkeiten der Elektrodenanordnung. Die Konfigurationen, die in dieser Arbeit verwendet werden, sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden. Eine genaue Beschreibung der Konfigurationen liefern unter anderem BENDER (1985), BÖRNER (2005), KNÖDEL ET AL. 2005, LANGE 2005, LOKE (1995, 2010), MILITZER & WEBER 1985, MILSOM (1996), MUNDRY 1985, REYNOLDS (1997) und WEIDELT 2005. Je nach Anordnung ergibt sich ein anderer Wert für den oben vorgestellten Konfigurationsfaktor K (Abb. 5).

Verfahren	Elektrodenkonfiguration	Konfigurationsfaktor (n: Abstandsfaktor)
Wenner Wenner α Lee (Mit zusätzlicher zentraler Sonde O)		$K = 2\pi a$
Schlumberger		$K = \pi n(n+1)a$ $n > 3$
Dipol-Dipol axialer Dipol Doppeldipol Wenner β		$K = \pi n(n+1)(n+2)a$

Abbildung 5: Konfigurationsfaktor für einige ausgewählte Elektrodenkonfigurationen. Quelle: Nach Tab. 5.5 aus LANGE 2005, S. 124.

Wenner-Anordnung: Die gebräuchlichste Anordnung ist die Wenner-Anordnung (vgl. Abb. 6), bei der der Abstand a zwischen den Elektroden A, M, N und B jeweils konstant ist. Aus diesem Grund ergibt sich für den Konfigurationsfaktor $K = 2\pi a$. Damit wird aus Gleichung (16)

$$\rho = \underbrace{2\pi a}_K \cdot \frac{U}{I} \quad (19)$$

Nach der Messung des ersten Wertes, wird die Anordnung jeweils um a Einheiten versetzt, d. h. Elektrode A rückt auf den Platz der Elektrode M usw., dieses Verfahren wird bis zum Ende der Auslage wiederholt. Aus all den dadurch entstehenden Einzelmessungen ergeben sich die Messwerte für die erste Schicht. Im nächsten Schritt wird der Abstand auf $2a$ erhöht, was die Messwerte der zweiten Schicht ergibt. Die Werte der letzten Schicht ergeben sich beim maximal möglichen Abstand der Elektroden zueinander. Der Vorteil der Wenner-Anordnung ist die relativ geringe Empfindlichkeit gegenüber Störsignalen und lateralen Inhomogenitäten (SCHROTT & HECHT 2006). Sie liefert ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis und ist gut geeignet bei der Untersuchung horizontaler Schichten und der Auflösung vertikaler Störkörper (LANGE 2005; SCHROTT & SASS 2008). Die laterale Auflösung ist allerdings etwas schlechter als bei der Schlumberger-Anordnung, da von einem Tiefenlevel zum nächsten drei Datenpunkte eingebüßt werden (vgl. Abb. 6; vgl. dazu auch Tab. 5.6 in LANGE 2005, S. 135).

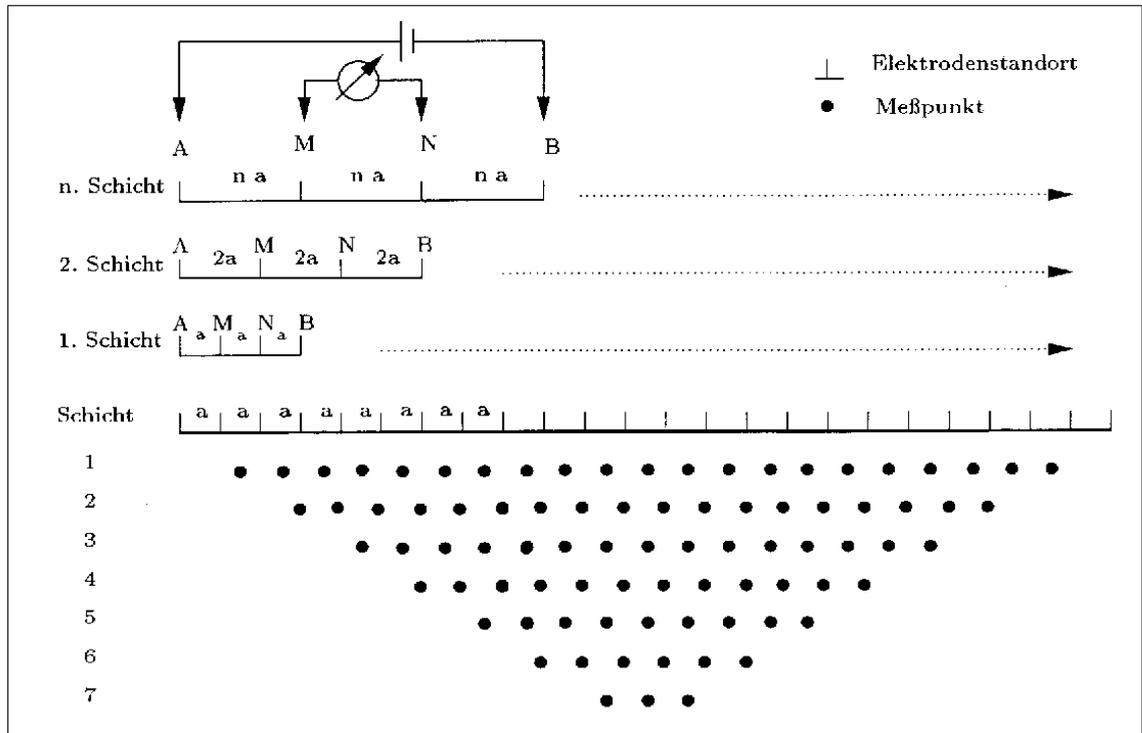


Abbildung 6: Messprinzip der Wenner-Anordnung. Quelle: BUDÄUS 1996, S. 37.

Dipol-Dipol-Anordnung: Eine weitere gängige Anordnung ist die Dipol-Dipol-Konfiguration (Abb. 7). Diese liefert die besten Resultate hinsichtlich der lateralen Auflösung einer Widerstandsmessung (KNEISEL 2003; LOKE & BARKER 1996). Sie ist gut geeignet für die Abgrenzung räumlich begrenzter Objekte knapp unterhalb der Oberfläche (SCHROTT & SASS 2008) und somit für archäologische Fragestellungen (HECHT & FASSBINDER 2006). Die einzelnen Schichten kommen hierbei dadurch zustande, dass der Abstand zwischen der Speiseelektrode B und der Messelektrode M Schritt für Schritt von a bis auf na erhöht wird, wobei der Abstand zwischen den beiden Speiseelektroden und zwischen den beiden Messelektroden jeweils konstant a bleibt. Der scheinbare Widerstandswert errechnet sich dabei zu

$$\rho = \underbrace{\pi n(n+1)(n+2)a}_{=K} \cdot \frac{U}{I} \quad . \quad (20)$$

Der Nachteil der Methode ist, dass die Spannung zwischen den Messelektroden mit wachsendem n schnell abnimmt. Um diesen Nachteil etwas auszugleichen, kann der Abstand der Messelektroden verdoppelt oder verdreifacht werden. Ansonsten ist eine Messung von höchstens sechs Schichten sinnvoll, da der Messfehler durch Rauschen zu groß wird (LOKE 1995).

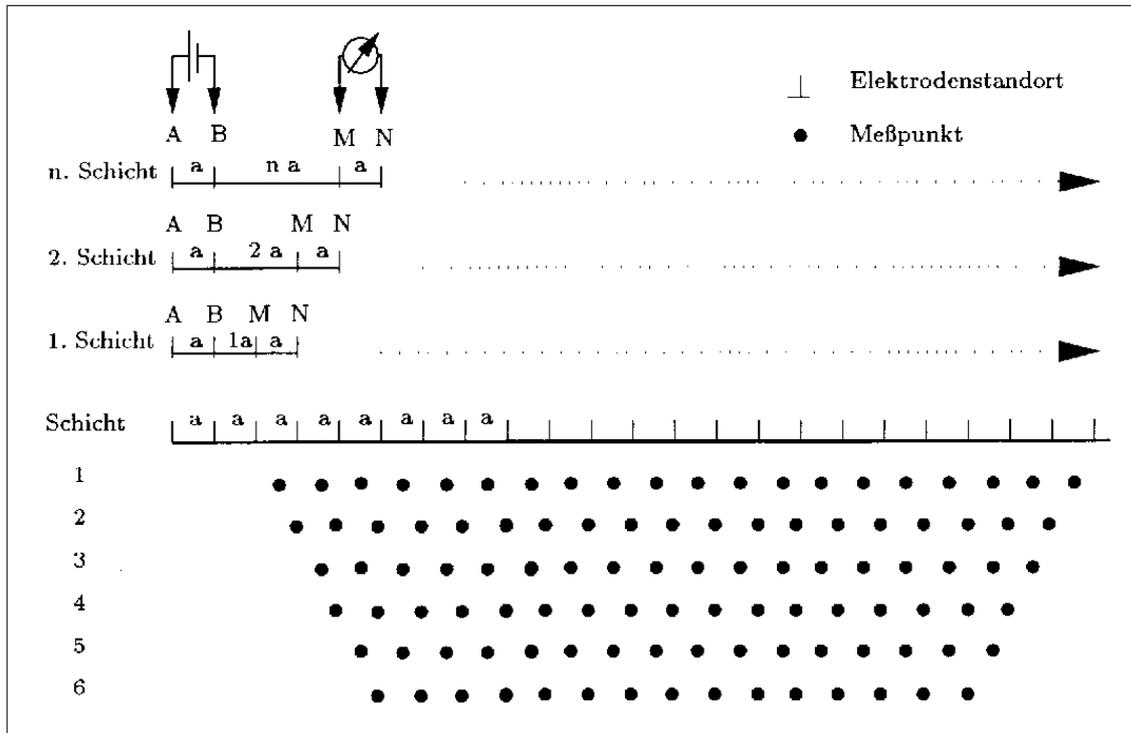


Abbildung 7: Messprinzip der Dipol-Dipol-Anordnung. Quelle: BUDÄUS 1996, S. 38.

Schlumberger-Anordnung: Bei der Schlumberger-Anordnung sind die Elektroden A und B viel weiter voneinander entfernt als die Elektroden M und N, d. h. $L \gg l$ (vgl. Abb. 8).

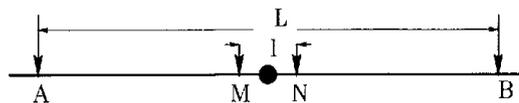


Abbildung 8: Elektrodenabstände bei der Schlumberger-Anordnung. Quelle: Eigener Entwurf nach BUDÄUS 1996, S. 40.

Damit ergibt sich für den spezifischen Widerstand bei dieser Anordnung

$$\rho = \underbrace{\frac{\pi L^2}{4l}}_{=K} \cdot \frac{U}{I} \quad (21)$$

Eindringtiefe und Sensitivität: Tatsächlich gemessen werden Potentialdifferenzen an der Oberfläche, es haben aber auch die tieferen Schichten Einfluss auf das Oberflächenpotential. Für einen homogenen Boden kann die Eindringtiefe analytisch berechnet werden, für reale, inhomogene Halbräume lässt sich die Verteilung nur numerisch bestimmen (TELFORD ET AL. 1993). Der horizontale Anteil der Stromdichte ergibt sich zu (vgl. auch BÖRNER 2005)

$$j_x = \sigma E_x = -\sigma \frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{I}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) = \frac{I}{2\pi} \left(\frac{x}{r_A^3} - \frac{x-L}{r_B^3} \right) \quad . \quad (23)$$

Die verwendeten Abstände werden in Abbildung 10 veranschaulicht. In der Mitte der Strecke \overline{AB} ist die Eindringtiefe aus Symmetriegründen am größten. Für $L = \sqrt{2} \cdot z$ hat dort die horizontale Stromdichte ein Maximum, d. h. in einer Tiefe von z fließt dann der maximale Strom (BÖRNER 2005).

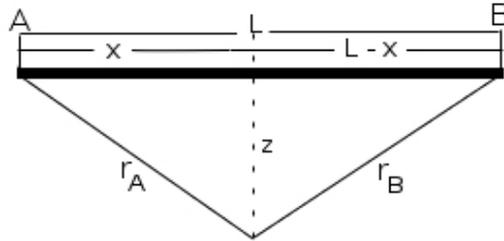


Abbildung 10: Geometrische Veranschaulichung der Eindringtiefe zwischen den Elektroden A und B. Quelle: Eigener Entwurf nach BÖRNER 2005.

Die Eindringtiefe hängt von der Sensitivität ab. Die verschiedenen Konfigurationen haben unterschiedliche Sensitivitätsverteilungen (Abb. 11). Diese zeigen an, welche Regionen jeweils zu welchem Anteil Einfluss auf den gemessenen scheinbaren Widerstand haben (LOKE 2010). Die Unterschiede in den Sensitivitätsverteilungen erklären die Unterschiede in den Widerstandswerten, die von ein und derselben geologischen Struktur stammen, jedoch mit verschiedenen Konfigurationen gemessen wurden.

In der Literatur existieren zwei Lösungsvorschläge zur Ermittlung der Eindringtiefe. Trägt man die Sensitivitätskurve über dem Verhältnis zwischen der Tiefe z und dem Elektrodenabstand a auf, kann die Eindringtiefe über das Maximum dieser Sensitivitätskurve (Maximum Sensitivity) oder durch den Wert des Verhältnisses zwischen Tiefe und Elektrodenabstand, der die Fläche unter der Sensitivitätskurve in zwei gleich große Flächen teilt (Median Depth of Investigation), bestimmt werden (vgl. LOKE 2010). Nach EDWARDS (1977) und BARKER (1991) handelt es sich dabei um die zuverlässigere Annahme.

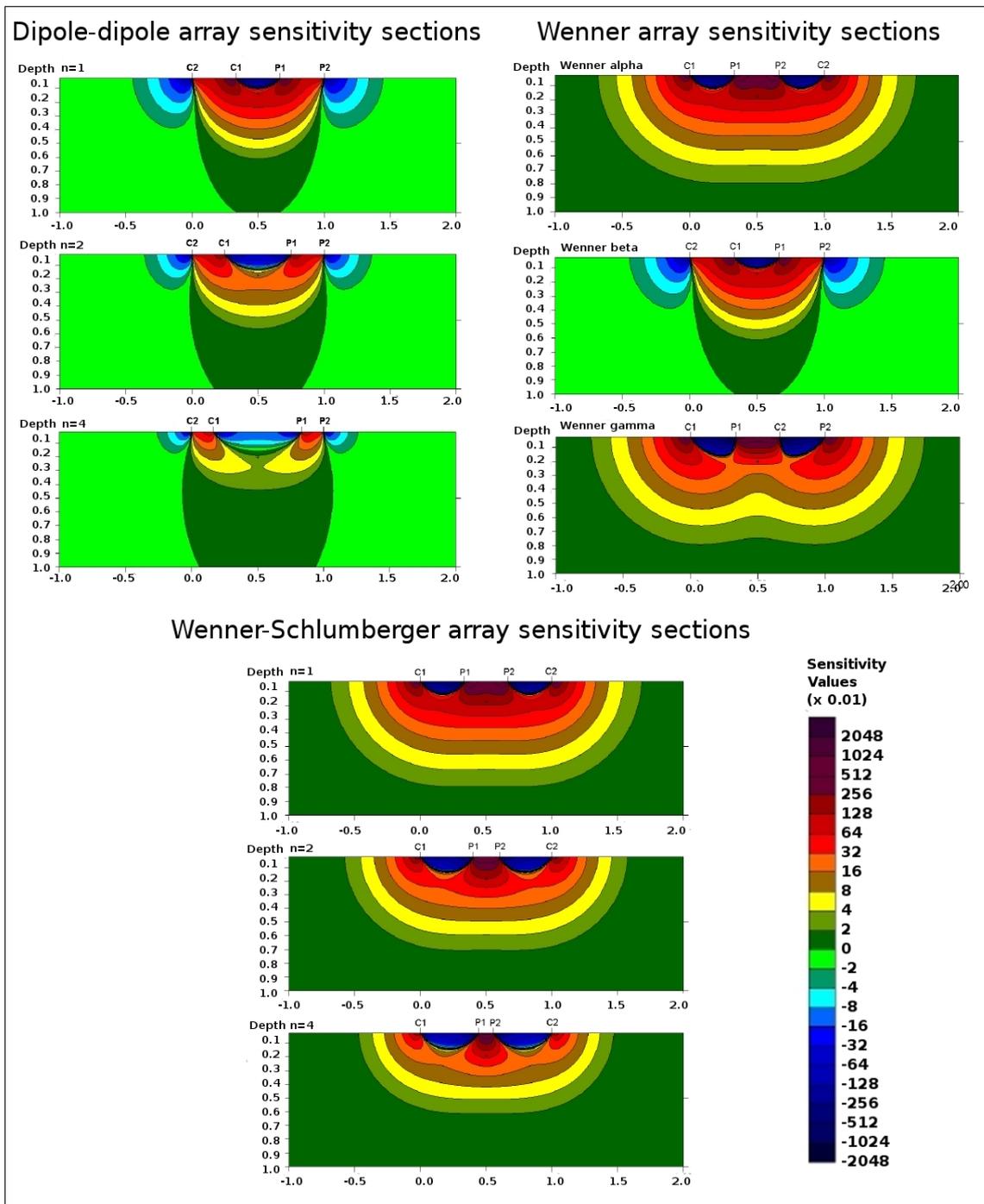


Abbildung 11: Zweidimensionale Sensitivitätsverteilungen für die Dipol-Dipol- (oben links), für die Wenner- (oben rechts) und für die Wenner-Schlumberger-Konfiguration (unten). Quelle: Leicht verändert nach LOKE 2010, S. 30, S. 32, S. 34.

2.1.5 Das Verfahren der Geoelektrischen Widerstandstomographie (ERT)

Das Multi-Elektrodenverfahren der Geoelektrischen Widerstandstomographie (ERT) hat sich aus dem klassischen Prinzip des Vierpunktverfahrens entwickelt (HECHT 2007). Damit ist es möglich, eine Vielzahl von Vierpunktmessungen hintereinander auszuführen, ohne die Elektroden umsetzen zu müssen. Es sind sowohl zwei- als auch dreidimensionale Messungen möglich (vgl. auch LOKE 2010). Für eine zweidimensionale ERT wird eine größere Anzahl an Elektroden (z. B. 100) möglichst in einer geraden Linie in jeweils gleichem Abstand zueinander in den Boden gesteckt. Beim Einmessen und Erden der Metallspieße ist besondere Sorgfalt erforderlich, da sich Positionsfehler und unzureichende galvanische Ankopplung der Elektroden in den Messwerten fortpflanzen (LANGE 2005). Bei sehr trockenen oder blockigen Substraten bzw. bei extremer Trockenheit kann eine Verbesserung durch Wässern der Elektroden erreicht werden (SCHROTT & SASS 2008). Die besten Resultate werden bei feuchtem und lehmigem Untergrund erzielt. Die Elektroden werden alle miteinander verkabelt und an ein Multi-Elektrodengerät angeschlossen. Dieses spricht nun computergesteuert jeweils vier Elektroden nach dem Vierpunktprinzip an, d. h. zwei davon als Strom- und zwei als Messelektroden. Hierbei können die oben beschriebenen Konfigurationen gewählt werden. Durch diese große Anzahl an Einzelmessungen (je nach Messkonfiguration mehrere hundert bis mehrere tausend), wird ein Schnittbild der unterirdischen Widerstandsverteilung erzeugt (HECHT & FASSBINDER 2006).

Für eine dreidimensionale ERT müssen die Elektroden in mehreren Reihen nebeneinander angeordnet werden. Dies erzeugt horizontale und vertikale Schnittbilder, die zu einem dreidimensionalen Blockbild zusammengefügt werden können (vgl. auch DABAS ET AL. 1994; HECHT & FASSBINDER 2006; PAPADOPOULOS ET AL. 2006).

Für die Messung mit Hilfe solcher Multi-Elektrodenanordnungen steht eine Vielzahl an Messgeräten zur Verfügung. In dieser Arbeit wurde das hochauflösende Multi-Elektrodengerät **GEOTOM 200/100 RES/IP** von **GEOLOG2000** verwendet. Dieses arbeitet mit vier Frequenzen (1.04, 2.08, 4.16 und 8.32 Hz) und hat eine Auflösung von bis zu 50 nV (vgl. auch GEOLOG 2012). Die Messung erfolgt computergesteuert durch die Messerfassungssoftware **GEOTOM**. Vor Beginn der Messung wird die gewählte Konfiguration, die Länge der jeweiligen Auslage, die Anzahl der verwendeten Elektroden und deren Abstand zueinander angegeben. Durch einen Ankopplungstest wird geprüft, ob alle Elektroden richtig angeschlossen sind und keine Kabeldefekte vorliegen. Nach der Aufnahme der Messwerte erfolgt eine erste Darstellung als Pseudosektion. Dies ist eine zweidimensionale Darstellung der farbcodierten Messdaten, die nicht mit einer Tiefeninformation verwechselt werden darf (LANGE 2005). Nach Abschluss einer Messung werden die Messwerte zusammen mit dem Typ der Messanordnung, der Anzahl der Elektroden, dem Elektrodenabstand und einigen weiteren Daten in einer dat-Datei gespeichert. Die Art der Dateneingabe wird ausführlich im RES2DINV-Manual (LOKE 1995, 2011a) beschrieben. In dieser Datei kann am Ende der Datenreihe noch die Geländetopographie in Form von x- und y-Koordinaten eingegeben werden. Auch der Einfluss der Topographie wird von LOKE (1995, 2011a) beschrieben. Liegt eine Geländeneigung vor, die größer als 10° ist, sind unbedingt topographische Korrekturen erforderlich. In diesem Fall können

die Auswirkungen des Geländereiefs die normalen Messfehler (2 - 5%) um Größenordnungen überschreiten und Scheinanomalien erzeugen (LANGE 2005).

In dieser Arbeit wurde zur Auswertung das Inversionsprogramm **RES2DINV** von LOKE (1995, 2011a) verwendet. Für dreidimensionale Datensätze kann das Programm **RES3DINV** verwendet werden (LOKE 2011b). Die Funktionsweise des Programmes RES2DINV wird ausführlich im Manual (LOKE 1995, 2011a) oder auch in den Tutorial Notes (LOKE 2010) beschrieben. Es soll hier nur ein kurzer Überblick gegeben werden. Das Programm RES2DINV erstellt zweidimensionale Modelle des Untergrundes für Daten, die mittels geoelektrischer Messungen gewonnen wurden (GRIFFITHS ET AL. 1990). Es arbeitet dabei mit einer Aufteilung des Bodens in Rechteckblöcke, deren Größe, Anzahl und Anordnung sich an den Messwerten orientiert (BARKER 1992). Es werden zwei unterschiedliche Modellgitter zur Verfügung gestellt, eines mit 10%-igem und eines mit 25%-igem Zuwachs der Schichtenmächtigkeit mit der Tiefe. Da der Einfluss des spezifischen Widerstandes auf das Oberflächenpotential mit der Tiefe abnimmt, werden den unteren Schichten mehrere Messwerte zugeordnet. Das Programm kann große Datensätze invertieren (200 bis 6500 Messwerte, 25 bis 1800 Elektroden).

Da bei der Messung realer Untergründe, die bezüglich des spezifischen Widerstandes nicht homogen sind, nur der scheinbare Widerstand an der Oberfläche gemessen wird, werden zur Auswertung Inversionsverfahren benötigt (LOKE & BARKER 1996). Hierbei wird mit „Inversen Modellen“ gearbeitet, die Lösungen der partiellen Differentialgleichung (12) sein müssen. Bei inversen Problemen wird anhand der beobachteten Wirkung auf die Ursache geschlossen, d. h. aus bekannten Werten für Strom (eingespeist) und Spannung (gemessen) wird versucht, auf die zugrundeliegende Struktur des Untergrundes zu schließen (JONGEN 2006). Um ein zweidimensionales Modell des Bodens zu erstellen, wird die Heterogenität der Leitfähigkeit quer zur Messrichtung vernachlässigt. Die Potentialverteilung wird durch eine Fouriertransformation vom Dreidimensionalen ins Zweidimensionale transformiert. Aus der partiellen Differentialgleichung (12) wird dadurch

$$-\nabla \cdot \left[\sigma(x, z) \nabla \tilde{\Phi}(x, k_y, z) \right] + k_y^2 \sigma(x, z) \tilde{\Phi}(x, k_y, z) = I \delta(x) \delta(z) \quad . \quad (24)$$

Dabei ist $\tilde{\Phi}(x, k_y, z)$ die Fouriertransformierte des Potentials und k_y die Fouriervariable. Die numerische Integration der Gleichung (24) kann durch einen Finite-Differenzen-Algorithmus (mit gemischten Randbedingungen) gelöst werden (DEY & MORRISON 1979). Hat man dadurch Lösungen für die Fouriertransformierte erhalten, kann durch eine inverse Fouriertransformation daraus wieder das Potential errechnet werden.

Das Programm RES2DINV arbeitet mit der *smoothness-constrained*-Modifikation der Gauss-Newton-Inversionsmethode (DE GROOT-HEDLIN & CONSTABLE 1990; LOKE & BARKER 1996; SASAKI 1992). Diese entwirft ein vereinfachtes Modell des Untergrundes, welches die tatsächlichen Verhältnisse gut wiedergibt und zugleich Inversionsstabilität garantiert (PAPADOPOULOS ET AL. 2006).

Nach LOKE (2010) besteht die konventionelle Gauss-Newton-Inversionsmethode aus drei Schritten. In einem ersten Schritt wird der Boden in Felder bzw. Zellen aufgeteilt. Die Aufteilung ist beliebig, es bietet sich jedoch aus Symmetriegründen eine Rechteckverteilung an.

lung an. Die Aufteilung und die Anzahl der Felder bestimmen das Auflösungsvermögen des Modelles, da Strukturen, die kleiner als ein Feld des Modelles sind, verloren gehen (BUDÄUS 1996). Es werden nun die scheinbaren spezifischen Widerstandswerte der Einzelmessungen in die einzelnen Zellen projiziert, der Widerstand innerhalb dieser Zellen ist somit konstant. Dadurch entsteht ein Startmodell, welches im Weiteren iterativ verbessert wird. Im zweiten Schritt werden für dieses Startmodell mit Hilfe eines Vorwärtsmodellierungsverfahrens (z. B. Finite Differenzen/Finite Elemente) theoretische Messwerte mit Hilfe der partiellen Differentialgleichung (24) errechnet. Dies führt zu einer ersten Pseudosektion dieser errechneten scheinbaren Widerstandswerte. Im dritten Schritt wird diese erste Modellantwort mit den Messwerten verglichen. Daraufhin wird die theoretische Widerstandsverteilung in weiteren Iterationsschritten solange variiert, bis eine möglichst gute Anpassung an die real erhaltenen Messwerte erreicht ist, wodurch bei jedem Iterationsschritt ein Korrekturmodell entsteht. Da die partielle Differentialgleichung (24) nicht exakt lösbar ist, kann nur versucht werden, die Abweichungen zu minimieren. Dies geschieht mit der Methode der kleinsten Quadrate (RMS). Die iterative Wiederholung des Anpassungsprozesses endet, wenn sich der Wert der Abweichung (RMS) nicht mehr signifikant ändert, was zumeist bei der dritten bis fünften Iteration der Fall ist. Der RMS-Fehler des errechneten Modells wird vom Programm angegeben (LOKE 1995).

Bei der von RES2DINV verwendeten *smoothness-constrained*-Modifikation der Gauss-Newton-Inversionsmethode muss das folgende Gleichungssystem gelöst werden (LOKE & BARKER 1996)

$$\left(\hat{J}_i^T \hat{J}_i + \lambda_i \hat{C}^T \hat{C} \right) \vec{p}_i = \hat{J}_i^T \vec{g}_i \quad . \quad (25)$$

Dabei ist \hat{J}_i die Jacobi-Matrix der i -ten Inversion, die die partiellen Ableitungen enthält, λ der Dämpfungsfaktor, \hat{C} die *flatness filter*-Matrix. Der Vektor \vec{p}_i ist der Perturbationsvektor der Modellparameter und \vec{g}_i der Vektor, der die Differenzen zwischen den Logarithmen der gemessenen und der berechneten Widerstandswerte enthält. Ein Vorteil der Methode liegt darin, dass die Werte für den Dämpfungsfaktor und für die Flatness-Faktoren variiert werden können, um das Inversionsergebnis besser an die Gegebenheiten anzupassen (LOKE 1995). Der Wert des Dämpfungsfaktors λ hängt vom Anteil an Rauschen in den Messwerten ab (SASAKI 1992). Für einen größeren Anteil an statistischem Rauschen kann ein größerer Wert für λ gewählt werden, womit Störsignale herausgefiltert werden können (LOKE & BARKER 1996). Die *flatness-filter*-Matrix enthält die horizontalen und vertikalen Flatness-Faktoren und erlaubt somit eine Gewichtung der Dämpfungsfaktoren in diese beiden Richtungen. Wenn die Strukturen hauptsächlich horizontal ausgerichtet sind, kann man eine kleinere Gewichtung auf den vertikalen Flatness-Faktor legen (LOKE 1995, 2010, 2011a). Als Startmodell für die Iteration wird eine homogene Verteilung der Widerstandswerte angenommen, mit einem Widerstandswert, der dem Mittelwert der gemessenen scheinbaren Widerstände entspricht. Für solch eine homogene Verteilung lässt sich die Jacobi-Matrix \hat{J}_0 analytisch berechnen (MCGILLIVRAY & OLDENBURG 1990; PARK & VAN 1991) und ihre Lösung kann somit in Abhängigkeit von der Wahl des Gitters und des Messverfahrens in einer Datei gespeichert werden. Dies

verkürzt die Laufzeit der Inversion enorm, da die aufwendige Berechnung der Jacobi-Matrix, die bei der konventionellen Gauss-Newton-Methode bei jedem Inversionsschritt neu durchgeführt werden muss, im Weiteren entfällt (LOKE & BARKER 1996). Für die weiteren Iterationen wird die sehr viel schnellere Quasi-Newton-Methode verwendet, bei der die Jacobi-Matrix durch eine Näherungsmatrix für die partiellen Ableitungen ersetzt wird (BROYDEN 1965). Es kann auch die konventionelle Gauss-Newton-Methode genutzt werden, die wesentlich langsamer ist, aber bei großen Widerstandscontrasten bessere Ergebnisse liefert. Als Kompromiss bietet sich an, für die ersten drei Iterationen die konventionelle Gauss-Newton-Methode zu verwenden und erst ab der vierten Iteration die Quasi-Newton-Methode (LOKE 1995).

Das Programm RES2DINV stellt die Messwerte anfangs in einer Pseudosektion graphisch dar, aus der erst durch die Inversion eine echte Tiefensektion wird. Untereinander abgebildet werden die Pseudosektionen der gemessenen („Measured Apparent Resistivity Pseudosection“), sowie der vom Modell berechneten scheinbaren Widerstände („Calculated Apparent Resistivity Pseudosection“) und die optimierte spezifische Widerstandsverteilung („Inverse Model Resistivity Section“).

Bei der Interpretation der erhaltenen Widerstandsprofile muss berücksichtigt werden, dass die dargestellten Widerstandswerte nur für die Modellblöcke gelten. Auch muss beachtet werden, dass bei der graphischen Darstellung Skalierungs- und Gridding-Verfahren zum Einsatz kommen (BUDÄUS 1996). Eine weitere Schwierigkeit bei der Interpretation ist, dass scharfe Grenzen nicht deutlich dargestellt werden können (SCHROTT & HECHT 2006). Um beim Inversionsergebnis sichtbare Strukturen zu erhalten, werden Regularisierungsverfahren eingesetzt, die immer das Modell mit den geringsten Kontrasten auswählen, um Singularitätseffekte zu vermeiden (TÄSCHNER 2008). Dies wirkt sich ungünstig bei der Auflösung scharfer Grenzen aus. Meist werden daher die Übergänge im Inversionsmodell unschärfer dargestellt, als dies real der Fall ist. Außerdem ist bei der Inversen Modellierung zu berücksichtigen, dass Prozesse vereinfacht oder vernachlässigt werden, dass nur eine beschränkte Anzahl an Messwerten vorliegt und dass Messfehler auftreten können. Das entstandene Inverse Modell ist immer nur eine mögliche Lösung der Struktur des Untergrundes, es gibt auch dazu äquivalente Modelle (KARDEIS 2009). Nach BENDER (1985) muss bei der Interpretation der Inversen Modelle berücksichtigt werden, dass sich bestimmte Schichten nur sehr schwach oder überhaupt nicht abzeichnen (Suppressionsprinzip). Dies kann der Fall sein, wenn die Schicht nur geringmächtig ist und sich ihr spezifischer Widerstand nur geringfügig von den Widerstandswerten der benachbarten Schichten unterscheidet. Es können sogar bis zu 20 m mächtige Schichten unterdrückt werden. Dabei sind vor allem zwei verschiedene Fälle zu unterscheiden. Liegt eine gut leitende Schicht zwischen zwei schlecht leitenden, so ist die Längsleitfähigkeit $s = h/\rho$ ausschlaggebend (h = Dicke der Schicht). Diese bleibt bei gleichen Vielfachen von h und ρ unverändert, so dass zahlreiche mögliche Lösungen dafür existieren (s-Äquivalenz). Wenn umgekehrt eine schlecht leitende Schicht zwischen zwei gut leitenden liegt, ist der Querwiderstand $t = h \cdot \rho$ entscheidend (t-Äquivalenz; BENDER 1985).

Modellerstellung mit RES2MOD: Das Programm **RES2MOD** ermöglicht die Erstellung von vereinfachten Modellen des Untergrundes, für die eine geoelektrische Messung simuliert werden kann. Die Funktionsweise ist ausführlich im Manual des Programmes beschrieben (LOKE 2002), weswegen hier nur ein kurzer Einblick gegeben wird. Das Programm arbeitet mit einer Vorwärtsmodellierung, d. h. es berechnet die zu erwartenden scheinbaren Widerstandswerte für ein zweidimensionales Modell des Untergrundes (LOKE 2002). Im Vorfeld der Messungen ist es sinnvoll, mit Hilfe einer Modellierung zu testen, welche Elektrodenanordnung für die zu erwartenden Anomalien am besten geeignet ist. Außerdem können mit der simulierten Pseudosektion die veränderbaren Parameter des Inversionsprogrammes auf ihre jeweiligen Auswirkungen hin getestet werden. Dadurch wird ein direkter Vergleich zwischen dem mit RES2MOD erstellten Modell und dem Inversionsergebnis ermöglicht. Diese Erkenntnisse können dabei helfen, Inversionsergebnisse real gemessener Daten besser zu interpretieren. Bei der Modellierung von Strukturen im Untergrund mit RES2MOD können bis zu 16 verschiedene Widerstandswerte in einem Modell verwendet werden. Es kann die Konfiguration gewählt werden, für die die Messung simuliert werden soll. Das Programm errechnet dann aus dem erstellten Modell die scheinbaren spezifischen Widerstandswerte, d. h. es erzeugt eine Pseudosektion. Durch Exportieren in eine dat-Datei kann mit dem Programm RES2DINV aus diesen simulierten Messwerten wiederum ein Inverses Modell des Bodens erzeugt werden. Um Messfehler zu simulieren, können die Datensätze mit bis zu 10% Rauschen belegt werden (LOKE 2002).

2.2 Bodenkundliche Feld- und Labormethoden

Bodenkundliche Feld- und Labormethoden werden ausführlich u. a. bei BARSCH ET AL. (2000), KRETZSCHMAR (1984) oder LESER (1977) beschrieben, weswegen hier nur kurz die in dieser Arbeit verwendeten Methoden vorgestellt werden.

Nach LESER (1977) sollten Schürfgruben an verschiedenen Standorten innerhalb des Geländes angelegt werden, um eine möglichst vollständige Toposequenz eines Geländes zu erhalten. Dabei empfiehlt es sich, die Standorte so zu wählen, dass möglichst alle Reliefpositionen erfasst werden, d. h. Kuppe, Ober-, Mittel-, Unterhang und Tiefenlinie. Die Ausmaße der Schürfgruben liegen bei 1 m Breite und 2 m Länge, die Tiefe der Gruben hängt von der Beschaffenheit des Untergrundes ab, da die Gruben möglichst alle Horizonte bis zum anstehenden Gestein (C-Horizont) erfassen sollten. Beschrieben werden die somit erhaltenen Bodenprofile mithilfe der *Bodenkundlichen Kartieranleitung* (AG BODEN 1996). Dabei können u. a. die Merkmale Bodenart, Horizontabfolge und -mächtigkeit, Humus- und Carbonatgehalt, pH-Wert und Gefügeform aufgenommen werden. Außerdem können noch sonstige Merkmale festgehalten werden, wie z. B. sekundäre Carbonat-, oder Fe-Mn-Ausfällungen, Mollusken, Tier- und Pflanzenreste, Holzkohle, Scherben, Ziegelstücke, Bioturbation. Die Bodenfarbe wird in feldfeuchtem Zustand nach den MUNSELL SOIL COLOR CHARTS (1975) bestimmt. Zur stratigraphischen Verknüpfung der Schürfgruben untereinander und zur weitreichenderen Kartierung des Geländes können Pürckhauer-Bohrungen dienen. Mit einem Innendurchmesser von

ca. 2 cm und einer Länge von 1 m liefern sie jedoch nur einen sehr kleinen Einblick in die Bodengegebenheiten und sind schwerer zu interpretieren. Die Beschreibung der Bohrprofile erfolgt nach ähnlichen Gesichtspunkten, wie bei den Schürfgruben. Um Informationen über die Gegebenheiten in etwas größerer Tiefe zu erhalten, können Rammkernsondierungen durchgeführt werden. Dabei erhält man Bohrkerne, die einen Durchmesser von ca. 4 cm haben und somit etwas leichter zu interpretieren sind als diejenigen, die man durch die Pürckhauer-Bohrstöcke erhält.

Proben können in Form von gestörten Proben oder Stechzylindern (E DIN ISO 10381) genommen werden. Anhand gestörter Proben kann z. B. der Gehalt an organischer Substanz oder an Kalk im Boden mit dem Verfahren des Glühverlustes (nach DIN 18128) ermittelt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Anteils an organischer Substanz ist deren Zerstörung durch Wasserstoffperoxid (H_2O_2).

Ein weiteres wichtiges Merkmal zur Unterscheidung der Böden ist die Korngrößenverteilung. Um diese zu bestimmen, werden je nach Korngröße unterschiedliche Methoden verwendet. Nach der Zerstörung der organischen Substanz durch die Behandlung mit H_2O_2 und der Zerstörung des Carbonates durch HCl werden die Fraktionen Grus (2 mm - 6,3 mm) und Sand (63 μm - 2 mm) durch standardisierte Siebe unterschiedlicher Maschenweite (DIN 4188) nacheinander aussortiert und nach anschließender Trocknung ausgewogen. Nach der Aussiebung der Grus- und Sandfraktionen können die Schluff- (2 μm - 63 μm) und die Tonfraktionen (< 2 μm) mit dem Pipettierverfahren nach Köhn (DIN 19683) sortiert werden. Die Korngrößenverteilung kann in Form von Histogrammen dargestellt werden, bei denen die prozentualen Anteile über den Fraktionen aufgetragen werden. Aus dem Vergleich der Histogramme der einzelnen Horizonte können Verschiebungen im Korngrößenspektrum ermittelt werden. Eine andere Möglichkeit der Darstellung ist die Kornsummenkurve, bei der die prozentualen Anteile der Fraktionen, angefangen von der Tonfraktion bis hin zur Grusfraktion schrittweise addiert werden und diese Summenwerte in einer Kurve über den Fraktionen aufgetragen werden. Mit Bodenproben in Stechzylindern können natürliche Lageeigenschaften des Bodens, wie z. B. die Feucht- und Trockendichte (DIN ISO 11272) bestimmt werden.

3 Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

Bevor die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Untersuchungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren und deren Ergebnisse vorgestellt und diskutiert werden, soll eine kurze Einführung in das Untersuchungsgebiet gegeben werden.

3.1 Einführung in das Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

Das Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ liegt am südwestlichen Rand des Ortes Dühren (vgl. Abb. 12). Dieser wiederum liegt südwestlich von Sinsheim, im Kraichgau, im Nordwesten Baden-Württembergs. Großräumlich betrachtet befindet sich der Kraichgau am Westrand der „Südwestdeutschen Großscholle“, deren tektonischer Bau ausführlich bei CARLÉ (1950) beschrieben wird. Das auch als „Kraichgaumulde“ bezeichnete Gebiet, welches eine Gesamtfläche von ca. 1600 km² (MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1962) und Höhen um die 200 bis 300 m aufweist (DÖRRER 1993), wird zu den Gäuplaten des Neckarlandes gerechnet, was sich auch in der Namensgebung zeigt (MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1962).

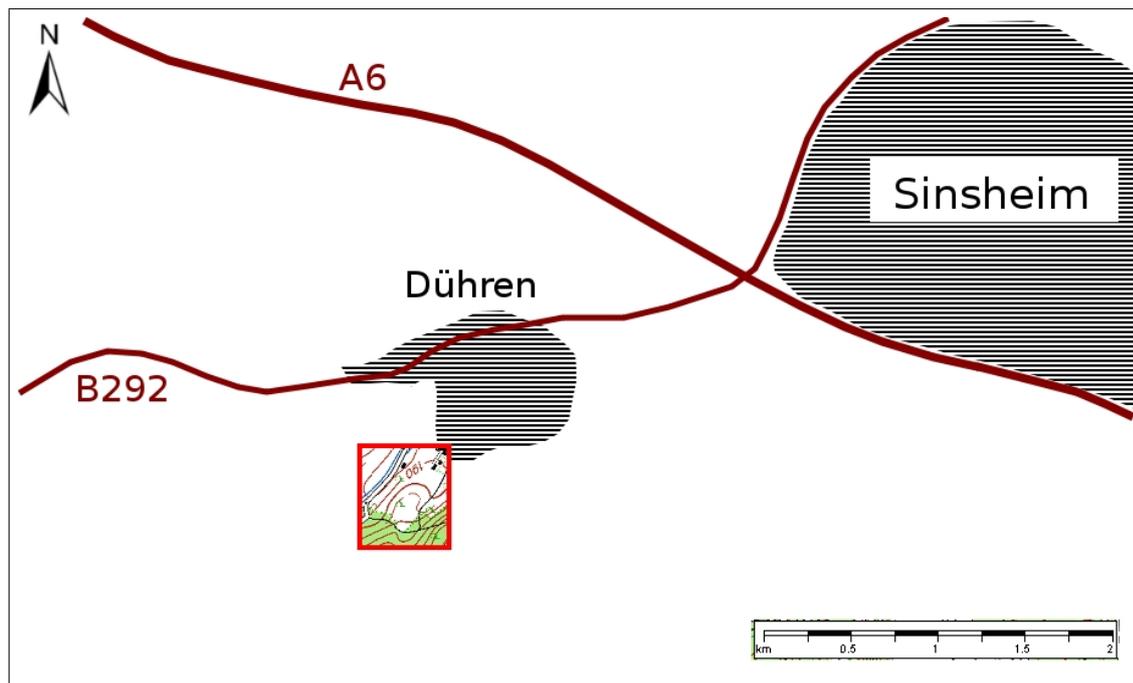


Abbildung 12: Geographische Lage des Untersuchungsgebietes Gewann „Steinbock“ (rot umrandet) am südwestlichen Ortsrand von Sinsheim-Dühren. Quelle: Eigener Entwurf, erstellt auf der Grundlage der Top 50 (LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 2006).

3.1.1 Geologie, Böden, Klima und Hydrologie

In der alten tektonischen Senkungszone des Kraichgau stehen oberflächennah die Gesteine der Trias an (ROTHE 2005). Dabei dominieren Muschelkalk und Keupersedimente, die lokal von mächtigem Löss überdeckt sind (EITEL 1989). Durch die nach Westen zum Oberrheingraben hin offene Flanke des Kraichgau konnten die Westwinde der pleistozänen Kaltzeiten den Staub aus den Schotterfluren des Rheintals anwehen (ROTHE 2005; SCHWEIZER & KRAATZ 1982), den Löss, der nun v. a. auf Hochflächen und auf nach Osten exponierten Leehängen liegt. Zum „Kraichgau-Löss“ liegen zahlreiche Untersuchungen vor, z. B. von EITEL (1989), HERRMANN & STAHR (2000) oder auch SABELBERG & LÖSCHER (1978), um nur einige zu nennen. Dieser zum Teil mächtigen Lössbedeckung verdankt die sanftwellige Hügellandschaft ihr Relief. Es kommen wenige, zumeist niedrige steile Hänge vor und es sind keine scharfen Grenzen zwischen den Talhängen und den nach Süden abfallenden Hügelrücken entwickelt (SCHWEIZER & KRAATZ 1982).

An Stellen, an denen der Keuper ansteht, überwiegt der Untere Gipskeuper, auf dem zumeist auf bewaldeten Kuppen noch Reste des Schilfsandsteins zu finden sind. Im Gebiet um Sinsheim tritt der Mittlere Keuper auf mit Schilfsandstein, Bunten Mergeln und Gipskeuper (ROTHE 2005). Während des Pleistozäns kam es zu Solifluktionserscheinungen, es entstanden Fließerden (SCHWEIZER & KRAATZ 1982).

Nach den Geologischen Karten Wiesloch (6718; LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1902) und Sinsheim (6719; LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1895) kommen im Umfeld des Untersuchungsgebietes, im Bereich Sinsheim-Dühren, neben dem Löss verschiedene Schichten des Mittleren Keupers (Gipskeuper, km1), Schilfsandstein (km2) und Bunte Mergel (km3) vor. Im Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ stehen vor allem jüngerer (dle) und älterer Lösslehm (dla) neben Unterem Gipskeuper (km1) an.

Die Böden des Kraichgau werden zum größten Teil durch die mächtige Lössbedeckung geprägt (EITEL 1989). So wird z. B. deren Fruchtbarkeit maßgeblich durch den carbonathaltigen Löss und seine Verwitterungsprodukte gewährleistet. In der Nacheiszeit unter humiden Klimabedingung konnten bodenbildende Prozesse einsetzen, die Carbonate aus dem Löss wurden vertikal verlagert. Der ursprünglich gelbliche Löss entwickelte sich durch die Bildung von Eisenoxiden und Tonmineralen zu einem gelbbraunen Lösslehm, der eine optimale Ausgangslage für ertragreiche Böden bildet (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998). So entwickelten sich unter den für die Bodenbildung günstigen Bedingungen des Holozäns in den mächtigen Lössschichten des Kraichgau tiefgründige, lehmige Parabraunerden (DÖRRER 1993). In relativ jungen Stadien der Bodenbildung entstand zunächst das Ah-C-Profil der Pararendzina (vgl. z. B. EITEL 2001; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998). Daraufhin entwickelten sich häufig zunächst Braunerden oder Parabraunerden. Voll entwickelte Parabraunerden sind inzwischen jedoch nur noch an wenigen Stellen erhalten, zumeist liegen sie gekappt vor. Da die Erosionsdynamik an den Hängen des Kraichgau zum Teil sehr groß ist, kam es vor allem unter landwirtschaftlicher Nutzung häufig zu einem vollständigen Verlust des gebildeten Bodens und somit der ursprünglichen Bodentypen (EICHLER 2003). An solchen Erosionsstand-

3.1 Einführung in das Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

orten haben sich inzwischen im Löss wieder schluffreiche Pararendzinen entwickelt. Wo die Lössbedeckung fehlt, entwickelten sich auf dem Keuper und den Keuper-Fließerden schwere, häufig kalkreiche Böden. Es überwiegen Pelosole, die mit tonig-lehmigen Braunerden und Parabraunerden vergesellschaftet sind (DÖRRER 1993). Durch den hohen Tonanteil des Gipskeupers bilden sich häufig Böden, die wenig wasserdurchlässig sind, wodurch es zu Staunässe kommt. In flacheren Bereichen kommt es aus diesem Grund oft zur Entstehung von Pseudogleyen. In Senken, am Fuße der Hügel und an Böschungen sind Kolluvisole ausgebildet, im Kolluvium, welches durch Erosion weiter oben liegenden Bodenmaterials entstanden ist (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998).

Durch die Beckenlage der Kraichgau-Senke (unter 300 m ü. NN) herrscht dort mildes, warmes Klima mit kontinental geprägtem Temperaturgang und mäßigen Niederschlägen vor (DÖRRER 1993). Die Jahresmitteltemperatur liegt bei ca. 9°C, weswegen der Kraichgau mit zu den wärmsten Gebieten Deutschlands gehört (HERRMANN & STAHR 2000). Die mittleren jährlichen Niederschläge liegen am Westrand des Kraichgaus bei ca. 650 mm, im Osten und Süden bei über 700 mm (DÖRRER 1993). Die Winde kommen zu meist aus südwestlicher Richtung und werden durch das flachwellige Relief begünstigt. Durch die Beckenlage werden die Starkwinde jedoch abgemildert (HERRMANN & STAHR 2000).

Die Entwässerung des Kraichgaus findet in westlicher Richtung in den Rhein statt. In östlicher Richtung führen Lein und Zaber (und Metter) durch das Stromberg-Heuchelberg-Gebiet in den Neckar. In anfangs östlicher, dann nach Norden abbiegender Richtung entwässert die Elsenz den Kraichgau, die bei Neckargemünd in den Neckar mündet (MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1962). Der Ort Dühren, welcher in einem Seitental der Elsenz liegt, wird durch den Erlenbach entwässert. Am Fuße des Hügels, auf dem das Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ liegt, verläuft der Wittigbach.

3.1.2 Besiedlungsgeschichte des Untersuchungsgebietes und archäologische Fundlage im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

Das Gebiet um den Ort Sinsheim-Dühren ist Altsiedelland. Der Landesgeologe Dr. H. Thürach hat im „verschwemmten Löß in Hohlwegen bei Dühren Brandspuren gefunden, die mit Grund als palaeolithisch (altsteinzeitlich) anzusehen seien“ (WAGNER 1911, S. 332). Südwestlich von Dühren liegen im „Großen Wald“ vierzehn Grabhügel mit insgesamt mindestens 80 Bestattungen, die erstmals von WILHELMI (1830) entdeckt und von ihm in die Zeit zwischen Neolithikum und Latènezeit eingeordnet wurden (vgl. dazu auch Tab. 2). Die Nekropole enthält keine Gräber der Mittellatènezeit (ca. 320 bis 150 v. Chr.), wobei nicht klar ist, warum sie gegen Ende der Frühlatène-Periode (480 bis 320 v. Chr.) aufgegeben wurde (SCHUMACHER 1931). Die zu den Grabhügeln gehörige Siedlung ist bisher nicht ermittelt, es ist jedoch möglich, dass es sich bei dem Untersuchungsgebiet um das ehemalige Siedlungsgebiet handelt.

Reste eines römischen Gutshofes im Waldgebiet oberhalb der „Drei Bückel“ zeugen von römischer Besiedlung im Untersuchungsgebiet. Außerdem führten einige römische Handelsstraßen durch das Gebiet (SCHUMACHER 1931).

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GEWANN „STEINBOCK“ BEI SINSHEIM-DÜHREN

Tabelle 2: Zeittafel vom Neolithikum bis zur Römischen Kaiserzeit. Quelle: Nach EGGERS 1959 und REINECKE & BÖHNER 1965.

Römische Kaiserzeit	C	150 - 375 n. Chr.
	B	0 - 150 n. Chr.
Latènezeit	D	150 - 0 v. Chr.
	C	320 - 150 v. Chr.
	B	400 - 320 v. Chr.
	A	480 - 400 v. Chr.
Hallstattzeit	D	650 - 480 v. Chr.
	C	800 - 650 v. Chr.
	B	1050 - 800 v. Chr.
	A	1200 - 1050 v. Chr.
Bronzezeit	Spät	1300 - 1200 v. Chr.
	Mittel	1600 - 1300 v. Chr.
	Früh	2200 - 1600 v. Chr.
Neolithikum	End	2800 - 2200 v. Chr.
	Spät	3500 - 2800 v. Chr.
	Jung	4400 - 3500 v. Chr.
	Mittel	5000 - 4400 v. Chr.
	Früh	5500 - 5000 v. Chr.

Wie der aus Dühren stammende Archäologe Schumacher berichtete (vgl. dazu auch SCHUMACHER 1890 oder 1931), stieß der Landwirt A. Bender 1865 beim Pflügen im Gewann „Steinbock“ südwestlich des kleinen Ortes Dühren bei Sinsheim auf ein Grab, welches reiche Grabbeigaben enthielt. Bis es jedoch zur archäologischen Grabung durch Schumacher kam, war ein großer Teil der gefundenen Gegenstände bereits zerstört oder verschwunden. Die noch erhaltenen Funde befinden sich derzeit im Badischen Landesmuseum in Karlsruhe (MATTHES ET AL. 2007). Eine Untersuchung der Funde (Abb. 13) findet derzeit im Rahmen einer Dissertation an der Philosophischen Fakultät der Eberhard Karls Universität Tübingen durch J. Spohn statt, der das reich ausgestattete Frauengrab von Sinsheim-Dühren zu den „bedeutendsten Grabfunden der jüngeren Latènezeit im mitteleuropäischen Raum“ zählt (SPOHN 2008, S. 54).

Im Jahre 1889 wurde die Fundstelle durch Schumacher einer erneuten Untersuchung unterzogen (SCHUMACHER 1889). Beim Sondieren um die Fundstelle herum stieß Schumacher dabei in einer Tiefe von ca. 50 - 55 cm auf einen „Streifen verkohlten Holzes von einer Bretter- oder Balkenlage, die in etwa 4 Meter Abstand von der Grabstätte in südöstlicher Richtung auf über 35 Meter Länge verfolgt wurde, ohne daß ihr Ende erreicht wäre. In 1,30 m Entfernung nach Westen ist sie auf der ganzen Länge von einem etwa 25 Zentimeter höher gelegenen böschungsartigen Brandstreifen begleitet“ (SCHUMACHER 1931, S. 14). Er hielt diesen Befund für eine „Holzbefestigung mit Rasenaufsatz oder Erdauswurf, die durch eine Feuersbrunst zu Grunde ging und mit dem Grabe selbst nichts zu tun hat“ (SCHUMACHER 1931, S. 14) und vermutete bereits, dass

3.1 Einführung in das Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

an dieser Stelle eine keltische Viereckschanze (ein „gallischer Meierhof“, SCHUMACHER 1931, S. 14) gelegen haben könnte.

Auch die Lage ist eine für Viereckschanzen typische, auf einem fruchtbaren Lössrücken, 200 m von einer starken Quelle und ebenso weit vom Wittigbach entfernt (vgl. dazu auch Kap. 3.1.3). In den 1960er Jahren fanden Nachgrabungen unter der Leitung von Prof. Fischer (Universität Tübingen) statt (FISCHER 1986), die den Fund eines Spitzgrabens bestätigten (vgl. auch MATTHES ET AL. 2007).

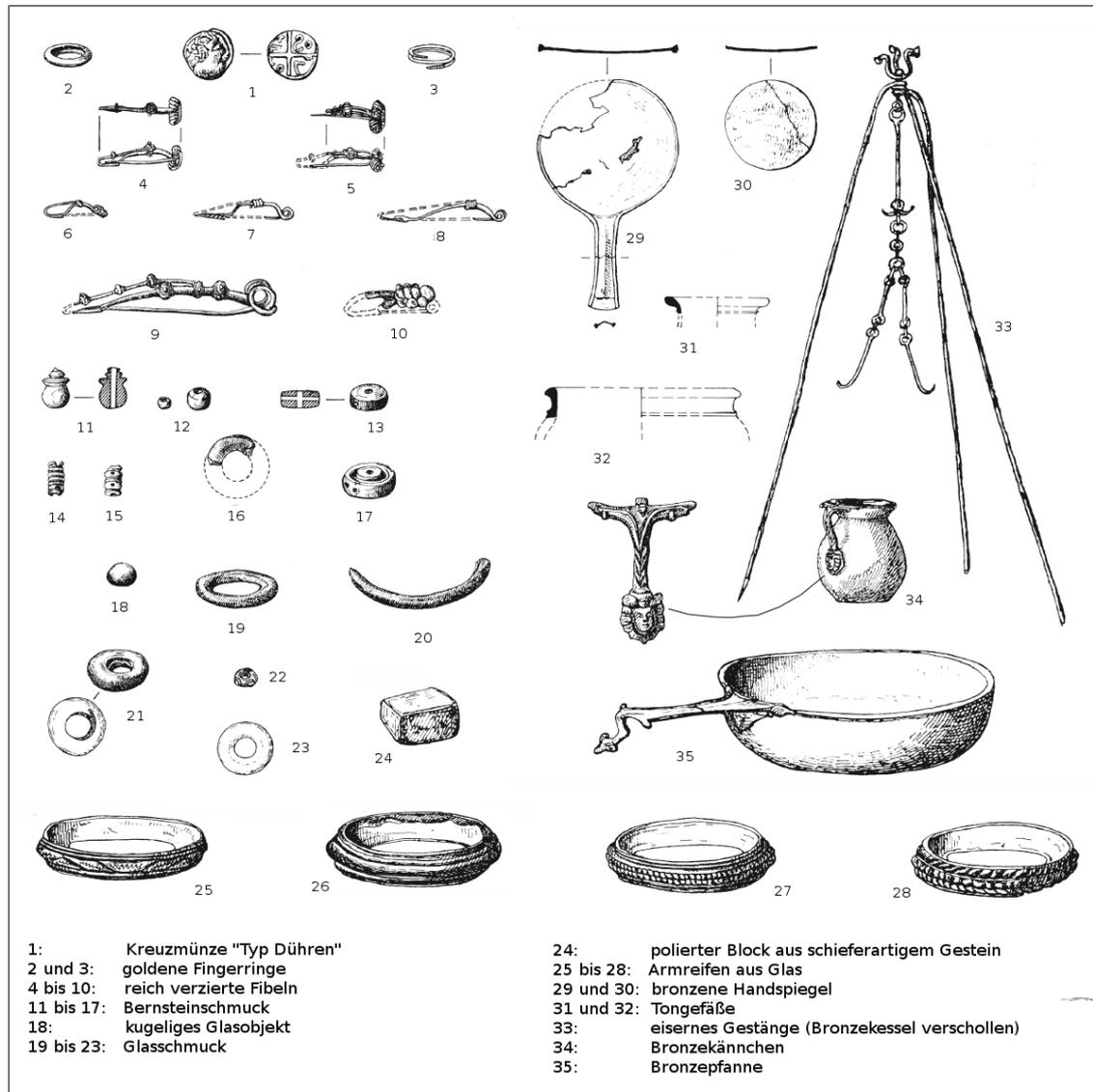


Abbildung 13: Auswahl von Funden aus dem keltischen Prunkgrab im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (unterschiedliche Maßstäbe). Quelle: Zusammengestellt aus SPOHN 2008.

3.1.3 Bedeutung, Lage und Aufbau keltischer Viereckschanzen

Die Bezeichnung „Viereckschanze“ geht auf den bayerischen Landeskonservator P. Reinecke zurück (WIELAND 1999). Dieser vertrat die Ansicht, die auch heute wieder von einigen Autoren vertreten wird (REICHENBERGER 1991; WIELAND 1995, 1996), dass es sich bei den viereckigen Anlagen um befestigte Gutshöfe gehandelt hat. Die Einordnung der Schanzen als spätkeltische Heiligtümer, Opferplätze ist ebenfalls eine Interpretation, die einige Autoren vertreten (BITTEL ET AL. 1990; GOESSLER 1952), sogar die Deutung als Viehgehege wurde diskutiert (BEESER 1990; EBERL 1932).

Neuere Erkenntnisse und Untersuchungen an zahlreichen Schanzen lassen eine Interpretation als „Zentralörtlichkeiten der untersten Kategorie“ zu (WIELAND 1999, S. 20), die eine wichtige Funktion für die ländliche Besiedelung der jüngeren Latènezeit hatten. WIELAND (1999) vermutet in den Viereckschanzen die typische ländliche Siedlungsform des 2. und 1. Jhds. v. Chr. Er beschreibt ebenfalls ausführlich die typischen Lagen keltischer Viereckschanzen mit deren jeweiliger Häufigkeit (z. B. auf flachen Hügelrücken, an flachen Hängen, in weitläufigen Ebenen, auf flachen Hügelkuppen, an Steilhängen oder in Senken; WIELAND 1999).

Bei der Wahl des Standortortes spielte das Vorhandensein von Wasser, in Form von nahegelegenen Quellen, Bächen oder Flüssen offenbar eine Rolle. Dies war jedoch nicht zwingend notwendig, da auch eine Versorgung mit Grundwasser möglich war, was zahlreiche Brunnenfunde innerhalb von Viereckschanzen belegen (WIELAND 1999).

Nach WIELAND (1999) liegen nahezu alle Viereckschanzen in fast steinfreien Böden, welche im Allgemeinen für die landwirtschaftliche Nutzung gut geeignet sind. Meist herrschen dort tiefgründige Lehme, Lösslehme, Sande, Feinkiese bzw. deren Durchmischungen vor, grobsteinige und felsige Standorte scheinen eher gemieden worden zu sein. Die Viereckschanzen weisen häufig eine quadratische oder zumindest annähernd quadratische Form auf, mit durchschnittlichen Seitenlängen zwischen 80 und 100 m (WIELAND 1999). Umbaut waren sie in den meisten Fällen mit einem Graben und einem nach innen angrenzenden, mit dem ausgehobenen Material aufgeschütteten Erdwall, der in manchen Fällen mit Holzpalisaden bebaut war (vgl. Abb. 14). Der Graben war in den meisten Fällen in Form eines Spitzgrabens angelegt, mit einer durchschnittlichen Tiefe von 2,5 m. Die obere Breite dürfte bei 4 bis 6 m gelegen haben. Der Wall könnte eine Höhe von 2 bis 3 m erreicht haben mit einer unteren Breite bis zu 7 m (vgl. Abb. 15). Nach WIELAND (1999) ist die Bebauung mit Holzpalisaden nicht gesichert, da es nur wenige Hinweise darauf gibt (z. B. Holzhausen). Möglich wäre auch eine Bebauung mit Zäunen oder eine Bepflanzung mit Hecken als Erosionsschutz. Der Zugang zur Schanze wurde durch breite Lücken in der Wall-Graben-Anlage ermöglicht, in die eventuell eine Holztoranlage gebaut war. Der Übergang über den Graben wurde vermutlich durch eine Holzbrücke gewährleistet, die der Toranlage vorgelagert war. Die Tore waren zumeist in Richtung Osten orientiert, seltener nach Süden oder Westen. Es wurde jedoch keine einzige nach Norden gewendete Öffnung der Schanzen gefunden. Die Wall-Graben-Anlagen könnten auf ein steigendes Schutzbedürfnis hindeuten. Innerhalb der Umwallung konnten die Wasserversorgung und wichtige Güter besser geschützt werden (WIELAND 1999).

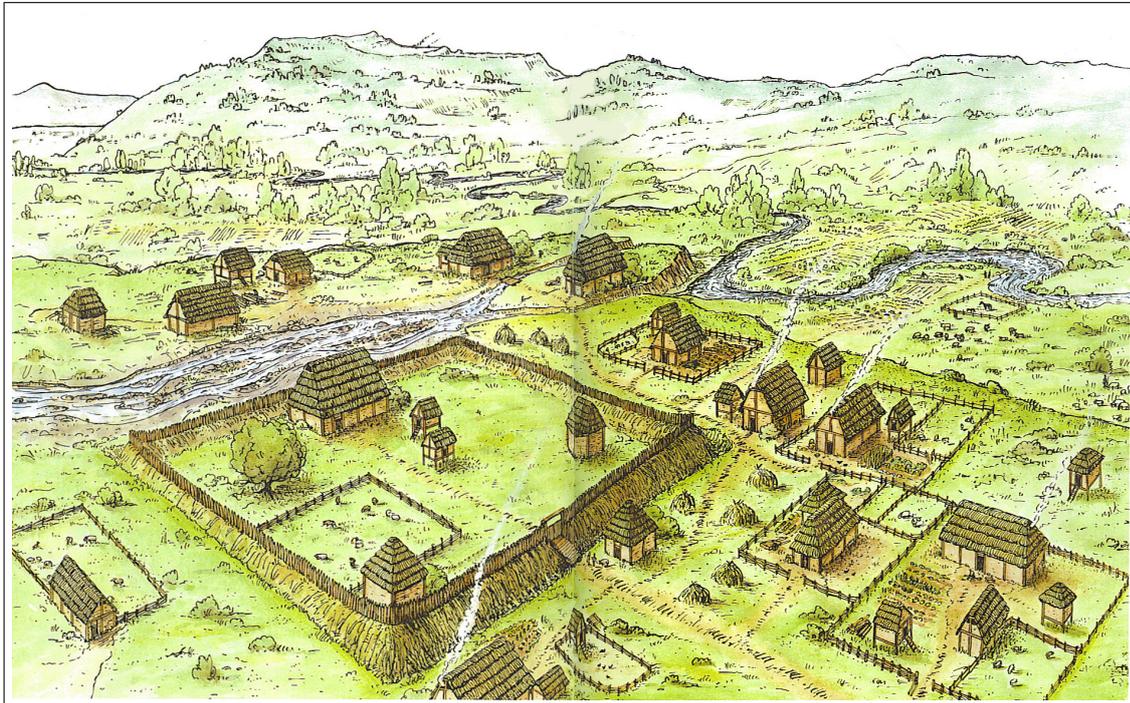


Abbildung 14: Rekonstruktionsversuch der Viereckschanze als Teil einer Dorfsiedlung, Bopfinger. Quelle: Zeichnung: J. Sailer, aus WIELAND 1999.

In einigen Fällen waren den Schanzen Vorbauten, sogenannte Annexe, vorgelagert, bei denen es sich evtl. um Siedlungen handelte, die nachträglich in den Bereich der Schanzenumwallung eingegliedert wurden (WIELAND 1999).

Nach WIELAND (1999) weist die Innenbebauung der Viereckschanzen ebenfalls typische Merkmale auf. Charakteristisch sind z. B. quadratische Pfostenbauten mit vier großen Pfosten im Innenraum, meist in den Ecken der Viereckschanzen mit Seitenlängen von 8 bis 9 m. Möglich waren auch größere, rechteckige Bauten mit Seitenlängen von bis zu 20 m an der dem Eingang gegenüberliegenden Seite mit einem vermutlich überdachten Vorraum.

Ein bisher nicht geklärter Aspekt ist das Ende der Viereckschanzen. Nach WIELAND (1999) gibt es zahlreiche Hinweise darauf, dass ein großes Schadensfeuer ihnen ein Ende bereitere. Darauf deuten Brandreste und Hüttenlehmstücke in den Grabenfüllungen und den Verfüllungen der Pfostengruben hin. Caesar gibt in seinem *Bellum Gallicum* (I, 5, 2) den Hinweis, die Helvetier hätten bei ihrem Auszug ihre Dörfer, Oppida und Gehöfte selbst niedergebrannt, um keinen Anreiz zur Rückkehr zu haben (GUTHARDT 1973). Die Ursache dieser Brände ist jedoch noch nicht vollständig geklärt.

WIELAND (1999) hält es für möglich, dass die Viereckschanzen in der römischen Zeit eventuell auch vom Militär als Lager weitergenutzt wurden, da bei fast allen Grabungen römische Funde zum Vorschein kamen.

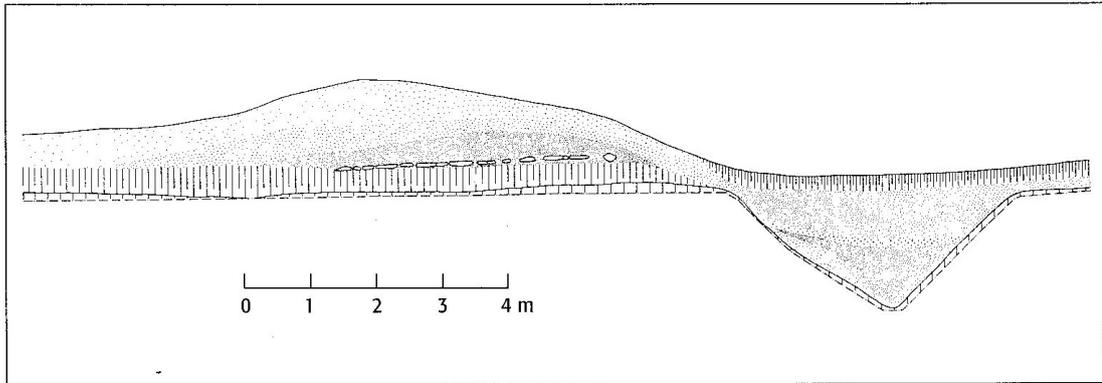


Abbildung 15: Querschnitt durch Wall und Graben (Südostseite) der Viereckschanze von Pliezhausen-Rübgarten. Quelle: Leicht verändert nach WIELAND 1999, S. 43; Original in BITTEL ET AL. 1990.

3.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

In diesem Kapitel werden die im Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim Dühren durchgeführten bodenkundlichen Untersuchungen und geoelektrischen Messungen und deren Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Dabei werden die Untersuchungen, die in direktem Zusammenhang mit der keltischen Viereckschanze stehen (on-site), von denjenigen, die sich mit dem Umfeld des archäologischen Befundes befassen (off-site), weitgehend getrennt behandelt. Die direkten Vergleiche zwischen ERT-Profilen und archäologischen Grabungsbefunden werden erläutert und die daraus gewonnenen Erkenntnisse aufgezeigt. Ergänzend dazu werden theoretische Modelle behandelt.

3.2.1 Bodenkundliche Untersuchungen und geoelektrische Messungen im Umfeld der keltischen Viereckschanze (off-site)

Im Gewann „Steinbock“ wurde zu Beginn der Untersuchungen eine bodenkundliche Kartierung vorgenommen. Dafür wurden z. T. im Rahmen mehrerer Geländepraktika zur Physischen Geographie der Universität Heidelberg (vgl. dazu auch PROTOKOLLE GELÄNDEPRAKTIKUM SINSHEIM 2006 bis 2008) Schürfguben angelegt und von G. Schukraft (Leiter des Labors für Geomorphologie und Geoökologie der Universität Heidelberg) Rammkernsondierungen durchgeführt. Zur stratigraphischen Verknüpfung der Schürfguben dienten Pürckhauer-Bohrungen. Von den für diese Arbeit benötigten geoelektrischen Messungen wurden einige von Dr. S. Hecht (Geographisches Institut der Universität Heidelberg) ebenfalls im Rahmen der Geländepraktika durchgeführt. In der Übersichtskarte (Abb. 16) ist die Lage aller Schürfguben, Geoelektrikprofile, Rammkernsondierungen und Pürckhauer-Bohrungen verzeichnet. Ebenfalls eingezeichnet wurde der Verlauf des Wallgrabens der Viereckschanze, auf den in Kapitel 3.2.3 ausführlicher eingegangen wird.

3.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

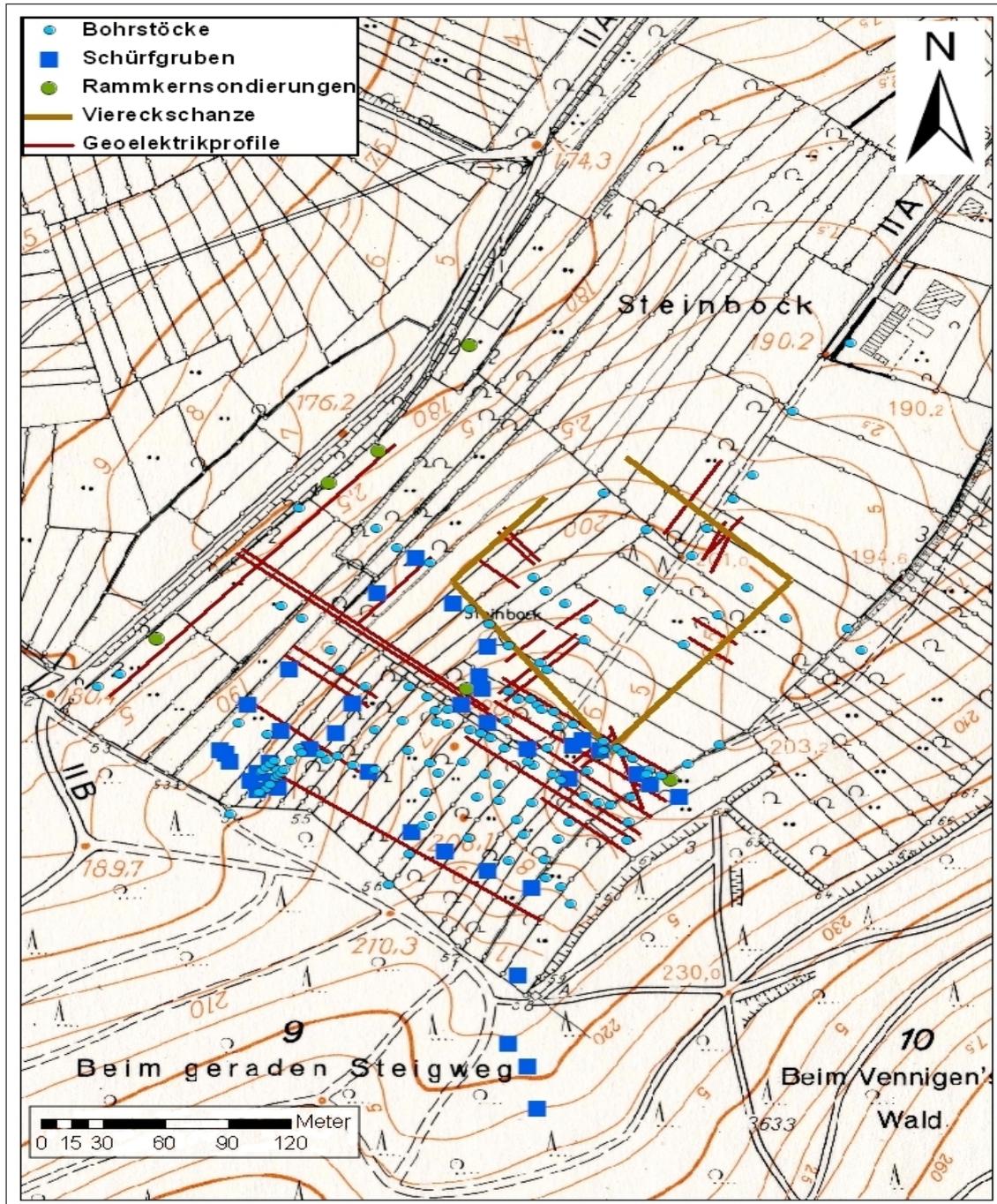


Abbildung 16: Übersichtskarte über die Geoelektrikprofile, Schürfgruben, Pürckhauer-Bohrstöcke und Rammkernsondierungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (vgl. zur Lage auch Abb. 12). Gekennzeichnet ist auch die Lage der Viereckschanze (braunes unvollständiges Viereck), wie sie sich auf Grundlage der vorliegenden Daten ergab (vgl. Kap. 3.2.3). Quelle: Erstellt auf der Kartengrundlage der DGK Dühren Südwest (LANDESMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1977) mit ArcGIS® (ESRI).

3.2.1.1 Identifizierung der Böden und Vorstellung der Leitprofile

Insgesamt wurden 40 Schürfgruben in verschiedenen Reliefpositionen (Kuppe, Ober- und Mittelhang) angelegt, um möglichst vollständige Toposequenzen zu erhalten. Die Gruben hatten eine durchschnittliche Breite von 1 m, die Länge lag zwischen 1,5 und 2 m. Die Tiefe variierte zwischen 1 und 2 m, je nach Beschaffenheit des Bodens. In Abbildung 17 sind die Positionen der angelegten Schürfgruben mit ihrer chronologischen Nummerierung (P1 bis P40) gekennzeichnet.

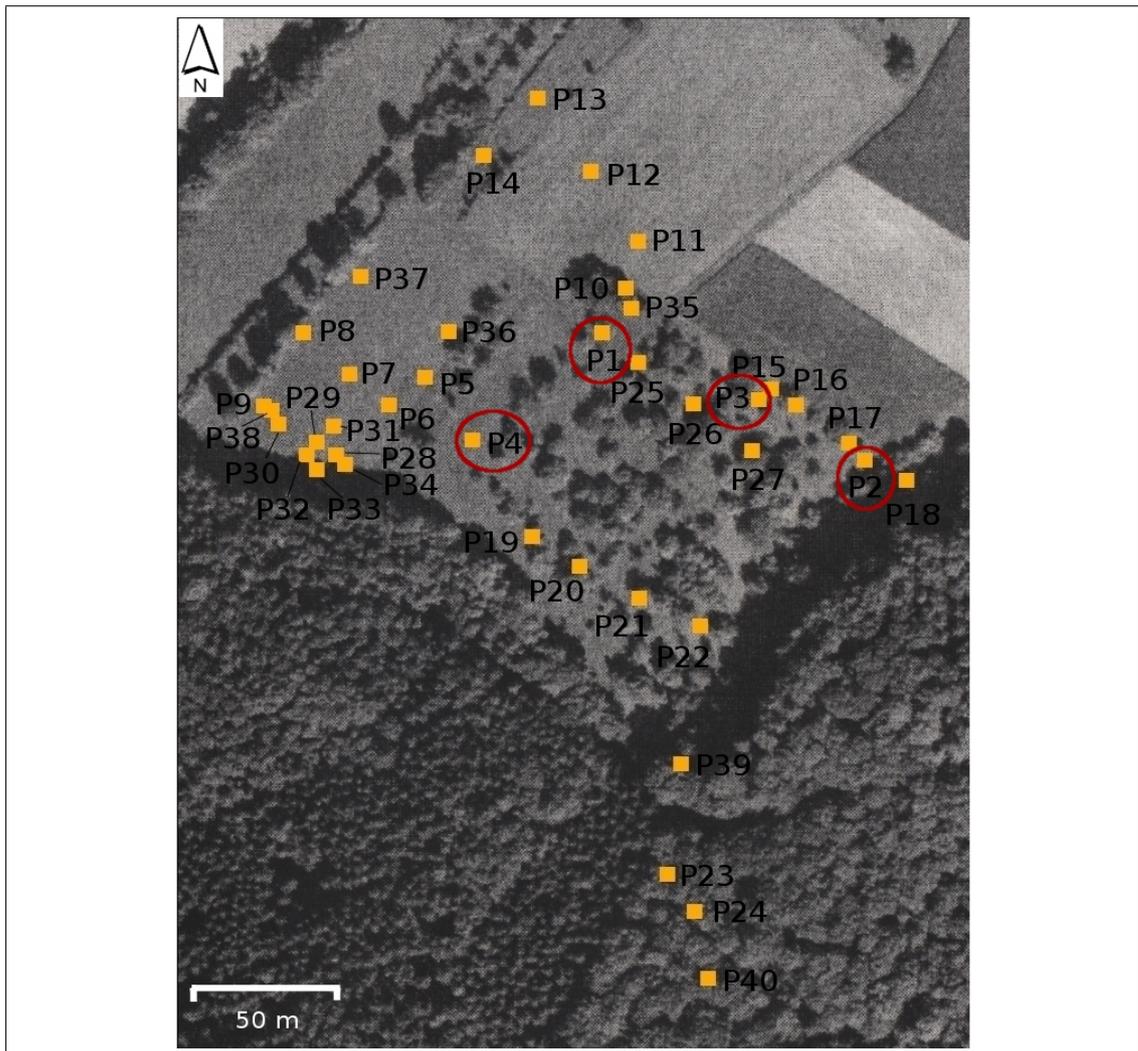


Abbildung 17: Übersichtskarte über die Schürfgruben (P1 bis P40, orangene Quadrate) im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. 16). Die Schürfgruben, die als Leitprofile vorgestellt werden (vgl. Kap. 3.2.1.1), sind rot eingekreist. Quelle: Eigene Darstellung, zugrundeliegendes Orthophoto zur Verfügung gestellt vom Regierungspräsidium Karlsruhe.

Die Feldansprache der angelegten Schürfruben erfolgte nach der *Bodenkundlichen Kartieranleitung* (AG BODEN 1996). Dabei wurde zuerst eine Unterteilung der Bodenprofile (P1 - P40; vgl. Abb. 17) in die verschiedenen Horizonte vorgenommen (vgl. Tab. A.9, Anhang). Für jeden dieser Horizonte wurde die Bodenart bestimmt und mit 12%-iger Salzsäure der Carbonatgehalt abgeschätzt. Die Farbansprache erfolgte im feldfeuchten Zustand mit Hilfe der MUNSSELL SOIL COLOR CHARTS (1975). Desweiteren wurden Besonderheiten, wie z. B. Holzkohle oder Ziegelbruchstücke, Hydromorphie-Merkmale, Fe-Mn-Ausfällungen, oder Anzeichen von Bioturbation aufgenommen. Aus der Gesamtheit dieser Daten wurden die Bodentypen bestimmt.

Die angelegten Schürfruben wurden mithilfe von 127 Pürckhauer-Bohrstöcken stratigraphisch verknüpft (vgl. Abb. 16). Ebenso sollten damit auch Informationen über Bereiche gewonnen werden, in denen geländebedingt keine Schürfruben angelegt werden konnten. Auch bei den Bohrstöcken wurden im Feld für die verschiedenen Horizonte jeweils die Merkmale Bodenart, -farbe und Carbonatgehalt bestimmt (vgl. Tab. A.11, Anhang). Die 7 Rammkernsondierungen (vgl. Abb. 16) ergänzten die Erkenntnisse aus den Schürfruben und ermöglichten Einblicke in etwas tiefere Bereiche. Bei den Rammkernen umfasste die Feldansprache ebenfalls die oben genannten Merkmale, außerdem wurden Besonderheiten notiert (Tab. A.10, Anhang). Zusammengefasst wurden die Ergebnisse der Kartierung in einer Bodenkarte (Abb. 18). Die Grundlage für die Bodenkarte bildeten die Bodentypen, die bei der Kartierung des Geländes hauptsächlich durch die Feldbestimmungen der Schürfruben identifiziert werden konnten. Zur Ergänzung der Feldansprachen wurden bei vier Leitprofilen (P1, P2, P3 und P4) Laboranalysen zur Korngrößenverteilung, zum Kalk- und Humusgehalt durchgeführt. Da das Untersuchungsgebiet landwirtschaftlich genutzt wird, konnten nicht im gesamten Gewann bodenkundliche Kartierungen und Beprobungen durchgeführt werden. Ebenso wurden keine Schürfruben innerhalb der Viereckschanze angelegt, um keine archäologischen Befunde zu zerstören. Aus diesen Gründen konzentrieren sich die bodenkundlichen Untersuchungen vor allem auf die Bereiche der nach Südosten und nach Nordwesten hin exponierten Hänge südwestlich der Schanze (vgl. Abb. 16). Bereiche der Karte, zu denen keine gesicherten Erkenntnisse vorliegen, wurden teilweise anhand der benachbarten Schürfruben unter Berücksichtigung der jeweiligen Hangsituation interpoliert. Um die Verteilung der Bodentypen im Untersuchungsgebiet in Bezug zum vorhandenen Relief zu setzen, wurde die Bodenkarte in ein dreidimensionales Modell des Geländes eingebettet (Abb. 19).

Die erstellte Bodenkarte (Abb. 18) zeigt, dass im Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ viele der für den Kraichgau typischen Böden vorkommen, wie sie in Kapitel 3.1.1 vorgestellt wurden. Durch die sanftwellige Beschaffenheit des Hanges, die Reste der Lössauflage an manchen Stellen, die anstehenden Keuper-Fließerden und die stärkere Durchfeuchtung in Senkenbereichen haben sich an den unterschiedlichen Reliefpositionen jeweils andere Böden entwickelt.

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GEWANN „STEINBOCK“ BEI SINSHEIM-DÜHREN

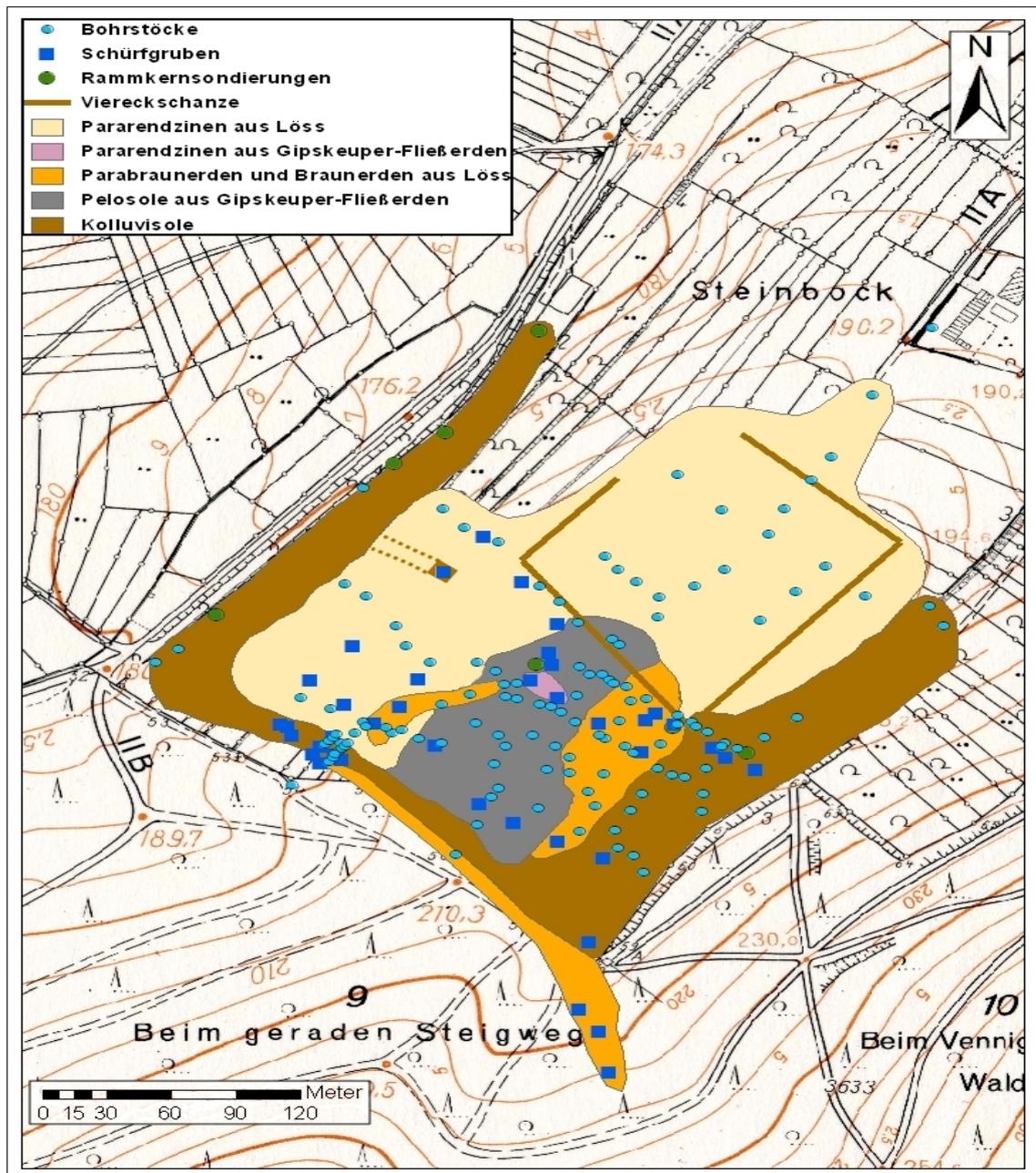


Abbildung 18: Bodenkarte für das Untersuchungsgebiet Gewinn „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (vgl. zur Lage auch Abb. 12). Die Bereiche, für die keine bodenkundlichen Daten vorlagen, wurden interpoliert. Übergangsformen sind unter ihrem vorrangigen Erscheinungstyp eingeordnet. Die gestrichelten Linien deuten an, dass an dieser Stelle ebenfalls ein kolluvialer Bereich liegen könnte, der jedoch nur durch eine Schürffgrube gesichert ist. Auf diesen Bereich wird in Kapitel 3.2.1.2 noch eingegangen. Gekennzeichnet ist auch die Lage der Viereckschanze (braunes unvollständiges Viereck), wie sie sich auf Grundlage der vorliegenden Daten ergab (vgl. Kap. 3.2.3). Quelle: Erstellt auf der Kartengrundlage der DGK Dühren Südwest (LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1977) mit ArcGIS® (ESRI).

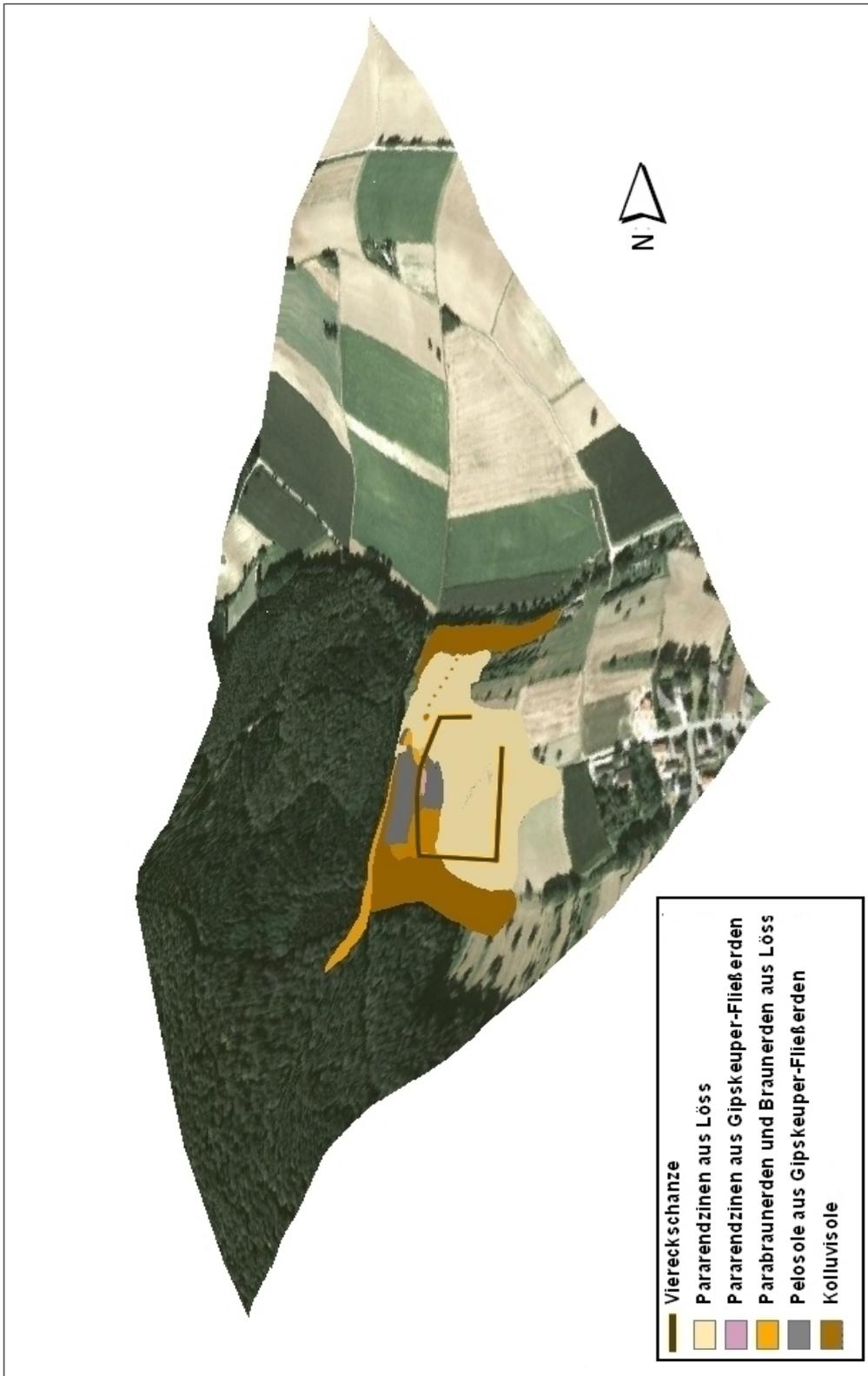


Abbildung 19: Dreidimensionales Modell (zweifach überhöht) des Untersuchungsgebietes Gewann „Steinbock“ (zur Lage vgl. Abb. 12). Eingezeichnet wurden die Bodentypen (vgl. dazu auch Abb. 18) und die Viereckschanze (braunes unvollständiges Viereck), auf die im Kapitel 3.2.3 näher eingegangen wird. Die gestrichelte Linie (Kolluvisol) deutet eine vermutete Rinne an, die jedoch nur durch eine Schürfgrube und ein ERT-Profil gesichert ist. Quelle: Erstellt mit ArcGIS® und ArcScene® (ESRI) auf der Grundlage der DGK Dühren Südwest (LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1977).

- **Pelosole aus Gipskeuper-Fließerden:** Im flacheren Kuppen- und Oberhangbereich des Hanges, wo die Lössbedeckung bereits abgetragen ist, finden sich Pelosole, die typischen Böden des Keuperhügellandes (vgl. Kap. 3.1.1), die sich in dem dort anstehenden Gipskeuper bzw. den Gipskeuper-Fließerden entwickelt haben. Die Gruben P4 (vgl. Abb. 23), P10, P19, P20 und P35 (vgl. Anhang Tab. A.9) sind Beispiele für Pelosole im Untersuchungsgebiet.
- **Pararendzinen aus Gipskeuper und Gipskeuper-Fließerden:** An manchen Stellen auf der Kuppe kommen Pararendzinen aus Gipskeuper und dessen Fließerden vor, z. B. P1 (vgl. Abb. 20) und P25 (vgl. Anhang Tab. A.9).
- **Pararendzinen aus Löss und Löss-Keuper-Fließerden:** Im Mittel- bis zum Unterhangbereich des Nordwesthanges, ist die Lössbedeckung noch nicht vollständig abgetragen. Dort entwickelten sich durch Verlust des gebildeten Bodens aufgrund des starken Gefälles wieder Pararendzinen im Löss bzw. in den Löss-Keuper-Fließerden, wie es sich in den Schürfgruben P7, P8, P11, P13, P36 und P37 (vgl. Anhang Tab. A.9) zeigte.
- **Parabraunerden und Braunerden aus Löss und Lösslehm:** Im Mittelhangbereich des nach Südosten exponierten Hanges, dessen Gefälle mit Steigungswinkeln bis zu 5° relativ gering ist, konnten sich im Löss bzw. im Lösslehm Braunerden und Parabraunerden ausbilden, die sich in den Schürfgruben P3 (vgl. Abb. 22), P15, P16, P26, P27 und P21 (Braunerde-Kolluvisol) zeigen (vgl. Anhang Tab. A.9). Auch am nordwestexponierten Hang gibt es im Oberhangbereich eine Stelle, an der sich Braunerden in den Gruben P5 und P6 fanden (vgl. Anhang Tab. A.9) und im Wald in der Grube P33 (vgl. Anhang Tab. A.9).
- **Kolluvisole:** An Stellen, an denen sich Erosionsmaterial sammeln konnte, bildeten sich Kolluvisole aus. So z. B. in der Senke des nach Südosten exponierten Hangbereiches am Waldrand (P2, vgl. Abb. 21 und P17, Anhang Tab. A.9) und in einer inzwischen verfüllten Rinne am Waldrand des nach Nordwesten hin ausgerichteten Hanges (P9, P28, P29, P30, P31, P32 und P34; vgl. Anhang Tab. A.9). Auch bei P14 (Anhang Tab. A.9) handelt es sich um einen Kolluvisol, da in dem Bereich ebenfalls eine inzwischen verfüllte Rinne vorliegt.
- **Pseudogleye:** In den Bereichen rezenter oder ehemaliger Entwässerungssysteme wie z. B. einer inzwischen verfüllten Rinne in der Senke des Südosthanges oder einer alten Rinne entlang des Waldrandes des Nordwesthanges kam es zu deutlichen Pseudovergleyungsmerkmalen. Reine Pseudogleye wurden nicht identifiziert, es kommen eher Übergangsformen vor, wie z. B. Parabraunerde- oder Braunerde-Pseudogleye (P23, P24 und P40; Anhang Tab. A.9), Pararendzina-Pseudogleye (P12; Anhang Tab. A.9) oder vor allem Kolluvisol-Pseudogleye (P18, P22, P38 und P39; Anhang Tab. A.9). Diese sind in der Bodenkarte unter ihrem vorrangigen Erscheinungstyp eingeordnet.

Als Leitprofile wurden die Schürfgruben P1, P2, P3 und P4 ausgewählt (vgl. Abb. 17).

P1 - Pararendzina aus Gipskeuper-Fließerden: Das Bodenprofil P1 (Abb. 20) wurde in nordwestlicher Exposition im Oberhangbereich des Hügels unter einer Streuobstwiese angelegt (R: 3487690, H: 5455509, Höhe: 207 m ü. NN; vgl. auch Abb. 17). Es handelt sich dabei um eine Pararendzina aus Gipskeuper-Fließerden. Bei der Feldansprache (AG BODEN 1996) ergaben sich vier Horizonte (vgl. Tab. 3). Aus dem Ah-, dem Ap- und dem Cv-Horizont wurden gestörte Proben entnommen und jeweils die Korngrößenverteilung und der Gehalt an organischer Substanz und Kalk im Labor bestimmt (vgl. Abb. 20; Tab. A.1 und A.2, Anhang).

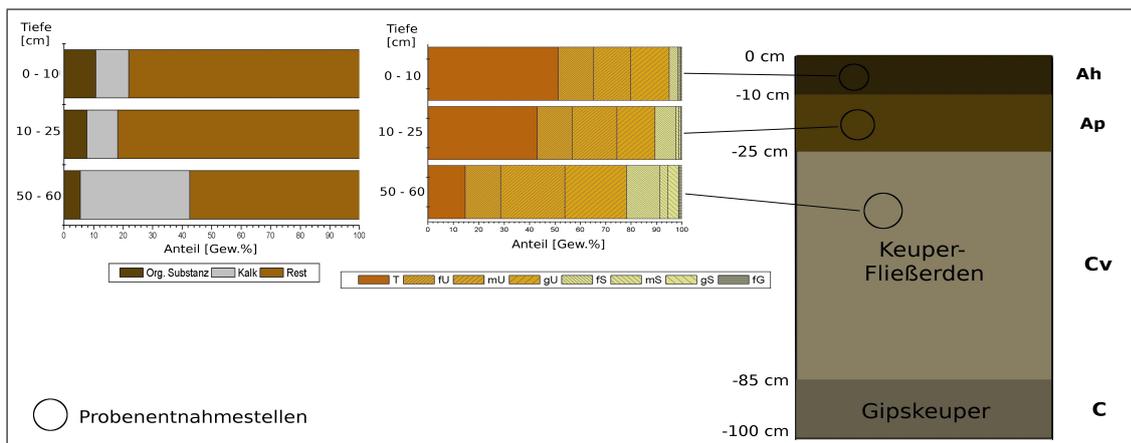


Abbildung 20: Schematisches Profil (rechts) mit Kennzeichnung der Probenentnahmestellen (schwarze Kreise) der Schürfgrube P1 (R: 3487690, H: 5455509; vgl. auch Abb. 17). Es sind ebenfalls die Korngrößenverteilungen der Proben (Mitte) und der Gehalt an organischer Substanz und Kalk (links) in Form eines Balkendiagrammes graphisch dargestellt. Der vergleichsweise hohe Kalkgehalt des C-Horizontes bestätigt, dass es sich um eine Pararendzina handelt. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tabelle 3: Feldansprache der Schürfgrube P1 im Gewann „Steinbock“ (R: 3487690, H: 5455509; vgl. dazu auch Abb. 20). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügestufe	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 10	Ah	–	Ut3/4	10YR3/3	Polyeder	2 - 10	2 - 8
10 - 25	Ap	–	Ut3/4	10YR3/3	Polyeder	2 - 7	0
25 - 85	Cv	–	Tu3	10YR6/4	Subpolyeder	7 - 10	0
85 - 160	C	–	Uls	10YR6/4	Subpolyeder	10 - 25	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten/Sonstige Merkmale						
0 - 25							
25 - 85	Manganband bei ca. 50 cm (10YR4/2), Einsprenglinge von Muschelkalk						
85 - 160	Keuper-Ausgangsgestein, z. T. verwittert, viele Steine						

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GEWANN „STEINBOCK“ BEI SINSHEIM-DÜHREN

P2 - Kolluvisol: Das Bodenprofil P2 (Abb. 21) wurde in einer Senke in südöstlicher Exposition angelegt (R: 3487778, H: 5455469, Höhe: 204 m ü. NN; vgl. auch Abb. 17). Es handelt sich dabei um einen Kolluvisol, der in Löss und Gipskeuper und deren Fließerden entstanden ist, was auch der Fund eines Ziegelstückes in 30 cm Tiefe (vgl. Tab. 4) und die Laboranalysen bestätigten (vgl. Abb. 21; Tab. A.3 und Tab. A.4, Anhang).

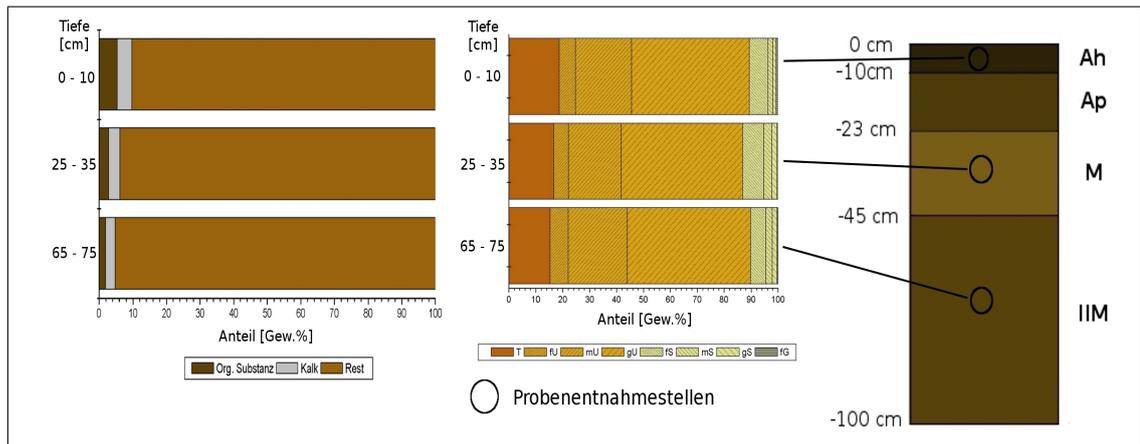


Abbildung 21: Schematisches Profil (rechts) mit Kennzeichnung der Probenentnahmestellen (schwarze Kreise) der Schürfgrube P2 (R: 3487778, H: 5455469; vgl. auch Abb. 17). Es sind ebenfalls die Korngrößenverteilungen der Proben (Mitte) und der Gehalt an organischer Substanz und Kalk (links) in Form eines Balkendiagrammes graphisch dargestellt. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tabelle 4: Feldansprache der Schürfgrube P2 im Gewinn „Steinbock“ (R: 3487778, H: 5455469; vgl. dazu auch Abb. 21). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügestruktur	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 10	Ah	–	Ut2	10YR4/3	Kohärent	0	4 - 8
10 - 23	Ap	–	Ut2	10YR4/3	Kohärent	0	4 - 8
23 - 45	M	–	Ut3	10YR4/4	Kohärent	0	0
45 - 230	IIM	–	Ut4	10YR4/4	Kohärent	0	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten/ Sonstige Merkmale						
0 - 23							
23 - 45	Ziegelstück (bei ca. 30 cm), Feinwurzeln, Rostfarben, Verbrennung						
45 - 230	Reduktionsmerkmale (Mn-, Fe-Oxide) in ehemaligen Wurzelgängen (vertikal), Bleichung (10YR5/3) durch Reduktion, vereinzelt Rostflecken und Mn-Konkretionen						

3.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

P3 - Parabraunerde aus Löss: Das Bodenprofil P3 (Abb. 22) wurde am Mittelhang in südöstlicher Exposition angelegt (R: 3487740, H: 5455493, Höhe: 206,5 m ü. NN; vgl. auch Abb. 17). Es handelt sich um eine gekappte Parabraunerde aus Löss mit einer typischen Horizontabfolge (vgl. Tab. 5). Die Ergebnisse der Laboranalysen sind in den Tabellen A.7 und A.8 im Anhang aufgelistet und in Abbildung 22 graphisch veranschaulicht.

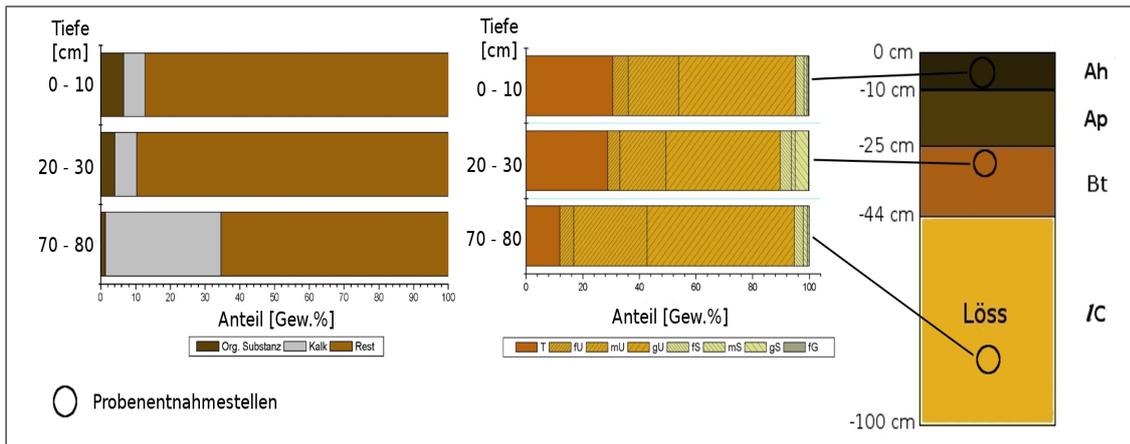


Abbildung 22: Schematisches Profil (rechts) mit Kennzeichnung der Probenentnahmestellen (schwarze Kreise) der Schürfgrube P3 (R: 3487740, H: 5455493; vgl. auch Abb. 17). Es sind ebenfalls die Korngrößenverteilungen der Proben (Mitte) und der Gehalt an organischer Substanz und Kalk (links) in Form eines Balkendiagrammes graphisch dargestellt. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tabelle 5: Feldansprache der Schürfgrube P3 im Gewann „Steinbock“ (R: 3487740, H: 5455493; vgl. dazu auch Abb. 22). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 10	Ah	–	Tu4	10YR3/4	polyedrisch	0	2 - 8
10 - 25	Ap	–	Tu4	10YR3/4	Kohärent	0	0
25 - 44	Bt	–	Tu3	10YR4/6	Kohärent	0	0
44 - 250	IC	–	Uu	10YR5/6	Kohärent	10 - 25	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 25							
25 - 44	Keupersandsteine → synergetische Umlagerung des Lösses						
44 - 250	Lössschnecken, Wurzelreste, Mollusken (Ø7 - 8 cm)						

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GEWANN „STEINBOCK“ BEI SINSHEIM-DÜHREN

P4 - Pelosol: Die Schürfgrube P4 (Abb. 23, Tab. 6) befand sich auf der Kuppe bzw. im flachen Oberhangbereich in nordwestlicher Exposition (R: 3487644, H: 5455481, Höhe: 206 m ü. NN; vgl. auch Abb. 17). Der hohe Tongehalt (über 45%) des P-Horizontes, der den Pelosol ausmacht (vgl. AG BODEN 1996), konnte auch im Labor bestätigt werden (vgl. Abb. 23; Tab. A.8, Anhang).

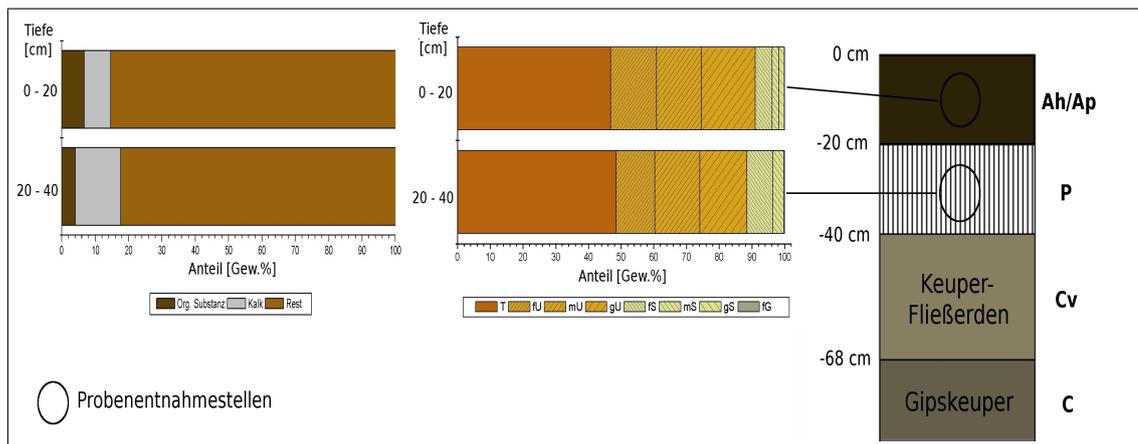


Abbildung 23: Schematisches Profil (rechts) mit Kennzeichnung der Probenentnahmestellen (schwarze Kreise) der Schürfgrube P3 (R: 3487644, H: 5455481; vgl. auch Abb. 17). Es sind ebenfalls die Korngrößenverteilungen der Proben (Mitte) und der Gehalt an organischer Substanz und Kalk (links) in Form eines Balkendiagrammes graphisch dargestellt. Der hohe Tongehalt (über 45%) in 20 - 40 cm Tiefe bestätigt, dass es sich um einen P-Horizont und somit um einen Pelosol handelt. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tabelle 6: Feldansprache der Schürfgrube P4 im Gewinn „Steinbock“ (R: 3487644, H: 5455481; vgl. dazu auch Abb. 23). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 20	Ah/AP	5,7	Lu	10YR3/3	Krümel	0 - 0,5	4 - 8
20 - 40	P	6,3	Tl	5YR3/4	Kohärent	0	4 - 8
40 - 68	Cv	7,3	Tl	2,5Y5/4	Kohärent	10 - 25	0
> 68	C	7,3	Tl		Kohärent	25 - 50	0

Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale
0 - 20	
20 - 40	Toncutane, Lösskomponente
40 - 68	Keuperfließerde, verschiedenfarbig: 10R4/6, 5Y6/1
> 68	

Rekonstruktion einer ehemaligen Rinne am nordwestexponierten Hang:

Mit Hilfe der Gruben P29 (Anhang Tab. A.9), P31 und P32 (Abb. 24), die im Rahmen eines Geländepraktikums zur Physischen Geographie der Universität Heidelberg angelegt wurden (vgl. dazu auch PROTOKOLLE GELÄNDEPRAKTIKUM SINSHEIM), konnte ein Bereich einer ehemaligen Rinne am Nordwesthang rekonstruiert werden. Diese Rinnenstruktur ist an der heutigen Oberfläche nicht mehr zu erkennen. Wie sie im Zusammenhang zu der keltischen Viereckschanze steht, konnte jedoch nicht geklärt werden.

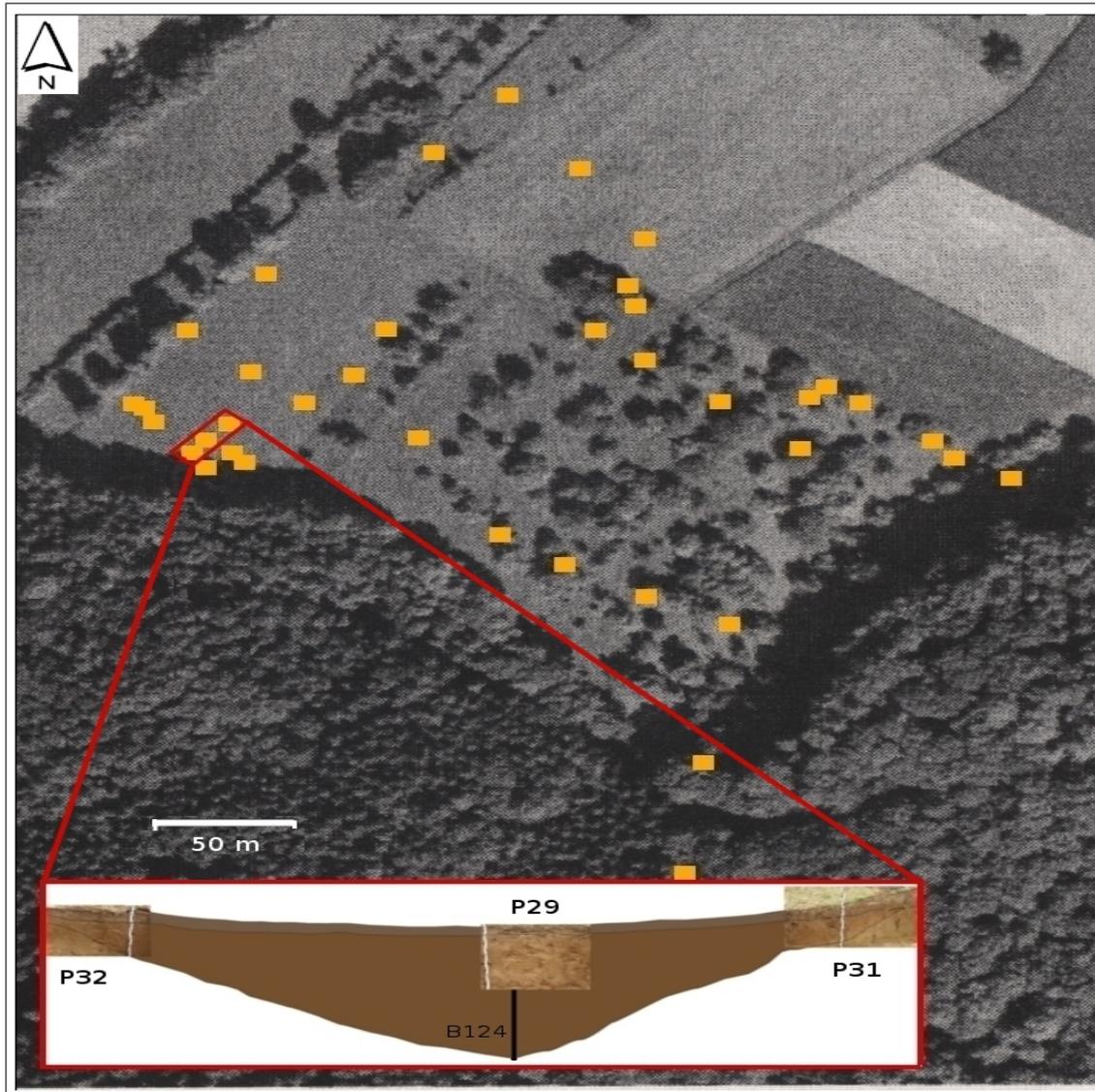


Abbildung 24: Rekonstruktion eines Teilbereiches einer ehemaligen Rinne am nordwestexponierten Hang im Gewann „Steinbock“ mit Hilfe der Schürfgruben P29, P31 und P32 (vgl. Abb. 17) und Bohrstöcken (beispielhaft eingetragen B124). Quelle: Eigene Darstellung.

3.2.1.2 Durchführung und Ergebnisse der Goelektrischen Widerstandstomographie zur Erkundung des Geländes um die Viereckschanze

Im Gewinn „Steinbock“ wurden insgesamt 30 Goelektrikprofile gemessen, die mit der chronologisch vergebenen Nummerierung in Abbildung 25 eingezeichnet sind.

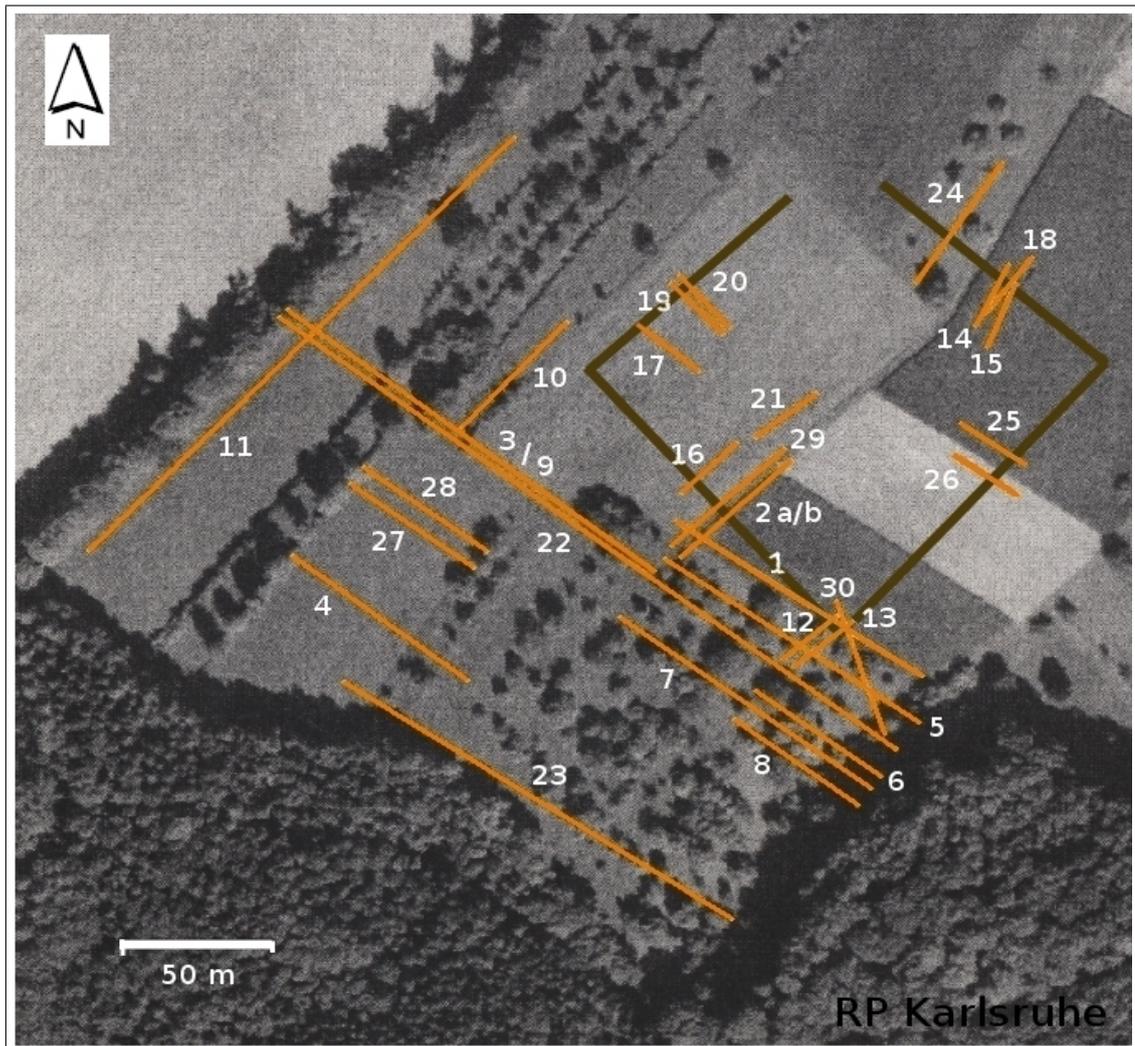


Abbildung 25: Lage der ERT-Profile (1 bis 30, orangene Linien) im Gewinn „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. 16). Gekennzeichnet ist auch die Viereckschanze (braunes, unvollständiges Viereck), auf die in Kapitel 3.2.3 eingegangen wird. Einige der Profile wurden angelegt, um die seitlichen Begrenzungen der ehemaligen Schanze zu erfassen. Die Profile 3 und 9 wurden an der gleichen Stelle, zu unterschiedlichen Zeiten gemessen. Quelle: Eigene Darstellung, zugrundeliegendes Orthophoto mit freundlicher Genehmigung vom Regierungspräsidium Karlsruhe zur Verfügung gestellt.

Ein Teil der angelegten Geoelektrikprofile diente der Erkundung des näheren Umfeldes der Viereckschanze und dem Vergleich mit den parallel dazu angelegten Schürfgruben (vgl. dazu auch Abb. 16). Die Profile 1, 5 bis 8, 23 und 30 wurden am etwas flacheren, nach Südosten hin exponierten Hang gemessen, die Profile 3 bzw. 9, 4, 27 und 28 am steileren Nordwesthang (vgl. Abb. 25). Das Profil 22 bietet einen guten Überblick über den gesamten Hangquerschnitt in nordwest-südöstlicher Richtung. Das Profil 10 verlief auf einer angelegten Terrasse am Nordwesthang und Profil 11 erstreckte sich über den flachen Bereich am Fuße des Nordwesthanges, an den die Uferböschung des Wittigbaches angrenzt (vgl. Abb. 25). Die übrigen Profile dienten direkt der Erkundung des Wallgrabens der Viereckschanze und werden in Kapitel 3.2.3 behandelt.

Mit Hilfe der Profile, die im Umfeld der Viereckschanze gemessen wurden, sollte die geologische Struktur des Untergrundes, d. h. die Übergänge zwischen dem anstehenden Keuper bzw. den Keuper-Fließerden, dem z. T. noch aufliegenden Löss und den Kolluvien erfasst werden. Es wurde die Schlumberger-Konfiguration gewählt, die eine bessere Tiefeninformation liefert als z. B. die Wenner- oder die Dipol-Dipol-Anordnung (HECHT & FASSBINDER 2006) und zumeist für geologische Fragestellungen verwendet wird (ASPINALL & GAFFNEY 2001). Mit Hilfe der Feldbestimmungen der Schürfgruben, Pürckhauerbohrungen und Rammkernsondierungen wurde eine Zuordnung der verschiedenen Widerstandsbereiche zu Löss, Keuper-Fließerden und Kolluvien und eine Eingrenzung der Übergänge dazwischen ermöglicht, woraufhin Interpretationsskizzen erstellt werden konnten. Im Folgenden werden einige der ERT-Profile, gegliedert nach den unterschiedlichen Hangbereichen, an denen sie gemessen wurden, vorgestellt.

Südosthang: Die Profile 1 und 5 bis 8, die in geringem Abstand und annähernd parallel zueinander angelegt wurden (vgl. Abb. 25), ermöglichen zusammen mit den zahlreichen Schürfgruben und Pürckhauer-Bohrungen eine nahezu umfassende Beschreibung des Südosthanges. Die Skalen der spezifischen Widerstände wurden einheitlich gewählt, um eine bessere Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Außerdem wurde eine logarithmische Darstellung der Widerstandsbereiche gewählt, da die Widerstandsintervalle z. T. sehr groß sind.

Beim ersten ERT-Profil (Abb. 26, oben) wurde der Wallgraben der Viereckschanze an zwei Stellen geschnitten, da es in der Nähe einer seiner Ecken aufgenommen worden war. Außerdem zeigt es eine alte Rinne, die inzwischen verfüllt ist, in der Senke unterhalb des flachen Südosthanges (vgl. dazu auch Abb. 25). Entlang des ersten ERT-Profils wurden einige Schürfgruben angelegt (P2, P15 - 17). Desweiteren ermöglichten zahlreiche Pürckhauer-Bohrungen (B29 - 36, B42, B113 - 116) und zwei Rammkernsondierungen (R2, R3) eine Interpretation des Profils (Abb. 26, Mitte) und die Erstellung einer Toposequenz (Abb. 26, unten). Die gestrichelten Linien in der Interpretationsskizze zeigen die Übergänge zwischen verschiedenen Widerstandsbereichen im ERT-Profil. Diese Widerstandsbereiche konnten jeweils dem Keuper bzw. den Keuper-Fließerden ($10 \Omega m \leq \rho \leq 30,6 \Omega m$), dem Löss ($30,6 \Omega m < \rho \leq 70,8 \Omega m$) und den Kolluvien ($\rho > 70,8 \Omega m$) zugeordnet werden.

Der Vergleich des gemessenen geoelektrischen Profils mit den Ergebnissen der pedologischen Untersuchungen zeigt, dass die Abgrenzung der verschiedenen Bereiche durch die Messung gut erfasst wurde. Da die Schichtgrenzen nicht scharf abgebildet werden (HECHT & FASSBINDER 2006), liegt eine Ungenauigkeit vor, die jedoch bei wenigen Metern liegt. Die Horizontgrenzen, die in der Vergleichsskizze eingezeichnet sind, ergaben sich anhand der Feldbestimmungen der Schürfgruben und Bohrungen. Der Verlauf der Grenzen dazwischen wurde interpoliert. Die verschiedenen Bodenhorizonte lassen sich jedoch im ERT-Profil nicht voneinander abgrenzen.

Das ERT-Profil 5, welches in einem Abstand von ca. 15 m in südwestlicher Richtung parallel zum ERT-Profil 1 angelegt wurde (vgl. dazu auch Abb. 25), zeigt ähnliche Strukturen (Abb. 27, oben). Da es hangabwärts leicht versetzt aufgenommen wurde, erfasst es einen größeren Bereich der ehemaligen Rinne in der Senke unterhalb des Südosthanges. Auch hier wurde wiederum eine Interpretationsskizze (Abb. 27, Mitte) angefertigt und eine Vergleichsskizze, in der die Schürfgruben (P2, P3, P15 - P17) und Pürckhauer-Bohrungen (B113 - B116) eingetragen sind (Abb. 27, unten). Da im direkten Übergangsbereich zwischen Keuper-Fließerden, Löss und Kolluvien keine bodenkundlichen Daten erhoben wurden, ist eine genaue Abgrenzung nicht möglich. Insgesamt wurden die verschiedenen Bereiche durch die geoelektrische Messung auch hier gut erfasst. Das Profil zeigt im Bereich der verfüllten alten Rinne eine tiefer reichende Rinnenstruktur. Dabei kann es sich um eine ältere Rinne handeln, die während der Kaltzeiten mit eingewehtem Löss überdeckt wurde. In diese Löss-Verfüllung hat sich wiederum eine Rinne eingegraben, die inzwischen ihrerseits mit kolluvialem Material verfüllt ist.

Das ERT-Profil 6 (vgl. Anhang Abb. A.3, oben), welches wiederum parallel zu ERT-Profil 5, um ca. 20 m südwestlich versetzt, gemessen wurde, zeigt die Fortsetzung der ehemaligen Rinne nach Südwesten hin. Der Bereich der Keuper-Fließerden wurde hierbei nicht erfasst. Bei diesem Profil ist noch etwas deutlicher die mit Löss verfüllte ältere Rinnenstruktur zu erkennen. Parallel zu diesem Profil wurden eine Schürfgrube angelegt (P27) und einige Pürckhauer-Bohrungen durchgeführt (B81 - B84), deren Vergleich mit dem ERT-Profil ebenfalls im Anhang zu finden ist (vgl. Abb. A.3, unten).

Das ERT-Profil 7 (Anhang Abb. A.4, oben) ist zum ERT-Profil 6 parallel und um 5 m südwestlich versetzt. Auch hier wurde die ehemalige Rinne erfasst, so dass sich inzwischen ein relativ gutes Bild des Rinnenverlaufes ergibt. Der Vergleich (Anhang Abb. A.4, unten) erfolgte hier anhand dreier Schürfgruben (P25 - P27) und zahlreicher Pürckhauer-Bohrungen (B78 - 85, B108 - B112).

Das parallel und um 5 m in südwestlicher Richtung dazu versetzt gemessene ERT-Profil 8 erfasst vor allem wieder den Bereich der ehemaligen Rinne (vgl. Anhang Abb. A.5).

Das ERT-Profil 30 verläuft schräg zu den anderen Profilen und schneidet die Profile 1 und 5 (vgl. Abb. 25). Da es keine weiteren Erkenntnisse lieferte, wird es keiner näheren Betrachtung unterzogen.

3.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

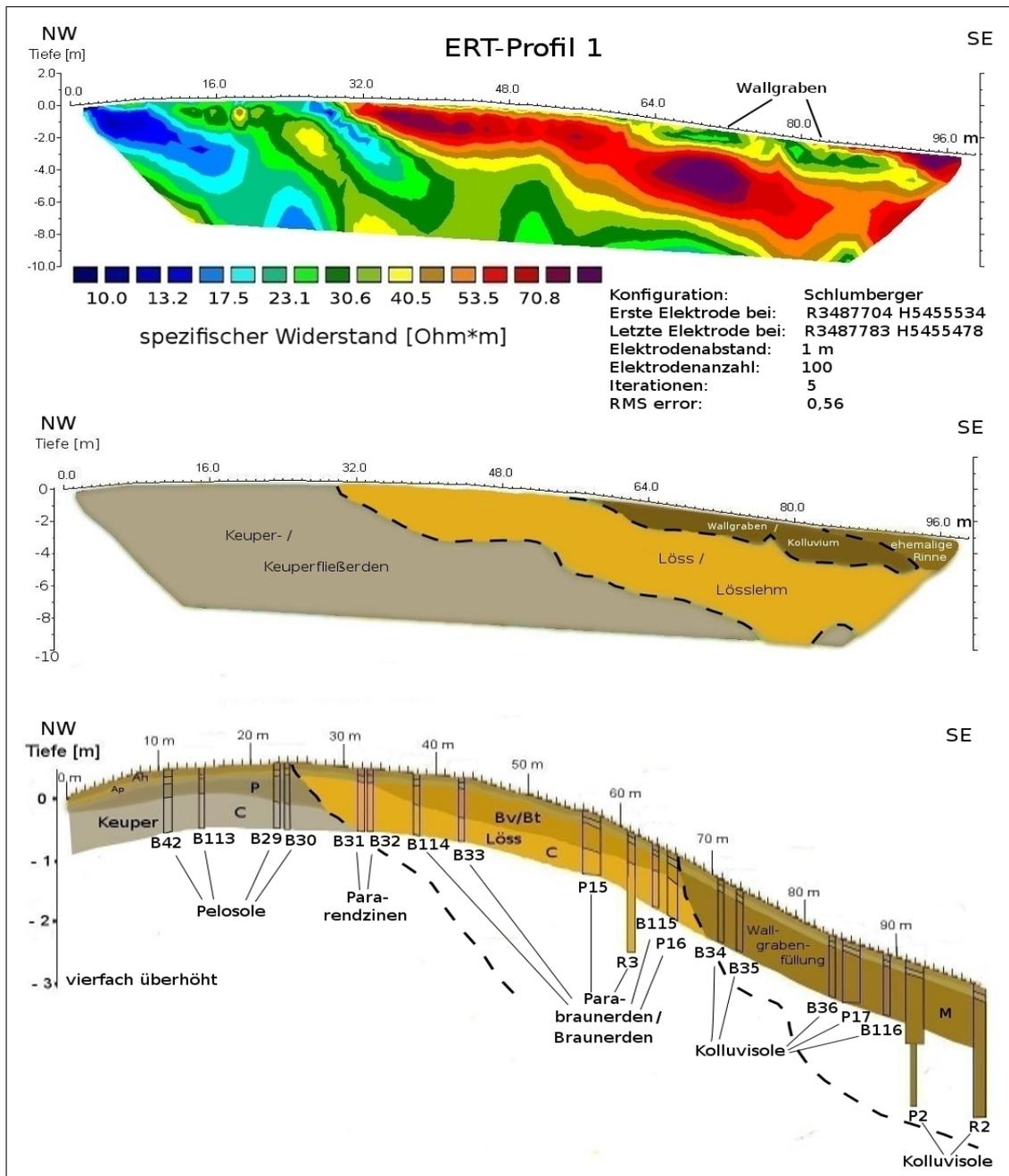


Abbildung 26: Oben: ERT-Profil 1 im Gewann „Steinbock“ (vgl. zur Lage auch Abb. 25). Der Wallgraben der Viereckschanze wurde im Bereich der südlichen Ecke geschnitten. Mitte: Interpretationsskizze des Profils, in der die Übergänge zwischen den verschiedenen Widerstandsbereichen durch gestrichelte Linien gekennzeichnet wurden. Unten: Darstellung der Schürffgruben, Rammkernsondierungen und Pürckhauer-Bohrungen entlang des ERT-Profils. Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GEWANN „STEINBOCK“ BEI SINSHEIM-DÜHREN

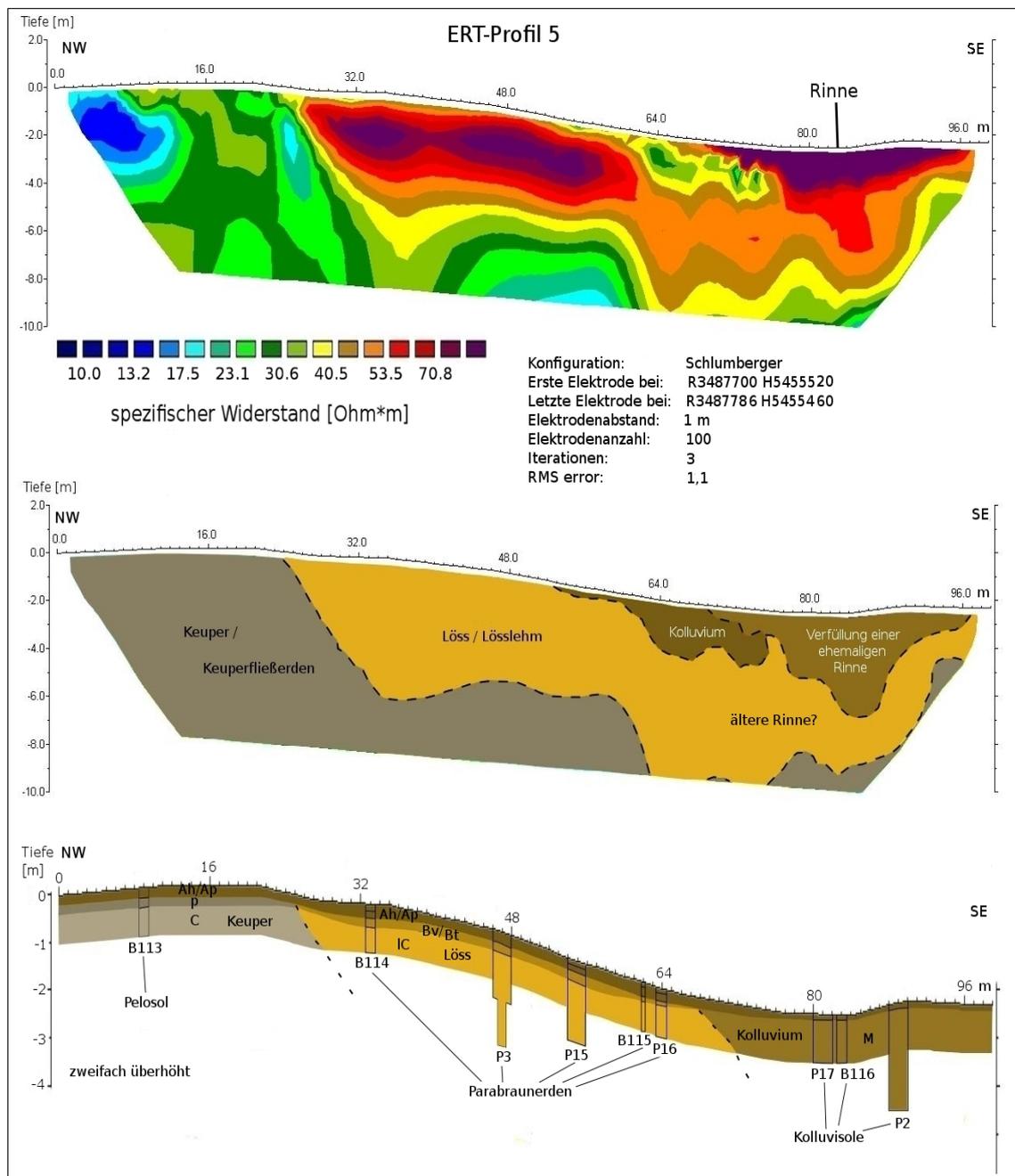


Abbildung 27: Oben: ERT-Profil 5 im Gewann „Steinbock“ (vgl. zur Lage auch Abb. 25). Zu erkennen ist die Rinne in der Senke unterhalb des Südosthanges. Mitte: Interpretationsskizze des Profils, in der die Übergänge zwischen den verschiedenen Widerstandsbereichen durch gestrichelte Linien gekennzeichnet wurden. Unten: Darstellung der Schürffgruben und Pürckhauer-Bohrungen entlang des ERT-Profiles. Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

3.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

Den Abschluss der Beschreibung dieses Hanges bildet das Profil 23 (Abb. 28, oben), welches nahe am südwestlichen Waldrand liegt und vom Südosthang bis zum Oberhangbereich des Nordwesthanges reicht (vgl. Abb. 25). Es zeigt ebenfalls die ehemalige Rinne und lässt deren weiteren Verlauf vermuten. Auch für dieses ERT-Profil wurde eine Vergleichsskizze erstellt (vgl. Abb. 28, unten), in welche die Schürffgruben P19 bis P22 eingetragen sind, die entlang des ERT-Profils angelegt wurden (vgl. Abb. 16).

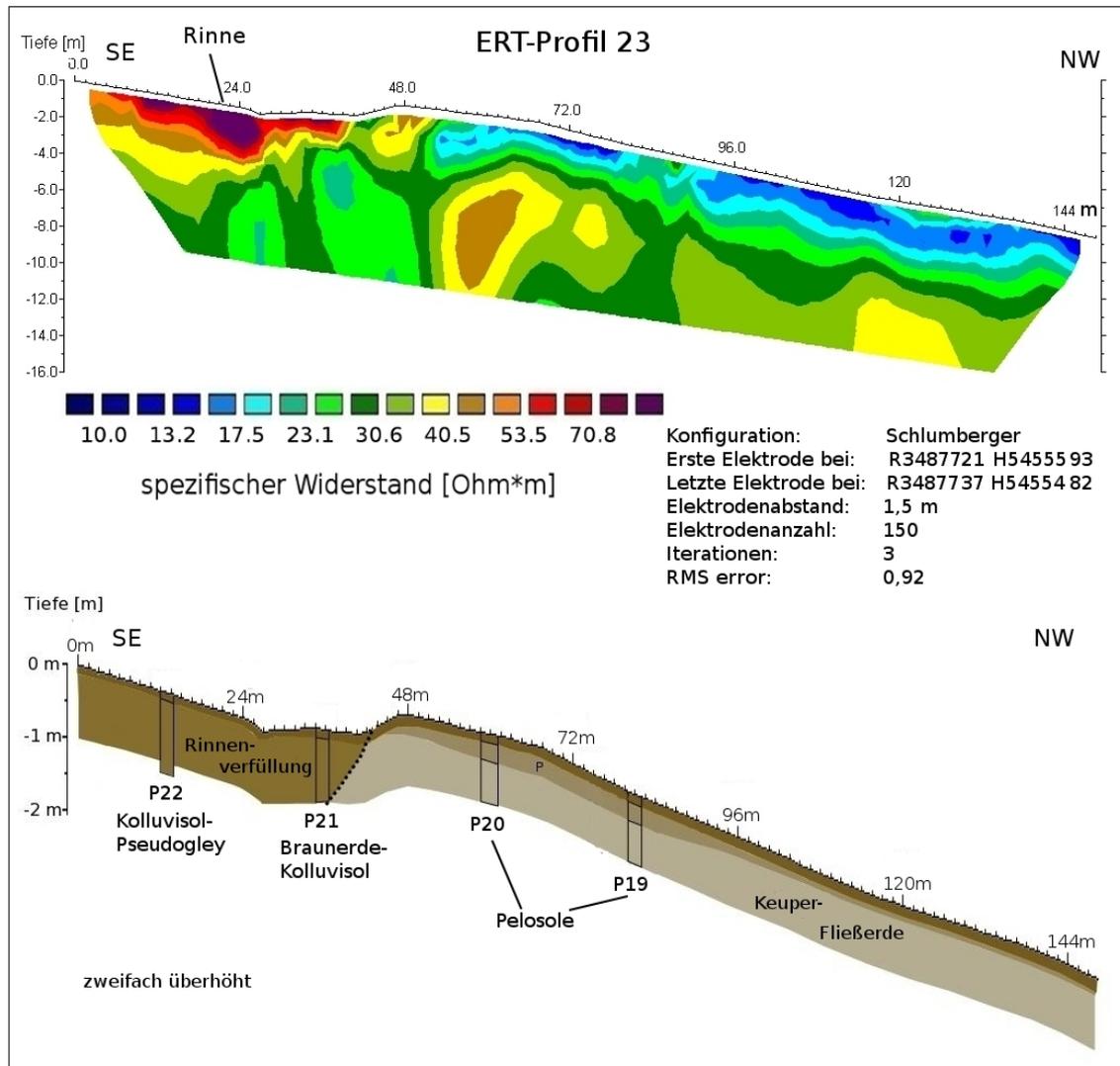


Abbildung 28: Oben: ERT-Profil 23 im Gewann „Steinbock“ (vgl. zur Lage auch Abb. 25). Zu erkennen ist die Rinne in der Senke unterhalb des Südosthanges. Unten: Darstellung der Schürffgruben entlang des Ert-Profils. Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GEWANN „STEINBOCK“ BEI SINSHEIM-DÜHREN

Mithilfe der Interpretationsskizzen der vorgestellten ERT-Profile 1 bis 8 wurde der Verlauf der ehemaligen Rinne in der Senke des Südosthanges rekonstruiert (Abb. 29). Die Abstände zwischen den jeweiligen Profilen sind dabei nicht maßstabsgetreu. Da die Entfernung zum ERT-Profil 23 zu groß war, konnte dieses nicht in die Rekonstruktionsskizze aufgenommen werden. Der kolluviale Bereich bzw. die Rinnenstruktur zeichnet sich in allen Profilen deutlich ab.

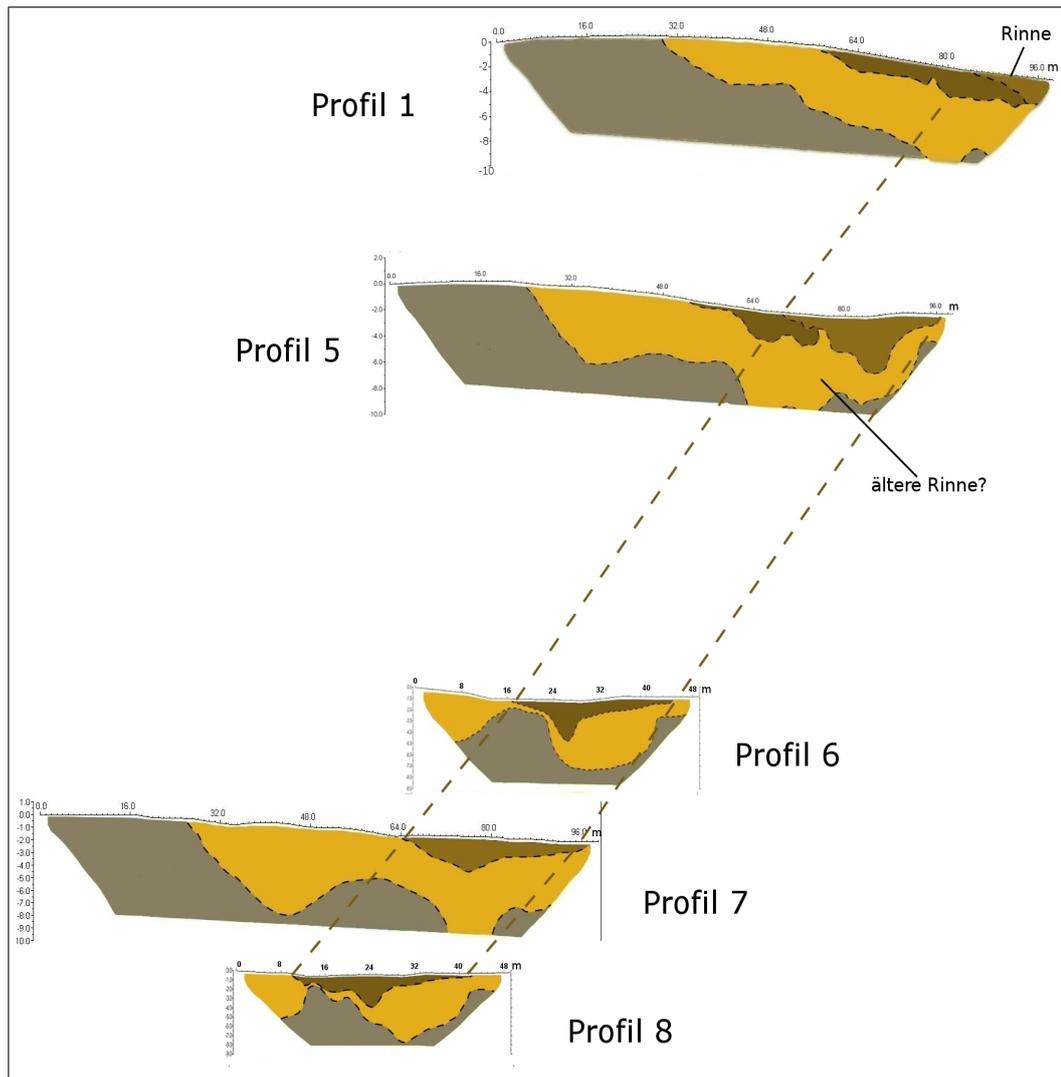


Abbildung 29: Rekonstruktion des Verlaufes einer inzwischen verfüllten Rinne (gestrichelte Linien) in der Senke des Südosthanges im Gewinn „Steinbock“ (vgl. Abb. 25). Verwendet wurden dafür die Interpretationsskizzen der ERT-Profile 1 und 5 bis 8, die so angeordnet wurden, dass ein dreidimensionaler Eindruck entsteht. Die Abstände sind dabei nicht maßstabsgetreu eingezeichnet. Quelle: Eigene Darstellung.

Nordwesthang: Auch entlang des etwas steileren Nordwesthanges wurden einige ERT-Profile angelegt, so dass sich auch über diesen Hangbereich ein Überblick gewinnen lässt. Das Profil Nr. 3 bzw. das Profil Nr. 9 (vgl. Abb. 30), welches an der gleichen Stelle, nur zu einem späteren Zeitpunkt gemessen wurde, umfasst dabei den Bereich von der Kuppe des Hügels bis hinunter in den Senkenbereich nahe der Uferböschung des Wittigbaches (vgl. Abb. 25). Die ERT-Profile 4, 27 und 28 (vgl. Anhang Abb. A.2, Abb. A.11) erfassen den Bereich des Mittelhanges. In den drei ERT-Profilen zeigt sich, dass nur noch wenige Reste der Lössbedeckung vorhanden sind, was sich durch das relativ große Gefälle des Hanges erklären lässt.

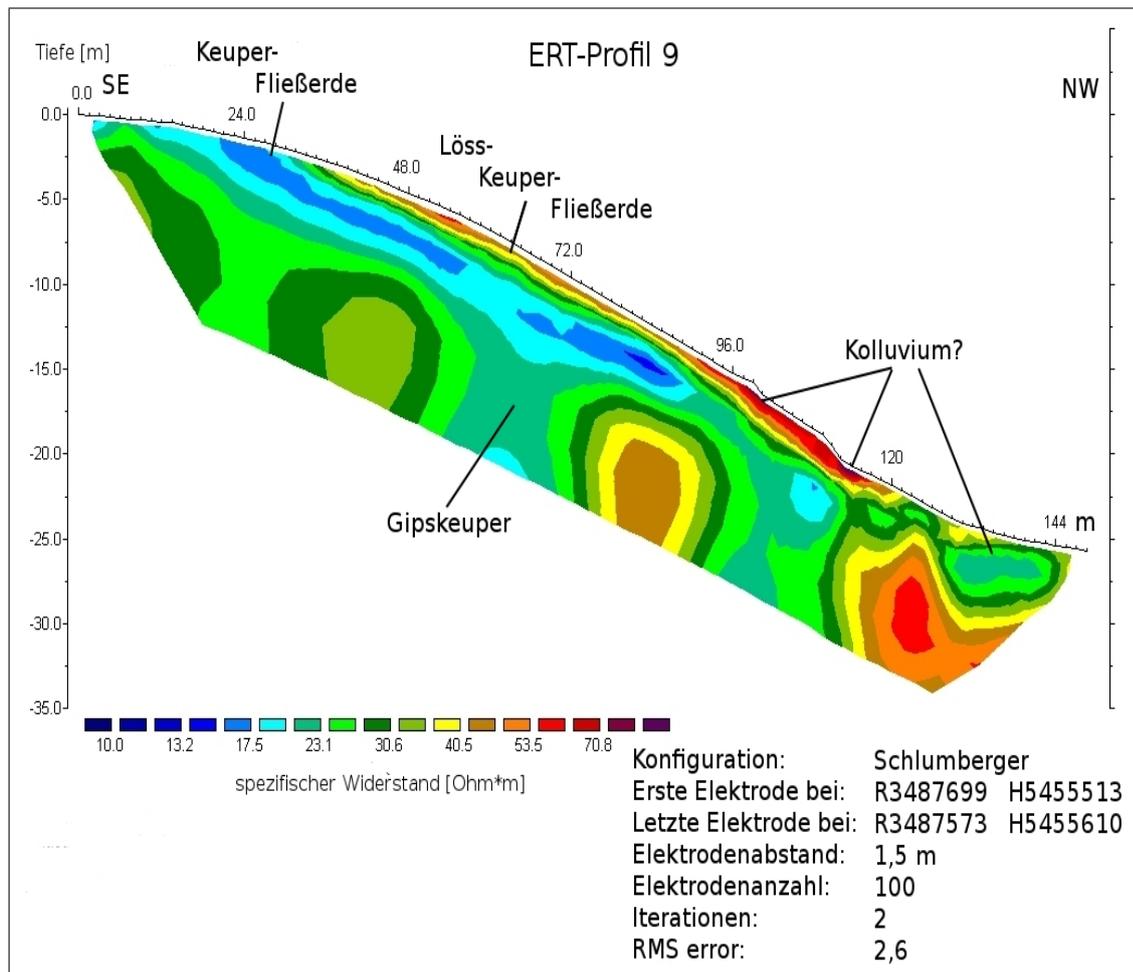


Abbildung 30: ERT-Profil 9 am Nordwesthang im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (vgl. auch Abb. 25). Da das ERT-Profil 22 teilweise den gleichen Hangbereich erfasste und mit diesem eine Toposequenz des Hanges erstellt wurde (vgl. Abb. 32), wird auf eine Darstellung der Bohrstöcke entlang des Profils verzichtet. Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GEWANN „STEINBOCK“ BEI SINSHEIM-DÜHREN

Das ERT-Profil 10 (Abb. 31) wurde auf einer kleinen Terrasse am Nordwesthang, höhenlinienparallel durchgeführt (vgl. Abb. 25). In diesem Profil zeigt sich eine weitere inzwischen verfüllte Rinne. Eine Schürfgrube (P14), die kolluviales Material enthielt, bestätigte das Vorhandensein der inzwischen aufgefüllten Rinnenstruktur (vgl. dazu auch Abb. 18). Diese verläuft genau an der Stelle, an der der Archäologe Schumacher auf seinem Plan des Geländes eine alte Zufahrt verzeichnet hatte, die er in Zusammenhang mit der keltischen Viereckschanze sah (SCHUMACHER 1889).

Das elfte ERT-Profil (Anhang, Abb. A.6) verlief am Fuße des Nordwesthanges auf der Niederterrasse des Wittigbaches parallel zur Uferböschung (vgl. Abb. 16). Entlang dieses Profils lagen drei der Rammkernbohrungen (R4, R6 und R7; vgl. Anhang Tab. A.10). Damit konnten die eher niedrigen Widerstandswerte ($\rho \leq 30,6 \Omega m$) den Kolluvien am Hangfuß zugeordnet werden, die auch im Profil 9 (vgl. Abb. 30), welches quer dazu verlief, auftreten.

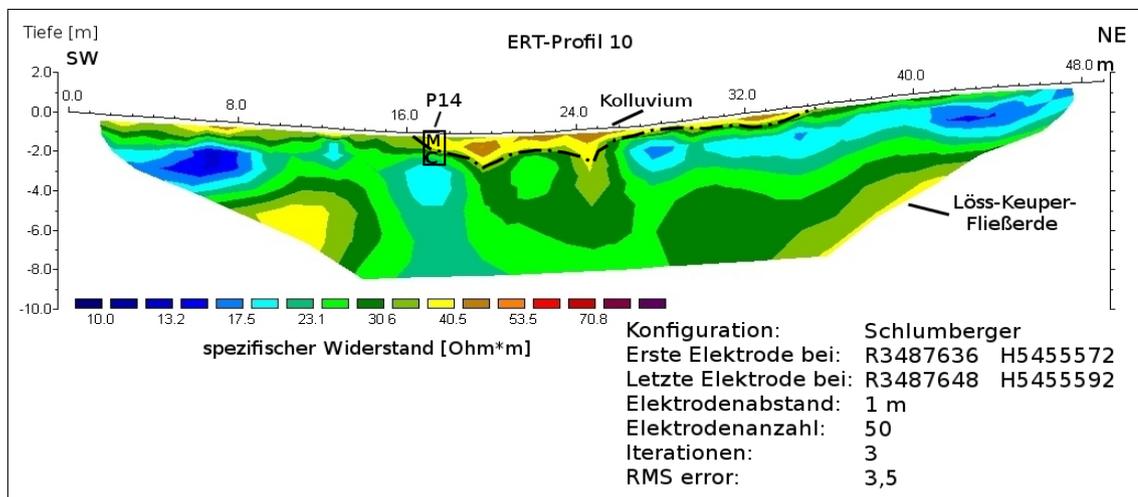


Abbildung 31: ERT-Profil 10 im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren, welches höhenlinienparallel auf einer Terrasse gemessen wurde (vgl. Abb. 25). Zu erkennen ist ein kolluvialer Bereich, dessen Vorhandensein durch die Schürfgrube P14 bestätigt wird. Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

Geländequerschnitt: Das ERT-Profil 22 (Abb. A.10, Anhang) zeigt einen Querschnitt des gesamten Hügels in nordwestlich-südöstlicher Richtung. Es erstreckt sich von der ehemaligen Rinne in der Senke am Südosthang über die Kuppe hinweg bis zum Fuße des Nordwesthanges (vgl. Abb. 25). Es besteht teilweise eine Überschneidung zum Profil 9, welches bei ca. 101,5 m dieses Profils seine Anfangselektrode hatte und ebenfalls bis zum Hangfuß reichte. Anhand aller Schürfgruben, die in der Nähe dieses Profils in den verschiedenen Hangbereichen angelegt worden waren, konnte eine Toposequenz für den gesamten Querschnitt des Hügels erstellt werden (Abb. 32).

3.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

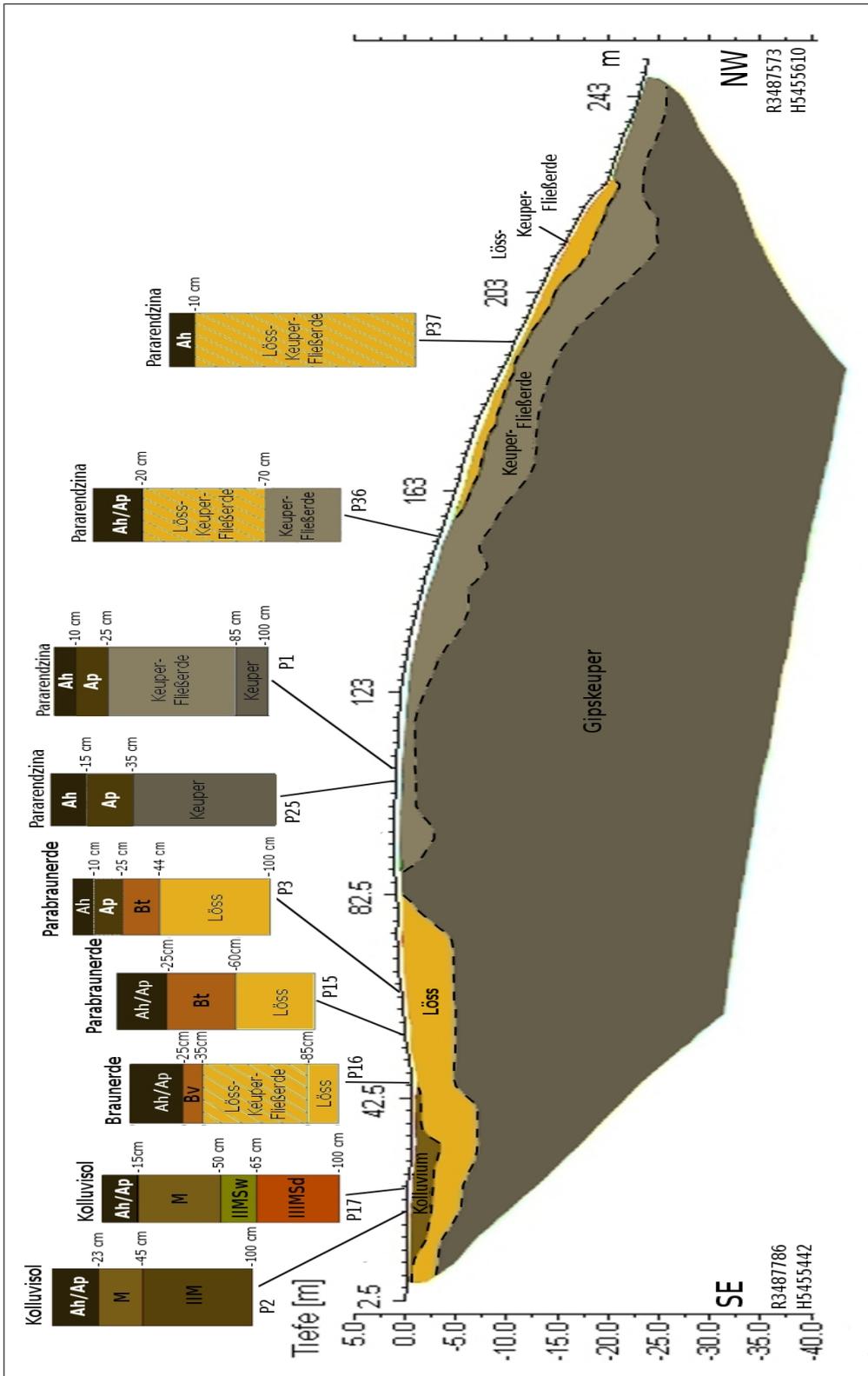


Abbildung 32: Schematische Toposequenz des Untersuchungsgebietes Gewann „Steinbock“ (vgl. Abb. 25), erstellt auf der Grundlage des ERT-Profiles 22 (vgl. dazu auch Anhang Abb. A.10). Eingezeichnet sind alle Schürfruben, die entlang dieses Profils angelegt wurden mit Kennzeichnung ihrer jeweiligen Lage am Hang (vgl. dazu auch Abb. 16). Die schematischen Darstellungen der Schürfruben entstanden auf der Grundlage der Feldbestimmungen (vgl. Anhang Tab. A.9). Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

3.2.2 Modell mit unterschiedlichen geologischen Schichten

Es wurde, wie in Kapitel 2.1.5 beschrieben, mit dem Programm RES2MOD ein vereinfachtes Modell mit drei unterschiedlichen geologischen Schichten erstellt. Damit wurden die Auswirkungen der Wahl der Konfiguration auf die Ergebnisse der geoelektrischen Messungen geprüft und die Entstehung von Artefakten durch die Inversionsroutine untersucht. Dabei wurden drei verschiedene Widerstandswerte verwendet (20, 50, 80 Ωm), die in Bereichen lagen, in denen auch die Messwerte der im Gelände durchgeführten Messungen lagen. Auch die Übergänge zwischen den verschiedenen Schichten wurden so modelliert, dass sie den tatsächlichen Gegebenheiten im Gewann „Steinbock“ möglichst ähnlich waren. Für diese Modelle wurden mit drei verschiedenen Konfigurationen (Wenner-, Dipol-Dipol- und Schlumberger-Konfiguration), die auch bei den durchgeführten Messungen verwendet wurden, Pseudosektionen berechnet (Vorwärtsmodellierung). Aus diesen künstlich erzeugten Datensätzen wurden mit dem Inversionsprogramm RES2DINV Inverse Modelle berechnet. Deren Widerstandsskalen wurden an diejenigen der echten Messungen angepasst, um bestmögliche Vergleichbarkeit zu erzielen. Die Abbildung 33 zeigt das Modell und die Widerstandsverteilungen für die verschiedenen Konfigurationen. Die Modellberechnungen zu den geologischen Schichten bestätigen, dass die Schlumberger-Konfiguration gut für diese Anwendung geeignet ist, jedoch liefert bei der hier erreichten Tiefe der simulierten Profile auch die Dipol-Dipol-Konfiguration vergleichbare Ergebnisse. Auch bei ihr sind die Übergänge zwischen den verschiedenen Schichten relativ gut abzuschätzen. Bei der Wenner-Konfiguration sind die Übergänge nur im oberen Bereich gut abzuschätzen, nach unten hin weiten sie stark auf. In den simulierten Widerstandsverteilungen fällt auf, dass es zur Artefaktausbildung kommt, die bei den verschiedenen Konfigurationen sehr unterschiedlich ausgeprägt ist. Da Störeinflüsse bei der Modellberechnung ausgeschlossen sind, sind diese Artefakte direkt auf die Inversionsroutine zurückzuführen. Die Entstehung solcher Artefakte muss bei der Interpretation der Widerstandsbilder, die bei real durchgeführten Messungen erhalten werden, berücksichtigt werden.

3.2.3 Erkundung der keltischen Viereckschanze (on-site)

Im folgenden Kapitel werden die Untersuchungen vorgestellt, die direkt an der keltischen Viereckschanze durchgeführt wurden.

3.2.3.1 Geomagnetische Prospektion und Kartenüberlagerung

Im Vorfeld der archäologischen Grabungen im Gewann „Steinbock“ wurde von Dr. H. von der Osten-Woldenburg (Geophysiker des Landesamtes für Denkmalpflege Baden-Württemberg) eine großflächige geomagnetische Prospektion durchgeführt (vgl. dazu auch MATTHES ET AL. 2007). Dafür wurde das Gebiet um die Viereckschanze vermessungstechnisch in Quadrate von 20 m Seitenlänge eingeteilt, die als Orientierungsraster dienten. Die Ergebnisse dieser geomagnetischen Prospektion wurden mit freundlicher

3.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

Genehmigung vom Regierungspräsidium Karlsruhe zur Verfügung gestellt und sind in Abbildung 34 mit Hilfe von ArcGIS® (ESRI) in ein Orthophoto eingehängt, welches ebenfalls vom Regierungspräsidium Karlsruhe zur Verfügung gestellt wurde. Im Magnetogramm zeichnet sich der Graben der Viereckschanze als helle Linie ab. Bei den schwarzen Punkten mit weißer Mitte handelt es sich um Markierungspunkte der Gemarkungsgrenzen (MATTHES ET AL. 2007). Innerhalb des weißen Feldes im unteren Kartenbereich konnten keine Messungen durchgeführt werden, da dort landwirtschaftliche Geräte lagerten.

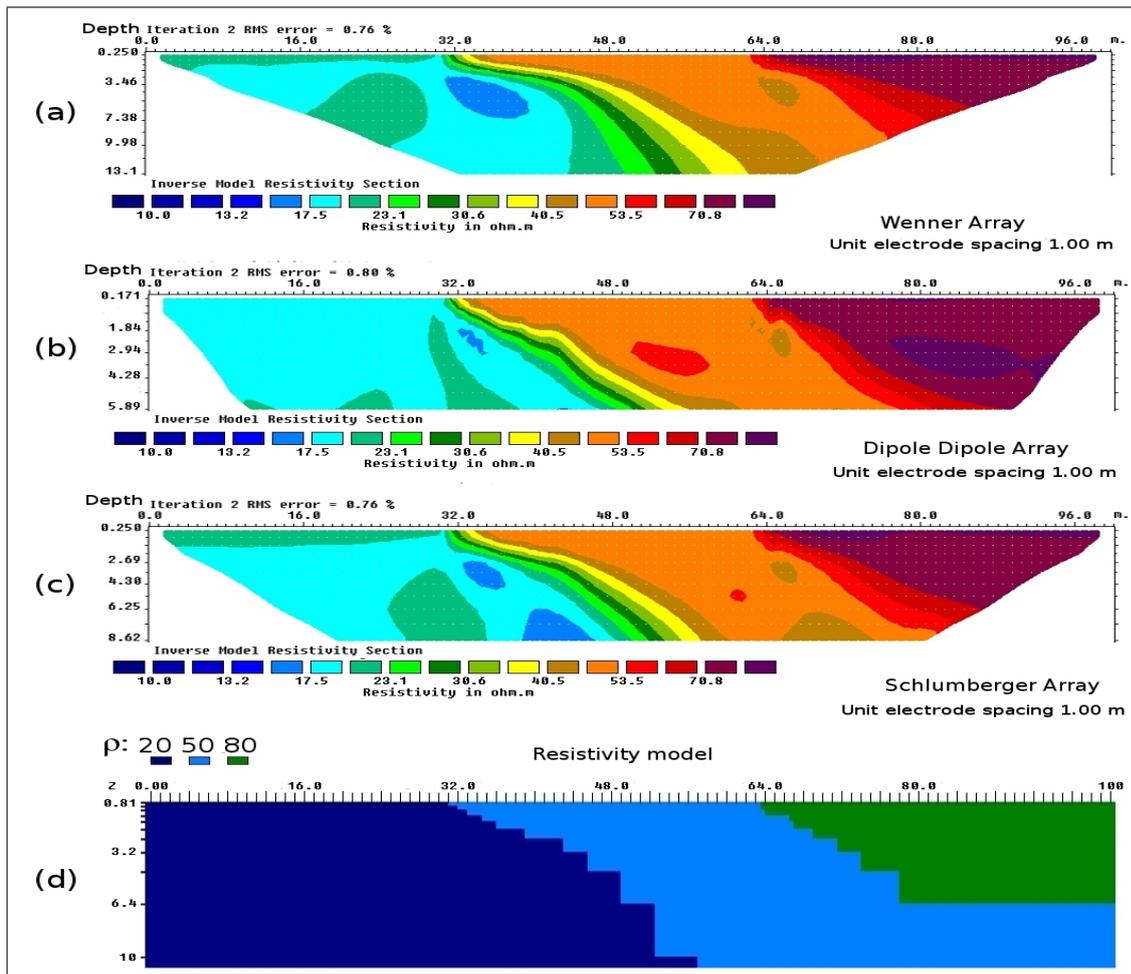


Abbildung 33: Mit RES2MOD erstelltes Modell mit drei unterschiedlichen geologischen Schichten (d) und die Widerstandsverteilungen, die mit RES2DINV errechnet wurden, mit der Wenner- (a), der Dipol-Dipol- (b) und der Schlumberger-Konfiguration (c). Es muss dabei beachtet werden, dass die Widerstandsverteilungen unterschiedliche Tiefen aufweisen. Zu erkennen sind Artefakte in den verschiedenen Schichten. Quelle: Eigene Darstellung.

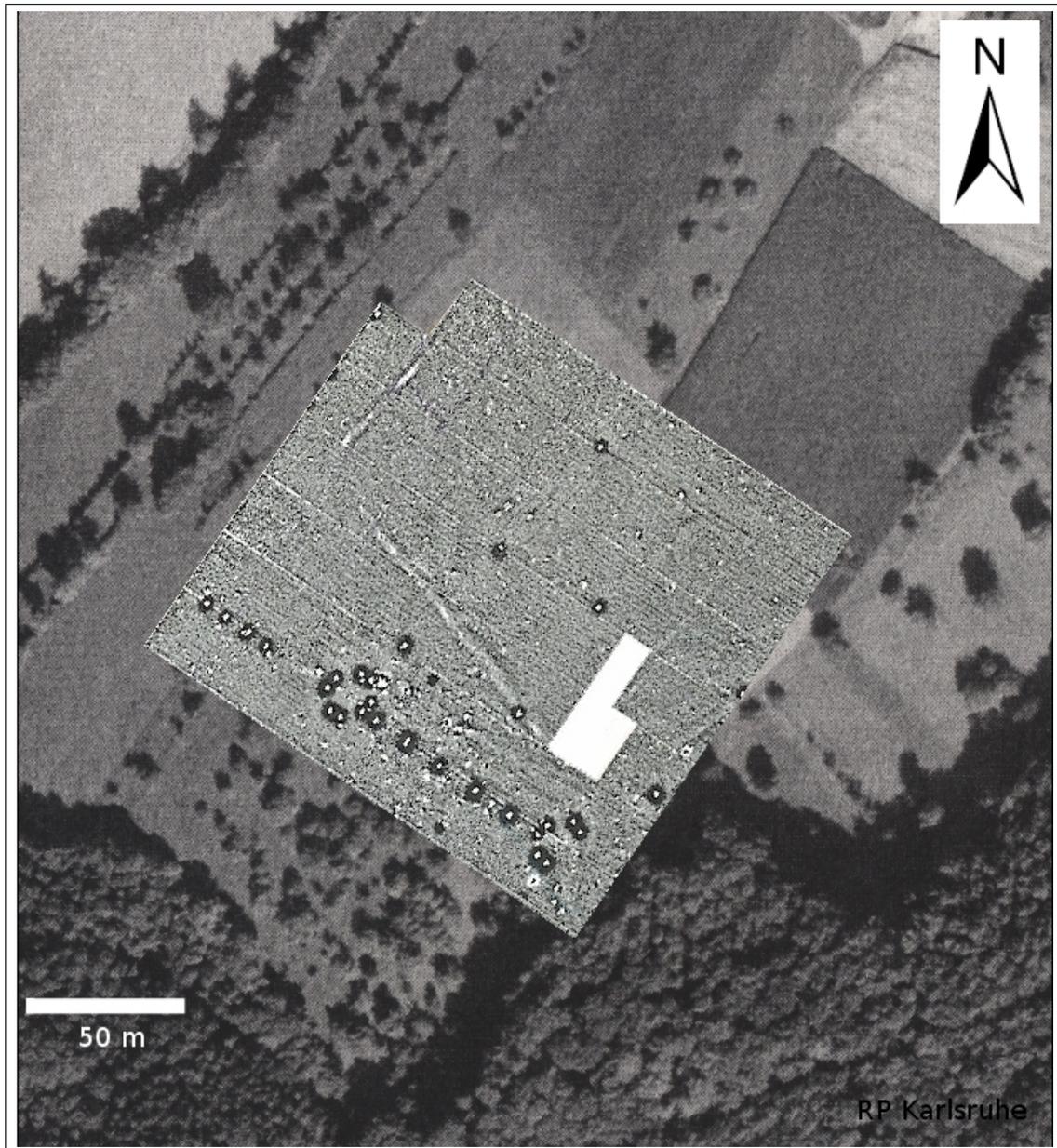


Abbildung 34: Ergebnisse der geomagnetischen Prospektion im Gewinn „Steinbock“, durchgeführt von Dr. H. von der Osten-Woldenburg (Landesamtes für Denkmalpflege Baden-Württemberg), über einem Orthophoto. Die helle Linie im Magnetogramm entspricht dem Graben der Viereckschanze, die schwarzen Punkte mit weißer Mitte sind Markierungspunkte der Gemarkungsgrenzen. Im Bereich der weißen Fläche konnten keine Messungen durchgeführt werden. Quelle: Regierungspräsidium Karlsruhe; vgl. auch MATTHES ET AL. 2007, S. 87.

3.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

Um ein möglichst umfassendes Bild der Lage und des Verlaufs der ehemaligen Wallgrabenanlage der Viereckschanze zu erhalten, wurde dem Orthophoto zusätzlich zum Magnetogramm eine handschriftliche Skizze des Archäologen K. Schumacher, die dieser bei seiner Untersuchung des Schanzengrabens und des Prunkgrabes im Jahr 1889 angefertigt hatte (SCHUMACHER 1889), überlagert. Abbildung 35 zeigt eine Umzeichnung dieser handschriftlichen Skizze durch SPOHN 2008. Darauf ist die Lage des Prunkgrabes (a) und seine Ausrichtung eingezeichnet sowie der Teilbereich des Wallgrabens der Viereckschanze (e), den Schumacher bei seiner Untersuchung erfasst hatte. Da er zum Teil nur kleinere Sondagen vorgenommen hatte, um dem Verlauf des Grabens zu folgen, musste er die Bereiche dazwischen interpolieren. An den Stellen, an denen Schumacher seine Sondagen durchführte, weist der Graben dadurch verursachte Störungen auf, die sich eventuell in den geoelektrischen Profilen abzeichnen. Durch die Überlagerungen der Pläne konnte der Verlauf des Schanzengrabens bis auf die nördliche Ecke, zu der keine Daten vorliegen, sowie die von Schumacher festgehaltene Lage des Prunkgrabes in das Orthophoto eingezeichnet werden (Abb. 36). Außerdem konnte so geklärt werden, an welchen Stellen der Schanzengraben bereits durch seine Ausgrabungen Störungen aufweist. Weitere Störungen, die durch die Nachgrabungen von Prof. Fischer zustande kamen, konnten auf diesem Wege nicht lokalisiert werden, da dazu keine veröffentlichten Pläne vorliegen (FISCHER 1986).

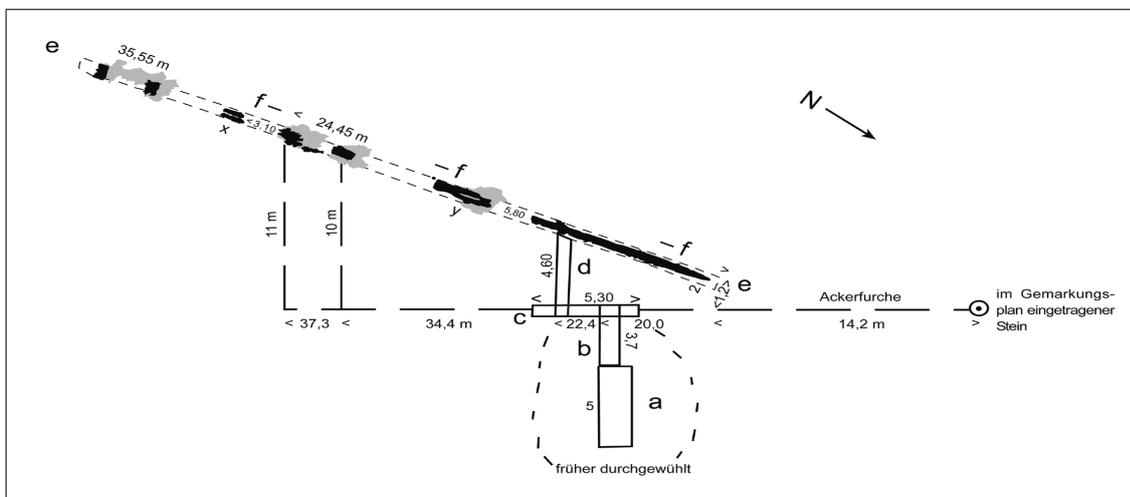


Abbildung 35: Sinsheim-Dühren, Gesamtplan der Grabungsaktivitäten von K. Schumacher im Jahr 1889. a: Grabungsschnitt durch die als Grab bezeichnete Stelle, b-d: rechtwinklig dazu angelegte Sondagen, e: Sondage entlang der verkohlten Hölzer (hier als schwarze Signatur), f: bandförmige Holzkohlekonzentration entlang der westlichen Grabenwandung. Quelle: Umzeichnung entnommen aus SPOHN 2008, S. 72; Vorlage: Ortsarchiv Archäologische Denkmalpflege beim Regierungspräsidium Karlsruhe.

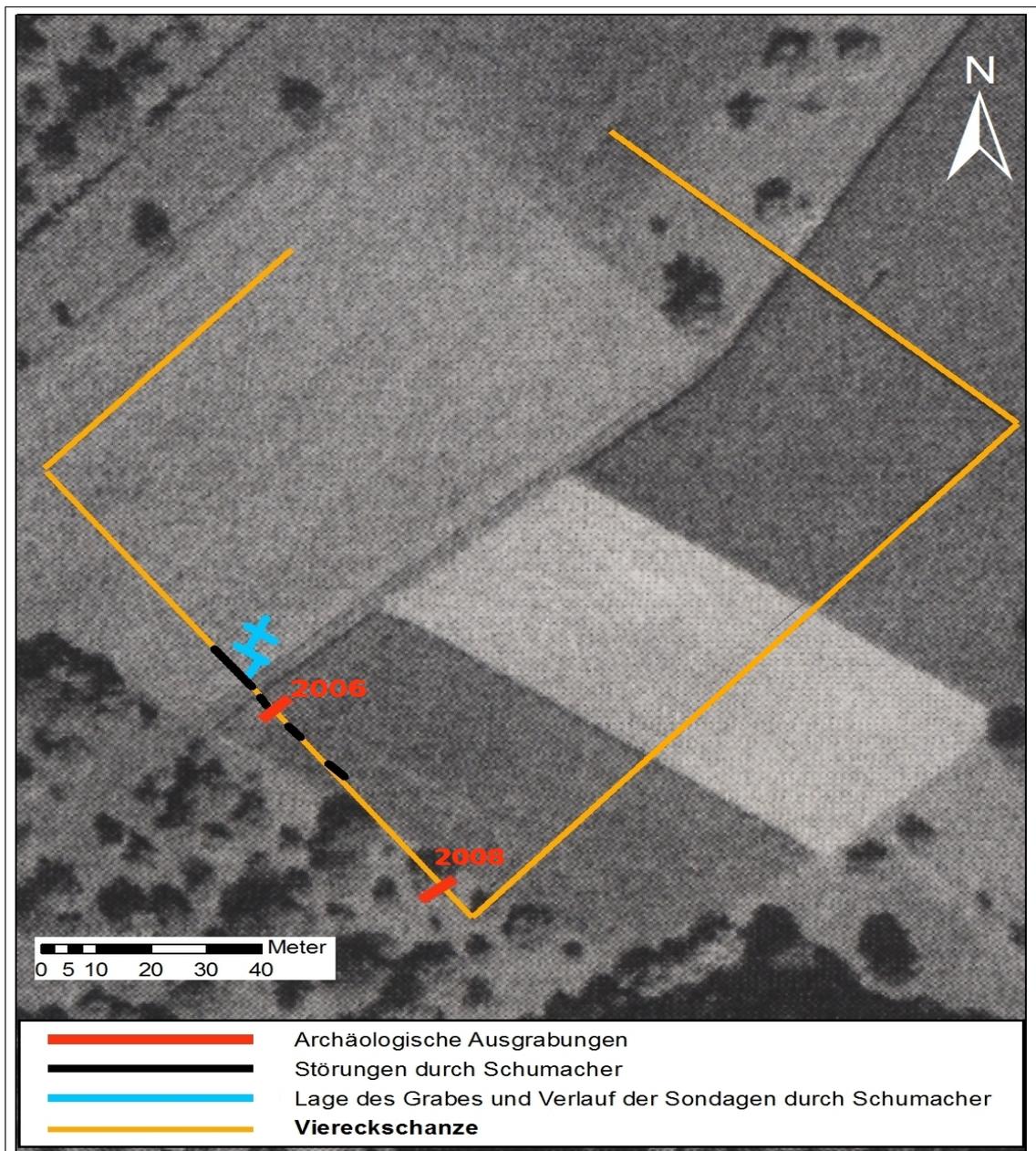


Abbildung 36: Kennzeichnung der Lage des Wallgrabens der Viereckschanze (orangenes, unvollständiges Viereck) und des Prunkgrabes (hellblaue Struktur) sowie der Störungen, die durch die Grabungen von Schumacher verursacht wurden (schwarz; vgl. dazu auch Abb. 35), auf einem Orthophoto. Eingezeichnet sind auch die beiden archäologischen Grabungen, die in den Jahren 2006 und 2008 durchgeführt wurden (rot; vgl. dazu auch Kap. 3.2.4). Die Lageinformationen wurden durch die Überlagerung verschiedener Pläne gewonnen. Quelle: Eigene Zusammenstellung mit ArcGIS® (ESRI); Orthophoto zur Verfügung gestellt vom Regierungspräsidium Karlsruhe.

3.2.3.2 Durchführung und Ergebnisse der Geoelektrischen Widerstandstomographie zur Erkundung der keltischen Viereckschanze

Der erstellte Plan des Verlaufes des Schanzengrabens (Abb. 36) diente als Planungsgrundlage für die Durchführung geoelektrischer Messungen rund um die Viereckschanze. Da ein Großteil der ehemaligen Schanze heute unter Ackerland liegt, konnte keine systematische Erfassung aller seitlichen Begrenzungen durchgeführt werden. Es wurde jedoch versucht, möglichst jede der vier Seiten mit mindestens einem ERT-Profil zu schneiden (vgl. Abb. 25). Dadurch sollte auch der Erhaltungszustand des Wallgrabens in unterschiedlichen Reliefpositionen erfasst werden. Die Profile wurden jeweils so angelegt, dass der Wallgraben möglichst senkrecht geschnitten wurde. Für alle geoelektrischen Messungen rund um die Viereckschanze wurde die Dipol-Dipol-Konfiguration verwendet, die für die Untersuchung archäologischer Strukturen am besten geeignet ist (vgl. Kap. 2.1.4). Im Folgenden werden für jede der vier seitlichen Begrenzungen der ehemaligen Schanze die Ergebnisse der geoelektrischen Messungen vorgestellt.

Südwestbegrenzung: Die südwestliche Begrenzung des ehemaligen Viereckschanzengrabens, an der auch die archäologischen Untersuchungen durch SCHUMACHER (1889) durchgeführt worden waren und in deren Nähe das Prunkgrab lag (vgl. Abb. 36), wurde von insgesamt 5 Geoelektrikprofilen erfasst.

Die ERT-Profile 2a und 2b (Abb. 37) wurden im Rahmen eines Geländepraktikums zur Physischen Geographie der Universität Heidelberg parallel zu einem auf dem Gelände verlaufenden Weg am Ackerrand gemessen (vgl. dazu auch Abb. 25). Der Wallgraben wurde dabei annähernd senkrecht geschnitten und verlief ungefähr in der Mitte der Profile. Bei ERT-Profil 2a wurden 50 Elektroden mit einem Abstand von 1 m verwendet, bei Profil 2b betrug der Elektrodenabstand nur 0,5 m bei gleicher Elektrodenanzahl. Es sollte damit der mittlere Teilbereich der ersten Messung genauer aufgelöst werden. Dadurch ging zwar Tiefeninformation verloren, da sich der Graben jedoch nur bis zu einer maximalen Tiefe von 2 m zu erstrecken schien, genügte die erhaltene Tiefeninformation von bis zu 2,6 m, um ihn vollständig zu erfassen. Die Abgrenzung in der Mitte entspricht dem Bereich des Grabens der Viereckschanze. Da diese beiden Profile über dem gleichen Bereich des Spitzgrabens gemessen wurden, jedoch unterschiedliche Profillängen und Elektrodenabstände gewählt worden waren, kann ein Eindruck über den Einfluss dieser Messgrößen auf das Ergebnis der Messung gewonnen werden. Durch den geringeren Elektrodenabstand wurde bei Profil 2b eine bessere Auflösung der Untergrundstrukturen erreicht, dennoch zeichnet sich der Spitzgraben in diesem Profil nicht deutlicher ab. Die Messungen wurden im oberen Hangbereich durchgeführt, an einer Stelle, an der bereits der Gipskeuper bzw. die Keuper-Fließerden anstehen und der Löss wenig bis nicht mehr vorhanden ist. Da es sich dabei um einen Erosionsstandort handelt, ist zu vermuten, dass der Graben hier nicht mehr seine ursprüngliche Tiefe aufweist. Im Profil 2a fallen Strukturen seitlich des Wallgrabens auf, bei denen es sich um Artefakte handeln könnte, die durch die Inversionsroutine zustande kamen. Um die Entstehung der Artefakte zu klären, wurden Modellberechnungen durchgeführt, die in Kapitel 3.2.5

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GEWANN „STEINBOCK“ BEI SINSHEIM-DÜHREN

vorgestellt werden. Wie diese Strukturen im Zusammenhang mit dem tatsächlichen Befund stehen, kann nur durch eine archäologische Grabung geklärt werden, wie sie entlang dieses Profils durchgeführt wurde. Da der Vergleich zwischen den Messergebnissen der Geoelektrischen Widerstandstomographie und den Befunden archäologischer Grabungen ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit ist, wird dieser in einem gesonderten Kapitel 3.2.4.1 vorgestellt. Dabei wird noch einmal näher auf das hier nur kurz vorgestellte Profil 2 eingegangen.

In unmittelbarer Nähe zu Profil 2, parallel dazu auf der anderen Seite des Weges (vgl. dazu auch Abb. 25), wurde das ERT-Profil 29 gemessen (Anhang, Abb. A.9). Eventuell wurde mit diesem Profil ein Teil des Grabens erfasst, der bereits durch Schumachers Grabungssondagen, die in diesem Bereich stattgefunden hatten (vgl. Abb. 36), gestört war. Ohne nachfolgende archäologische Grabung kann dies jedoch nicht abschließend geklärt werden. Deutlich zu erkennen ist allerdings auch hier wieder der Übergang zwischen den Keuper-Fließerden und dem anstehenden Keuper.

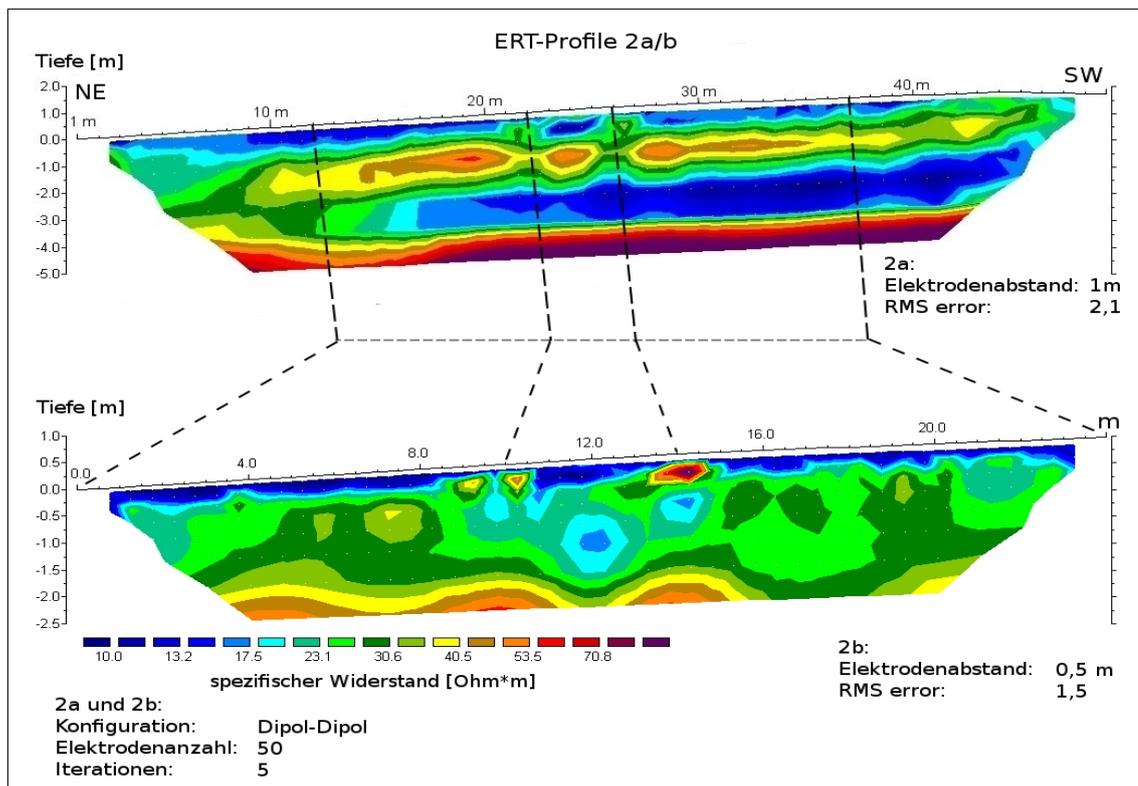


Abbildung 37: Vergleich der ERT-Profile 2a mit einem Elektrodenabstand von 1 m (oben) und 2b mit einem Elektrodenabstand von 0,5 m (unten). Zu Lage und Verlauf vgl. Abbildung 25. Die gestrichelten Linien kennzeichnen den Überschneidungsbereich der beiden Profile. Zu erkennen ist der Schanzengraben in der Mitte der Profile und seitlich davon auftretende Artefakte, die bei Profil 2a stärker hervortreten. Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

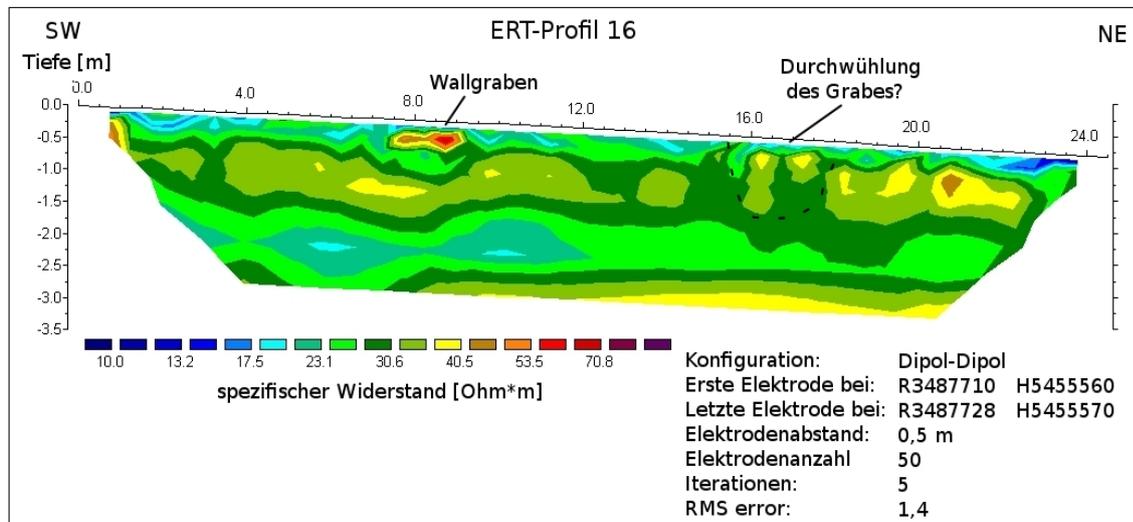


Abbildung 38: ERT-Profil 16 im Gewann „Steinbock“ (vgl. auch Abb. 25). Zu erkennen ist der Wallgraben der Viereckschanze und eventuell die Durchwühlung des Bereiches, in dem das Prunkgrab lag (vgl. Abb. 36). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Auch ERT-Profil 16 (Abb. 38) wurde im Oberhangbereich, parallel zu Profil 2 und 29 und annähernd senkrecht zum Verlauf des Wallgrabens der Schanze angelegt (vgl. Abb. 25). In diesem Profil ist der Graben bei ca. 8 m sichtbar. Ähnlich wie bei Profil 2 ist er jedoch nicht als Spitzgraben zu erkennen. Er scheint nur noch eine geringe Tiefe aufzuweisen, was sich durch die Lage am Oberhang des nach Nordwesten hin exponierten Hanges und die intensive landwirtschaftliche Nutzung des Geländes an dieser Stelle erklären lässt. Die Störung, die im ERT-Profil zwischen ca. 15 m und 18 m zu erkennen ist, liegt in dem Bereich, in dem Schumacher auf seinem Plan das Prunkgrab verzeichnet hat (vgl. dazu auch Abb. 36). Sie dürfte also auf seine Grabungsaktivitäten bzw. eventuell auch auf die Nachgrabung durch Prof. Fischer zurückzuführen sein (FISCHER 1986). Die ERT-Profile 12 und 13 (Abb. 39 und Abb. 40) wurden ebenfalls annähernd orthogonal zur Südwestbegrenzung der Schanze und zueinander parallel in einem Abstand von 5 m angelegt. Sie lagen im Mittelhangbereich des Südosthanges, in dem noch Reste der Lössauflage erhalten sind. Es handelt sich hier um einen vor Erosion geschützteren Standort. Zum einen weist der Südosthang ein relativ geringes Gefälle auf ($1 - 5^\circ$), zum anderen findet auf der Fläche keine Bodenbearbeitung mehr statt, da sie unter einer Streuobstwiese liegt. Die Schürfgaben, die in der Nähe der Profile lagen (P3, P15 und P16; vgl. auch Tab. 3 und Anhang Tab. A.9), zeigen, dass hier noch gekappte Parabraunerden und Braunerden vorkommen (vgl. auch Abb. 18). Die Schürfgaben sowie eine Rammkernbohrung (R3; Anhang Tab. A.10) ermöglichten eine Interpretation der beiden Profile. In die Interpretationsskizze des Profils 12 (Abb. 39, unten) sind bereits die Umrisse des Grabens, wie sie sich bei der archäologischen Grabung ergaben, eingezeichnet. Auf Profil 12 wird weiter unten näher eingegangen, da auch entlang dieses Profils eine archäologische Grabung stattfand.

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GEWANN „STEINBOCK“ BEI SINSHEIM-DÜHREN

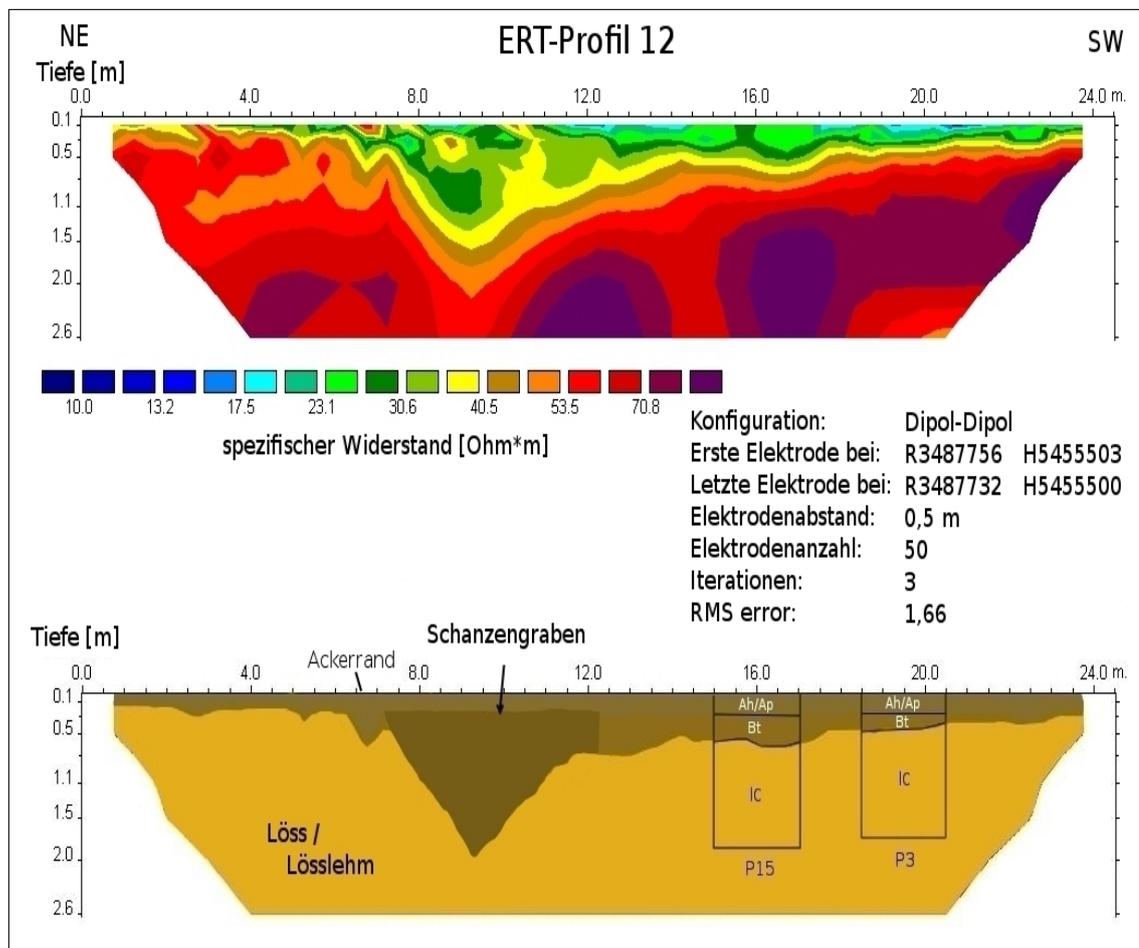


Abbildung 39: ERT-Profil 12 im Gewinn „Steinbock“ (oben; vgl. auch Abb. 25 und Abb. 36). Entlang des Profils wurde eine archäologische Grabung angelegt, durch deren Ergebnisse der Umriss des Schanzengrabens in die Interpretationsskizze des Profils (unten) eingezeichnet werden konnte. Ebenfalls eingezeichnet sind zwei Schürfguben außerhalb des Ausgrabungsbereiches. Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

Im ERT-Profil 13 (Abb. 40, oben) zeichnet sich der Wallgraben im Vergleich zu Profil 12 weniger deutlich als Spitzgraben ab. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass mit der Messung der Bereich einer Ecke des Grabens erfasst wurde (vgl. dazu auch Abb. 25). Bei diesem Profil ermöglichten eine Schürfgube (P16; Anhang Tab. A.9) und eine Rammkernsondierung (R3; Anhang Tab. A.10) eine Interpretation des Bereiches außerhalb des Wallgrabens. Bei der Störung im oberen Bereich des Grabens könnte es sich um eine Wurzel handeln, da das Profil in unmittelbarer Nähe zu einem Baum gemessen wurde.

3.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

Teile der Lössbedeckung vorhanden. Da die Fläche landwirtschaftlich genutzt wird, ist hier der Graben der Erosion stärker ausgesetzt, jedoch ist das Gefälle weniger stark als im Bereich der nordwestlichen Begrenzung. Der Wallgraben der Schanze hebt sich bei beiden Profilen deutlich vom umgebenden Löss bzw. Lösslehm ab.

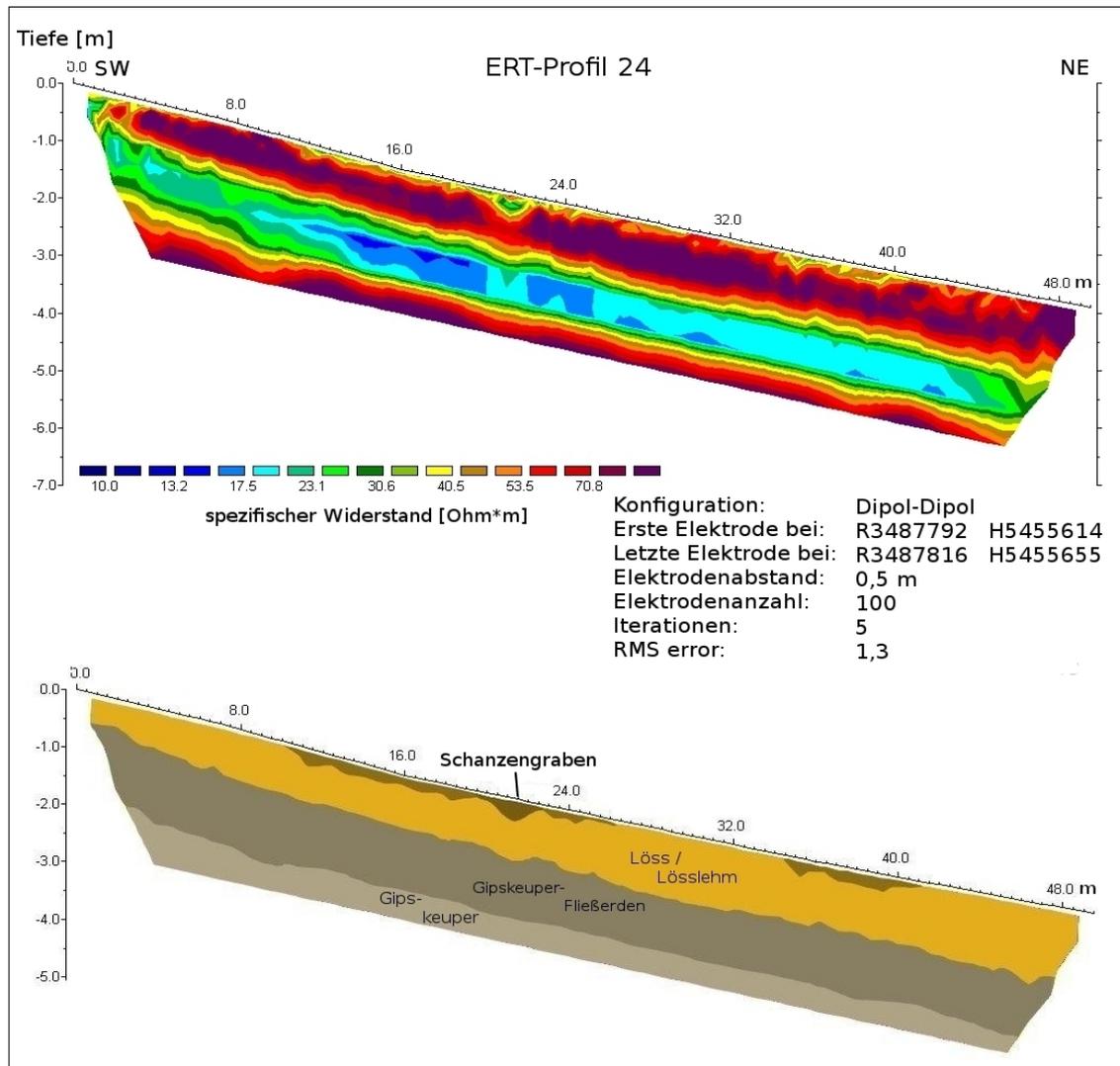


Abbildung 42: ERT-Profil 24 im Gewann „Steinbock“ (oben) und Interpretationsskizze (unten). Zu Lage und Verlauf vgl. Abbildung 25. Zwischen ca. 19,5 m und 22,5 m ist der Wallgraben der Viereckschanze zu erkennen. Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GEWANN „STEINBOCK“ BEI SINSHEIM-DÜHREN

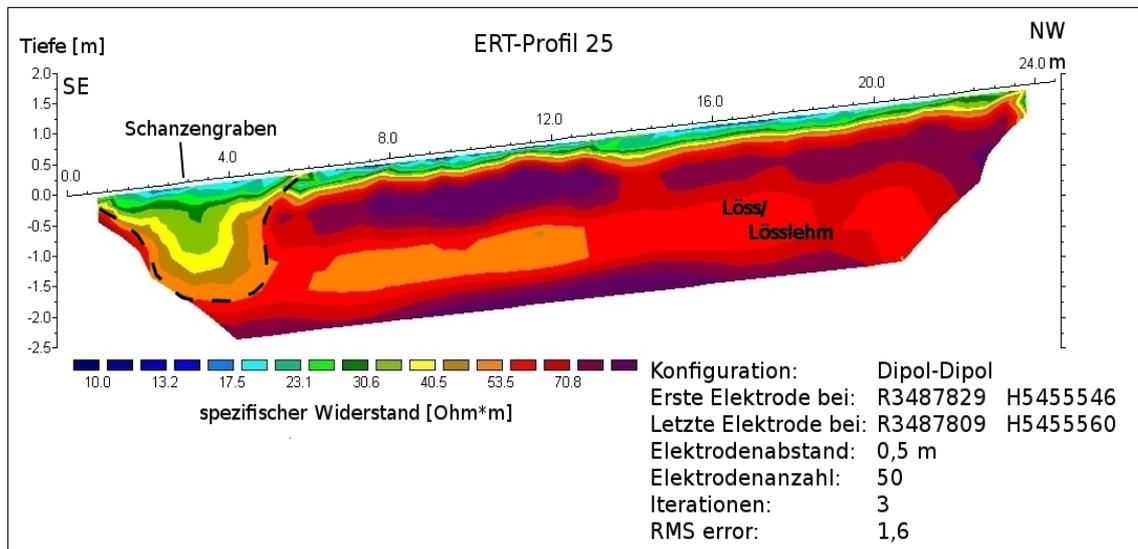


Abbildung 43: ERT-Profil 25 im Gewinn „Steinbock“ (vgl. Abb. 25). Der Schanzengraben ist im Randbereich des Profils deutlich zu erkennen. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

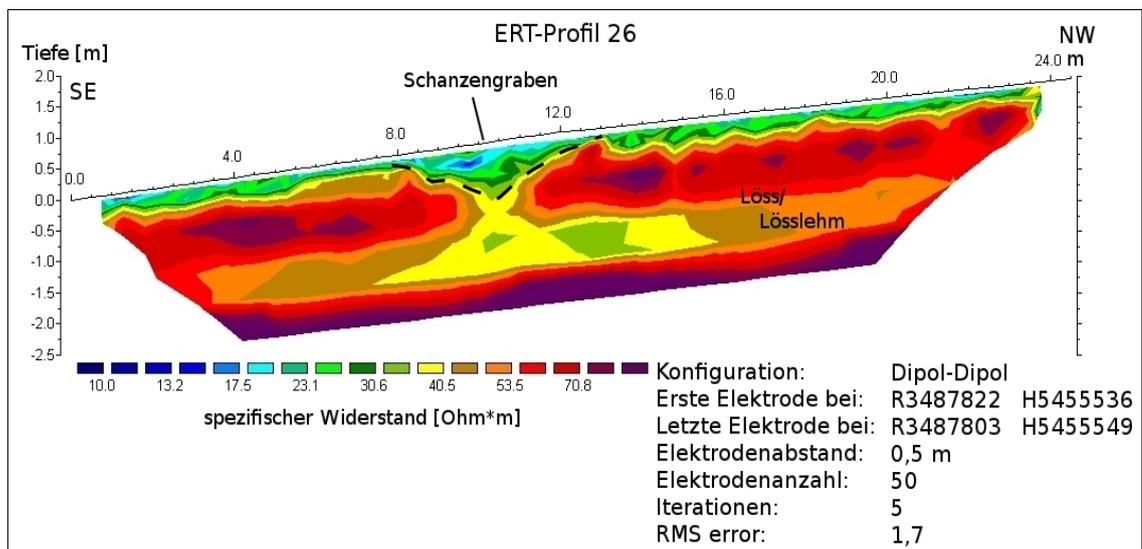


Abbildung 44: ERT-Profil 26 im Gewinn „Steinbock“ (vgl. Abb. 25). Der Schanzengraben zeichnet sich im mittleren Bereich des Profils deutlich ab. Direkt unterhalb des Grabens liegt ein Bereich, der etwas geringere Widerstandswerte ($40,5 \Omega\text{m} \leq \rho \leq 53,5 \Omega\text{m}$) aufweist als die unmittelbare Umgebung. Dabei kann es sich um einen gut wasserleitenden Durchbruch unterhalb des Grabens handeln, es könnte jedoch auch eine Spiegelung sein, die durch die Inversionsroutine zustande kommt. Dieser Frage wird in Kapitel 3.2.5 nachgegangen. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

3.2.4 Vergleich der Ergebnisse der Geoelektrischen Widerstandstomographie mit den Befunden der archäologischen Grabungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

Im Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren wurden vom Referat für Denkmalpflege des Regierungspräsidiums Karlsruhe zwei archäologische Grabungen unter der Leitung von Dr. G. Wieland durchgeführt. Diese lieferten jeweils Querschnitte durch den Spitzgraben der keltischen Viereckschanze. Da sie entlang vorausgegangener geoelektrischer Profilmessungen angelegt wurden, ist ein direkter Vergleich der Messergebnisse der ERT mit den archäologischen Grabungsbefunden möglich. Die Grabungsdokumentation, die für die direkten Vergleiche benötigt wurde, wurde mit freundlicher Genehmigung vom Regierungspräsidium Karlsruhe, Referat für Denkmalpflege zur Verfügung gestellt (GRABUNGSDOKUMENTATION SINSHEIM-DÜHREN 2006 und 2008, unveröffentlicht).

3.2.4.1 Archäologische Grabung in Sinsheim-Dühren im November 2006 und Vergleich mit dem ERT-Profil 2a

Die erste archäologische Grabung im Gewann „Steinbock“ fand im November 2006 entlang des ERT-Profiles 2 statt (vgl. Abb. 25 und Abb. 36). Es wurden in mehreren Grabungsschritten jeweils Plana angelegt, die durch Zeichnungen und Fotografien dokumentiert wurden. Die dabei zu Tage getretenen Funde waren vor allem Tierknochen, Keramik, Hüttenlehmfragmente und Holzkohle (vgl. dazu auch MATTHES ET AL. 2007). Nach Erreichen der Sohle des Spitzgrabens wurde abschließend das Profil gesäubert, eingemessen und dokumentiert. Abbildung 45 zeigt die zeichnerische Dokumentation auf Millimeterpapier im Maßstab 1:20 (GRABUNGSDOKUMENTATION SINSHEIM-DÜHREN 2006, unveröffentlicht). Darauf sind die Umrisse des Spitzgrabens der keltischen Viereckschanze und Strukturen, die sich innerhalb des Grabens abzeichnen, zu erkennen. Die eingetragenen Nummern kennzeichnen die unterschiedlichen archäologischen Befunde, auf die in der archäologischen Beschreibung näher eingegangen wird. Der Aufbau des Grabens wird dort wie folgt beschrieben (GRABUNGSDOKUMENTATION SINSHEIM-DÜHREN 2006, unveröffentlicht, FDR: 2006-116; vgl. dazu auch MATTHES ET AL. 2007):

Unterhalb des landwirtschaftlich genutzten Horizontes (1) befand sich eine „humose Einfüllschicht“ (2), in der auch die Tierknochen, Keramik und Holzkohle gefunden wurden. Südwestlich davon zeichnete sich ein „Brandschuttstreifen“ (3) ab, der zur Mitte hin und in Richtung Nordosten in „lockeres humoses Füllgut“ (4) überging (evtl. Tiergang). Darunter lag eine „sterile humose Füllschicht ohne Einschlüsse“ (5). Im Sohlenbereich (6) des Grabens fanden sich „einzelne Schwemmschichten“. Am Grabenrand (7) zum anstehenden Gipskeuper bzw. den Keuper-Fließerden (8) hin verlief ein „rötlicher Sickerstrand“. Abbildung 46 zeigt zur Ergänzung ein Foto des Grabenprofils, welches am Ende der Grabungskampagne entstand.

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GEWANN „STEINBOCK“ BEI SINSHEIM-DÜHREN

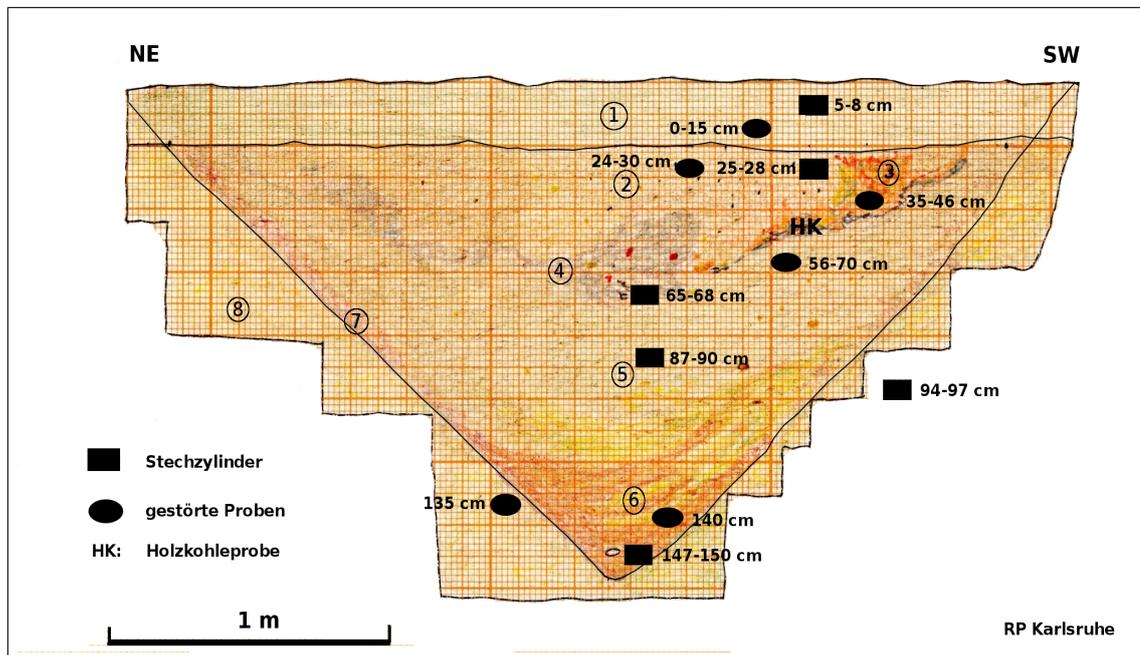


Abbildung 45: Archäologische Dokumentation des Profils des Wallgrabens der keltischen Viereckschanze bei der Grabung im November 2006 im Gewinn „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren entlang des ERT-Profiles 2 (vgl. Abb. 25). Eingezeichnet sind die Entnahmestellen der gestörten Proben und der Stechzylinder mit den entsprechenden Entnahmetiefen und die Entnahmestelle der Holzkohleprobe (HK). Die Befundnummern (1 bis 8, eingekreist) werden im Text erläutert. Quelle: Verändert nach der Originalzeichnung von E. Bürg (Grabungstechnik Regierungspräsidium Karlsruhe) aus der GRABUNGSDOKUMENTATION SINSHEIM-DÜHREN 2006, unveröffentlicht.



Abbildung 46: Fotografie des Profils des Wallgrabens der keltischen Viereckschanze im Gewinn „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. 45). Entstanden am Ende der archäologischen Grabung im November 2006. Quelle: Eigene Aufnahme.

Um die Ergebnisse der Geoelektrischen Widerstandstomographie und der anschließenden Inversion mit RES2DINV direkt mit den Befunden der archäologischen Grabung vergleichen zu können, wurde die archäologische Profilzeichnung (vgl. Abb. 45) maßstäblich an das ERT-Profil angepasst und diesem überlagert. Es wurden die Umrissse des Grabens und der verschiedenen archäologischen Schichten sowie die Befundnummern auf das ERT-Profil übertragen (vgl. Abb. 47). Wie dieser Vergleich zeigt, sind die Umrissse des Spitzgrabens durch die Messung nicht besonders gut erfasst worden. Die untere Begrenzung des Grabens und die Schwemmschichten im Sohlenbereich zeichnen sich im ERT-Profil nicht ab. Auch die anderen archäologischen Schichten lassen sich hinsichtlich der gemessenen Widerstandswerte nicht voneinander unterscheiden. Die Breite des oberen Grabenrandes wurde durch die ERT annähernd genau abgebildet.

Bei der Ausgrabung bestätigte sich die Annahme, dass seitlich und unterhalb des Grabens Keuper-Fließerden anstehen. Die auffälligen Strukturen, die sich im geoelektrischen Profil auf beiden Seiten des Grabens zeigen, finden keine Entsprechung im archäologischen Grabungsprofil. Sie müssen somit Artefakte sein, die durch die Messung bzw. die Inversionsroutine zustande kommen. Um die Entstehungsfrage der Artefakte zu klären, wurden Modellrechnungen durchgeführt, die in Kap. 3.2.5 vorgestellt werden.

Da sich der Graben im Profil 2b weniger deutlich abzeichnete als im Profil 2a, wurde kein Vergleich der Ergebnisse der archäologischen Grabung mit diesem Profil vorgenommen. Auch im Profil 2b sind jedoch Artefakte seitlich des Grabens zu erkennen (vgl. Abb. 37).

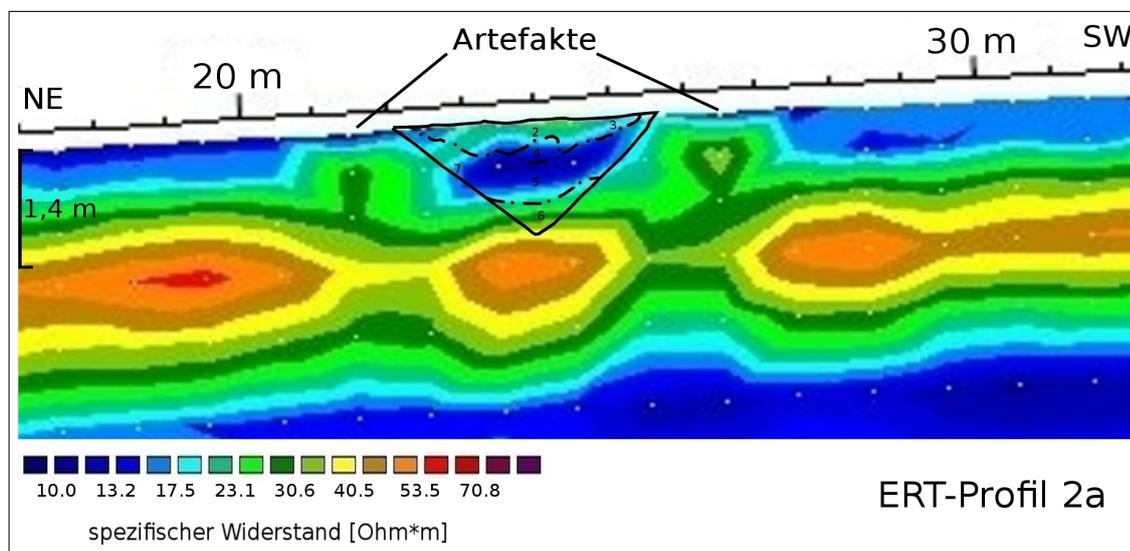


Abbildung 47: Direkter Vergleich zwischen dem ERT-Profil 2a (vgl. dazu auch Abb. 37) und dem archäologischen Profil der Grabung im November 2006 im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. 45). Die Umrissse des Grabens und der einzelnen archäologischen Schichten wurden auf das ERT-Profil übertragen. Seitlich des Grabens sind deutlich Artefakte zu erkennen, deren Entstehung in Kapitel 3.2.5 geklärt werden soll. Quelle: Eigene Darstellung.

Laboruntersuchungen: Um die Frage zu klären, warum sich der Wallgraben im ERT-Profil nicht als Spitzgraben abzeichnet und warum die einzelnen archäologischen Schichten nicht erkennbar sind, wurden für jede dieser Schichten Laboruntersuchungen durchgeführt. Neben einer bodenkundlichen Feldansprache der Profilwand der archäologischen Grabung (Anhang Tab. A.12) wurden aus jeder archäologischen Schicht jeweils gestörte Proben und Stechzylinder entnommen. Als Vergleichsprobe wurde eine gestörte Probe und ein Stechzylinder seitlich des Grabens entnommen. In Abbildung 45 sind die Entnahmestellen der Proben mit den entsprechenden Entnahmetiefen in die archäologische Profilskizze eingezeichnet.

Da die elektrische Leitfähigkeit eines Bodens, wie in Kapitel 2.1.1 erläutert, hauptsächlich eine elektrolytische Leitfähigkeit ist, hängt sie unter anderem stark von der Wasserverfügbarkeit in den Bodenporen ab (WEIDELT 2005). Da feinkörnige Substrate Niederschlagswasser besser speichern können als grobkörnige, hängt der Wassergehalt im Boden auch von der Korngrößenverteilung ab (HECHT 2007). Aus diesem Grund wurde die Korngrößenverteilung für die jeweiligen archäologischen Schichten anhand der gestörten Proben, die daraus entnommen worden waren, untersucht (Abb. 48; Tab. A.14 und Abb. A.12 im Anhang). Daraus lässt sich erkennen, dass der Schluffanteil von oben nach unten hin abnimmt zu Gunsten des Sand- und Grusanteiles. Der Sandanteil in der Probe von außerhalb des Grabens liegt jedoch deutlich über dem von innerhalb. Der Tongehalt ist in allen Schichten ähnlich, lediglich in den oberen 15 cm liegt er etwas höher. Der untere Grabenbereich unterscheidet sich hinsichtlich der Korngrößenverteilung somit weniger von der Umgebung als die oberen Bereiche. Dies könnte dafür verantwortlich sein, dass sich der untere Grabenbereich in der geoelektrischen Messung nicht deutlich abzeichnet. Die Verfüllung der Grabensohle lag vermutlich zeitlich nahe bei der Aushebung des Grabens und enthält Material, welches dem anstehenden Material neben dem Sohlenbereich in seiner Korngrößenzusammensetzung sehr ähnlich ist. Die Korngrößenverteilungen in den oberen archäologischen Schichten unterscheiden sich nur geringfügig voneinander, was ein Grund dafür sein kann, dass sich Übergänge zwischen ihnen im ERT-Profil nicht erkennen lassen. Beim Anlegen der Wall-Graben-Anlage wurde das ausgehobene Material als Wall neben dem Graben aufgehäuft (vgl. Abb. 15). Der erhöhte Schluffanteil innerhalb der Verfüllung des Grabens deutet darauf hin, dass neben dem Graben bzw. im aufgehäuften Wall Löss vorhanden gewesen ist, der in die Verfüllung des Grabens gelangen konnte. Dies legt die Vermutung nahe, dass zur Zeit des Aufbaus der Wallgraben-Anlage noch Lössreste auf dem Oberhang vorhanden waren. Es könnte sich dabei jedoch auch um Löss handeln, der sich bereits bei der Entstehung der Fließerde mit dem Keuper vermischt hat. Eine ergänzende Untersuchung des Humus- und des Kalkgehaltes (durch Glühverlust) in den gestörten Proben lieferte keine weiteren Erkenntnisse (vgl. Abb. 48; Tab. A.13 im Anhang). Auffällig ist lediglich der deutlich höhere Kalkgehalt in der Probe aus der Brandschicht (Befundnummer 3; vgl. auch Abb. 45). Dies kann auch durch das eventuelle Vorhandensein kleiner Knochensplitter erklärt werden (vgl. auch MATTHES ET AL. 2007). Bei der Untersuchung des Gehaltes an organischer Substanz ergaben sich im Grabeninneren keine höheren Werte als in der Vergleichsprobe von außerhalb. Da auch die Feucht- und die Trockendichte Aufschluss über den Porenraum geben, wur-

den diese mit Hilfe der Stechzylinderproben bestimmt (vgl. Anhang Tab. A.15 und Abb. A.13). Die Lagerungsdichte liegt bei Mineralböden zwischen 1,1 und 1,8 g/cm^3 und bei organischen Böden zwischen 0,12 und 0,48 g/cm^3 (HYPERSOIL 2012). Die erhaltenen Werte liegen somit alle im zu erwartenden Bereich, die Abweichungen der Einzelwerte zum Mittelwert sind nicht signifikant.

Der Archäologe K. Schumacher beschrieb bereits in seinen Aufzeichnungen eine „verkohlte Bretter- oder Balkenlage“, die er in ca. 50 bis 55 cm Tiefe im Wallgraben der Schanze fand (SCHUMACHER 1931, S. 14). Im Laufe der archäologischen Grabung im November 2006 fanden sich in der Brandlage des Spitzgrabens (in ca. 50 bis 60 cm Tiefe) größere Holzkohlestücke. Höchstwahrscheinlich handelt es sich bei dieser Schicht um die Entsprechung zu der von Schumacher erwähnten Bretterlage (MATTHES ET AL. 2007). Aus dieser Schicht wurde eine Holzkohleprobe entnommen (vgl. auch Abb. 45), die von Dr. B. Kromer (Radiokohlenstofflabor, Heidelberger Akademie der Wissenschaften am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg) datiert wurde (vgl. dazu auch KROMER 2007). Kalibriert wurde das erhaltene ^{14}C -Alter BP mit IntCal04 und CALIB5 (vgl. dazu auch z. B. REIMER ET AL. 2004). Das unkalibrierte Alter wurde dabei auf 2088 Jahre BP mit einem Fehler von 35 Jahren bestimmt (Tab. 7). Mit Hilfe der Kalibrationskurve IntCal04 (REIMER ET AL. 2004) wurde das ^{14}C -Alter auf ein Kalenderalter transformiert. Dies ergab, dass das Alter der Probe mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,2% (1σ -Bereich) zwischen 163 und 54 v. Chr. und mit einer Wahrscheinlichkeit von 95,4% (2σ -Bereich) zwischen 200 und 2 v. Chr. liegt. Beide kalibrierten Alter fallen somit in die Mittelatène-C- (320 - 150 v. Chr.) bis Spätatène-D-Zeit (150 - 0 v. Chr.; vgl. dazu auch Tab. 2).

Nach SPOHN (2008) datiert die Bestattung im Prunkgrab in die ausgehende Mittelatènezeit. Es bleibt zu klären, wie das Prunkgrab in Zusammenhang mit der Viereckschanze stand. Da das Grab in einem Bereich lag, der wahrscheinlich vom Wall der Viereckschanze überdeckt war (SPOHN 2008), muss es vor der Errichtung der Schanze angelegt worden sein. Die Datierung der Holzkohleprobe könnte das zeitliche Ende der Viereckschanze anzeigen, zumindest aber ein größeres Feuerereignis. Es kann jedoch nicht bestimmt werden, wie lange die Schanze bestand, bzw. wann sie errichtet wurde. Die Ergebnisse der naturwissenschaftlichen Datierung des Feuerereignisses stehen nicht im Widerspruch zur archäologischen Datierung der Grabfunde, es besteht jedoch weiterhin Klärungsbedarf zur zeitlichen Abfolge (vgl. dazu auch MATTHES ET AL. 2007).

Der direkte Vergleich der Befunde der archäologischen Grabung im November 2006 mit den Ergebnissen der ERT ergab, dass eine Abgrenzung des Wallgrabens zum anstehenden Keuper bzw. den Keuper-Fließerden schwierig ist. Ob diese Interpretationsschwierigkeiten von der Umgebung des Grabens maßgeblich abhängen, kann erst ein Vergleich zu einem anderen Profil, bei dem sich die Umgebung um den Graben von der hier vorgefundenen unterscheidet, klären. Das Profil 12, bei dem eine archäologische Grabung durchgeführt wurde, erfüllt diese Bedingung, da es in einem Hangbereich gemessen wurde, an dem noch Reste der Lössauflage vorhanden sind.

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GEWANN „STEINBOCK“ BEI SINSHEIM-DÜHREN

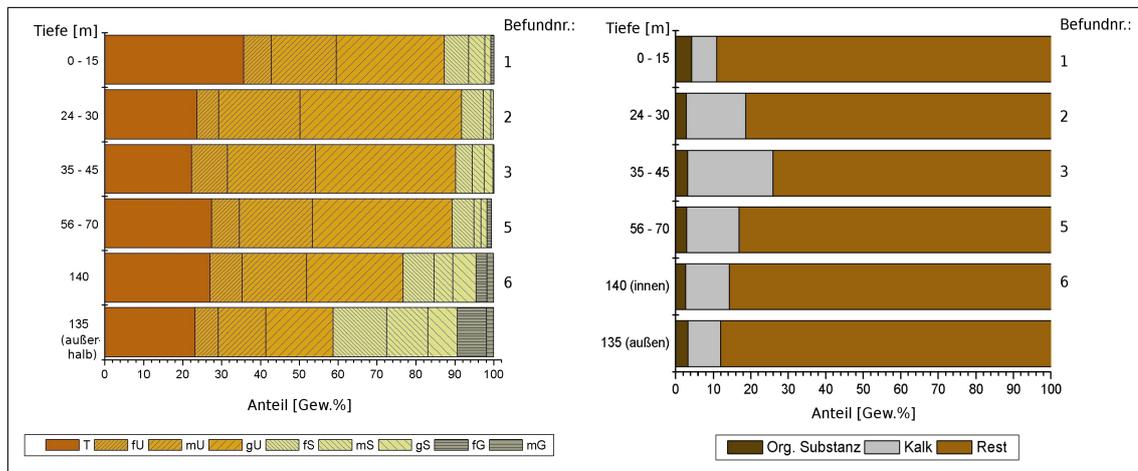


Abbildung 48: Korngrößenverteilungen (links) und Anteile an organischer Substanz und Kalk (rechts) in den gestörten Proben aus der Profilwand des Wallgrabens der Viereckschanze im Gewann „Steinbock“, entnommen am Ende der archäologischen Grabung im November 2006. Die Probenentnahmestellen mit den Entnahmetiefen sowie die Befundnummern sind der Abbildung 45 zu entnehmen. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tabelle 7: Radiokohlenstoffalter (konv. ^{14}C Alter BP) der Holzkohleprobe (Entnahmetiefe ca. 50 bis 60 cm) aus der Brandlage (vgl. auch Abb. 45) des Wallgrabens der keltischen Viereckschanze bei der Grabung im November 2006 im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren. Quelle: Durchgeführt von Dr. B. Kromer, Heidelberger Akademie der Wissenschaften am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg.

Labornr.	Probenname	konv. ^{14}C Alter BP	kal. Alter 1σ	kal. Alter 2σ
Hd-25926	Sinsheim-Dühren G1	2088 ± 35	cal BC 163-54	cal BC 200-2

3.2.4.2 Archäologische Grabung in Sinsheim-Dühren im März/April 2008 und Vergleich mit dem ERT-Profil 12

Die zweite archäologische Grabung im Gewann „Steinbock“ fand im März/April 2008 wiederum durch das Regierungspräsidium Karlsruhe, Referat für Denkmalpflege unter der Leitung von Dr. G. Wieland statt. Sie wurde so angelegt, dass das am Ende der Grabung dokumentierte archäologische Profil genau mit dem ERT-Profil 12 zusammenfiel (vgl. dazu auch Abb. 25 und Abb. 36). Dies ermöglichte auch hier wieder einen direkten Vergleich der beiden Profile. Bei dieser Ausgrabung wurden wiederum, wie bereits oben beschrieben, mehrere Plana angelegt und dokumentiert. Zum Abschluss wurde das gesamte Grabenprofil auf Millimeterpapier im Maßstab 1:20 gezeichnet (vgl. Abb. 49), auf dem auch die Befundnummern vermerkt sind, die für die verschiedenen archäologi-

3.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Gewann
„Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

schen Schichten vergeben wurden. Nach der archäologischen Beschreibung (vgl. GRABUNGSDOKUMENTATION SINSHEIM-DÜHREN 2008, unveröffentlicht) handelt es sich bei den verschiedenen archäologischen Schichten um einen „Humus-“ (1) und „Wurzelhorizont“ (2), unter dem sich ein „reduzierter, fahlgrauer Lössbereich“ (4) mit einzelnen Holzkohlestücken befand. Zu den Grabenrändern hin fand sich eher „rotbraun gefärbter Lösslehm“ (3), „teilweise schwach marmoriert“ und „von Staunässeflecken durchzogen“. Am unteren Rand der Lössbereiche schloss sich ein „lockeres Holzkohleband, nicht als durchgehende Schicht vorliegend“ (5) an, an dessen tiefster Stelle sich „einige massivere Brettreste“ fanden. Darunter folgen unterschiedlich gefärbte Lösslehmschichten (6 bis 8), von helleren mit Staunässeflecken bis hin zu gebändertem Lösslehm bzw. dessen Fließerden. Außerhalb des Grabens steht „Löss gebändert mit Keuper“, d. h. die Löss-Keuper-Fließerden an (9) und unterhalb „autochthoner Löss“ (10).

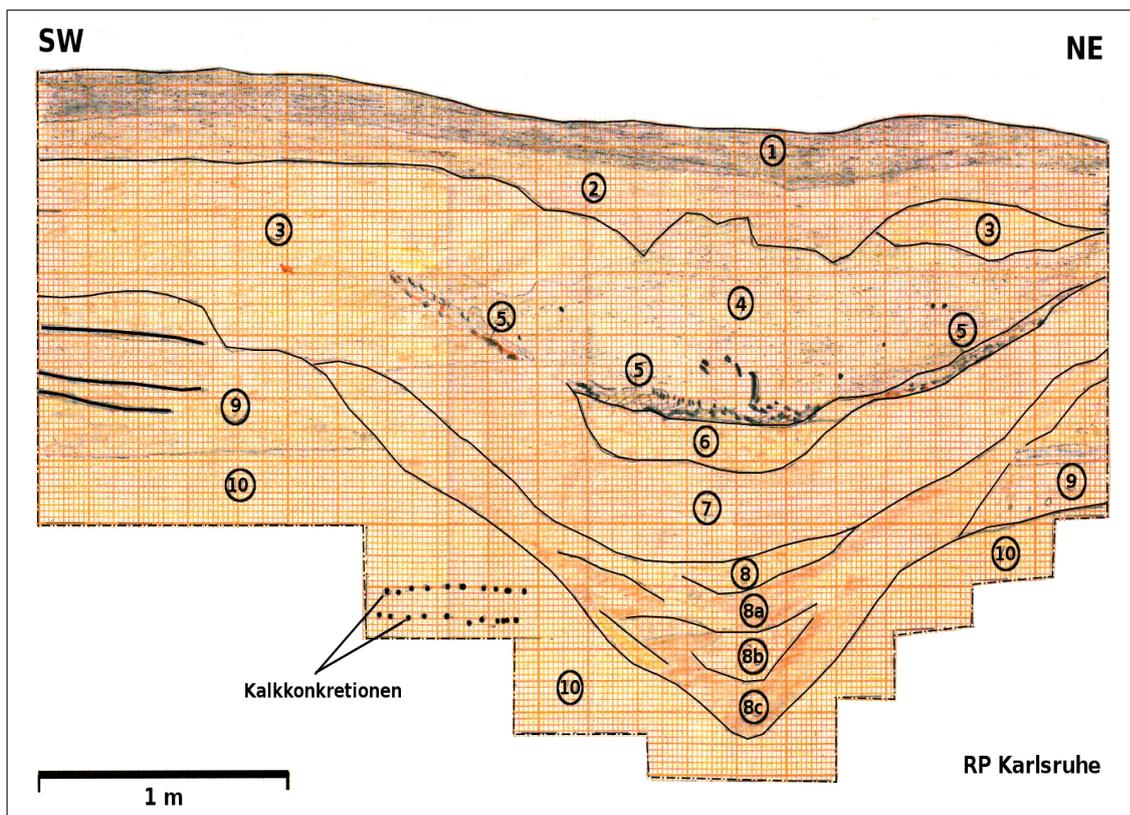


Abbildung 49: Archäologische Dokumentation des Profils des Wallgrabens der keltischen Viereckschanze bei der Grabung im März/April 2008 im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren entlang des ERT-Profiles 12 (vgl. dazu Abb. 25 und Abb. 36). Die Befundnummern (1 bis 10) werden im Text erläutert. Quelle: Verändert nach der Originalskizze von H. Eberspächer (Grabungstechnik Regierungspräsidium Karlsruhe) aus der GRABUNGSDOKUMENTATION SINSHEIM-DÜHREN 2008, unveröffentlicht.

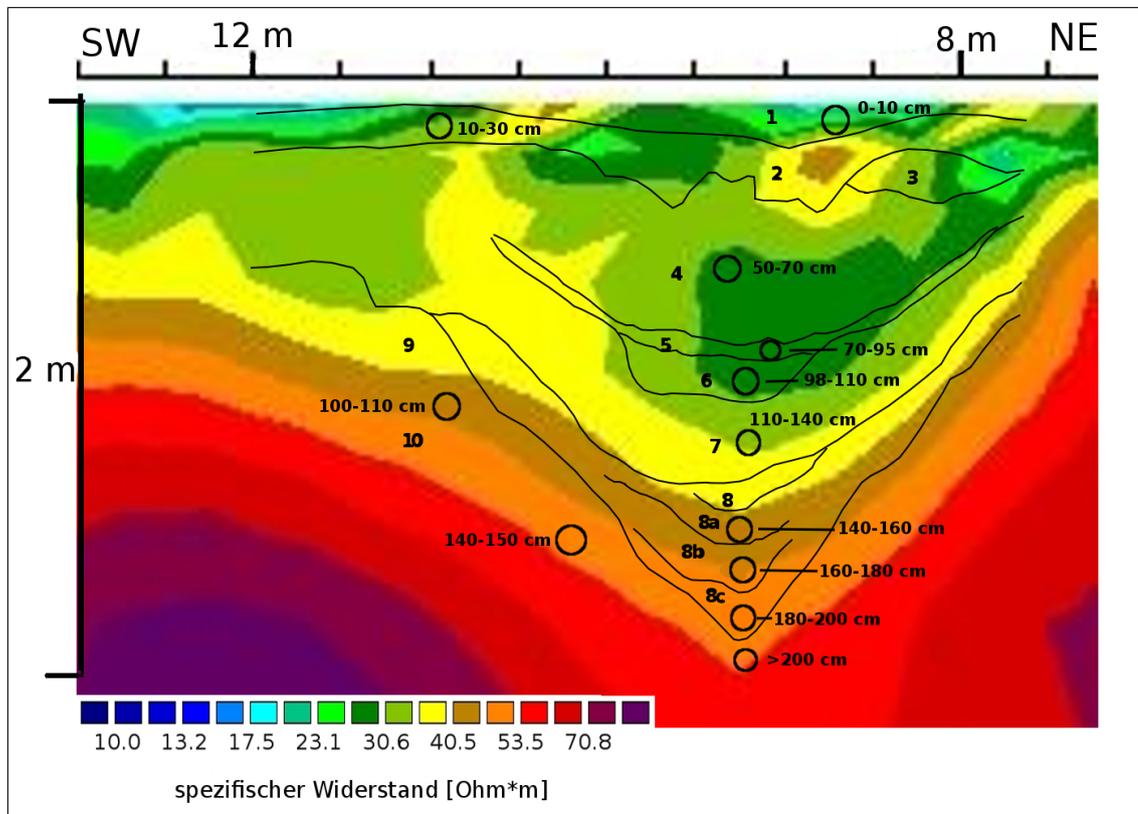


Abbildung 50: Direkter Vergleich des ERT-Profiles 12 (vgl. auch Abb. 39) mit den Befundgrenzen der archäologischen Grabung im Gewann „Steinbock“ im März/April 2008 durch Überlagerung. Eingezeichnet sind auch die Befundnummern der archäologischen Skizze (vgl. dazu auch Abb. 49) und die Probenentnahmestellen mit der entsprechenden Entnahmetiefe. Quelle: Eigene Darstellung.

Die archäologische Profilskizze wurde wieder maßstäblich an das ERT-Profil 12 angepasst und diesem überlagert (Abb. 50). Da bei der archäologischen Grabung das Profil in nordwestlicher Blickrichtung aufgenommen wurde, die Auslage bei der geoelektrischen Messung allerdings so gewählt worden war, dass das entstandene Profil in Südost-Blickrichtung zu betrachten ist, musste dieses an seiner vertikalen Mittelachse gespiegelt werden. Daraufhin wurden die Umrisse des Grabens sowie die Befundgrenzen und die Befundnummern aus der archäologischen Skizze (vgl. Abb. 49) auf das ERT-Profil übertragen, um eine direkte Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

Wie bereits erläutert, bildet die Geoelektrische Widerstandstomographie keine harten Schichtgrenzen ab, die Übergänge sind fließend (vgl. auch HECHT 2007). Dies lässt keine exakte Bestimmung der Grenzen eines archäologischen Befundes aus dem ERT-Profil zu.

Beim Vergleich zeigt sich eine gute Übereinstimmung der äußeren Begrenzungen des gemessenen Grabens mit dem tatsächlich vorhandenen. Darüber hinaus drücken sich die verschiedenen archäologischen Befundschichten innerhalb des Grabens teilweise in unterschiedlichen Widerstandswerten aus (vgl. Abb. 50). Die unteren Grabenbereiche (8, 8a, 8b und 8c) unterscheiden sich kaum voneinander, es handelt sich dabei um mit Keuper gebänderte Lösslehmschichten. Auch im ERT-Profil gehen die Widerstandswerte in diesem Bereich fließend ineinander über. Der Bereich oberhalb der Brandschicht (5) zeigt etwas geringere Widerstandswerte, was darauf zurückzuführen sein könnte, dass er mit tonigerem Material verfüllt ist als die Bereiche unterhalb.

Laboruntersuchungen: Um zu überprüfen, wie stark sich die einzelnen archäologischen Schichten hinsichtlich der Korngrößenverteilungen unterscheiden, wurden Laboranalysen durchgeführt. Dafür wurde aus jeder archäologischen Befundschicht je eine gestörte Probe genommen sowie drei Vergleichsproben von außerhalb (100 - 110 cm, 140 - 150 cm) bzw. unterhalb (> 200 cm) des Grabens. Die Entnahmestellen der Proben sind ebenfalls in Abbildung 50 gekennzeichnet. Anhand dieser Proben wurde im Labor zusätzlich mittels Glühverlust der Carbonatgehalt und der Gehalt an organischer Substanz in den verschiedenen archäologischen Befundschichten ermittelt (vgl. Abb. 51). Die Ergebnisse des Glühverlustes zeigen, dass die als „Holzkohleband“ bezeichnete archäologische Schicht (5; vgl. GRABUNGSDOKUMENTATION SINSHEIM-DÜHREN 2008, unveröffentlicht) deutlich mehr organische Substanz enthält als die benachbarten Schichten. Außerdem ist der Carbonatgehalt in den Schichten (4) und (5) höher als in den darüberliegenden (1) bis (3) und auch höher als in den nächsten darunterliegenden (6) und (7). Das Holzkohleband deutet wie bereits oben erwähnt auf ein Brandereignis hin, welches eventuell mit dem Untergang der Viereckschanze in Zusammenhang stand. Die unteren Verfülllagen könnten somit bereits zur Zeit der Nutzung der Schanze wieder in den Graben eingeschwemmt worden sein. Die Korngrößenverteilung (Abb. 51 und Tab. A.18 im Anhang) zeigt einen hohen Anteil an Grobschluff und Ton in allen Proben. Sowohl im Bereich der Brandlage (4 und 5) als auch zur Grabensohle hin (8a, 8b und 8c) liegt der Sandanteil etwas höher als in den übrigen Bereichen, jeweils zu Lasten des Tonanteiles. Da ein erhöhter Tonanteil die Wasserspeichereigenschaften und somit die elektrische Leitfähigkeit verbessert (vgl. dazu Kap. 2.1.1), weist der gesamte Verfüllbereich des Grabens geringere spezifische elektrische Widerstandswerte auf, als der stärker schluffhaltige Außenbereich. Dieser Teil des ehemaligen Wallgrabens liegt in einem Bereich des Hanges, in dem noch Reste der Lössauflage vorhanden sind. Der beim Ausheben des Grabens angelegte Wall dürfte demnach eine höhere Schluffkomponente enthalten haben als der am Oberhang angelegte. In die unteren Schichten des Grabens könnte dadurch eine größere Menge an Schluff gespült worden sein, was durch die Laborergebnisse bestätigt wird. Erst nachdem auf der Kuppe bzw. am Oberhang die Lössauflage immer mehr abgetragen worden war und somit die Keuper-Fließerden freilagen, konnte immer mehr tonhaltiges Material eingeschwemmt werden, was den erhöhten Tonanteil in den oberen Schichten erklären kann.

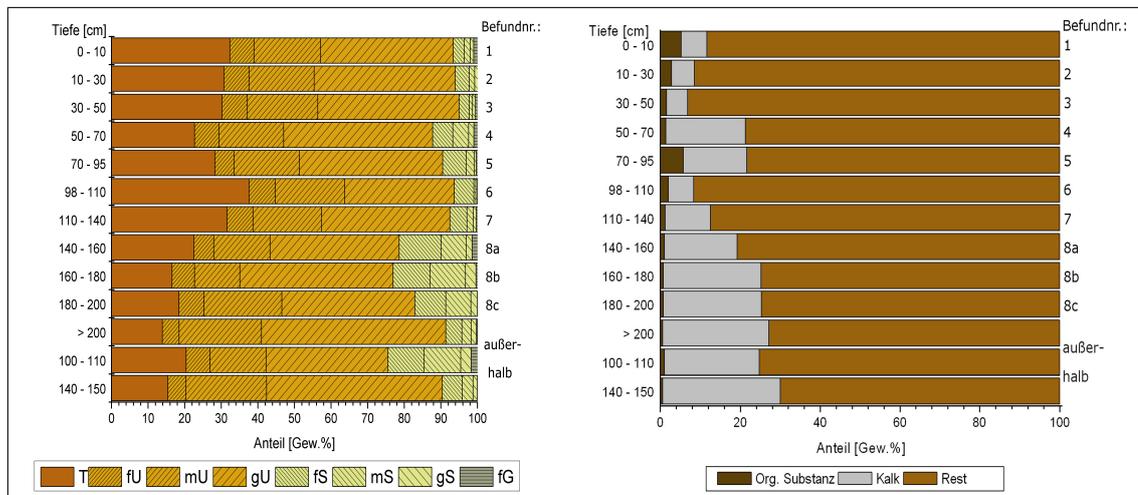


Abbildung 51: Korngrößenverteilungen (links) und Anteile an organischer Substanz und Kalk (rechts) für die Proben aus der archäologischen Grabung im März/April 2008 im Gewinn „Steinbock“ (vgl. dazu Abb. 50). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

3.2.5 Modellerstellung eines simulierten Spitzgrabens

Mit dem Programm RES2MOD wurde das vereinfachte Modell eines Spitzgrabens erstellt, für das mit den verschiedenen Konfigurationen, die auch bei den durchgeführten Messungen verwendet wurden, Pseudosektionen berechnet wurden. Aus diesen wurden mit dem Inversionsprogramm RES2DINV Inverse Modelle erstellt.

Der simulierte Graben hatte eine obere Breite von ca. 2,5 m und eine Tiefe von ca. 2,8 m. Es wurden zwei unterschiedliche Widerstandswerte für innerhalb ($\rho = 25 \Omega m$) und für außerhalb ($\rho = 65 \Omega m$) des Grabens gewählt, die in den jeweiligen Bereichen jedoch homogen waren. Mit Hilfe dieser Modellberechnungen sollte einerseits untersucht werden, welchen Einfluss die Konfiguration auf die Ergebnisse der Messung über einem Spitzgraben hat und andererseits, welche „Unschärfen“ an den Grenzen zwischen zwei homogenen Bereichen durch die Inversionsroutine entstehen und welche Artefakte entstehen. Abbildung 52 zeigt das Modell des Spitzgrabens und die Widerstandsverteilungen, die mit den drei Konfigurationen (Wenner, Dipol-Dipol und Schlumberger) berechnet wurden. Die Modellrechnung zeigt, dass die Form des Spitzgrabens mit der Wenner-Konfiguration nicht besonders deutlich erfasst wird (vgl. Abb. 52, a). Lediglich die obere Breite wird naturgetreu dargestellt. Die bei der Modellberechnung auftretenden Artefakte unterscheiden sich von denen, die bei der realen Messung (ERT-Profil 2a) auftraten, es fehlen diejenigen seitlich des Grabens (vgl. dazu auch Abb. 37). Der Graben scheint nach unten hin gespiegelt zu werden. Da die Modellantwort jedoch nur bis zu einer Tiefe von 2,82 m angezeigt wird, kann dies nicht mit Sicherheit festgestellt werden. Die Ergebnisse der Inversion, die mit der Dipol-Dipol-Konfiguration simuliert wurde (vgl. Abb. 52, b), zeigen, dass die modellierte Form des Grabens hierbei gut erfasst wurde, jedoch an Tiefeninformation verloren geht (vgl. Kap. 2.1.4). Aus zahl-

3.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

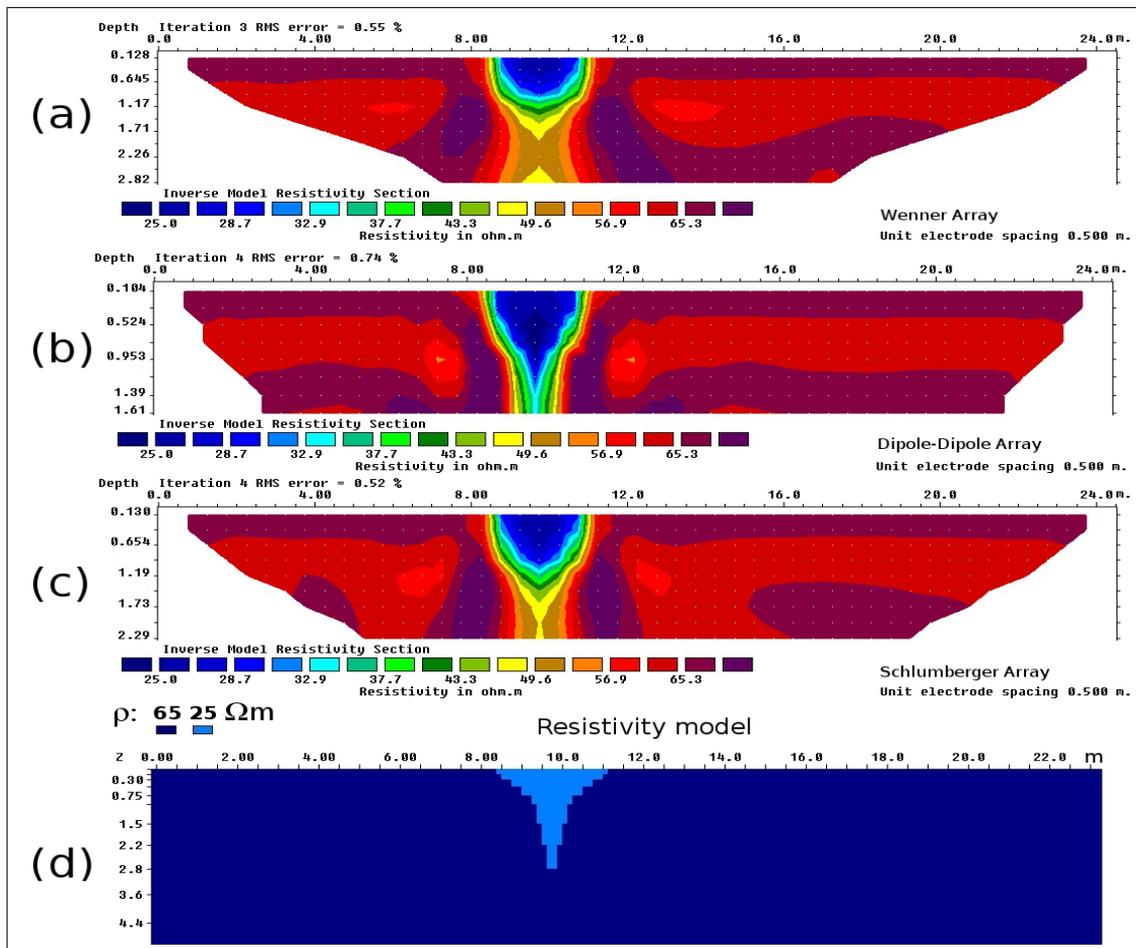


Abbildung 52: Mit RES2MOD erstelltes Modell eines Spitzgrabens (d) und die mit RES2DINV simulierte Widerstandsverteilungen mit der Wenner-Konfiguration (a), mit der Dipol-Dipol-Konfiguration (b) und mit der Schlumberger-Konfiguration (c). Quelle: Eigene Darstellung.

reichen anderen Arbeiten ist bekannt, dass sich die Dipol-Dipol-Konfiguration bei der Untersuchung archäologischer Fragestellungen am besten eignet (vgl. Kap. 2.1.4), weswegen sie in dieser Arbeit hauptsächlich verwendet wurde. Die Ergebnisse des Vergleichs der Modellrechnung mit unterschiedlichen Konfigurationen bestätigen die Richtigkeit der Wahl. Beim Inversionsergebnis der simulierten Dipol-Dipol-Messung fällt auf, dass es zu einer Artefaktausbildung seitlich des Grabens kam, die derjenigen bei der real durchgeführten Messung (ERT-Profil 2a) sehr ähnlich ist, bei der ebenfalls die Dipol-Dipol-Konfiguration verwendet worden war (vgl. wiederum Abb. 37). Solche Artefakte können bei einer realen Messung z. B. durch die dreidimensionale Natur der Untergrundstrukturen zustande kommen, die bei der Transformation ins Zweidimensionale vernachlässigt wird, oder auch durch die Brechung der Stromlinien an Widerstandsgrenzen (NOEL & XU 1991). Da die Artefaktbildung auch im Modell auftrat, in welchem ein homo-

gener Untergrund gewählt worden war, in dem die einzigen Widerstandsgrenzen die Randbereiche des Grabens darstellen, muss ein anderer Effekt dafür verantwortlich sein. Da bei der simulierten Messung die äußeren Einflussfaktoren ausgeschlossen sind, lässt sich das dortige Auftreten von Artefakten direkt auf die Inversionsroutine zurückführen. Eine mögliche Erklärung dafür, dass sie in dieser Form bei der Modellierung mit der Dipol-Dipol-Konfiguration stärker ausgeprägt auftreten, liegt in der Sensitivitätsverteilung der verschiedenen Konfigurationen (vgl. Abb. 11). Bei der simulierten Messung mit Hilfe der Schlumberger-Konfiguration zeigt sich ein ähnliches Bild (vgl. Abb. 52, c). Die Tiefe des Spitzgrabens wird wiederum nicht richtig erfasst. Die Form des Spitzgrabens entspricht eher der im Modell vorgegebenen Form als bei der Simulation mit der Wenner-Konfiguration, jedoch weniger als bei der Simulation mit der Dipol-Dipol-Konfiguration. Auch hier treten Artefakte seitlich des Grabens auf, die weniger stark ausgeprägt sind als bei der Modellierung mit der Dipol-Dipol-Konfiguration, was wiederum auf die Sensitivitätsverteilung zurückzuführen ist.

Um zu berücksichtigen, dass bei real durchgeführten Messungen Messfehler auftreten können, wurden weitere Modelle mit der Dipol-Dipol-Konfiguration berechnet, die mit verschiedenen Anteilen an Rauschen (1%, 5% und 10%) belegt wurden (Abb. 53). Die Modellierung mit 1% Rauschen unterscheidet sich noch nicht deutlich von derjenigen ohne Rauschen, lediglich die Artefakte treten etwas stärker zutage. Beim Modell mit 5% Rauschen treten weitere Artefakte auch in größerer Entfernung zum Spitzgraben auf. Bei 10% Rauschen schließlich ist der Spitzgraben fast nicht mehr als solcher zu erkennen und die Modellantwort enthält zahlreiche Artefakte. Das Auftreten von Artefakten bei einer real durchgeführten Messung kann also neben den oben genannten Gründen auch auf einen erhöhten Anteil an Rauschen, d. h. an Fehlern in den Messwerten, zurückzuführen sein.

Da ein Spitzgraben bei einer real durchgeführten geoelektrischen Messung nicht in einem homogenen Untergrund vorliegt, wurden weitere Modelle mit realistischeren Umgebungsbedingungen erstellt. Dafür wurde ein Spitzgraben in das Modell mit unterschiedlichen geologischen Schichten eingefügt (vgl. Kap. 3.2.2). Dadurch kann einerseits untersucht werden, wie sich das Vorhandensein eines Spitzgrabens auf das Modell der geologischen Schichten auswirkt und andererseits, welche Auswirkungen es umgekehrt auf das Modell des Spitzgrabens hat, wenn er nicht in einem homogenen Untergrund vorliegt. Auch dieses Modell wurde mit den drei Konfigurationen simuliert (vgl. Abb. 54), um wiederum die Unterschiede zu untersuchen. Die Berechnungen ergaben, dass auch im Fall des realistischeren Untergrundes die Dipol-Dipol-Konfiguration am besten geeignet ist, die Form und die Tiefe des Spitzgrabens zu erfassen. Bei der Simulation mit der Schlumberger-Konfiguration lässt sich der Graben zwar von der Umgebung unterscheiden, seine Form lässt jedoch nicht auf einen Spitzgraben schließen. Bei der Simulation mit der Wenner-Konfiguration erscheint er stark verflacht, seine eigentliche Form ist nicht mehr zu erkennen. Diese Ergebnisse wurden bereits bei der Simulation des Spitzgrabens im homogenen Untergrund erhalten. Die geologischen Schichten im Modell haben sich nicht auf die Form des Grabens im Widerstandsmodell ausgewirkt. Umgekehrt bewirkte das Vorhandensein des Spitzgrabens im Modell der geologischen Schichten ein erhöhtes Auftreten von Ar-

3.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

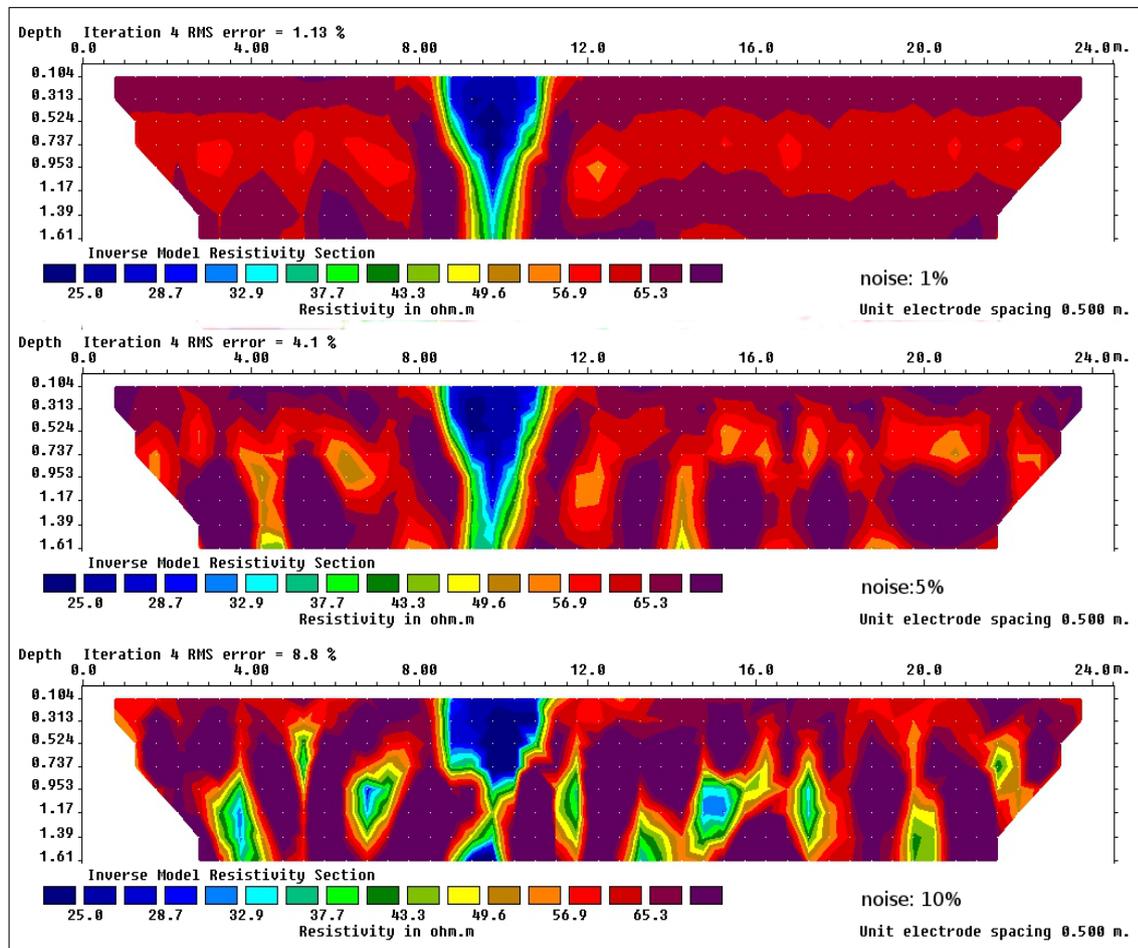


Abbildung 53: Widerstandsverteilungen des mit RES2MOD erstellten Modelles eines Spitzgrabens, welches mit der Dipol-Dipol-Konfiguration simuliert wurde, mit 1% Rauschen (oben), 5% Rauschen (Mitte) und 10% Rauschen (unten). Quelle: Eigene Darstellung.

tefakten, jedoch vor allem im direkten Umfeld des Grabens. Dabei zeigt wiederum die Dipol-Dipol-Konfiguration die geringste Artefaktausbildung, die sich auch am wenigsten von derjenigen im Modell mit geologischen Schichten ohne Spitzgraben unterscheidet. Auch wurde eine Verzerrung der Übergänge zwischen den geologischen Schichten unterhalb des Grabens bewirkt. Dieser Effekt trat am stärksten bei der Simulation mit der Schlumberger-Konfiguration auf, am schwächsten bei der Dipol-Dipol-Konfiguration. Die Dipol-Dipol-Konfiguration erfasste somit die Struktur des Grabens am besten und zeigte die geringsten Verzerrungen der geologischen Schichten bei Vorhandensein des Grabens. Der Nachteil der geringeren Erkundungstiefe wird durch diese Vorteile kompensiert, da die meisten archäologischen Objekte nur wenige Meter unter der Oberfläche liegen.

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GEWANN „STEINBOCK“ BEI SINSHEIM-DÜHREN

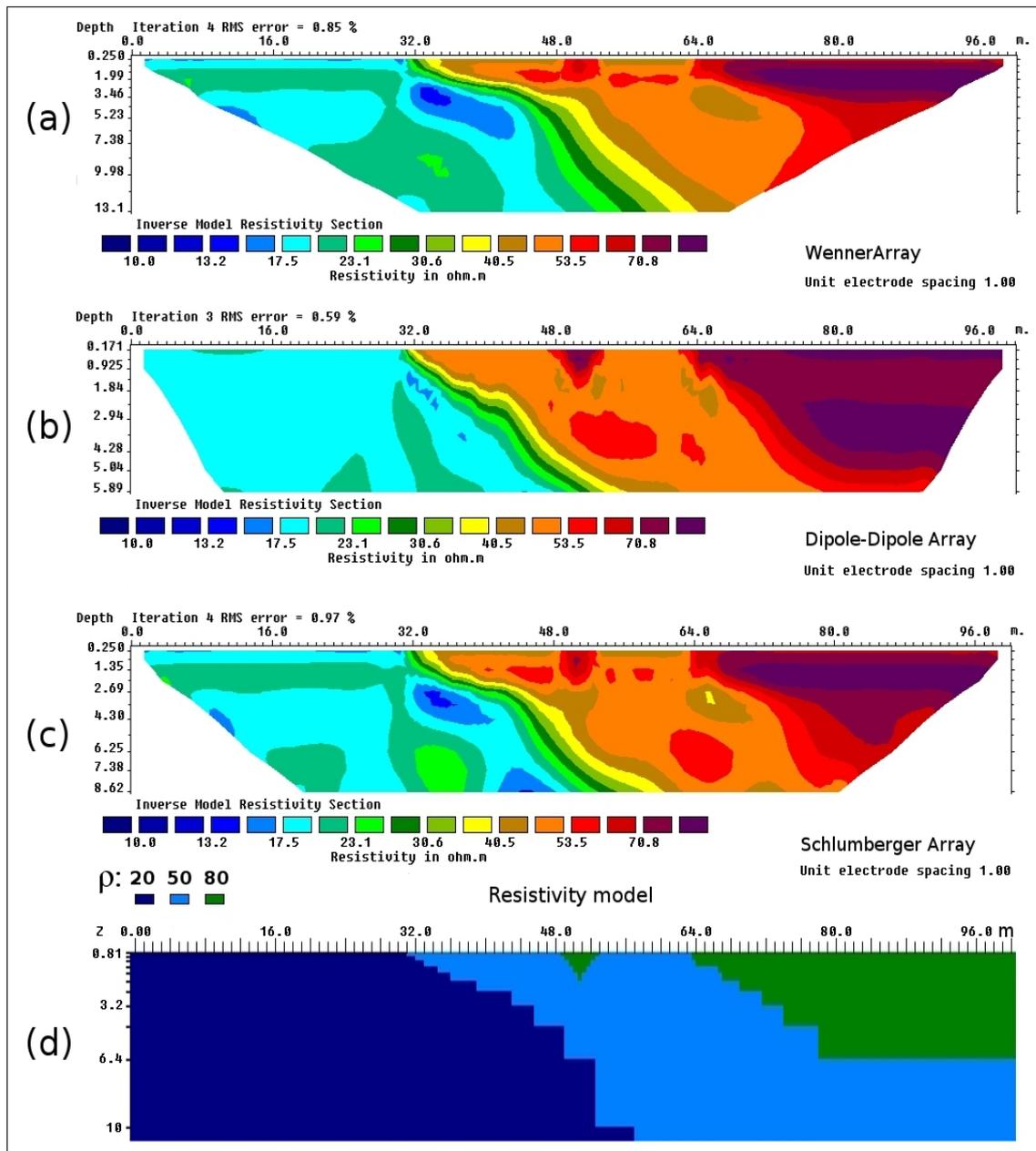


Abbildung 54: Mit RES2MOD erstelltes Modell eines Spitzgrabens, der in einen realistischeren Untergrund eingebettet wurde (d). Dafür wurde das Modell mit den drei unterschiedlichen geologischen Schichten verwendet (vgl. Abb. 33). Abgebildet sind auch die Widerstandsverteilungen, die mit RES2DINV simuliert wurden, mit der Wenner-Konfiguration (a), mit der Dipol-Dipol-Konfiguration (b) und mit der Schlumberger-Konfiguration (c). Die Dipol-Dipol-Konfiguration zeigt die Form des Spitzgrabens am deutlichsten. Quelle: Eigene Darstellung.

3.2.6 Zusammenfassung der Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren

Die bodenkundliche Kartierung des Geländes um die keltische Viereckschanze im Untersuchungsgebiet Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren hat ergeben, dass an einigen Stellen noch Reste der Lössauflage über den Keuper-Fließerden vorhanden sind. Es wurden verschiedene, für den Kraichgau typische Böden identifiziert und die vorkommenden Hauptbodentypen anhand von vier Leitprofilen vorgestellt. Aufgrund der Ergebnisse dieser Kartierung konnte eine Bodenkarte für das Umfeld der Viereckschanze erstellt werden. Die gemessenen ERT-Profile konnten direkt mit den Ergebnissen der bodenkundlichen Untersuchungen der parallel dazu angelegten Schürfgruben, Pürckhauer-Bohrungen und Rammkernsondierungen verglichen werden. Die Vergleiche ergaben, dass die Übergänge zwischen den verschiedenen geologischen Schichten durch die Geoelektrische Widerstandstomographie gut erfasst wurden und ermöglichten eine Zuordnung der verschiedenen Widerstandsbereiche in den geoelektrischen Profilen zu den im Gelände vorkommenden Gesteinen und Sedimenten. Da es sich hier um geologische Schichten handelt, die sich in ihren Widerstandswerten stark unterscheiden (Löss und Gipskeuper), lassen sie sich in den durch die ERT entstandenen Widerstandsmodellen des Untergrundes deutlich voneinander abgrenzen. Einzelne Bodenhorizonte lassen sich jedoch nicht identifizieren. Mit Hilfe eines vereinfachten Modells mit geologischen Schichten, welches mit RES2MOD erstellt wurde, konnte überprüft werden, wie klar sich Schichtübergänge im Widerstandsmodell voneinander abgrenzen lassen.

Durch die Überlagerung eines Orthophotos mit dem Magnetogramm und dem Plan des Archäologen SCHUMACHER (1889) konnten die Lage und der Verlauf des Schanzengrabens und die Lage des Prunkgrabes ermittelt werden. Damit war es möglich, geoelektrische Messungen so anzulegen, dass die verschiedenen Bereiche des Wallgrabens erfasst wurden. Die Geoelektrische Tomographie rund um die Viereckschanze zeigte, dass in Bereichen mit geringerem Gefälle, in denen noch Lössauflage vorhanden ist, der Graben der Schanze noch besser erhalten ist. Die durchgeführten geoelektrischen Messungen zeigten auch, dass der Graben an allen untersuchten Stellen noch vorhanden ist. Wie zu erwarten, weist er an Erosionsstandorten eine geringere Tiefe auf als an Akkumulationsstandorten. Unter der Annahme einer ursprünglichen Tiefe des Grabens von 2 bis 2,5 m, was den Befunden archäologischer Grabungen an anderen Viereckschanzen entspricht (vgl. Kap. 3.1.3, WIELAND 1999), legen die Ergebnisse der geoelektrischen Messungen die Vermutung nahe, dass das Relief am Oberhang mindestens 1 m unter demjenigen der Latènezeit liegt. Es konnte nicht geklärt werden, ob es sich bei dem inzwischen abgetragenen Material um Reste einer Lössauflage gehandelt hat. Da Teile des Grabens im Bereich der Keuper-Fließerden verlaufen, ist es möglich, dass bereits zur damaligen Zeit kein Löss im Oberhang- und Kuppenbereich mehr vorhanden war. Denkbar ist aber auch, dass noch Reste existierten und die Erbauer der Schanze erst im Verlauf des Aushebens des Grabens auf die anstehenden Keuper-Fließerden stießen.

Durch die darauffolgenden archäologischen Grabungen entlang zwei der geoelektrischen Messungen konnten direkte Vergleiche zwischen Mess- und Grabungsergebnissen gezogen werden. Diese Vergleiche zeigten, dass die Ergebnisse der Messung, die den Graben

im Bereich der noch vorhandenen Lössauflage erfasste, deutlich besser mit den tatsächlichen Gegebenheiten übereinstimmen als im Bereich der Keuper-Fließerden. Eine Tiefenabschätzung war in diesem Fall möglich. In der Keuperumgebung war eine Abgrenzung des Grabens deutlich schwieriger. Eine Tiefenvorhersage war hier nicht zuverlässig möglich. Die Abgrenzung wurde zusätzlich durch das Auftreten von Artefakten seitlich des Grabens erschwert.

Bei beiden Vergleichen zeigte sich jedoch, dass sich die unterschiedlichen archäologischen Befundschichten im Graben nicht eindeutig im geoelektrischen Profil identifizieren lassen. Die durchgeführten Laboruntersuchungen der Proben aus den verschiedenen archäologischen Schichten ergaben, dass nur geringe Unterschiede in den Korngrößenverteilungen vorliegen, was eine mögliche Ursache für die geringen Widerstandsunterschiede ist. Oft liegt auch die Mächtigkeit der verschiedenen archäologischen Schichten unterhalb der Auflösungsgrenze der ERT und kann somit nicht erfasst werden.

Die Simulation vereinfachter Modelle eines Spitzgrabens in homogener Umgebung mit verschiedenen Konfigurationen bestätigte die Ergebnisse früherer Arbeiten, die zeigten, dass die Dipol-Dipol-Konfiguration am besten geeignet ist, die Grenzen des Grabens so genau wie möglich zu erfassen (vgl. dazu auch Kapitel 2.1.4). Das Auftreten von Artefakten seitlich des Spitzgrabens bei einer real durchgeführten Messung konnte mit Hilfe der vereinfachten Modelle der Inversionsroutine zugeschrieben werden, wobei ihre Ausprägung von der verwendeten Konfiguration abhängt. Die mit der Dipol-Dipol-Konfiguration simulierte Messung zeigt stärker ausgeprägte Artefakte seitlich der archäologischen Struktur, diejenige mit der Wenner-Konfiguration zeigt dafür stärkere Artefaktausbildung unterhalb der Struktur. Die Modellberechnungen eines Spitzgrabens, der nicht in einen homogenen, sondern in einen realistischeren, geschichteten Untergrund eingebettet wurde, ergaben, dass auch hier die Dipol-Dipol-Konfiguration die besten Ergebnisse liefert. Die modellierten Schichten unterlagen dabei nur einer geringen Verzerrung und die Form des Spitzgrabens wurde gut erfasst.

4 Untersuchungsgebiet Grösseltal bei Neuenbürg, Enzkreis

Auch für den zweiten Standort, der für diese Studie ausgewählt wurde, soll eine kurze Einführung gegeben werden, bevor die Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt und diskutiert werden.

4.1 Einführung in das Untersuchungsgebiet Grösseltal bei Neuenbürg, Enzkreis

Das Untersuchungsgebiet Grösseltal liegt in der Nähe der Stadt Neuenbürg (Enzkreis), ca. 10 km von Pforzheim entfernt (Abb. 55), in einem Seitental der Enz, im Nordschwarzwald, im Nordwesten Baden-Württembergs.

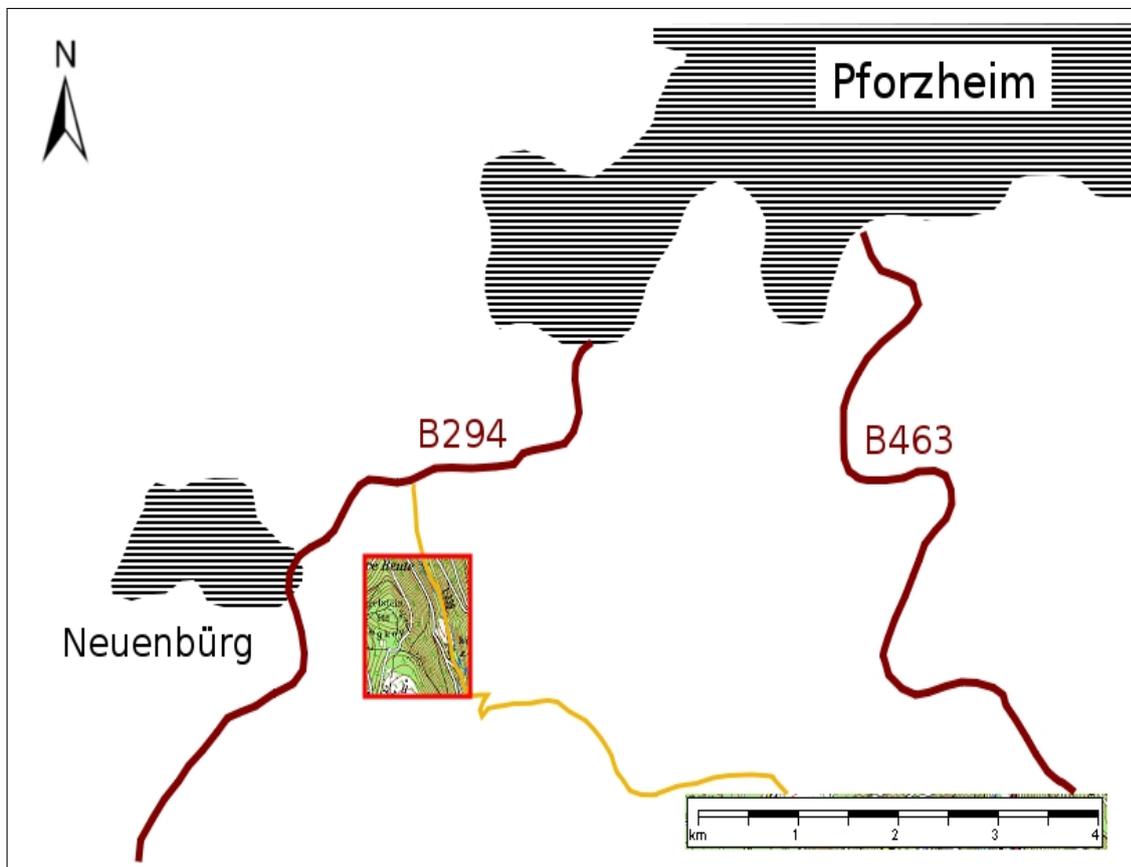


Abbildung 55: Geographische Lage des Untersuchungsgebietes Grösseltal (rot umrandet) bei Neuenbürg, Enzkreis. Quelle: Eigener Entwurf, erstellt auf der Grundlage der Top 50 (LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 2006).

4.1.1 Geologie, Böden, Klima und Hydrologie

Der Schwarzwald besteht aus zwei verschiedenartigen und unterschiedlich alten Baukörpern (MOHR 1993). In den am höchsten herausgehobenen Teilen steht das ältere kristalline Grundgebirge an, welches sich wiederum in Gneis- (prävariskisch) und Granitgebirge (variskisch) unterteilen lässt. In den weniger stark gehobenen Bereichen, d. h. im Norden und Osten ist das Deckgebirge des Buntsandsteins noch erhalten. Im Bereich des Deckgebirges liegt über dem Unteren Buntsandstein (su) der Mittlere Buntsandstein (sm) und der Obere Buntsandstein (so) (MOHR 1993). Die Geologische Karte Birkenfeld (7117; GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1982) zeigt, dass im Bereich des Untersuchungsgebietes vor allem der Mittlere Buntsandstein vertreten ist. Auf den Kuppen der angrenzenden Hügel kommt noch Oberer Buntsandstein vor. Außerdem zeigt die Karte zahlreiche Erzgänge in unmittelbarer Nähe des Untersuchungsgebietes, deren Entstehung durch die ebenfalls zu erkennenden Bruchlinien begünstigt wurde. Hauptsächlich im Granit und Gneis, aber auch im Deckgebirge sind hydrothermale Erzgänge weit verbreitet. Im Zuge der variskischen Gebirgsbildung drangen mehrere große Granitkörper in den Gneisbestand ein. Durch tektonische Großbewegungen entstanden im Grundgebirge des Schwarzwaldes Klüfte. Gegen Ende variskischer magmatischer Tätigkeit bildeten sich in diesen Klüften hydrothermale Erz- und Mineralgänge (METZ 1971). Auch im Buntsandstein-Deckgebirge entstanden Erz- und Mineralgänge, hier bevorzugt längs der Randverwerfung, in einem schmalen Bereich parallel dazu in der Grabenschulter oder auch in tertiären Störungen im Gebirgsinneren (MOHR 1993). Im Nordschwarzwald werden die Böden auf Grundgebirge von denen auf Buntsandstein unterschieden. Die typischen Böden im Bereich des Buntsandstein-Deckgebirges sind die Podsole. An den Unterhängen der Schwarzwaldtäler und am westlichen Schwarzwaldrand kam es zur Bildung von Parabraunerden und Braunerden und im Bereich der Talauen, wo teilweise noch Löss aufliegt, zur Entstehung von Auengleyen aus zumeist sandigen Sedimenten. Da der Granit mehr Feldspat und Glimmer enthält, können auf ihm fruchtbarere Böden, z. B. oligotrophe Braunerden entstehen (LUBW 2012).

Infolge der Höhe herrschen im Schwarzwald eher niedrigere Temperaturen und größere Niederschlagsmengen vor (MOHR 1993). Der Mittelgebirgscharakter des Schwarzwaldes ist durch advektive Niederschläge während des ganzen Jahres gekennzeichnet. Luv- und Leeseite unterscheiden sich oft wesentlich. Das niederschlagsreichste Gebiet ist der Nordschwarzwald (Hornisgrinde 2200 mm/a) und vor allem dessen Westseite, da dieser den regenbringenden Westwinden voll ausgesetzt ist (TRENKLE & VON RUDLOFF 1980).

Hydrologisch gehört der Schwarzwald zum größten Teil dem rheinischen System an (MOHR 1993). Eine wichtige Wasserscheide verläuft vom Dobel über Teufelsmühle, Hohloh und Schramberg nach Süden gegen Freudenstadt. Westlich davon münden die Flüsse direkt in den Rhein, östlich davon fließen sie in die Glatt oder Enz und somit indirekt über den Neckar in den Rhein (METZ 1971). Die Enz weist dabei das größte Einzugsgebiet auf. Nur noch der südöstliche Mittelschwarzwald entwässert zur Donau hin. Das Grabungsgelände im Untersuchungsgebiet Grösseltal liegt auf der Niederterrasse des Grösselbaches, der in die Enz mündet.

4.1.2 Besiedlungsgeschichte des Untersuchungsgebietes und archäologische Fundlage

Aus dem jetzigen archäologischen Forschungsstand lassen sich nur bedingt Aussagen über die Besiedlung des Nordschwarzwaldes treffen, da nur ein kleiner Prozentsatz der Fundstellen durch archäologische Grabungen erforscht wurde (LENGERT ET AL. 2001). In der Zeit des Neolithikums war er nahezu unbesiedelt, nur die Randbereiche wurden wegen der Steinvorkommen besucht (METZ 1971). Für eine Besiedlung und Nutzung der Eisenerzvorkommen des Nordschwarzwaldes bereits zur Eisenzeit gibt es inzwischen einige Belege (GASSMANN ET AL. 2006). Nach GASSMANN (2001) lässt sich „eine intensive Beschäftigung mit den Waldgebieten des Nordschwarzwaldes durch die Kelten am Beginn der Eisenzeit vor mindestens 2500 Jahren“ konkret belegen (GASSMANN 2001, S. 172). Auch im Neuenbürger Erzrevier traten diese auf. Die befestigte Höhensiedlung, die um 1930 auf dem Schlossberg von Neuenbürg entdeckt und durch den Hobbyarchäologen Dr. Feiler archäologisch untersucht wurde (BERNARD & WIELAND 2011), lässt sich aufgrund frühlatènezeitlicher Keramikfunde in diese Zeit datieren (JENSEN 1986). Es wurde bereits bei der Entdeckung dieser keltischen Siedlung ein Zusammenhang zu den Eisenerzvorkommen im Neuenbürger Revier vermutet (BERNARD & WIELAND 2011). Auf dem Schlossberg selbst fanden sich zwar keine Hinweise auf eine Verhüttung von Eisenerzen, jedoch wurden in der näheren Umgebung zahlreiche Verhüttungsplätze lokalisiert (GASSMANN 2001).

Am Anfang der aktuellen Erforschung eisenzeitlicher Verhüttungsplätze im Neuenbürger Erzrevier stand eine systematische Kartierung durch G. Gassmann (GASSMANN ET AL. 2005). Die Suche nach Verhüttungsschlacken begann direkt bei den Erzgängen. Durch Schlackenfunde in Bachläufen, Windwurf- und Schwarzwildwühlflächen oder auch in Maulwurfshügeln konnte die Lage einiger Verhüttungsplätze ermittelt werden.

Eine erste archäologische Grabung im Neuenbürger Revier fand 1995 im Rahmen des Forschungsprojektes zu den „Anfängen der keltischen Eisenerzverhüttung in Südwestdeutschland“ im „Schnaizteich“ bei Neuenbürg-Waldrennach, in ca. 2 km Entfernung zum Schlossberg statt (GASSMANN 1996). Es folgten in den Jahren darauf weitere Grabungen erneut im „Schnaizteich“ (GASSMANN & WIELAND 2005), im „Herrlensbusch“ (GASSMANN & WIELAND 2006), im „Hirschgarten“ (GASSMANN & WIELAND 2007), auf der „Herrlensbuschwiese“ (GASSMANN & WIELAND 2008B) und schließlich von 2008 bis 2010 im Grösseltal (GASSMANN & WIELAND 2009, 2010; GASSMANN ET AL. 2011). Alle Grabungen brachten Verhüttungsplätze aus der Eisenzeit zum Vorschein, mit Rennöfen und vorgelagerten Schlackenhalde. Mit inzwischen insgesamt 76 lokalisierten (GASSMANN, in Vorbereitung) und sechs archäologisch untersuchten Arealen stellt die Region um Neuenbürg „das bisher größte Verhüttungszentrum seiner Zeitstellung nördlich der Alpen dar“ (GASSMANN 2001, S. 173). Durch Funde hallstattzeitlicher Keramik konnte der Beginn der Eisenproduktion in Neuenbürg in das 7./6. Jhd. v. Chr. datiert werden, was zeitlich vor der Siedlung auf dem Schlossberg liegt (GASSMANN & WIELAND 2008a). Da im Rahmen dieser Arbeit geoelektrische Messungen vor allem im Grösseltal und im angrenzenden Waldgebiet durchgeführt wurden, werden die Grabungsbefunde der Jahre 2008 bis 2010 im nächsten Kapitel teilweise ausführlicher vorgestellt.

4.1.3 Keltische Verhüttungsmethoden und Funktionsweise der Rennöfen

Bei den in der Gegend um Neuenbürg bisher gefundenen eisenzeitlichen Rennöfen handelt es sich um relativ kleine Kuppelöfen (vgl. dazu auch GASSMANN 1996; GASSMANN & WIELAND 2005 bis 2010 und GASSMANN ET AL. 2011). Die geringe Größe könnte darauf zurückzuführen sein, dass sie die bisher ältesten Vertreter sind (GASSMANN 2001). Die Schmelzöfen waren zumeist fast vollständig in den Hang eingetieft (vgl. Abb. 56). Die Sohle der Öfen wurde aus dem anstehenden Material herausgearbeitet, teilweise mit Steinplatten oder verziegeltem Lehm befestigt und mit einer dicken, verdichteten Holzkohleschicht bedeckt. Darüber wurde eine Lehmkuppel mit aufgesetztem Beschickungsschacht eventuell mit Hilfe eines Stützgerüsts aus Weidenruten oder Holz errichtet. Die Holzkohleschicht und die Eintiefung in den Hang sorgten für eine gute Wärmeisolierung. Die vorgelagerte Bedienungsgrube stieg nach außen hin leicht an, um ein zu frühes Abfließen der Schlacke zu verhindern (GASSMANN ET AL. 2005).

Der Rennfeuerprozess wird u. a. bei GASSMANN ET AL. (2006) ausführlich beschrieben und soll hier nur kurz erläutert werden. Im Vorfeld des eigentlichen Verhüttungsvorganges wurden die Erze geröstet und zerschlagen. Daraufhin wurden die Erzstücke bzw. die erzhaltigen Gesteinsstücke mit Hilfe sogenannter „Pochsteine“ weiter zerkleinert (vgl. dazu z. B. GASSMANN ET AL. 2006). Dabei handelt es sich um etwa faustgroße, gerundete Steine. Da durch das Zerreiben der Erze Mulden in den Pochsteinen entstanden, können sie anhand dieser Bearbeitungsspuren als solche erkannt werden. Nach dem groben Zerkleinern mit solchen Pochsteinen konnten die kleinen Erzstücke mit einer zweiteiligen Schiebemühle weiter zu sehr kleinen Stücken bis hin zu Staub zermahlen werden. Bei den archäologischen Grabungen im Raum Neuenbürg wurden zahlreiche Pochsteine und einige Schiebemühlen gefunden (vgl. z. B. GASSMANN ET AL. 2006).

Beim Verhüttungsvorgang wurde der Ofen nach dem Anheizen von oben durch den Schacht abwechselnd mit Holzkohle und dem zerkleinerten Eisenerz beschickt, die bei Temperaturen um die 1150°C zur Reaktion gebracht wurden. Da bei dieser Temperatur der Schmelzpunkt des Eisens nicht erreicht wird, bleibt das Metall in seiner festen Form bestehen (GASSMANN ET AL. 2006). Die als Abfallprodukt entstehende, flüssige Schlacke trennt sich vom Metall und rinnt zur Ofenbasis bzw. in die Vorgrube, was zu der Bezeichnung „Rennofen“ führte (GASSMANN 2001). Die Schlacke erstarrte entweder noch innerhalb des Ofens oder in der Vorgrube, deren leichtes Ansteigen ein zu schnelles Abfließen verhindern sollte. Das durch die Holzkohle reduzierte Eisen reicherte sich vermutlich oberhalb der Schlacke im Ofenbereich mit der größten Temperatur an, was Versuche mit nachgebauten Rennöfen bestätigten (GASSMANN 2006; GASSMANN & WIELAND 2008a). Zur Bildung der niedrig schmelzenden Schlacke wurden wesentliche Anteile des Eisengehaltes benötigt, weswegen die Metallausbeute meist unter 25% lag. Aus diesem Grund wurden reiche Erze benötigt, wie sie im Neuenbürgener Erzrevier vorkommen (GASSMANN 2001). Die Holzkohle diente beim Verhüttungsvorgang als Energieträger und Reduktionsmittel, weswegen die Köhlerei unmittelbar mit der Metallurgie gekoppelt war (GASSMANN 2001). Die für das Erreichen und Aufrechterhalten der Temperatur notwendige ständige Luftzufuhr wurde entweder durch Blasebalgbetrieb oder durch die Ausnutzung natürlicher Hangwinde gewährleistet. Beide Techniken wurden

im Laufe der Grabungen um Neuenbürg nachgewiesen (z. B. durch Funde von Düsenziegeln; GASSMANN ET AL. 2006, 2011). Nach GASSMANN (2001) war ein Verhüttungsgang beendet, sobald die Schlackenaufnahmekapazität in Ofen und Vorgrube erschöpft war. Die Dauer eines Verhüttungsvorganges lag vermutlich bei ca. einem Tag. Dann musste die „Ofenschnauze“ aufgebrochen werden, um die erstarrte, amorphe Schlacke und das davon separierte Eisen, die Luppe, zu entnehmen. Der Ofen konnte ausgebessert und erneut verwendet werden, so dass die Benutzung eines Ofens über einen längeren Zeitraum möglich war. Nach der Entnahme der Luppen wurden diese auf großen Ambossteinen direkt vor Ort weiterverarbeitet, wie die Grabungsergebnisse zeigten (GASSMANN & WIELAND 2009).

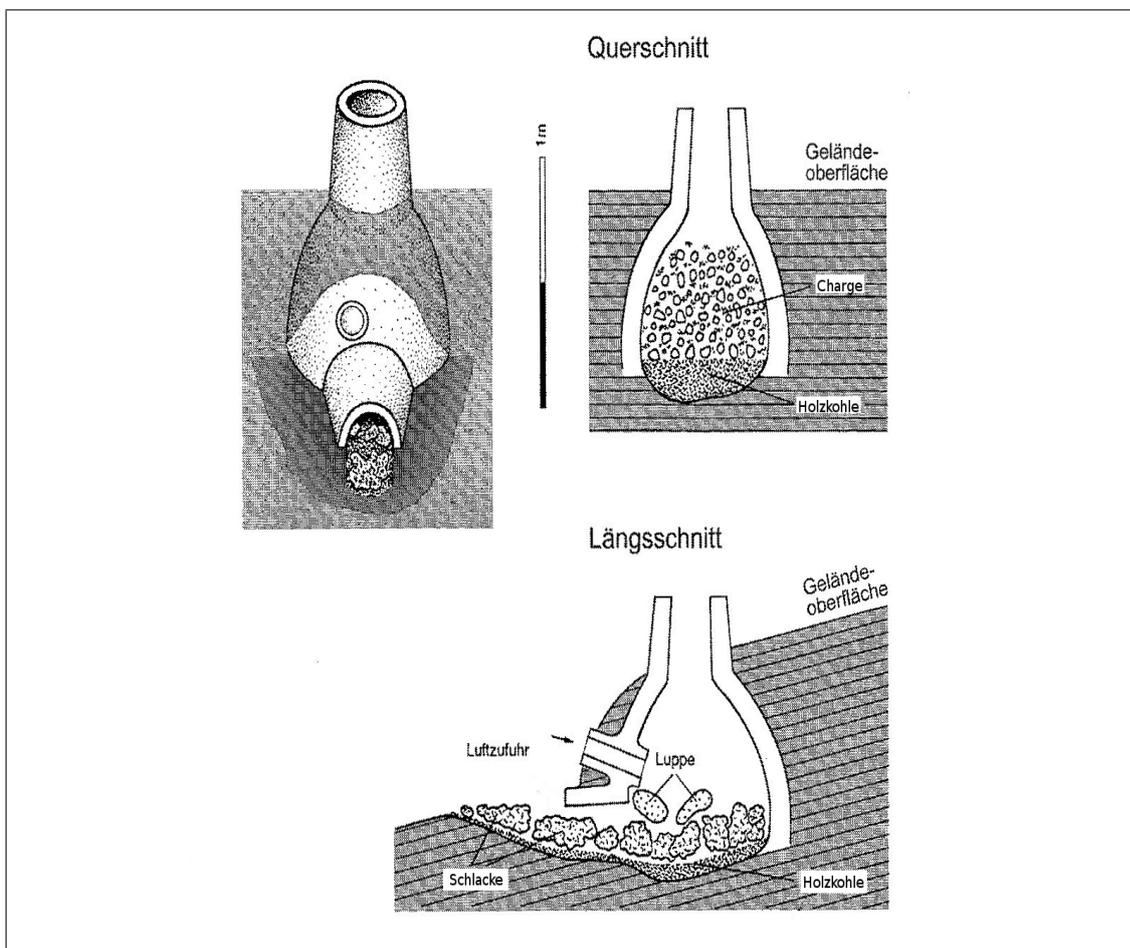


Abbildung 56: Quer- und Längsschnitt durch einen keltischen Rennofen. Quelle: Leicht verändert aus GASSMANN ET AL. 2006.

4.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Grösseltal bei Neuenbürg, Enzkreis

Insgesamt fanden im Grösseltal in den Jahren 2008 bis 2010 drei archäologische Grabungskampagnen jeweils unter der Leitung von Dr. G. Wieland (Regierungspräsidium Karlsruhe, Referat für Denkmalpflege) und Dr. G. Gassmann (Landesamt für Denkmalpflege Esslingen) im Rahmen des DFG-Projektes „Das Neuenbürgener Erzrevier im Nordschwarzwald als Wirtschaftsraum während der Späthallstatt- und Frühlatènezeit“ statt (vgl. dazu auch GASSMANN & WIELAND 2009, 2010; GASSMANN ET AL. 2011).

Im Vorfeld der Ausgrabungen konnten zahlreiche geoelektrische Messungen durchgeführt werden. Es sollen hier gezielte Vergleiche zwischen den geoelektrischen Profilschnitten und den archäologischen Profilskizzen der anschließenden Grabungen gezogen werden. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der bodenkundlichen Untersuchungen sowie der geoelektrischen Messungen und der Vergleich zu den archäologischen Grabungsbefunden vorgestellt und diskutiert. Alle hierfür benötigten Dokumentationen der archäologischen Grabungen, wie z. B. ein Gesamtgrabungsplan, zahlreiche archäologische Profil- und Planumsskizzen, eine Liste der archäologischen Befunde, das Magnetogramm, sowie Lidar-Daten und Luftbilder des Geländes wurden mit freundlicher Genehmigung vom Regierungspräsidium Karlsruhe (Dr. G. Wieland) und dem Landesamt für Denkmalpflege Esslingen (Dr. G. Gassmann) zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich teilweise um unveröffentlichtes Material, für das die Rechte beim oben genannten DFG-Projekt liegen. Bei diesem Standort gab es neben der Erfassung des ausgegrabenen keltischen Erzverhüttungsplatzes im Grösseltal auch die Möglichkeit, im angrenzenden Waldgebiet mit der Methode der Geoelektrischen Widerstandstomographie die Spuren des zugehörigen Erzabbaus zu untersuchen. Auf die Ergebnisse dieser Messungen wird ebenfalls in diesem Kapitel eingegangen.

4.2.1 Bodenkundliche und geophysikalische Untersuchungen im Umfeld des eisenzeitlichen Verhüttungsplatzes im Grösseltal (off-site)

Auch im Untersuchungsgebiet Grösseltal wurde im Vorfeld der archäologischen Grabungskampagnen von Dr. H. von der Osten-Woldenburg eine geomagnetische Prospektion durchgeführt. Dafür wurden einige Punkte im Gelände mit ihren Gauss-Krüger-Koordinaten und ihren Höhen ü. NN eingemessen. Als Grundlage für die geomagnetische Messung wurde ein lokales Raster mit Quadraten von 20 m Seitenlänge über das Gelände gelegt, welches sich nicht exakt am Gauss-Krüger-Raster orientiert, sondern um 14° von diesem abweicht, da das den Geländegegebenheiten besser entsprach (vgl. GRABUNGSDOKUMENTATION GRÖSSELTAL 2008 - 2010, unveröffentlicht). In dieses Raster wurden sowohl die geomagnetischen Messungen als auch die archäologischen Grabungsflächen eingehängt. Abbildung 57 zeigt die Ergebnisse der geomagnetischen Messungen und die Grabungsflächen, die im Verlauf der Grabungskampagnen der Jahre 2008 bis 2010 geöffnet wurden. Gekennzeichnet wurde auch die Lage der Rennöfen, die im Laufe der Grabungskampagnen gefunden wurden. Die Ergebnisse der geomagnetischen Feldmessungen liegen als Graustufenbild des magnetischen Gradienten vor, welches mit freundlicher

Genehmigung vom Regierungspräsidium Karlsruhe und Landesamt für Denkmalpflege Esslingen zur Verfügung gestellt wurde. Dabei sind die positiven Messwerte weiß und die negativen schwarz gefärbt (GASSMANN ET AL. 2005).

Nach GASSMANN ET AL. (2005) beruht die geomagnetische Prospektion von Verhüttungsplätzen auf dem magnetischen Kontrast zwischen dem direkten Hochtemperaturbereich des Ofens und dem umgebenden Boden. Beim Erhitzen über die Curietemperatur hinaus werden ferrimagnetische Minerale magnetisiert, z. B. Magnetit oder Maghemit. Ihre magnetischen Dipole richten sich nach dem Erdmagnetfeld aus. Diese Ausrichtung bleibt beim Abkühlen erhalten, d. h. es entsteht eine „thermoremanente Magnetisierung“. Somit sind Rennöfen, die sich noch in situ befinden, durch ausgeprägte magnetische Dipole charakterisiert und lassen sich im Magnetogramm erkennen (vgl. auch POSSELT & ZICKGRAF 2012). Da die Ofenschnauzen aufgebrochen wurden und diese Bruchstücke z. T. zusammen mit anderem Material die Öfen wieder verfüllten, ist der Ofenbereich häufig jedoch nicht durch eine einheitliche Magnetisierung gekennzeichnet. Den Rennöfen vorgelagert sind jeweils Schlackenhalde, deren Ausdehnung sich gut im Magnetogramm erkennen lässt (vgl. Abb. 57).

Im Untersuchungsgebiet Grösseltal wurden im Rahmen zweier Geländepraktika zur Physischen Geographie der Universität Heidelberg (vgl. PROTOKOLLE GELÄNDEPRAKTIKUM NEUENBÜRG 2008) im Umfeld des eisenzeitlichen Verhüttungsplatzes 12 Schürfruben angelegt, wobei die Auswahl der Standorte für die Anlage der Schürfruben auf Bereiche beschränkt war, in denen anhand der Ergebnisse der geomagnetischen Prospektion keine archäologischen Befunde zu erwarten waren (vgl. Abb. 57). Die angelegten Schürfruben hatten eine durchschnittliche Breite von 1 m, ihre Länge lag zwischen 1,5 und 2 m, die Tiefe variierte zwischen 1 und 2 m, je nach Beschaffenheit des Untergrundes. Wie bereits oben erwähnt, liegt das Untersuchungsgebiet im Bereich des Mittleren Buntsandsteins. Die meisten Schürfruben enthielten auch verwitterten oder unverwitterten Buntsandstein in Form von Sand, Grus oder auch ganzen Steinen. Es fanden sich auch Beimengungen von Schluff, was auf Reste einer Lössbedeckung hindeuten könnte (Tab. B.19).

Da das Gelände nachweislich bereits in der Latènezeit anthropogen genutzt und dadurch geprägt wurde (GASSMANN & WIELAND 2009), handelt es sich bei den vorgefundenen Böden um Mischböden mit kolluvialem Gepräge. Oberhalb des Verzahnungsbereiches von Niederterrasse und Aue liegen diese in Form von Kolluvisol-Regosolen vor, im Auenbereich zeigen die Kolluvisole starke Vergleymerkmale, weswegen sie als Kolluvisol-Gleye klassifiziert wurden (vgl. wiederum Tab. B.19).

In Abbildung 58 ist die Lage der Schürfruben mit ihrer chronologischen Nummerierung dargestellt über einem Luftbild, welches mit freundlicher Genehmigung vom Landesamt für Denkmalpflege Esslingen zur Verfügung gestellt wurde. Zur besseren Orientierung sind wieder die Grenzen der archäologischen Grabungsflächen eingezeichnet. Ebenfalls gekennzeichnet sind die Rennöfen, die im Verlauf der Grabungskampagnen gefunden wurden und die geoelektrischen Messprofile, auf die in Kapitel 4.2.2 näher eingegangen wird. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, erfasste das ERT-Profil 11 einen großen Teil der Niederterrasse bis zum Unterhangbereich hin. In dieses Profil wurden die Schürfruben

4 UNTERSUCHUNGSGEBIET GRÖSSELTAL BEI NEUENBÜRG, ENZKREIS

7, 8 und 9, die in unmittelbarer Nähe parallel dazu angelegt worden waren, eingezeichnet, wodurch eine Toposequenz dieses Hangbereiches entstand (vgl. Abb. 59).

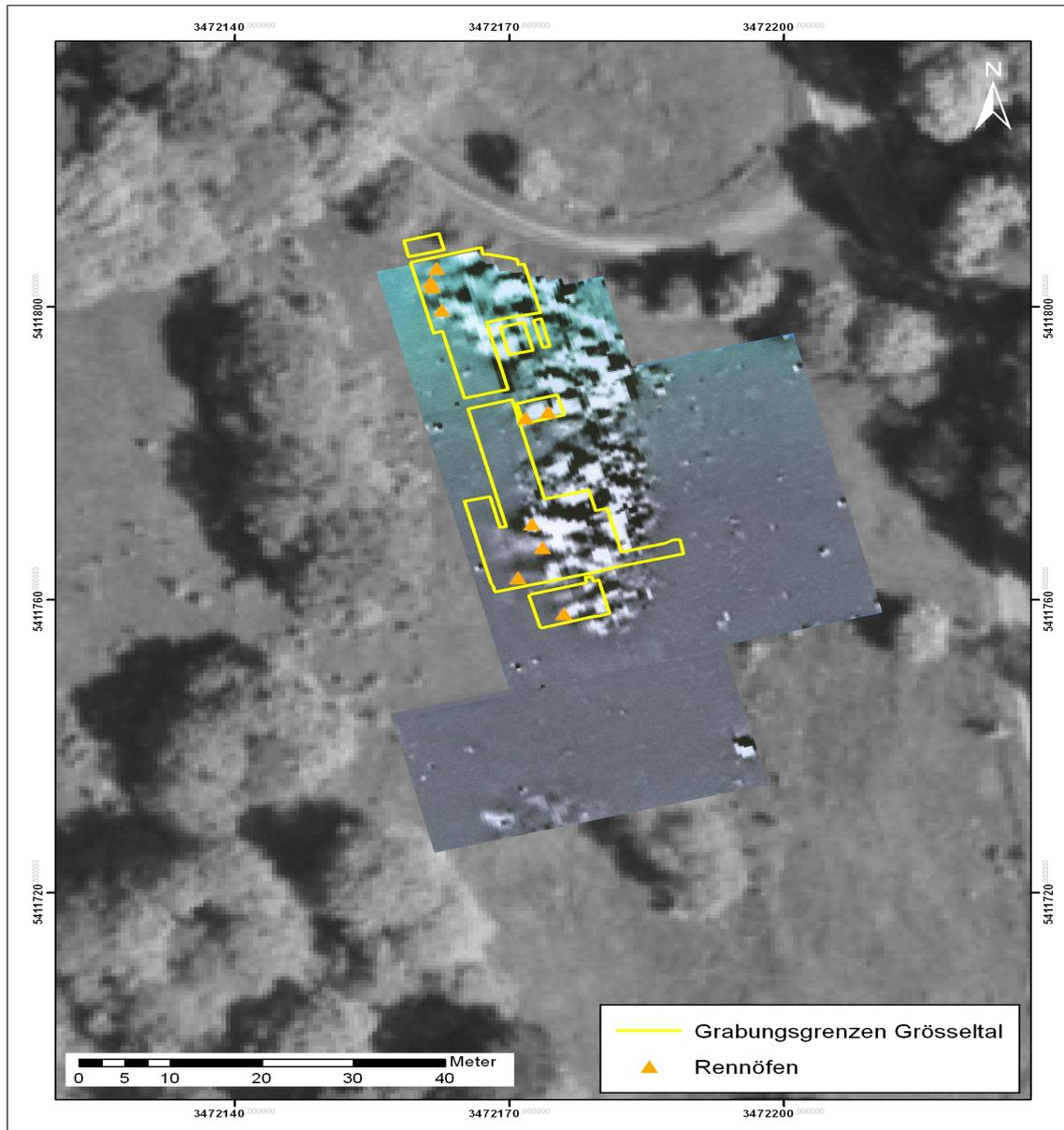


Abbildung 57: Magnetogramm und gesamte Grabungsflächen der drei Grabungskampagnen der Jahre 2008 bis 2010 im Grösseltal bei Neuenbürg (Enzkreis) auf einem Luftbild. Gekennzeichnet ist auch die Lage der bisher gefundenen Rennöfen (vgl. dazu auch GASSMANN ET AL. 2011). Quelle: Eigene Erstellung mit ArcGIS® (ESRI), Magnetogramm gemessen von Dr. H. von der Osten-Woldenburg, Gesamtgrabungsplan und Luftbild zur Verfügung gestellt vom Regierungspräsidium Karlsruhe, Landesamt für Denkmalpflege Esslingen.

4.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Grösseltal bei Neuenbürg, Enzkreis

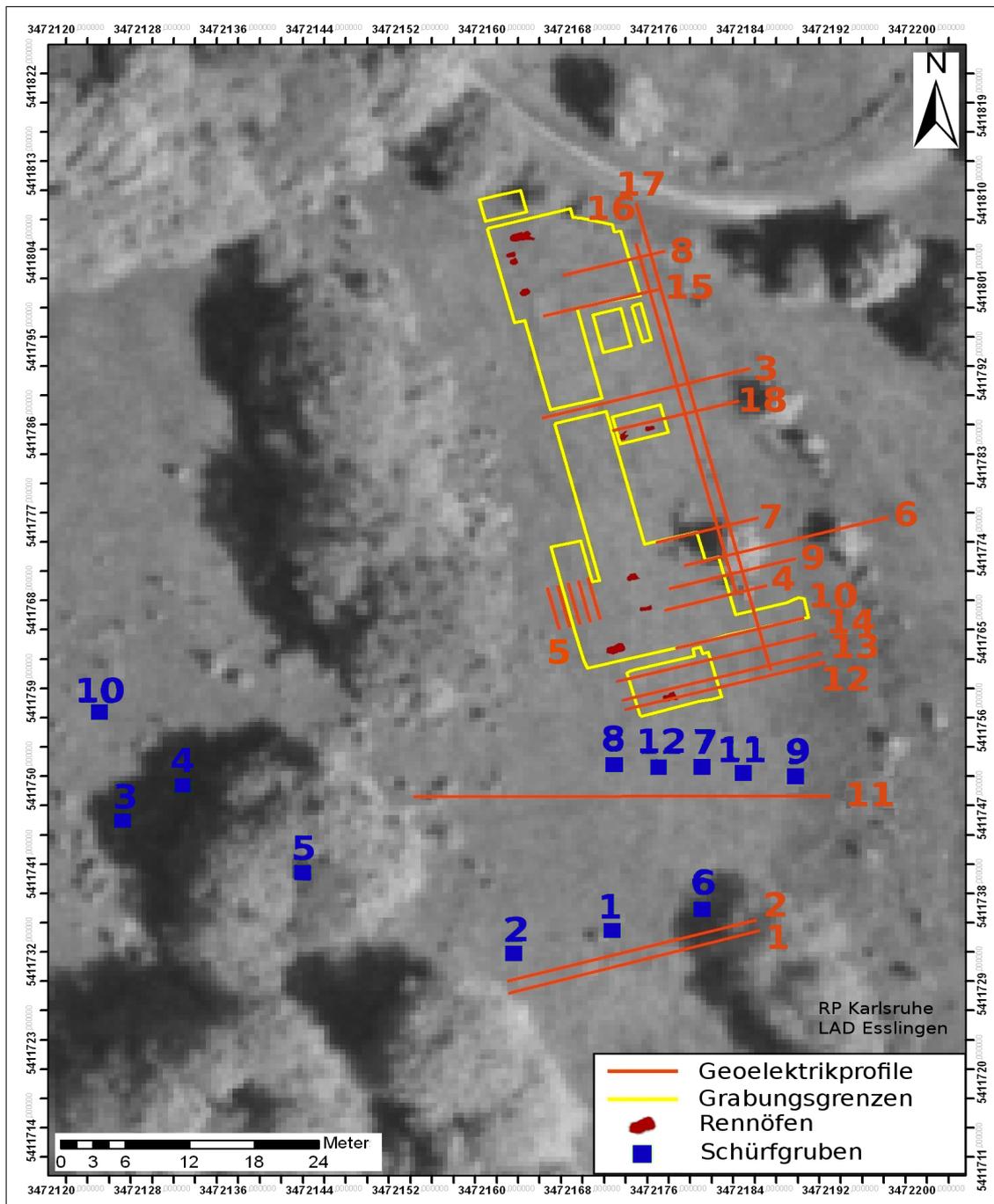


Abbildung 58: Übersicht über die Schürfgruben und Geoelektrikprofile im Grösseltal bei Neuenbürg (Enzkreis). Eingezeichnet sind ebenfalls die Grabungsgrenzen und die Lage der Rennöfen. Quelle: Eigene Erstellung mit ArcGIS® (ESRI), Gesamtgrabungsplan und Luftbild zur Verfügung gestellt vom Regierungspräsidium Karlsruhe, Landesamt für Denkmalpflege Esslingen.

4.2.2 Vergleich zwischen den Befunden der archäologischen Grabungen und den Ergebnissen der geoelektrischen Messungen

Im Untersuchungsgebiet Grösseltal bei Neuenbürg (Enzkreis) wurden insgesamt 18 geoelektrische Messungen durchgeführt, die hauptsächlich der Erfassung der Schlackenhalde und zum Auffinden bzw. Identifizieren der Rennöfen oder sonstiger archäologischer Befunde und dem späteren Vergleich mit der archäologischen Dokumentation dienen. Abbildung 60 zeigt die archäologischen Flächen, die im Verlauf der drei Grabungskampagnen geöffnet wurden, wiederum über dem Magnetogramm. Die Bezeichnungen der quadratischen Flächen mit einer jeweiligen Seitenlänge von 5 m wurden der archäologischen Dokumentation entnommen (GRABUNGSDOKUMENTATION GRÖSSELTAL 2008 bis 2010, unveröffentlicht). Die angelegten Plana, Teilplana und Profile wurden in Form von Fotografien, Beschreibungen und durch Zeichnungen im Maßstab 1:20 auf Millimeterpapier, die mit Hilfe eines Pantographen angefertigt wurden (im Jahr 2008) oder durch Pläne, die mit einem Tachymeter erstellt und durch Photogrammetrie ergänzt wurden (in den Jahren 2009 und 2010) dokumentiert. Zusammengefasst wurden die Befunde der drei Grabungskampagnen in einem Gesamtplan aller geöffneten Grabungsflächen, der mit freundlicher Genehmigung vom Regierungspräsidium Karlsruhe und dem Landesamt für Denkmalpflege Esslingen für diese Arbeit zur Verfügung gestellt wurde. Die archäologischen Befunde, die im Lauf der drei Grabungskampagnen zutage kamen (vgl. dazu auch GASSMANN & WIELAND 2009, 2010 und GASSMANN ET AL. 2011), waren insgesamt 10 keltische Rennöfen, deren Lage in den Abbildungen 57 und 58 zu erkennen ist, mit vorgelagerten Bediengruben und angrenzenden Arbeitsbereichen. Zu diesen Arbeitsbereichen gehörten unter anderem Röst- und Pochplätze, auf denen das Erz für die Verhüttung vorbereitet, d. h. geröstet und zerkleinert wurde und Ambosssteine mit Schlackenanhäufungen, auf denen die in den Öfen gewonnene Luppe weiterverarbeitet wurde. Auch Feuerstellen, Holzkohle- und Lehmdepots wurden gefunden. Zu jedem Ofenbereich gehörte eine Schlackenhalde, die im Verlauf der Grabungskampagnen noch nicht vollständig ausgegraben werden konnten, deren Ausmaß aber durch die Befunde der Geomagnetik abgeschätzt werden kann (vgl. Abb. 57).

Da diese archäologischen Befunden teilweise eng miteinander verzahnt sind, ist eine Interpretation der Ergebnisse der geoelektrischen Messungen im Allgemeinen eher schwierig. Die Arbeitsbereiche in Form von Steinplatten haben oftmals eine zu geringe Ausdehnung, um durch die Geoelektrische Widerstandstomographie erfasst zu werden. Die Schlackenhalde erstrecken sich über größere Bereiche und überlagern z. T. andere Befunde (GASSMANN ET AL. 2011).

Zur Zeit der Durchführung der geoelektrischen Messungen lagen die Ergebnisse der geomagnetischen Prospektion bereits vor, so dass anhand dieser zu erkennen war, wo die Bereiche der Schlackenhalde und der sonstigen Befunde zu erwarten waren (vgl. Abb. 57). Somit konnten die geoelektrischen Messungen so angelegt werden, dass diese Bereiche an verschiedenen Stellen geschnitten wurden. Da die ERT-Profile mit den Ergebnissen der darauffolgenden archäologischen Grabungen verglichen werden sollten, wurden die Profile überwiegend dort gemessen, wo Grabungen geplant waren (vgl. Abb. 60).

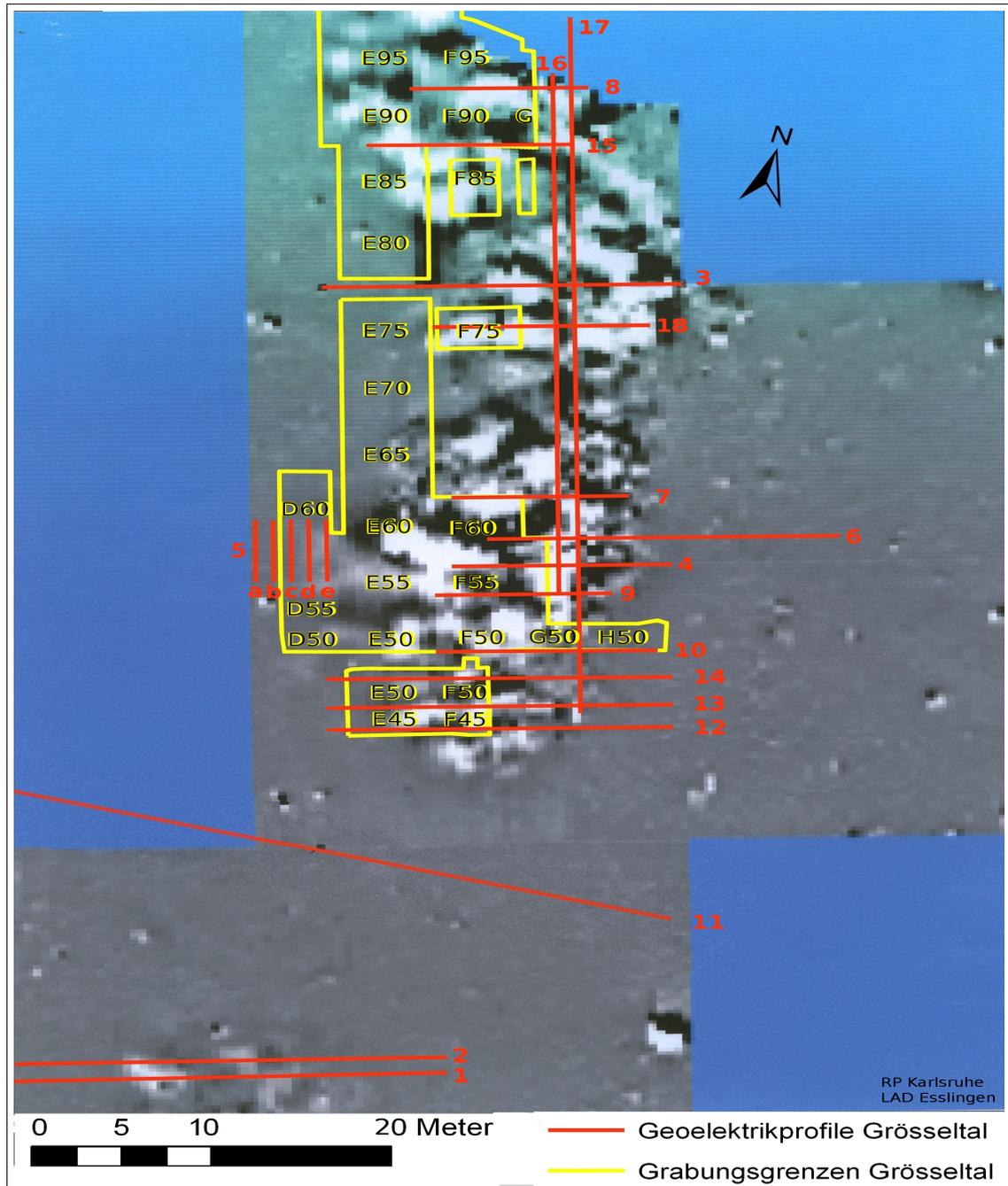


Abbildung 60: Geoelektrikprofile und Grabungsflächen auf dem Magnetogramm im Grösseltal. Die Bezeichnungen der Grabungsflächen entsprechen denjenigen der archäologischen Grabungsdokumentation. Quelle: Eigene Erstellung mit ArcGIS® (ESRI), Magnetogramm gemessen von Dr. H. von der Osten-Woldenburg, Gesamtgrabungsplan und Luftbild zur Verfügung gestellt vom Regierungspräsidium Karlsruhe, Landesamt für Denkmalpflege Esslingen.

Die Ergebnisse der geoelektrischen Messungen, die direkt entlang späterer Ausgrabungsprofile angelegt wurden (z. B. ERT-Profil 5e, 10 und 15; vgl. Abb. 60), konnten direkt mit den archäologischen Profilskizzen verglichen werden. Bei geoelektrischen Profilen, die innerhalb späterer Grabungsflächen gemessen wurden (ERT-Profile 8, 12, 13, 14 und 18), wurden den verschiedenen Strukturen, so weit es möglich war, auf dem Gesamtgrabungsplan archäologische Befunde zugeordnet. Bei den Abschnitten der ERT-Profile, die über bisher nicht ausgegrabenen Bereichen verliefen, war teilweise noch ein Vergleich mit den Ergebnissen der Geomagnetik möglich.

Im Folgenden werden die ERT-Profile und gegebenenfalls die Vergleiche zu den archäologischen Profilen oder dem Gesamtplan vorgestellt. Dazu werden zur Beschreibung der genauen Lage der ERT-Profile bezüglich der archäologischen Profile und Grabungsflächen die Bezeichnungen verwendet, wie sie in Abbildung 60 abzulesen sind. Zur besseren Übersichtlichkeit erfolgt die Vorstellung der Profile nicht in der Reihenfolge ihrer chronologischen Nummerierung, sondern von Süden nach Norden. So können auch Strukturen, die sich eventuell über mehrere Profile erstrecken, besser erfasst bzw. untersucht werden.

Die ersten beiden Profile wurden südlich außerhalb des eigentlichen Grabungsgeländes angelegt, an einer Stelle, an der ebenfalls magnetische Anomalien im Magnetogramm zu erkennen sind (vgl. Abb. 60). Im ERT-Profil 1 (Abb. 61, oben) zeigt sich, dass in dem Bereich magnetischer Anomalie auch die spezifischen elektrischen Widerstandswerte stark von den umgebenden Werten abweichen. Sie liegen in dem entsprechenden Bereich, d. h. zwischen 6 und 18 m, deutlich höher ($\rho > 1284 \Omega m$). Dies legt die Vermutung nahe, dass es sich dabei tatsächlich um Schlackenhalde handelt. Nach GASSMANN ET AL. (2005) sind die Schlacken zumeist porös und enthalten oft Holzkohlestücke oder auch Blasen Hohlräume. Sie besitzen somit schlechte Wasserspeichereigenschaften, weswegen sie eine sehr niedrige elektrolytische Leitfähigkeit aufweisen. Wie in Kapitel 2.1.1 erläutert wurde, macht diese einen Hauptanteil der Leitfähigkeit im Boden aus, weswegen der Widerstandswert der Schlacken deutlich höher ist als derjenige der eher lehmigen, gut wasserleitenden Umgebung. Zudem sind im Bereich der Schlackenhalde oft Ofenbauteile zu finden (GASSMANN ET AL. 2005), die ebenfalls hohe Widerstandswerte aufweisen (vgl. Tab. 1, „Lehm (als Ziegel)“).

Der Bereich zwischen 4 und 6 m, der im ERT-Profil eventuell den auslaufenden Teil der Halde zeigt, ist im Magnetogramm nicht deutlich sichtbar. Parallel zu diesem ersten Profil wurde ein weiteres, in nördlicher Richtung um 1 m versetzt, angelegt. Dieses zweite ERT-Profil (Abb. 61, unten) zeigt, dass sich der hochohmige Bereich, bei dem es sich eventuell um die Schlackenhalde handelt, nach Norden hin verzüngt, was auch dem Befund der geomagnetischen Messung entspricht. Im Magnetogramm deutlich sichtbare Veränderungen der Magnetfeldstärke liegen v. a. im Bereich zwischen 10 und 15 m des ERT-Profils und weniger deutliche zwischen 7 und 8 m. In diesen Bereichen liegen auch im ERT-Profil erhöhte Widerstandswerte vor. Insgesamt finden die Bereiche magnetischer Anomalie ihre Entsprechung in den ERT-Profilen. Ob es sich bei dem kleineren, abgetrennten Bereich mit höheren Widerstandswerten bei ca. 9 m um einen abgetrennten Teil der Schlackenhalde oder um Steine handelt, kann ohne nachfolgende Grabung nicht sicher geklärt werden.

4 UNTERSUCHUNGSGEBIET GRÖSSELTAL BEI NEUENBÜRG, ENZKREIS

Die Zuordnung der höheren Widerstandswerte zu den Schlackenhalden konnte durch Vergleiche von ERT-Profilen, die an Stellen gemessen wurden, an denen danach eine archäologische Grabung erfolgte, bestätigt werden (vgl. unten).

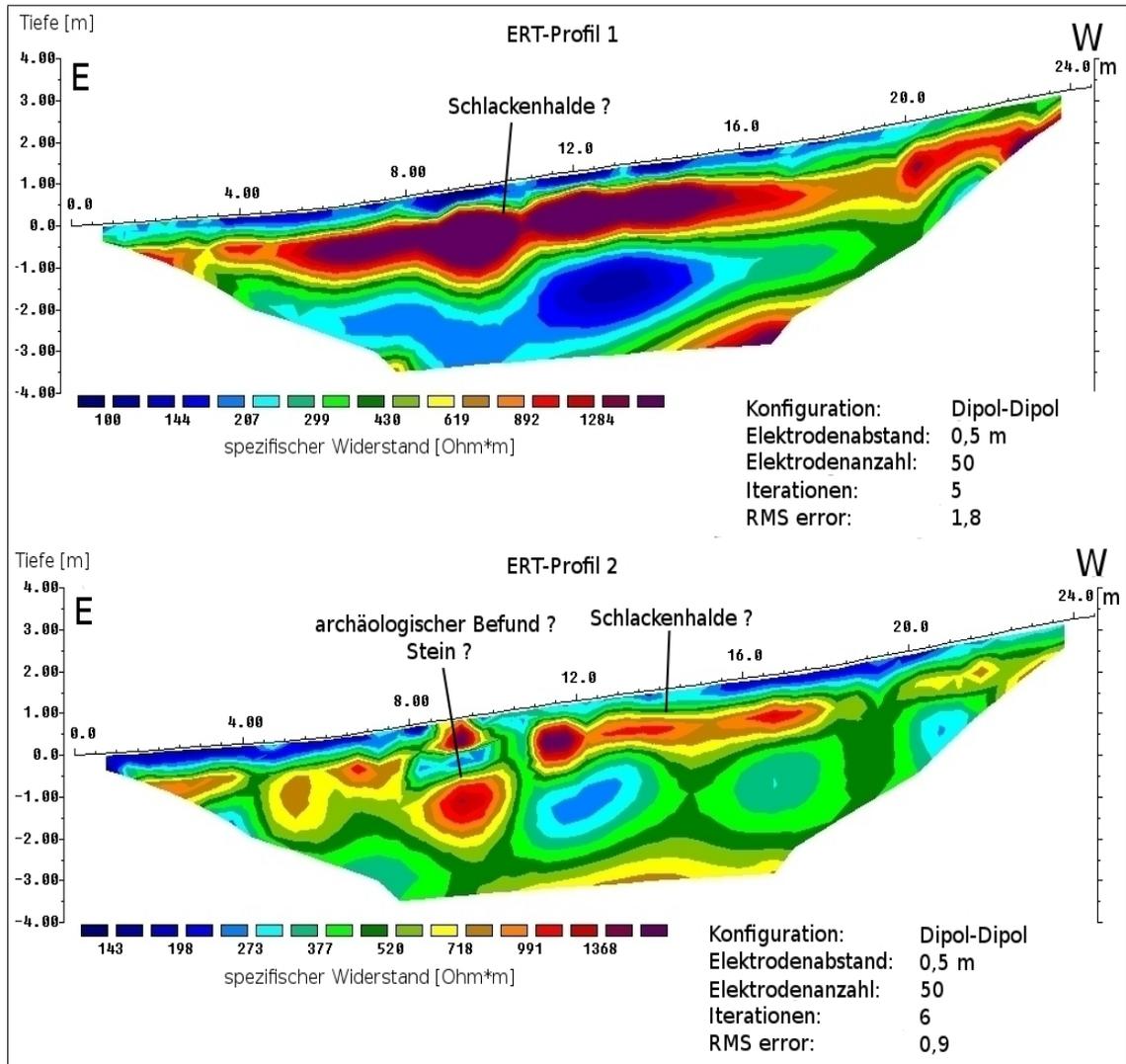


Abbildung 61: ERT-Profile 1 (oben) und 2 (unten) im Grösseltal bei Neuenbürg (Enzkreis). Beide Profile wurden im Abstand von 1 m parallel zueinander gemessen (vg. Abb 58). Im Profil 1 wird eine Schlackenhalde vermutet, die sich im Magnetogramm abzeichnet (vgl. Abb. 60) und die sich im Profil 2 verjüngt. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

4.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Grösseltal bei Neuenbürg, Enzkreis

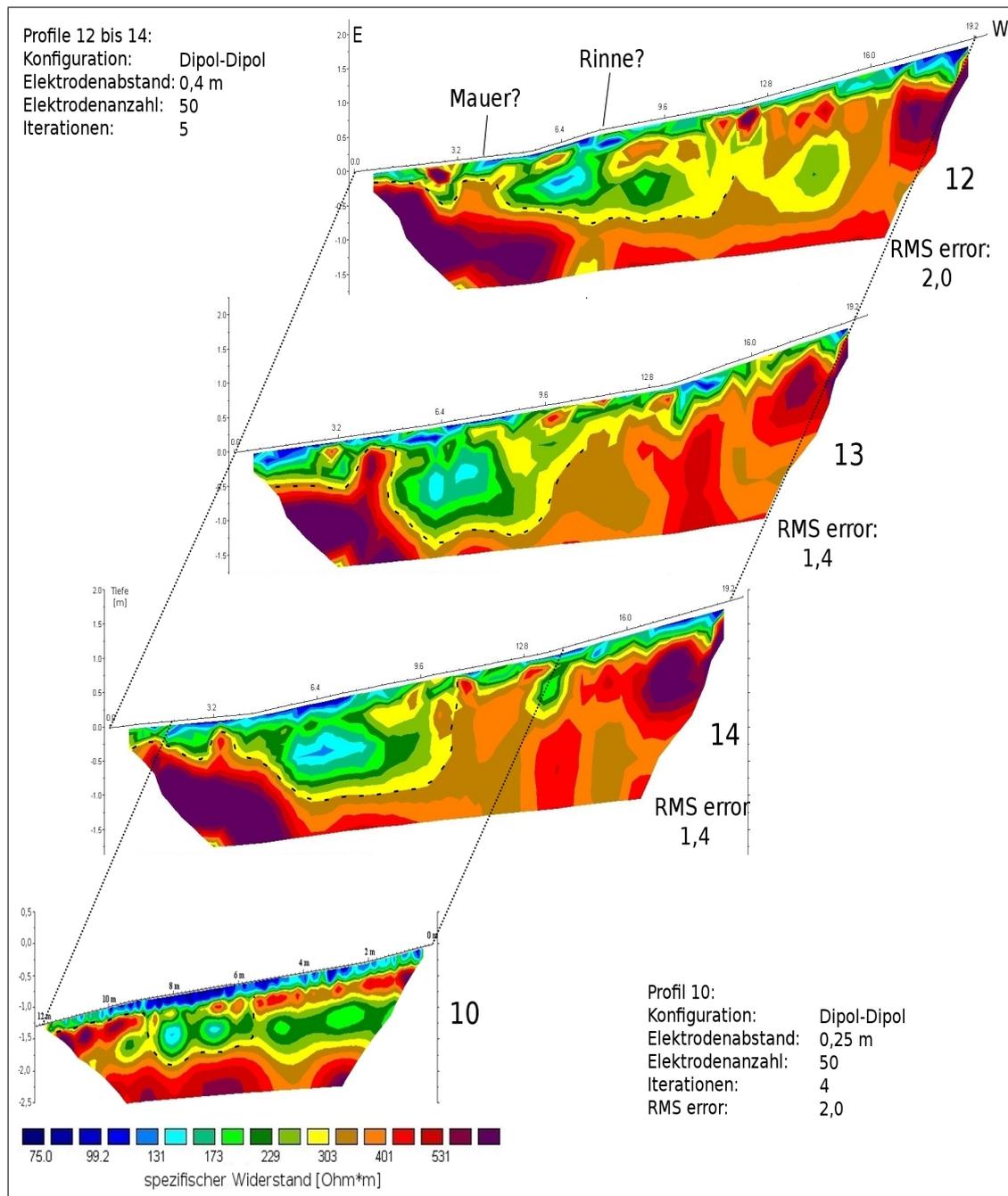


Abbildung 62: ERT-Profil 12, 13, 14 und 10 in ihrer relativen Anordnung zueinander (von oben nach unten; vgl. dazu auch Abb. 58 und Abb. 60). Die Abstände zwischen den Profilen sind nicht maßstabsgetreu. Gekennzeichnet ist die Rinne-Struktur, deren Verlauf sich erkennen lässt, sowie eine vermutete Mauer oder Fundamentierung, die sich bei der archäologischen Grabung im Bereich des ERT-Profils 10 fand. Quelle: Eigene Darstellung; ERT-Profil 10 eigene Datenerhebung; ERT-Profil 12, 13 und 14 gemessen von Dr. S. Hecht.

Im Bereich der südlichen Grabungsflächen EF 45/50 lagen die Profile 12 bis 14, die alle in einem Abstand von wenigen Metern parallel zueinander von Dr. S. Hecht im Rahmen eines Geländepraktikums zur Physischen Geographie der Universität Heidelberg gemessen wurden (vgl. dazu auch PROTOKOLLE GELÄNDEPRAKTIKUM NEUENBÜRG 2008). Ebenfalls parallel dazu, um wenige Meter nördlich versetzt, verlief das ERT-Profil 10, welches etwas kürzer war. Abbildung 62 zeigt die vier Profile in ihrer Anordnung zueinander, wobei die Abstände dazwischen nicht maßstabsgetreu sind. In all diesen Profilen zeigt sich eine Störung im östlichen Bereich, die am deutlichsten im Profil 13 zutage tritt. Bei dieser Struktur könnte es sich um eine Fundamentierung bzw. um Reste einer Mauer handeln, die jedoch nicht im Zusammenhang mit dem eisenzeitlichen Verhüttungsplatz stand, sondern wohl eher jüngeren Datums ist (GASSMANN & WIELAND 2010). Daneben zeichnet sich in allen vier Profilen eine Rinnenstruktur ab, die oberflächlich nicht zu erkennen, also vollständig verfüllt ist. Ob es sich dabei um eine natürlich entstandene oder eine künstlich angelegte Rinne handelt, konnte bislang nicht geklärt werden. Teilabschnitte der Profile 12 bis 14 lagen innerhalb der späteren Grabungsflächen EF 45/50, so dass sie mit dem archäologischen Gesamtplan verglichen werden können (Abb. 63 und 64).

Das ERT-Profil 12 wurde so angelegt, dass es teilweise innerhalb der Grabungsflächen EF 45 lag, ca. 1 m vom südlichen Rand entfernt (vgl. Abb. 60). Die Überschneidung lag ungefähr zwischen 9,8 m und 17,8 m des ERT-Profils. Der Vergleich mit dem archäologischen Gesamtplan (Abb. 63) zeigt, dass mit diesem Profil ein Rennofen (Befundnummer 181) geschnitten wurde, der sich mit Vorgrube zwischen 12,6 m und 15,1 m des Profils erstreckt. Dort weist das ERT-Profil erhöhte Widerstandswerte auf ($\rho \geq 401 \Omega m$), vor allem im Bereich der Ofenbasis, die mit Steinplatten ausgelegt ist. Auch zu erkennen ist die Eintiefung der Vorgrube. Der geschnittene Rennofen lässt sich zwar mit Hilfe der Grabungsbefunde im ERT-Profil identifizieren, die Zuordnung ist jedoch nicht so eindeutig, dass eine zuverlässige Deutung als Rennofen ohne archäologische Grabung möglich wäre. Der ab ca. 16,5 m angrenzende Bereich erhöhter Widerstandswerte ($\rho > 531 \Omega m$) entspricht dem Hangschutt aus Buntsandstein, der den hinteren Ofenbereich überlagerte (vgl. auch GASSMANN & WIELAND 2010). Eine der beiden hochohmigen Strukturen ($\rho \geq 531 \Omega m$) zwischen 11 und 12,5 m des ERT-Profils lässt sich der Sandsteinplatte (Amboss?; Befundnummer 195) zuordnen, die andere findet keine Entsprechung im Gesamtplan.

Auch bei ERT-Profil 13 liegt eine Überschneidung mit den Flächen EF 45/50 vor (vgl. Abb. 64). Hier liegen im Bereich der Ofenvorgrube vergleichsweise niedrige Widerstandswerte ($\rho \leq 173 \Omega m$) vor. Dies muss jedoch nicht im Widerspruch zur Interpretation des ERT-Profils 12 stehen, da dieses Profil am äußeren Rand der Ofenvorgrube verlief. Dort könnte diese auch mit weniger Schlacken und Ofenbauteilen und dafür mit mehr Lehm verfüllt sein, was zu den geringeren Widerstandswerten führen würde. Der Beginn des Hangschuttes zeigt sich auch in diesem geoelektrischen Profil wieder in Form erhöhter Widerstandswerte ($\rho > 531 \Omega m$) bei ca. 16 m.

Das ERT-Profil 14 verlief innerhalb der Flächen EF 50. Bei dem Bereich erhöhter Widerstandswerte zwischen ca. 10,8 und 11,3 m könnte es sich um einen Drainagegraben

handeln, der auf die Ofenvorgrube zuläuft (GASSMANN & WIELAND 2010). Zwischen ca. 13 und 14,1 m zeigt sich im Profil eine eingetiefte Struktur mit vergleichsweise niedrigen Widerstandswerten ($173 \Omega m \leq \rho \leq 303 \Omega m$), an die ein Bereich erhöhter Widerstandswerte anschließt ($\rho > 401 \Omega m$). Dieser könnte dem Befund entsprechen, bei dem es sich nach GASSMANN & WIELAND (2010) um eine „rechteckige Konstruktion aus übereinander gestapelten flach liegenden Buntsandsteinplatten“ (Befundnummer 180) „samt einer vorgelagerten Feuerstelle“ (Befundnummer 185a) handelt. „Diese Installation war über einer älteren Grube errichtet, die mit Verhüttungsabfällen verfüllt war“ (GASSMANN & WIELAND 2010, S. 112).

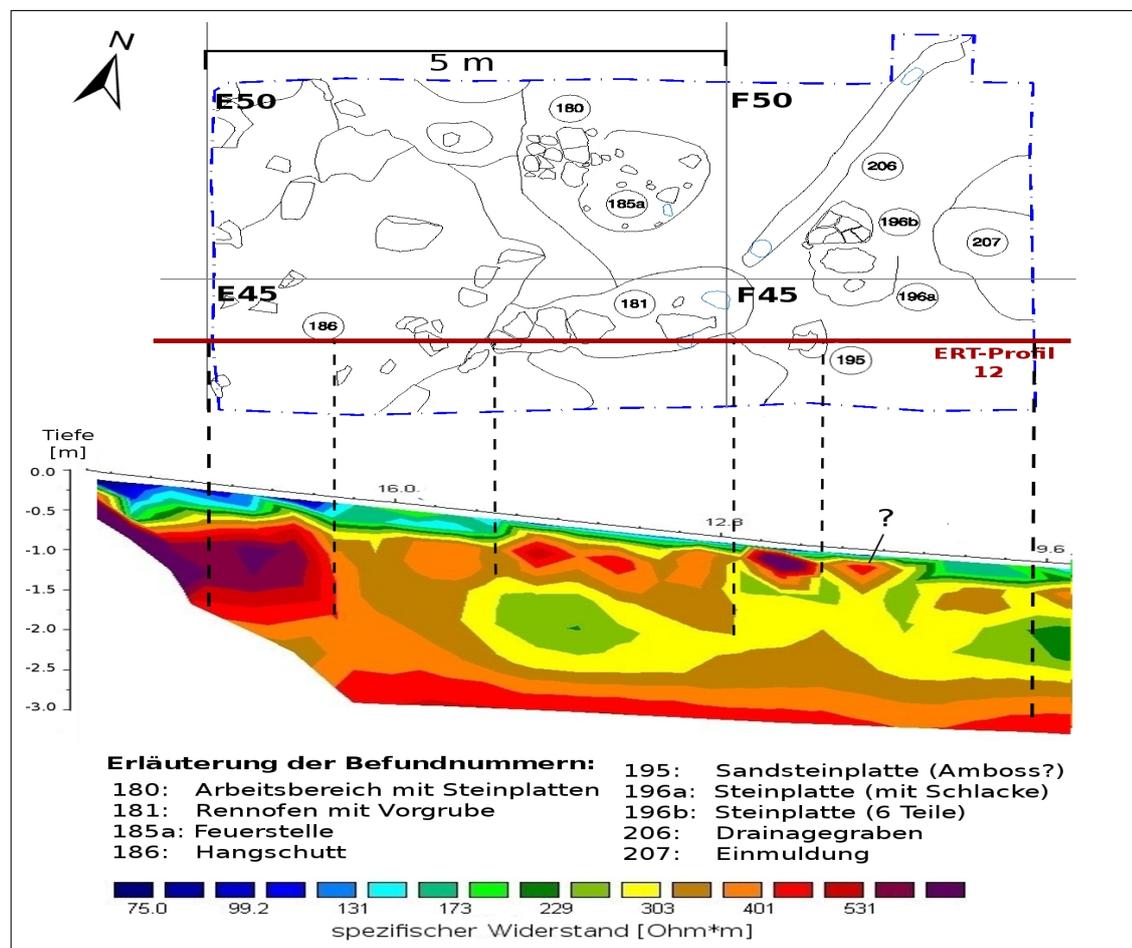


Abbildung 63: Vergleich des ERT-Profiles 12 mit den Grabungsbefunden der Flächen E 45 und F 45. Die gestrichelten Linien kennzeichnen auffällige Strukturen im ERT-Profil und weisen auf die entsprechenden Stellen im archäologischen Gesamtgrabungsplan. Die Längenskala des ERT-Profiles wurde an die des Gesamtplans angepasst, um eine bessere Vergleichbarkeit der Bereiche zu ermöglichen. Quelle: Eigene Darstellung; Gesamtgrabungsplan aus der GRABUNGSDOKUMENTATION GRÖSSELTAL 2008 bis 2010, unveröffentlicht; zur Verfügung gestellt vom Regierungspräsidium Karlsruhe und Landesamt für Denkmalpflege Esslingen.

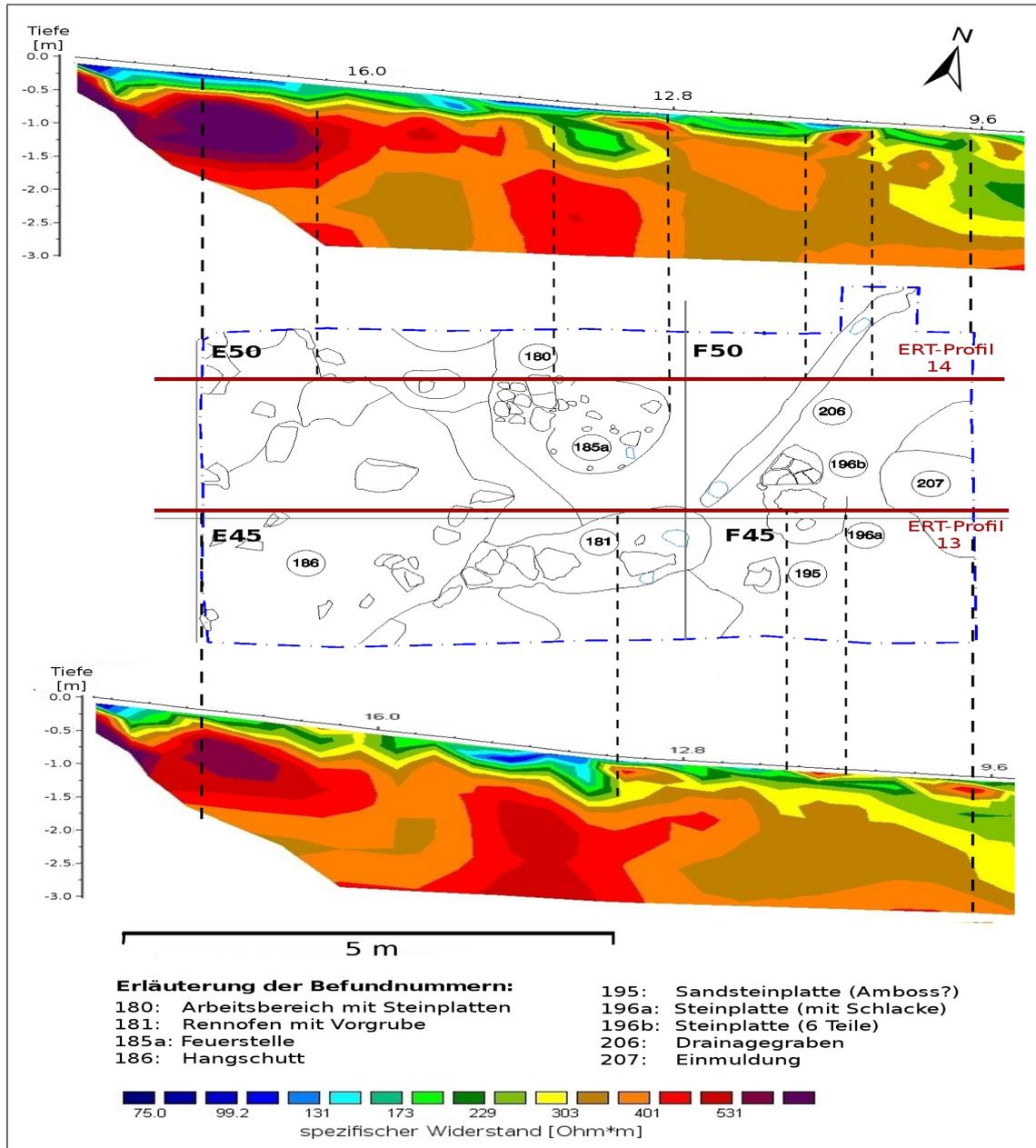


Abbildung 64: Vergleich der ERT-Profile 13 (unten) und 14 (oben) mit den Grabungsbefunden der Flächen EF 50 bzw. EF 45. Die gestrichelten Linien kennzeichnen auffällige Strukturen im ERT-Profil und weisen auf die entsprechenden Stellen im archäologischen Gesamtgrabungsplan. Der Bereich des Hangschutts zeichnet sich wiederum deutlich in den ERT-Profilen ab. Die archäologischen Strukturen sind jedoch in beiden Profilen schwierig zuzuordnen, vor allem die vermeintliche Grube bei Profil 14. Quelle: Eigene Darstellung; Gesamtgrabungsplan aus der GRABUNGSDOKUMENTATION GRÖSSELTAL 2008 bis 2010, unveröffentlicht; zur Verfügung gestellt vom Regierungspräsidium Karlsruhe und Landesamt für Denkmalpflege Esslingen.

Bei der eingetieften Struktur könnte es sich um diese Grube handeln. Direkt an die Sandsteinplatten grenzt der Bereich mit Hangschutt an, der ebenfalls im ERT-Profil seine Entsprechung findet. Einzelne Steine lassen sich in den ERT-Profilen schlecht identifizieren, da ihre Ausdehnung z. T. unterhalb der Auflösungsgrenze liegt. Der Bereich des Hangschutts lässt sich jedoch in allen drei Profilen deutlich durch erhöhte Widerstandswerte erkennen. Auch seine seitliche Begrenzung wird durch die Geoelektrische Widerstandstomographie relativ genau erfasst.

Das 10te ERT-Profil wurde dort gemessen, wo auch das Südprofil der Grabungsflächen FGH 50 angelegt wurde (vgl. Abb. 60), so dass hierfür ein direkter Vergleich mit einer archäologischen Profilskizze möglich war (Abb. 65). Von 0 bis 5 m verlief es entlang der Fläche F 50, von 5 bis 10 m entlang von G 50 und von 10 m bis zum Ende lag es im Bereich der Fläche H 50. Die Blickrichtung des gegrabenen Profils war der des gemessenen entgegengesetzt, weswegen das ERT-Profil an der vertikalen Mittelachse gespiegelt wurde. Dem gespiegelten ERT-Profil wurde das archäologische Profil überlagert, welches photogrammetrisch erstellt wurde (Abb. 65, oben). Die Umrisse der archäologischen Befunde bzw. der Steine und die Grenzen der archäologischen Schichten wurden maßstabsgetreu auf das gespiegelte geoelektrische Profilbild übertragen, wodurch eine direkte Vergleichbarkeit ermöglicht wurde. Im Bereich der Fläche H 50 lag eine Störung, die sich bereits in den ERT-Profilen 12 bis 14 abgezeichnet hatte (vgl. Abb. 62) und auch in diesem ERT-Profil zu sehen ist. Bei dieser könnte es sich, wie bereits oben erwähnt, um eine Steinpackung handeln, die nach GASSMANN & WIELAND (2010) auf eine mittelalterliche Störung zurückgeht. Da sie somit nicht im Zusammenhang mit dem keltischen Verhüttungsplatz stand, wurde der Bereich des Profils, in dem diese Störung lag, nicht archäologisch dokumentiert. Aus diesem Grund kann das ERT-Profil an dieser Stelle nicht direkt mit Grabungsbefunden verglichen werden.

Der Vergleich des gemessenen mit dem gegrabenen Profil zeigt, dass die untere Grenze des Oberbodens sich im ERT-Profil gut ablesen lässt. Auch die mit Steinen stärker durchsetzte archäologische Schicht findet ihre Entsprechung in der hochohmigeren Zwischenlage ($\rho > 505 \Omega m$), wobei sich die einzelnen Steine wiederum nicht abzeichnen. Der niederohmige Bereich ($138 \Omega m \leq \rho \leq 264 \Omega m$) innerhalb der Fläche G 50, der auch in den Profilen 12 bis 14 zu sehen war und vermutlich eine inzwischen verfüllte Rinne zeigt (vgl. dazu auch Abb. 62), findet keine direkte Entsprechung im archäologischen Profil. Im Verlauf der Grabungskampagnen zeigte sich jedoch, dass es sich um einen Bereich handelt, der gut wasserleitend ist, da in Gruben, die in diesem Bereich angelegt wurden, nach wenigen Stunden bereits Wasser stand (GASSMANN & WIELAND 2010).

Die Profile 9, 4, 6 und 7 verliefen innerhalb der Grabungsflächen FG 60/65 (vgl. Abb. 60). Da bei allen ERT-Profilen die archäologischen Befunde im Randbereich liegen und somit ein Vergleich schwer möglich ist, werden sie keiner näheren Betrachtung unterzogen und befinden sich teilweise im Anhang (Abb. B.16).

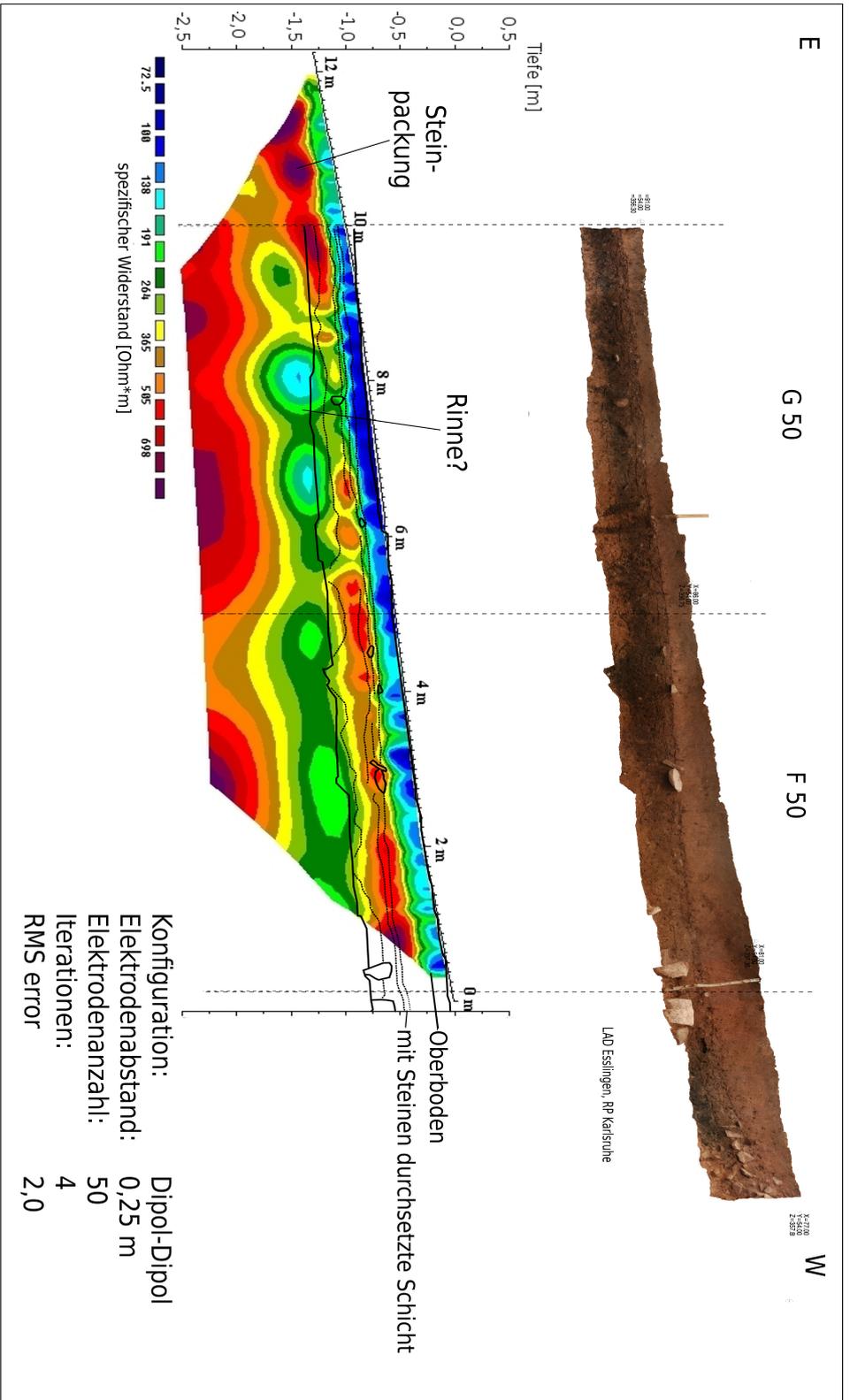


Abbildung 65: Oben: Südprofil der archäologischen Grabungsflächen EFG 50 (vgl. Abb. 60). Unten: Direkter Vergleich des ERT-Profiles 10 (vgl. Abb 60) mit der archäologischen Profilskizze. Um den Vergleich zu ermöglichen, wurden die Grenzen der verschiedenen archäologischen Schichten auf das ERT-Profil übertragen. Lediglich die mit Steinen stärker durchsetzte archäologische Schicht zeichnet sich durch erhöhte Widerstandswerte ab. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung; Archäologisches Profil aus der GRABUNGSDOKUMENTATION GRÖSSELTAL 2008 bis 2010, unveröffentlicht; zur Verfügung gestellt vom Regierungspräsidium Karlsruhe und Landesamt für Denkmalpflege Esslingen.

4.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Grösseltal bei Neuenbürg, Enzkreis

Die Profile 5a bis 5e wurden parallel zueinander und jeweils in 1 m Abstand in dem Bereich gemessen, in dem anschließend die Grabungsflächen D 55 und D 60 geöffnet wurden (vgl. Abb. 60). Abbildung 66 zeigt die Profile in einer Anordnung, die einen dreidimensionalen Eindruck vermitteln soll, wodurch sich der Verlauf von Strukturen im Untergrund besser erkennen lässt. Die Abstände zwischen den Profilen sind dabei nicht maßstabsgetreu. Bei diesen ERT-Profilen wurde die Funktion „extended model“ verwendet, da diese sich bei der geringen Profillänge besser als Vergleichsgrundlage eignete. Dabei werden die Modellzellen über die ganze Auslagenlänge hin ausgedehnt (LOKE 1995, 2011a).

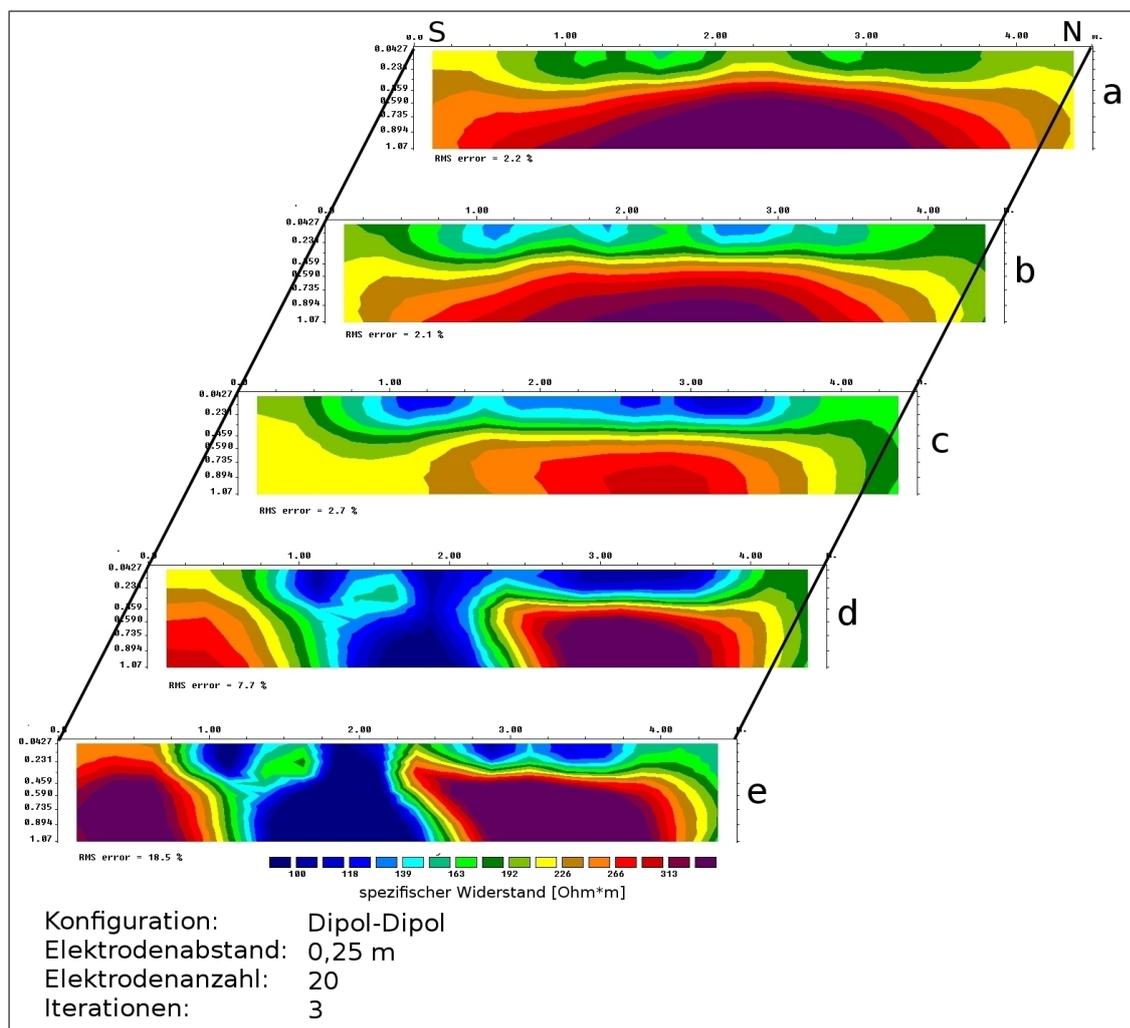


Abbildung 66: ERT-Profilen 5a bis 5e im Grösseltal (von oben nach unten) in einer Anordnung, die einen dreidimensionalen Eindruck vermitteln soll. Die Abstände zwischen den Profilen sind dabei nicht maßstabsgetreu (vgl. Abb. 60). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Das Profil 5e verlief entlang des später angelegten Ostprofils der Grabungsflächen D 55 und D 60 (vgl. Abb. 60), wodurch es direkt mit diesem verglichen werden kann. Es wurde wiederum das archäologische Profil dem geoelektrischen überlagert. Da die Blickrichtung beim geoelektrischen Profil nach Westen orientiert war, beim archäologischen Profil jedoch nach Osten, wurde das mit RES2DINV erhaltene Schnittbild an seiner vertikalen Mittelachse gespiegelt. Daraufhin wurde die archäologische Profilskizze, die auf Millimeterpapier im Maßstab 1:20 gezeichnet worden war (GRABUNGSDOKUMENTATION GRÖSSELTAL 2008 bis 2010, unveröffentlicht), dem gespiegelten ERT-Profil überlagert und maßstäblich daran angepasst. So konnten die Umrisslinien der verschiedenen archäologischen Schichten und Befunde auf das ERT-Profil übertragen werden, wodurch wieder für eine möglichst gute Vergleichbarkeit gesorgt wurde (Abb. 67).

In der Mitte des Profils befand sich die Stange eines Zeltes, welches die archäologischen Flächen schützte, die einige Zentimeter tief in den Boden eingegraben war. Dieses Loch sorgte vermutlich für eine bessere Durchfeuchtung des darunterliegenden Bereiches, was die geringeren Widerstandswerte dort erklären würde. Der Vergleich mit der archäologischen Profilskizze zeigt, dass sich unterhalb der Zeltstange in ca. 1,20 m Tiefe ein Steinblock befand, der wenige Zentimeter vor dem Profil lag. Dieser kann dazu geführt haben, dass der Wasserabfluss eher seitlich davon erfolgte, was die Aufweitung des gut leitenden Bereiches erklären könnte. Die verschiedenen archäologischen Schichten zeichnen sich auch hier nicht in der Widerstandsverteilung ab, was daran liegen kann, dass sie sich hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften nicht signifikant voneinander unterscheiden. Um dies zu klären, wurden aus jeder archäologischen Schicht gestörte Proben genommen (vgl. ebenfalls Abb. 67) und im Labor die Korngrößenverteilung, sowie der Kalk- und Humusgehalt bestimmt (vgl. Abb. 68; Tab. B.20 und Tab. B.21 im Anhang). Die Beschreibung der verschiedenen archäologischen Schichten wurde der GRABUNGSDOKUMENTATION GRÖSSELTAL (2008 bis 2010, unveröffentlicht) entnommen. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zeigen, dass die als „Humusschicht“ angesprochene archäologische Schicht, aus der die Probe aus 0 - 20 cm Tiefe stammt, einen höheren Humusgehalt aufweist als die darunterliegenden, jedoch eine sehr ähnliche Korngrößenzusammensetzung wie die Schicht, aus der die nächste Probe entnommen wurde (30 - 40 cm). Diese wird in der archäologischen Beschreibung als „rötlich sandiger Verwitterungslehm mit Holzkohleflittern und Rostklumpen und nur geringem Steinanteil“ angesprochen, die „wahrscheinlich künstlich aufgetragen“ wurde. Die archäologische Schicht, aus der die Probe aus 55 - 65 cm Tiefe stammt, ist eine „Schotterschicht“, die in allen Profilen der Grabung auftrat. Sie weist einen deutlich größeren Grusanteil auf als die darüberliegenden Schichten. Auch in der Probe aus 90 - 100 cm Tiefe war vermehrt Grus vorhanden, auffällig ist hier der hohe Humusanteil. Dieser archäologische Befund wird in der Beschreibung als „zentrales Holzkohledepot“ angesprochen, was den erhöhten Gehalt an organischer Substanz erklärt. Die Probe aus 110 - 120 cm Tiefe stammt aus einer Schicht, die als „rötlichbrauner sandiger Lehm mit vereinzelt Holzkohleflittern und einzelnen Buntsandsteinbrocken“ angesprochen wird. Den größten Grusanteil weist die Probe aus der untersten Schicht (120 - 130 cm) auf, die als „massiv mit Blockschutt und kleinstückigem Material durchsetzter Lehm (Solifluktionsschutt)“ beschrieben wird.

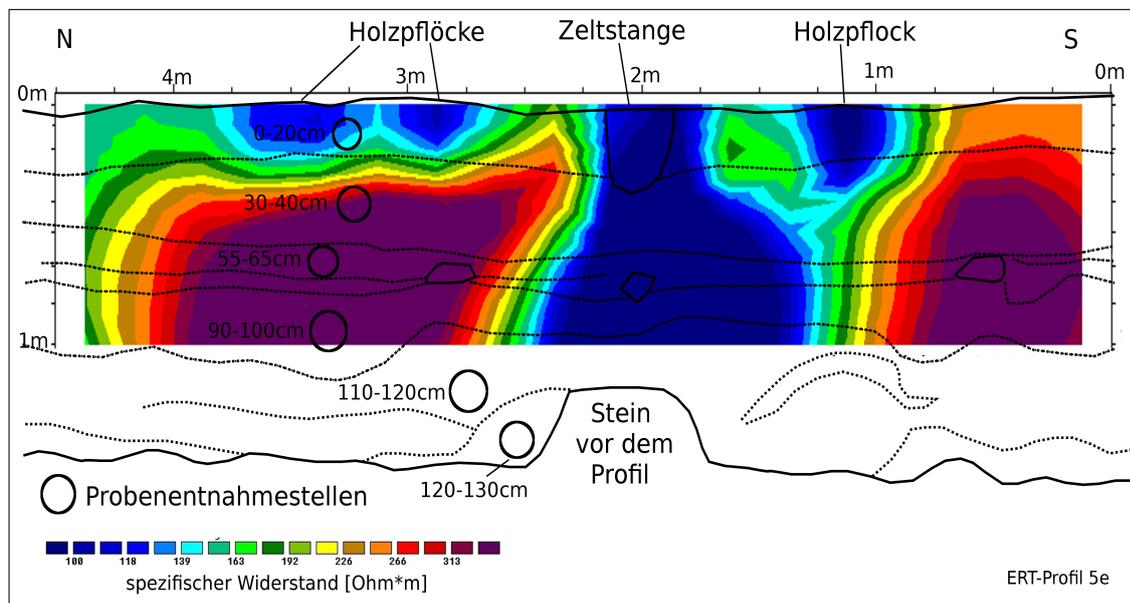


Abbildung 67: Direkter Vergleich zwischen dem Ostprofil zu den Grabungsflächen D 55 und D 60 (vgl. dazu Abb. 60) im Grösseltal zum ERT-Profil 5e (vgl. Abb. 66). Die Grenzen der archäologischen Schichten wurden auf das ERT-Profil 5e übertragen. Direkt neben dem Profil waren eine Zeltstange und Holzpflocke in den Boden geschlagen, was im Profil als Störung zu erkennen ist. Gekennzeichnet sind ebenfalls die Entnahmestellen der gestörten Proben (schwarze Kreise) mit ihren Entnahmetiefen. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

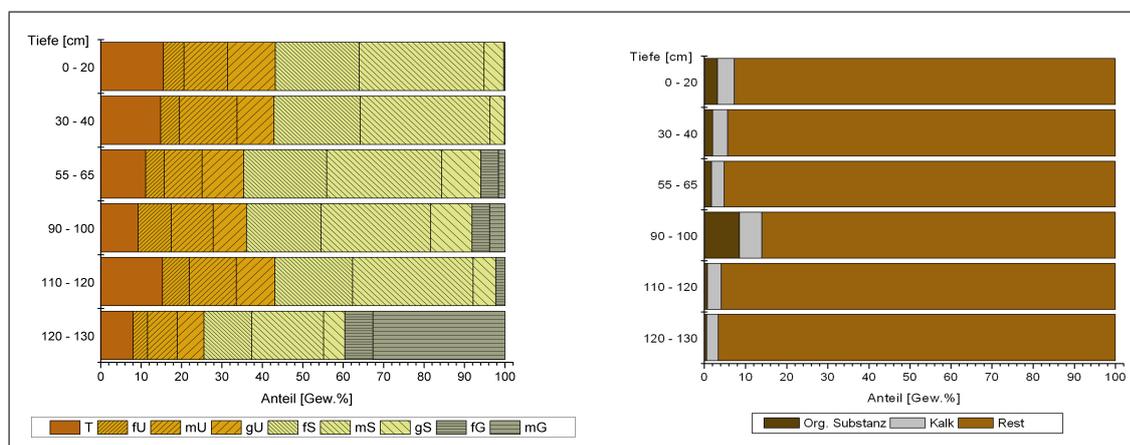


Abbildung 68: Korngrößenverteilungen (links) und Humus- und Kalkgehalt (rechts) für die Proben aus dem Ostprofil zu den Grabungsflächen D 55 und D 60 (vgl. Abb. 67). Es liegt ein deutlich erhöhter Anteil an organischer Substanz in der Probe aus 90 - 100 cm Tiefe vor, die aus dem „zentralen Holzkohledepot“ (vgl. GRABUNGSDOKUMENTATION GRÖSSELTAL 2008 bis 2010, unveröffentlicht) stammt. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Insgesamt weisen alle Proben einen relativ großen Anteil an Sand auf, wie es in Böden auf Buntsandstein zu erwarten ist. Die vorhandene Schluffkomponente könnte darauf hindeuten, dass das Gelände ehemals zumindest teilweise lössbedeckt war.

Die Korngrößenzusammensetzungen der verschiedenen archäologischen Schichten unterscheiden sich wenig voneinander, was erklären kann, warum sie sehr ähnliche spezifische elektrische Widerstandswerte aufweisen und warum sie sich somit im ERT-Profil nicht voneinander abgrenzen lassen.

Das 18te ERT-Profil wurde teilweise innerhalb der Fläche F 75 gemessen (vgl. Abb. 60), von der während der Grabungskampagne 2010 bereits die oberen 20 bis 30 cm geöffnet worden waren (GASSMANN ET AL. 2011). Da das Profil erst nach dem Ende dieser Grabungskampagne gemessen wurde und zu diesem Zeitpunkt die Fläche bereits wieder verfüllt war, erfassten die oberen 20 bis 30 cm des Profils den bereits gestörten Bereich. Da der Bereich darunter jedoch noch ungestört ist und die oberflächlich freigelegten archäologischen Befunde tiefer reichen bzw. teilweise auch erst in etwas größerer Tiefe noch Befunde zu erwarten sind, wurde die Messung trotz der bereits erfolgten Grabung durchgeführt. Da die Lage der Rennöfen in dieser Fläche bereits bekannt war, konnte das Profil so angelegt werden, dass die Vorgrube eines Ofens geschnitten wurde. Es diente somit vor allem dazu, abzuschätzen, wie tief die Befunde reichen und um einen weiteren Vergleich zwischen einem ERT-Profil, welches über einer Ofenvorgrube gemessen wurde und den archäologischen Befunden zu haben. Da diese Fläche ebenfalls im archäologischen Gesamtplan festgehalten wurde, ist auch hier ein Vergleich damit möglich (Abb. 69). Die Überschneidung des ERT-Profils mit der geöffneten Fläche reicht von 7,25 bis ca. 12 m. Bei dem Bereich erhöhter Widerstandswerte ($\rho > 681 \Omega m$) zwischen 10 und 11,2 m im ERT-Profil handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um die Vorgrube des Ofens, der in der Südwestecke der Fläche freigelegt wurde. Da bei der Grabung nur die oberen 20 bis 30 cm geöffnet waren und die Struktur im ERT-Profil erst in ca. 40 cm Tiefe beginnt, kann dies zwar nicht mit Sicherheit geklärt werden, aber die bisherigen Befunde zeigten, dass jedem Ofen eine solche Vorgrube vorgelagert ist (vgl. dazu auch GASSMANN & WIELAND 2009, 2010; GASSMANN ET AL. 2011). Die Struktur, die zwischen ca. 8,2 und 9 m im ERT-Profil zu erkennen ist, liegt etwas weniger tief und findet somit eine Entsprechung im archäologischen Planum. Es handelt sich dabei um eine Ansammlung größerer Steine, die eventuell zur Aufbereitung von Erzen und Luppen dienten (GASSMANN ET AL. 2011).

Das dritte ERT-Profil (Anhang Abb. B.15) verlief mit seinen letzten 6 m mittig auf einem schmalen Steg (Breite ca. 1,4 m) zwischen den zur Zeit der Messung bereits geöffneten Grabungsflächen E 75 und E 80 (vgl. Abb. 60). Dieser Bereich weist sehr hohe Widerstandswerte auf, die sich dadurch erklären lassen, dass es durch das Offenliegen der Grabungsflächen seitlich des Profils zu einer Austrocknung und dadurch bedingten schlechteren elektrolytischen Leitfähigkeit des Bereiches kam. Hierzu liegt zwar als Vergleichsmöglichkeit die archäologische Skizze des Nordprofils der Fläche E 75 vor, aus den oben genannten Schwierigkeiten ist jedoch ein direkter Vergleich nicht sinnvoll.

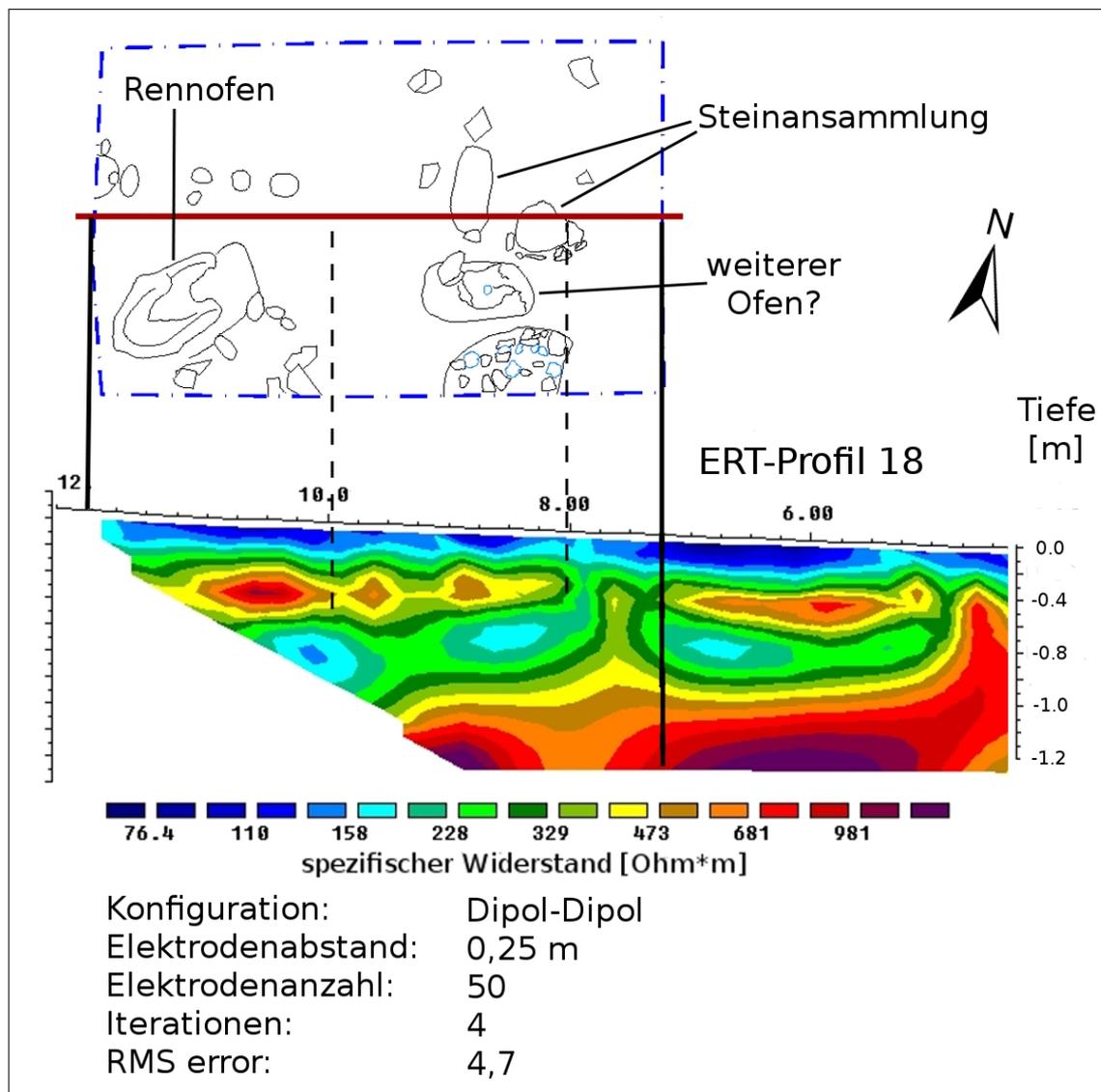


Abbildung 69: Vergleich des ERT-Profiles 18 mit den Grabungsbefunden der Fläche F 75 (vgl. Abb. 60). Die gestrichelten Linien kennzeichnen auffällige Strukturen im ERT-Profil und weisen auf die entsprechenden Stellen im archäologischen Gesamtgrabungsplan. Die Vorgrube des Ofens ist im Gesamtplan noch nicht in ihrer vollen Größe erfasst, da das Planum nur in ca. 30 cm Tiefe angelegt wurde. Der Bereich erhöhter Widerstandswerte im ERT-Profil entspricht wahrscheinlich dieser Vorgrube. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung; Gesamtgrabungsplan aus der GRABUNGSDOKUMENTATION GRÖSSELTAL 2008 bis 2010, unveröffentlicht; zur Verfügung gestellt vom Regierungspräsidium Karlsruhe und Landesamt für Denkmalpflege Esslingen.

Aus dem Nordprofil der Fläche E 75 wurden gestörte Proben genommen (Abb. 70), anhand derer die Korngrößenverteilungen, der Humus- und Kalkgehalt der verschiedenen archäologischen Schichten, die auch in anderen Profilwänden auftraten, untersucht wurden (Abb. 71; Tab. B.22 und Tab. B.23 Anhang). Da die Ergebnisse der bodenkundlichen Untersuchungen der Proben bei der Interpretation anderer ERT-Profile in diesem Untersuchungsgebiet nützlich sein können, werden sie kurz vorgestellt.

Die Bezeichnungen für die verschiedenen archäologischen Schichten bzw. Befunde wurden der archäologischen Beschreibung entnommen (GRABUNGSDOKUMENTATION GRÖSSELTAL 2008 bis 2010, unveröffentlicht). Die Proben aus 0 - 10 cm und 10 - 20 cm Tiefe stammen beide aus der „Humusschicht“ (Befundnummer: 1) und weisen somit erhöhte Gehalte an organischer Substanz auf (vgl. Abb. 71). Auch hier tritt wieder wie bereits im Ostprofil der Flächen D 55/60 die eventuell „künstlich aufgetragene“ Schicht auf (Befundnummer: 145), aus der die Probe aus 30 - 35 cm Tiefe stammt. Diese drei Schichten weisen sehr ähnliche Korngrößenzusammensetzungen auf (vgl. dazu auch Abb. 71, Abb. B.21 Anhang). Die Probe aus 35 - 40 cm Tiefe stammt aus der „Schotterschicht“ (Befundnummer: 100), was sich deutlich am erhöhten Grusanteil zeigt. Die Probe aus 40 - 55 cm (a) entstammt einer Schicht, die als „rötlich-brauner sandiger Lehm mit wenigen kleinen Steinen“ (Befundnummer: 102) beschrieben wird, was sich im leicht erhöhten Grusanteil zeigt. Dagegen weist die Probe aus 40 - 55 cm (b) aus einem „Lehmkeil“ (Befundnummer: 141) einen etwas erhöhten Tonanteil auf, genau wie die Probe aus 55 - 65 cm (a), die aus einer Schicht mit „grau-braunem sandigem Lehm“ (Befundnummer: 105) entnommen wurde. Die Probe aus 55 - 65 cm (b) dagegen weist wieder einen geringeren Tonanteil zugunsten des Sandanteiles auf. Sie entstammt einer „Grubenverfüllung“ aus „gräulich sandigem Lehm“ (Befundnummer: 118). Die letzte Probe (95 - 100 cm) entstammt wiederum der Schicht aus „massiv mit Blockschutt und kleinstückigem Material durchsetzten Hanglehmes (Solifluktionsschutt)“ (Befundnummer: 106), weswegen der Grusanteil auch deutlich erhöht ist. Die Unterschiede in den Korngrößenverteilungen der verschiedenen archäologischen Schichten sind alle sehr gering, was eine mögliche Ursache dafür sein kann, dass sich in allen gemessenen Profilen wiederum die einzelnen archäologischen Schichten nicht voneinander abgrenzen lassen. Die einzige Schicht, die sich teilweise in den geoelektrischen Profilen identifizieren lässt (vgl. dazu auch ERT-Profil 10, Abb. 65), ist die „Schotterschicht“ (Befundnummer: 100), die einen deutlich höheren Grus- und Steinanteil aufweist.

Das 15te ERT-Profil wurde entlang der Südgrenze der Grabungsflächen FG 90 zu den Flächen FG 85 gemessen (vgl. Abb. 60), verlief somit ursprünglich entlang des Südprofils der während der Grabungskampagne 2010 geöffneten Flächen. Da sich die Ausgrabung jedoch im weiteren Verlauf der Grabungskampagne auf die Fläche F 85 ausdehnte, wurde diese Südprofilwand teilweise zerstört. Es blieb nur noch ein 2 m langes Teilstück erhalten, welches archäologisch dokumentiert wurde. Mit diesem ist ein direkter Vergleich schwierig, da das verbliebene Teilstück im Randbereich des ERT-Profiles liegt. Da der Vergleich keine verwertbaren Ergebnisse lieferte, ist das Profil im Anhang zu finden (vgl. Abb. B.17).

4.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Grösseltal bei Neuenbürg, Enzkreis

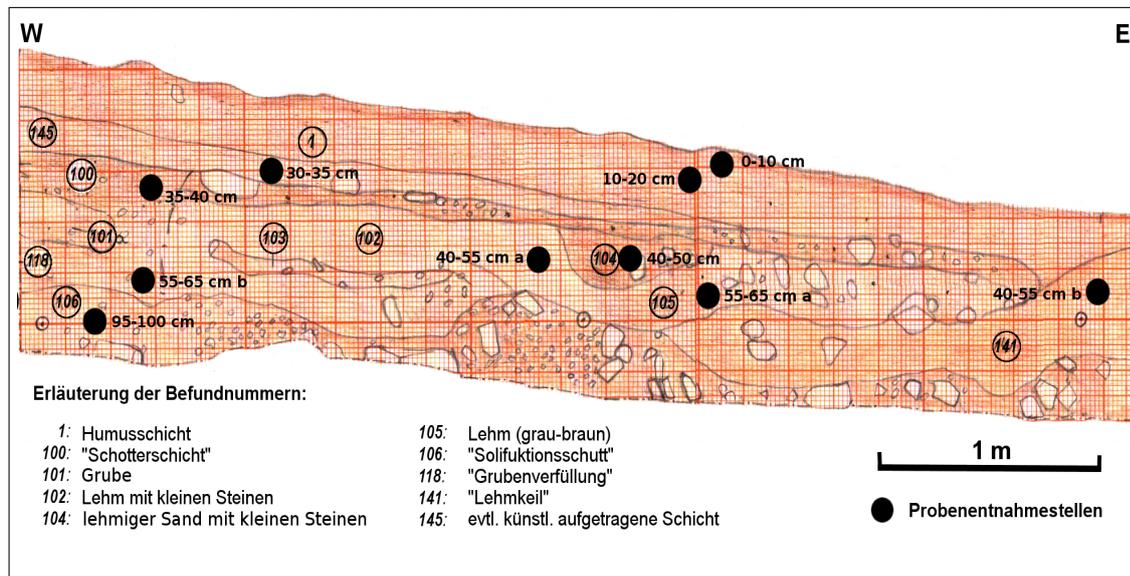


Abbildung 70: Probenentnahmestellen mit den entsprechenden Entnahmetiefen aus dem Nordprofil der Grabungsfläche E 75 (vgl. Abb. 60). Eingezeichnet sind auch die Befundnummern für die verschiedenen archäologischen Schichten, auf die im Text näher eingegangen wird. Quelle: Verändert nach der GRABUNGSDOKUMENTATION GRÖSSELTAL 2008 bis 2010, unveröffentlicht; zur Verfügung gestellt vom Regierungspräsidium Karlsruhe und Landesamt für Denkmalpflege Esslingen.

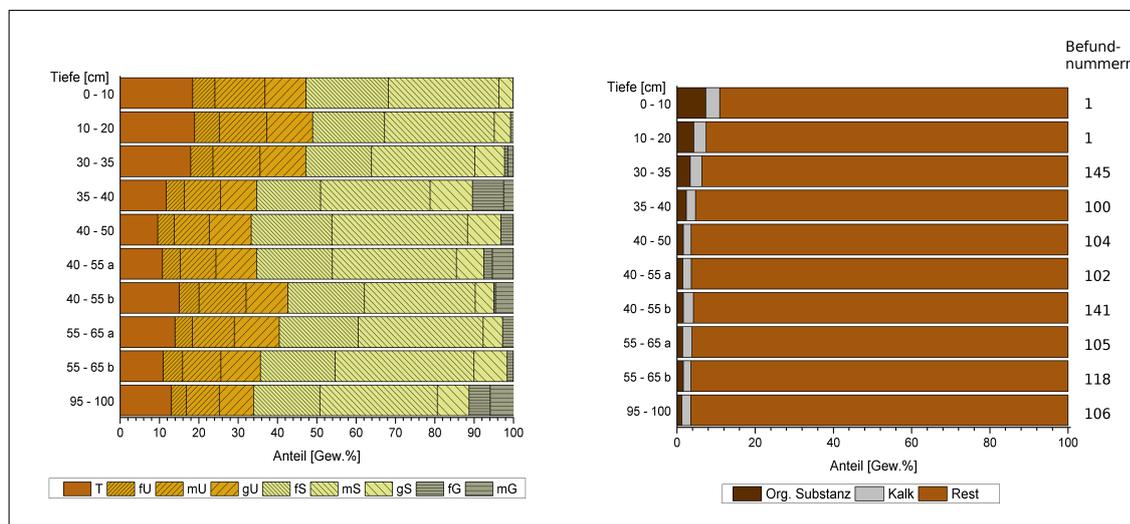


Abbildung 71: Korngrößenverteilungen (links) und Humus- und Kalkgehalt (rechts) für die Proben aus dem Nordprofil der Grabungsfläche E 75 (vgl. Abb. 70). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Das achte Profil wurde im nördlichen Teil des Grabungsgeländes, innerhalb der Flächen EFG 90 gemessen (vgl. Abb. 60). Hierzu liegen Grabungsergebnisse aus den Jahren 2009 und 2010 wiederum im Gesamtplan vor, die mit dem ERT-Profil verglichen werden können. Die ersten 0,4 m des Profils reichen in die Fläche E 90 hinein, die im Vorjahr der Messung bereits geöffnet war. Zwischen 0,4 und 5,4 m verlief das Profil innerhalb der Fläche F 90 und ab 5,4 m innerhalb der Fläche G 90. Im Laufe der Grabungskampagne 2010 wurde die Fläche F 90 ganz und von der Fläche G 90 der erste Meter geöffnet. Somit kann der Bereich von 0,4 bis 6,4 m des ERT-Profiles mit dem archäologischen Gesamtplan verglichen werden (Abb. 72). Dort ist zwischen 3,4 und 4,4 m eine Buntsandsteinplatte verzeichnet, neben der weitere Steine liegen. Bei dieser Steinansammlung handelt es sich nach GASSMANN ET AL. (2011) um einen Arbeitsbereich, da sich im Umfeld viel „geröstetes“ Erz fand (GASSMANN ET AL. 2011, S. 114). Im ERT-Profil zeigen sich an dieser Stelle leicht erhöhte Widerstandswerte ($223 \Omega m \leq \rho \leq 365 \Omega m$). Bei 4,5 m beginnt im archäologischen Plan ein „quer zum Hang verlaufender Steinriegel, der vermutlich zur Stabilisierung“ diente (GASSMANN ET AL. 2011, S. 114). Dieser findet auch im ERT-Profil seine Entsprechung in Form von deutlich erhöhten Widerstandswerten ($\rho \geq 979 \Omega m$). Im Bereich zwischen ca. 6,4 und 7,4 m des ERT-Profiles ist eine Unterbrechung in der Steinlage zu erkennen. Dort verläuft nahezu vertikal ein Bereich mittlerer Widerstandswerte ($365 \Omega m \leq \rho \leq 597 \Omega m$). Da ab 6,4 m leider keine Grabungsbefunde mehr vorliegen, kann nicht geklärt werden, worum es sich dabei handelt.

Die ERT-Profile 16 und 17 (Abb. 73) wurden senkrecht zu den anderen gemessenen Profilen angelegt und verliefen fast über den gesamten Bereich magnetischer Anomalien (vgl. Abb. 60). Profil 16 (Abb. 73, unten) verlief dabei in einem Meter Abstand zur Grabungsgrenze des Jahres 2010 (Fläche G 90/95). Gemessen wurden zwei Teilprofile mit einem Elektrodenabstand von 0,5 m, die jeweils 24,5 m lang waren. Die erste Elektrode des zweiten Profiltails lag bei 14,5 m des ersten Profiltails, d. h. in dem Bereich zwischen 14,5 und 24,5 m überlappten beide. Aus diesen beiden Einzelprofilen wurde mit Hilfe der Funktion „Concatenate“, die das Programm RES2DINV zur Verfügung stellt (LOKE 1995), ein Gesamtprofil erstellt. Das ERT-Profil 17 (Abb. 73, oben) wurde parallel zum 16ten Profil, um einen weiteren Meter nach Osten hin versetzt, gemessen. Bei diesem wurden 100 Elektroden verwendet mit einem Elektrodenabstand von 0,5 m. Die erste Elektrode des 17ten Profils lag 4 m weiter nördlich als die des 16ten Profils. Zu den Profilen 16 und 17 liegen keine archäologischen Profile vor, da bislang in diesem Bereich noch keine Grabung stattfand. Die Ergebnisse der Geomagnetik und die Befunde der Grabungskampagnen legen jedoch die Vermutung nahe, dass es sich bei den Bereichen mit erhöhten Widerstandswerten, die sich in beiden Profilen deutlich abzeichnen, um die Schlackenhalde handelt, die den Öfen und Arbeitsbereichen vorgelagert sind. Das Magnetogramm zeigt mehrere, aneinander grenzende bzw. einander teilweise überlappende Halden, die sich zu den Rändern hin verjüngen. Im östlichen Bereich des Geländes scheinen noch größere Schlackenhalde zu liegen. Dies bietet Potential für mögliche zukünftige Grabungskampagnen (vgl. dazu auch GASSMANN ET AL. 2011) und für dadurch ermöglichte Vergleiche zu weiteren Profilen bzw. Befunden.

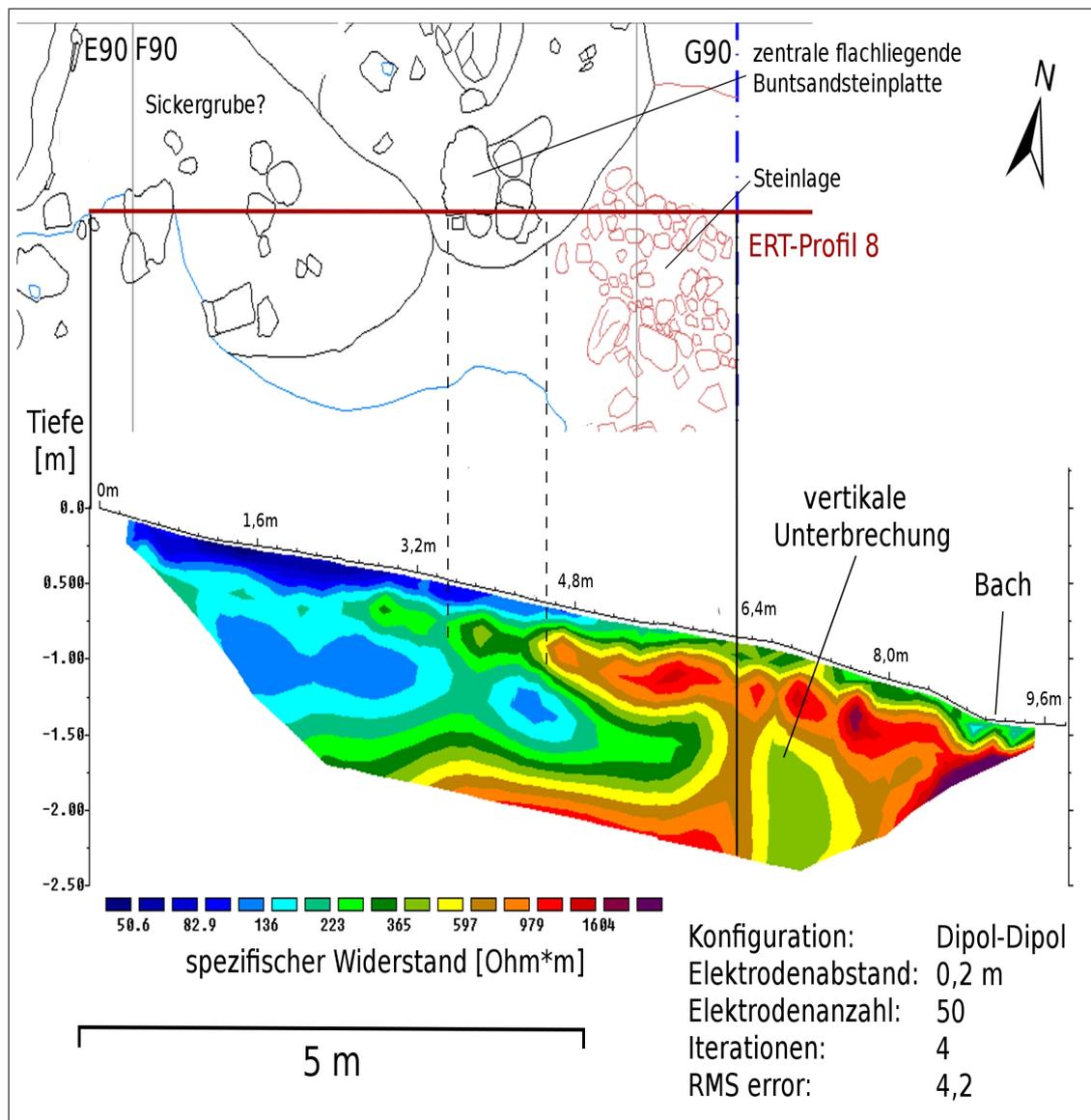


Abbildung 72: Vergleich des ERT-Profiles 8 mit den Grabungsbefunden der Flächen EFG 90 (vgl. Abb. 60). Die gestrichelten Linien kennzeichnen auffällige Strukturen im ERT-Profil und deren Entsprechung im archäologischen Gesamtgrabungsplan. Im ERT-Profil deutlich zu erkennen ist die Steinlage am östlichen Rand der Grabungsfläche G 90. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung; Gesamtgrabungsplan aus der GRABUNGSDOKUMENTATION GRÖSSELTAL 2008 bis 2010, unveröffentlicht; zur Verfügung gestellt vom Regierungspräsidium Karlsruhe und Landesamt für Denkmalpflege Esslingen.

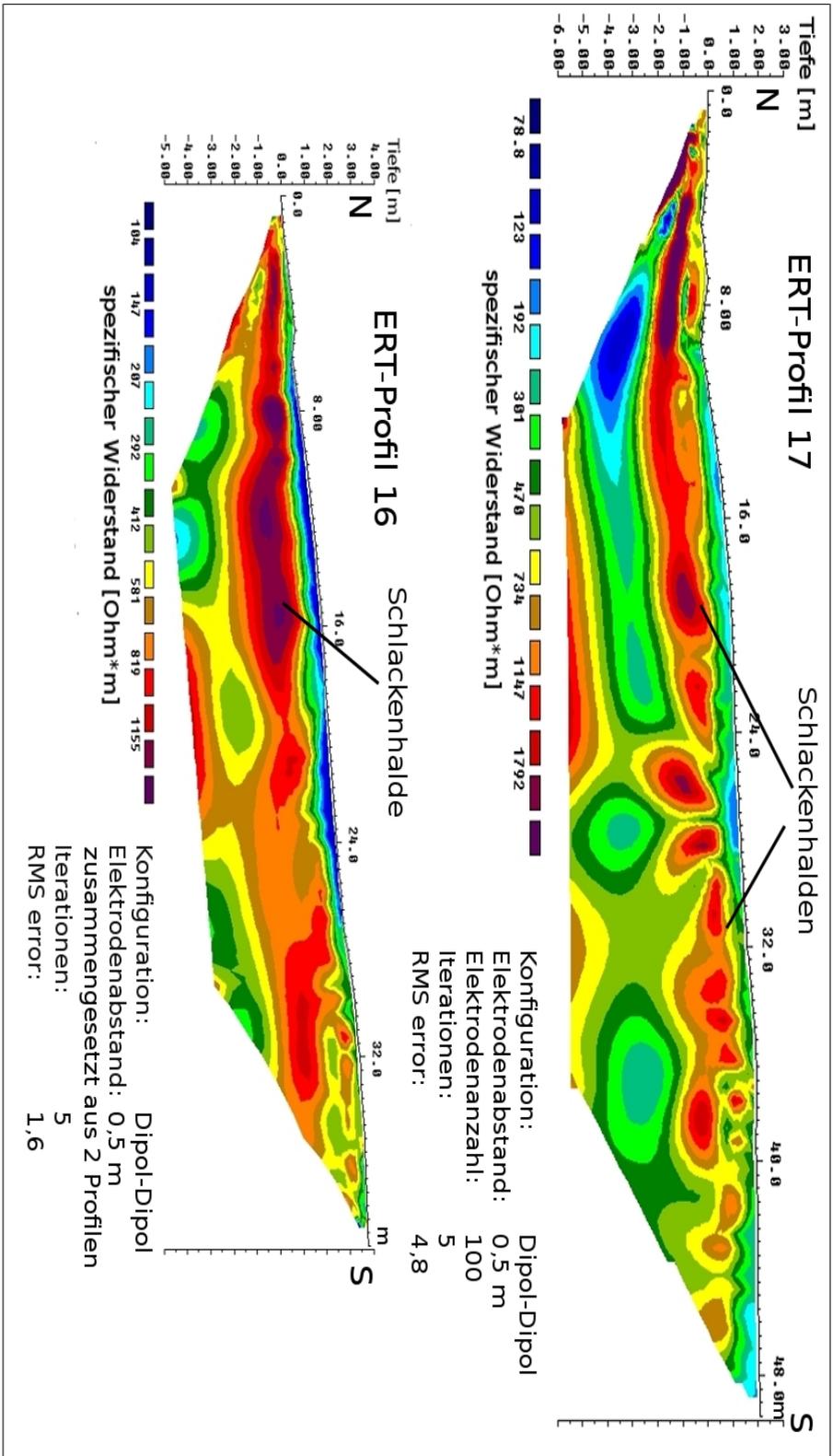


Abbildung 73: ERT-Profilie 16 (unten) und 17 (oben) im Grösseltal. Zu Lage und Verlauf der beiden Profile vgl. Abbildung 60. Zu erkennen sind die Schlackenhalde, die sich fast über die gesamten Profile erstrecken. Profil 16 wurde aus zwei Einzelprofilen zusammengesetzt.

Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

4.2.3 Modelle verschiedener Schlackenhalden

Da bei den Messungen im Grösseltal die Zuordnung der in den ERT-Profilen sichtbaren Strukturen zu tatsächlichen Befunden eher schwierig war, sollte mit Hilfe von Modellen untersucht werden, inwieweit sich simulierte Schlackenhalden durch die Methode der Geoelektrischen Widerstandstomographie erfassen, eingrenzen und interpretieren lassen. Dafür wurden zuerst mit RES2MOD zwei unterschiedliche Modelle von Schlackenhalden erstellt. Beim ersten Modell erstreckt sich die Schlackenhalde von 0,3 bis ca. 1 m Tiefe. Beim zweiten Modell beginnt sie direkt unter der Oberfläche und reicht bis in ca. 50 cm Tiefe. Beide Modelle wurden mit drei unterschiedlichen Konfigurationen (Wenner, Dipol-Dipol und Schlumberger) simuliert. Es wurde dabei jeweils mit zwei verschiedenen Widerstandswerten ($\rho_1 = 10 \Omega m$ und $\rho_2 = 2000 \Omega m$) gearbeitet.

Die Abbildungen 74 und 75 zeigen das Modell der tiefer und der höher gelegenen Schlackenhalde und die Inversionsergebnisse („Inverse Model Resistivity Section“), die mit den drei Konfigurationen simuliert wurden. Die Widerstandsskala wurde so gewählt, dass die beiden Widerstandswerte des Modells die untere und obere Grenze bilden.

Bei allen drei Konfigurationen zeigt das Inverse Modelling deutlich unterschiedliche Reaktionen auf die verschieden tiefen Schlackenhalden, obwohl sich ihre vorgegebene Form nicht wesentlich unterscheidet. Die Simulationen mit der Wenner- und mit der Schlumberger-Konfiguration unterscheiden sich kaum voneinander, die deutlichsten Unterschiede weist die Berechnung mit der Dipol-Dipol-Konfiguration auf. Bei dieser werden die verschiedenen Schlackenhaldenbereiche besser voneinander abgegrenzt. Es entstehen jedoch unterhalb der höher gelegenen Schlackenhalde Artefakte, die wie eine Spiegelung der Strukturen der modellierten Schlackenhalde aussehen. Bei den beiden anderen Konfigurationen treten diese Artefakte eher seitlich versetzt im Bereich unterhalb der Struktur der Halde auf. Insgesamt wird bei allen Inversen Modellen die Tiefe der Schlackenhalde überschätzt. Da bei keiner der Konfigurationen die untere Grenze der tiefer gelegenen Halde im Widerstandsmodell dargestellt wurde, kann nicht genau abgelesen werden, wie stark die Tiefe in der Widerstandsverteilung von der Tiefe der simulierten Halde abweicht. Die Breite der tiefer gelegenen Halde wird bei allen Simulationen unterschätzt. Bei der höher gelegenen Schlackenhalde wird bei allen drei Konfigurationen die Breite der Halde an der Oberfläche gut erfasst, jedoch in den tieferen Schichten eher unterschätzt. Die untere Begrenzung des Widerstandsbereiches, der der Halde entspricht, wird in allen Fällen zu tief dargestellt. Es zeigt sich auch hier wieder, dass die Dipol-Dipol-Konfiguration am besten geeignet ist, um die Begrenzungen der Schlackenhalden annähernd zu erfassen.

Da sich bei den real durchgeführten Messungen die Schlackenhalden nicht besonders gut abgrenzen ließen bzw. keine zuverlässigen Aussagen zur Tiefe möglich waren, wurde anhand der Modelle untersucht, ob sich die Erfassung der Halde verbessern lässt. Dafür wurde das Modell der tiefer gelegenen Schlackenhalde (vgl. Abb. 74) mit allen drei Konfigurationen jeweils mit robuster Inversion („robust constraint“; vgl. dazu auch LOKE 1995) berechnet (Abb. 76).

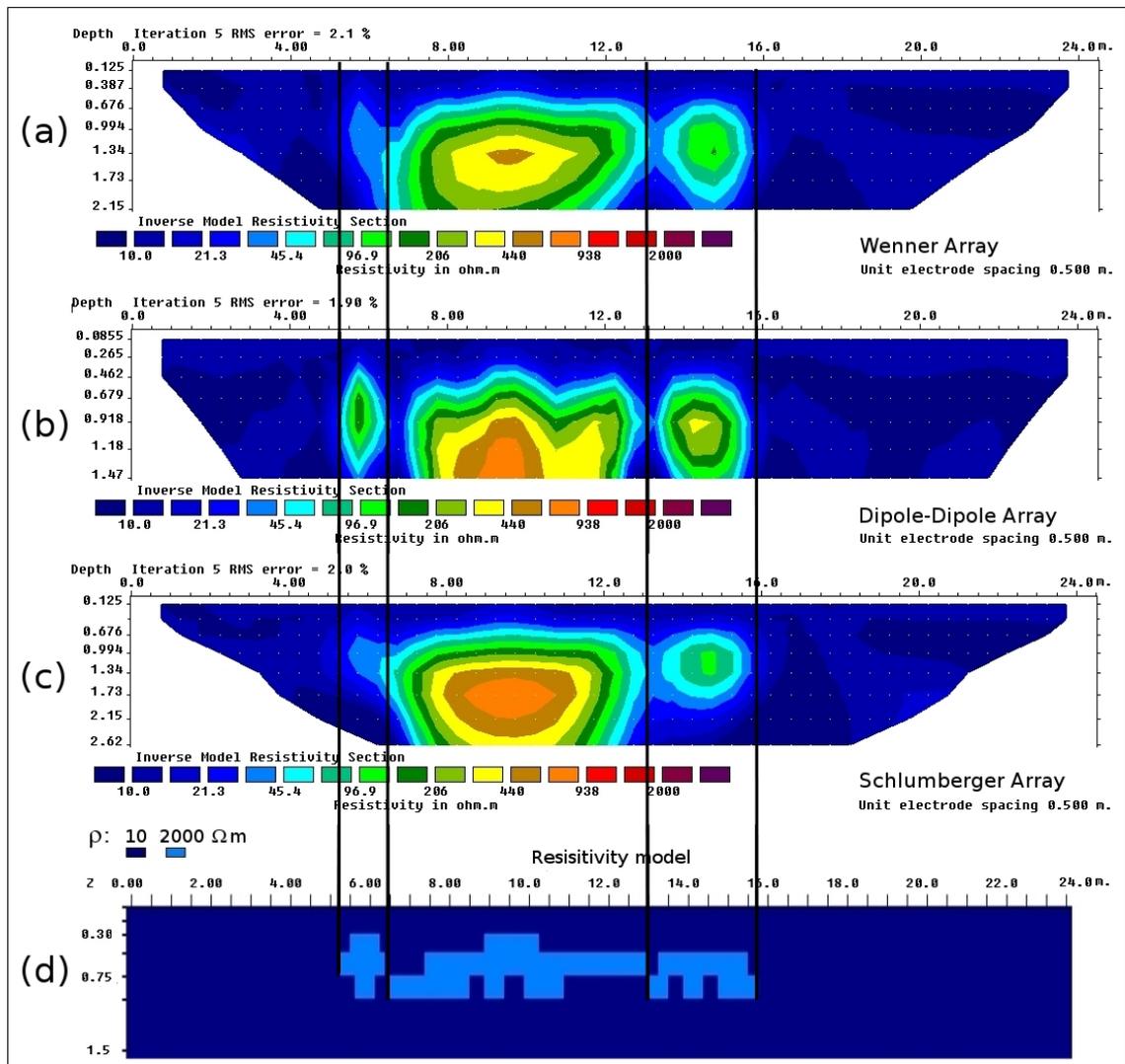


Abbildung 74: Mit RES2MOD erstelltes Modell einer tiefer gelegenen Schlackenhalde (d) und die Widerstandsverteilungen, die mit der Wenner- (a), der Dipol-Dipol- (b) und der Schlumberger-Konfiguration (c) simuliert wurden, mit einer benutzerdefinierten Skala, die an die vorgegebenen Widerstandswerte angepasst wurde. Die Striche kennzeichnen die seitlichen Begrenzungen der verschiedenen Schlackenhaldenteile und verdeutlichen deren Abbildung in den Widerstandsbildern. Quelle: Eigene Darstellung.

Die robuste Inversion wird verwendet, wenn scharfe Begrenzungen erwartet werden (LOKE 1995). Die konventionelle least-squares Methode versucht, die quadratischen Abweichungen zwischen den gemessenen und den errechneten Werten zu minimieren (vgl. dazu auch Kap. 2.1.5). Diese Methode liefert bei zufälligen oder Gauß'schen Fehlern gute Resultate. Bei Benutzung der robusten Inversionsmethode versucht das Programm,

die absoluten Veränderungen der Widerstandswerte zu minimieren. Dadurch erzeugt die Methode schärfere Übergänge zwischen verschiedenen Widerstandsbereichen. Innerhalb der jeweiligen Bereiche werden die Widerstandswerte nahezu konstant gehalten (LOKE 1995).

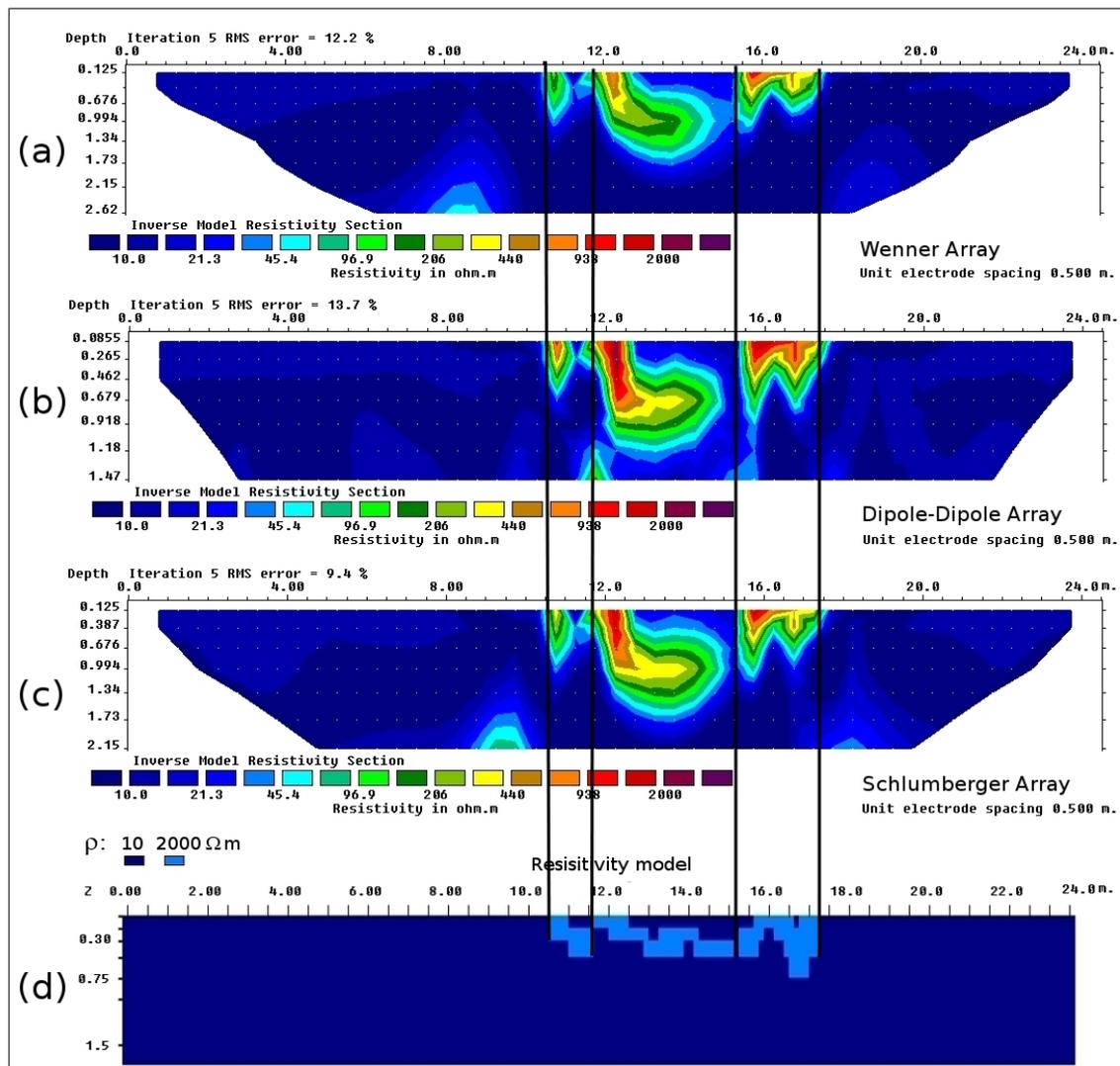


Abbildung 75: Mit RES2MOD erstelltes Modell einer höher gelegenen Schlackenhalden (d) und die Widerstandsverteilungen, die mit der Wenner- (a), der Dipol-Dipol- (b) und der Schlumberger-Konfiguration (c) simuliert wurden, mit einer benutzerdefinierten Skala, die an die vorgegebenen Widerstandswerte angepasst wurde. Auch hier kennzeichnen die Striche die seitlichen Begrenzungen der verschiedenen Schlackenhaldenteile und verdeutlichen deren Abbildung in den Widerstandsbildern. Quelle: Eigene Darstellung.

Bei der Berechnung der Schlackenhalden-Modelle mit der robusten Inversion werden die Begrenzungen der Halde deutlich schärfer dargestellt, vor allem nach unten hin. Die seitlichen Begrenzungen bzw. auch die Übergänge zwischen den verschiedenen Haldenbereichen entsprechen viel besser denjenigen im vorgegebenen Modell als bei der Inversion mit „standard constraint“, die Tiefe der Halde wird jedoch immer noch stark überschätzt.

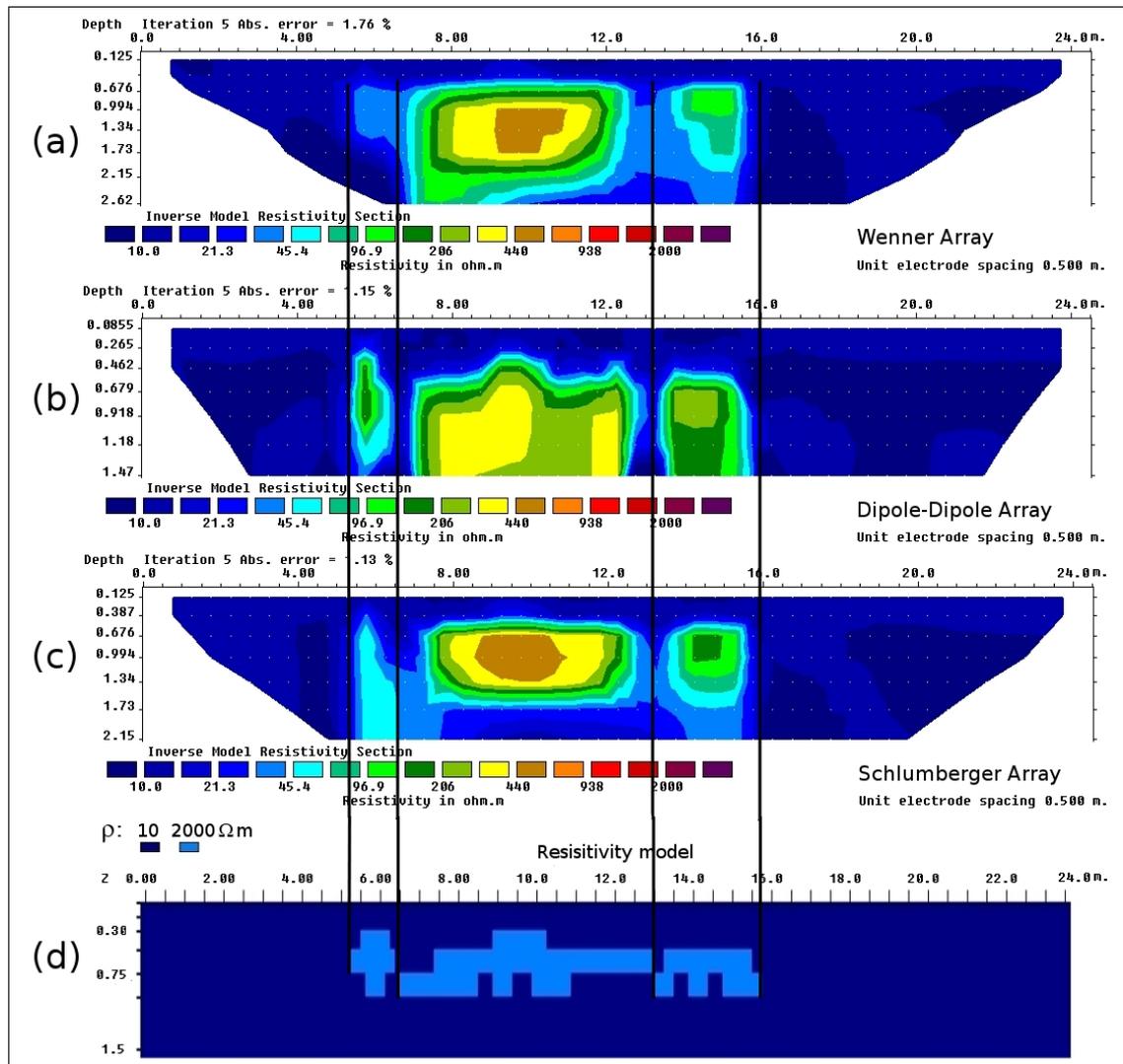


Abbildung 76: Mit RES2MOD erstelltes Modell der tiefer gelegenen Schlackenhalde (d) und die Widerstandsverteilungen mit robuster Inversion. Simuliert mit der Wenner- (a), der Dipol-Dipol- (b) und der Schlumberger-Konfiguration (c). Die Striche kennzeichnen wieder die seitlichen Begrenzungen der verschiedenen Schlackenhaldentteile und verdeutlichen deren Abbildung in den Widerstandsbildern. Die Begrenzungen der simulierten Halde werden deutlich schärfer dargestellt. Quelle: Eigene Darstellung.

Da es sich bei den Schlackenhalde um vorwiegend horizontal ausgedehnte Befunde handelt, wurde das Modell der tiefer gelegenen Halde erneut mit einem erhöhten horizontalen Filter berechnet (Abb. 77), d. h. das Verhältnis zwischen vertikalem und horizontalem Filter wurde zugunsten des horizontalen erhöht (vertical/horizontal flatness filter ratio = 0,5). Die Erhöhung des horizontalen Filters zeigt bei allen drei Konfigurationen keine deutliche Verbesserung im Ergebnis der Inversion (vgl. dazu Abb. 74). Bei der Wenner- und der Schlumberger-Konfiguration wurde die untere Grenze damit etwas deutlicher dargestellt, jedoch wurde die Tiefenausdehnung der Halde immer noch überschätzt.

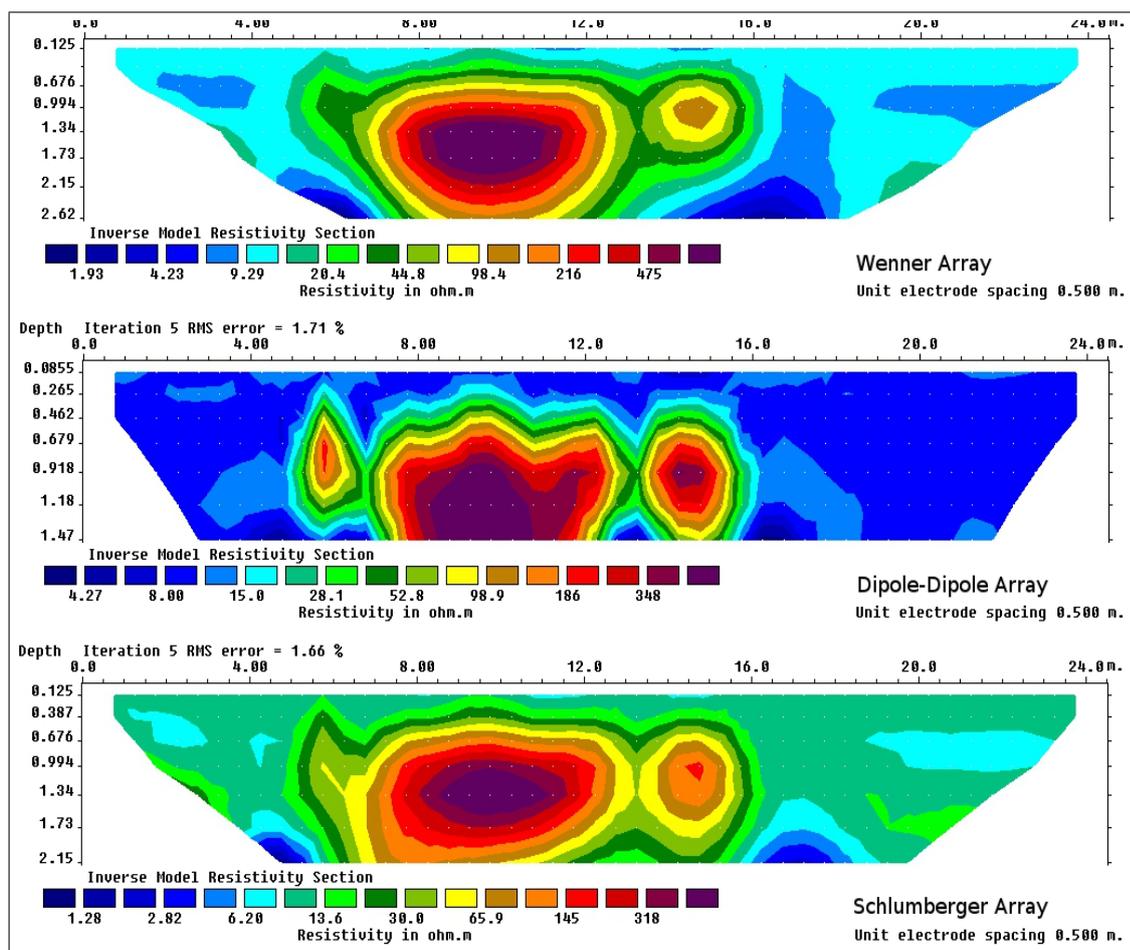


Abbildung 77: Widerstandsverteilungen für das Modell der Schlackenhalde (vgl. z. B. Abb. 74) mit erhöhtem horizontalen Filter (vertical/horizontal flatness filter ratio = 0,5). Simuliert mit der Wenner- (oben), der Dipol-Dipol- (Mitte) und der Schlumberger-Konfiguration (unten). Die Veränderung des Filters bewirkt hierbei keine deutliche Verbesserung. Quelle: Eigene Darstellung.

4.2.4 Anwendung der Geoelektrischen Widerstandstomographie zur Lokalisierung alter Bergbauspuren

Mit einer weiteren Messreihe, die im Waldgebiet westlich oberhalb des Grabungsgeländes im Grösseltal am Hang des Sackberges durchgeführt wurde (vgl. Abb. 78), sollte die Methode der ERT zum Auffinden alter Bergbauspuren angewendet werden. Ziel der Messungen war es, Spuren der zur keltischen Eisenerzverhüttung im Grösseltal gehörigen Erzgewinnung zu finden (GASSMANN & WIELAND 2010; GASSMANN ET AL. 2011). Im Neuenbürger Erzrevier verlaufen zahlreiche Erzgänge und es wurden bereits an verschiedenen Stellen Spuren eisenzeitlicher Erzverhüttung nachgewiesen (vgl. GASSMANN 1996; GASSMANN & WIELAND 2005 bis 2010; GASSMANN ET AL. 2011). Geklärt ist bisher nicht, woher die verhütteten Erze, die im Laufe der verschiedenen Grabungskampagnen an den unterschiedlichsten Stellen gefunden wurden, jeweils stammen. Die geoelektrischen Messungen wurden im Waldgebiet in unmittelbarer Nähe zu dem Gelände im Grösseltal an Stellen, an denen oberflächlich Terrassen bzw. Mulden im Gelände sichtbar waren und bei denen „bei Begehungen wiederholt Spuren mutmaßlicher alter Erzgewinnung angetroffen worden waren“ (GASSMANN ET AL. 2011, S. 115), durchgeführt. Abbildung 78 zeigt ein dreidimensionales Modell des Geländes, in welches die gemessenen ERT-Profile eingezeichnet wurden. Zu erkennen ist, dass eines der Profile einen Schwerspätgang mit Brauneisenerz schneidet, der in der Geologischen Karte (BIRKENFELD 7117) eingetragen ist und ebenfalls auf das Modell übertragen wurde. Zur besseren Orientierung wurden auch die Grabungsflächen im Grösseltal eingezeichnet. Erstellt wurde das Modell mit Hilfe von ArcGIS® (ESRI) auf der Grundlage von Lidar-Daten und Luftbildern, die mit freundlicher Genehmigung durch das Landesamt für Denkmalpflege Esslingen zur Verfügung gestellt wurden. Die Stellen, an denen die geoelektrischen Messungen durchgeführt wurden, liegen alle wenige 100 m oberhalb des Ausgrabungsareals und teilweise in einer Senke, die direkt auf das Grabungsareal zuläuft. Die erste Messung verlief dabei zentral durch zwei oberflächlich sichtbare Terrassen. Das ERT-Profil 1 (Abb. 79) zeigt bei beiden Terrassen keine tiefer reichenden Strukturen in Form von Schächten oder sonstigen Hohlformen. Auch sind keine eindeutigen Erzabbauhalden auszumachen. Die Messung lässt ohne weitere archäologische Untersuchung der Terrassen keine eindeutige Aussage zu deren Entstehung zu.

In wenigen Metern Entfernung zu dieser ersten Messung wurde eine zweite angelegt (Abb. 80), die über eine größere Terrasse verlief. Bei dieser Messung wurde die Schlumberger-Konfiguration gewählt. Im Bereich der Terrasse zeigt sich im Profil deutlich eine vertikale Struktur. Das dreidimensionale Modell des Geländes (Abb. 78) zeigt, dass dieses ERT-Profil genau über dem Schwerspätgang mit Brauneisenerz gemessen wurde. Bei der vertikalen Struktur könnte es sich somit tatsächlich um einen inzwischen verfüllten Abbauschacht handeln. Da die Messung nur bis in eine Tiefe von ca. 4 m reichte, die Struktur dort jedoch nicht zu enden scheint, kann keine Aussage zur tatsächlichen Tiefe des eventuellen Schachtes getroffen werden. Ob es sich bei diesem Schacht um Spuren eisenzeitlicher Erzgewinnung handelt, oder ob er jüngerer Entstehung ist, lässt sich ohne nachfolgende archäologische Ausgrabung nicht mit Bestimmtheit feststellen (GASSMANN ET AL. 2011).

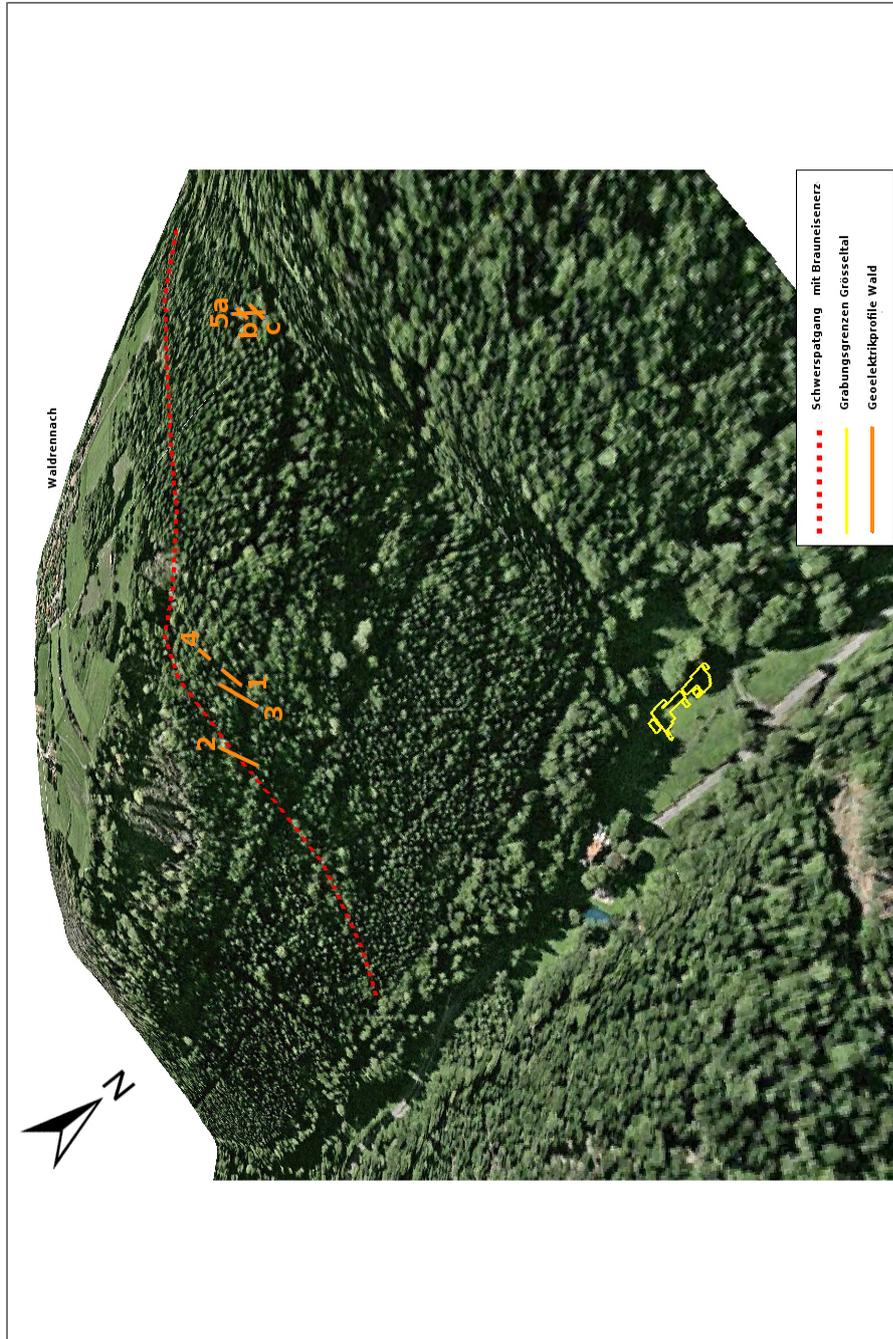


Abbildung 78: Dreidimensionales Modell eines Bereiches des Grösseltals mit Blick auf den Sackberg. Eingezeichnet sind die Grabungsgrenzen im Grösseltal (gelb), die geoelektrischen Messungen im angrenzenden Waldgebiet (orange) und ein Schwerspatgang mit Brauneisenerz (rot gepunktelt), dessen Lage aus der Geologischen Karte Burkenfeld (7117; GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 1982) bestimmt wurde. Quelle: Eigene Erstellung mit ArcGIS® (ESRI), Lidar-Daten mit freundlicher Genehmigung durch das Landesamt für Denkmalpflege Esslingen zur Verfügung gestellt.

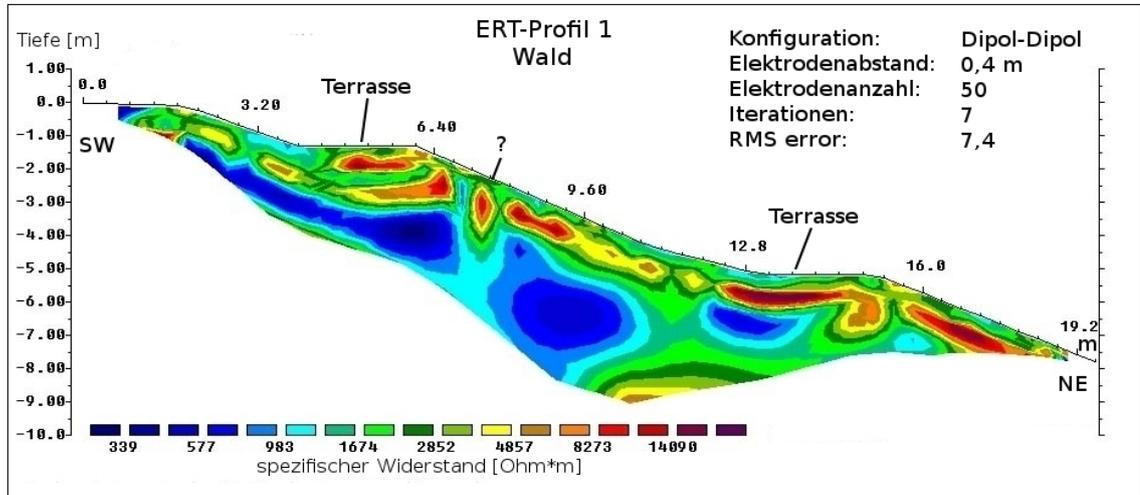


Abbildung 79: ERT-Profil 1 am Hang des Sackberges oberhalb des Grabungsgeländes im Grösseltal (vgl. dazu auch Abb. 78). Zu sehen sind die zwei Terrassen, über denen die Messung verlief, in deren Bereich jedoch keine eindeutigen Hohlformen zu erkennen sind. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

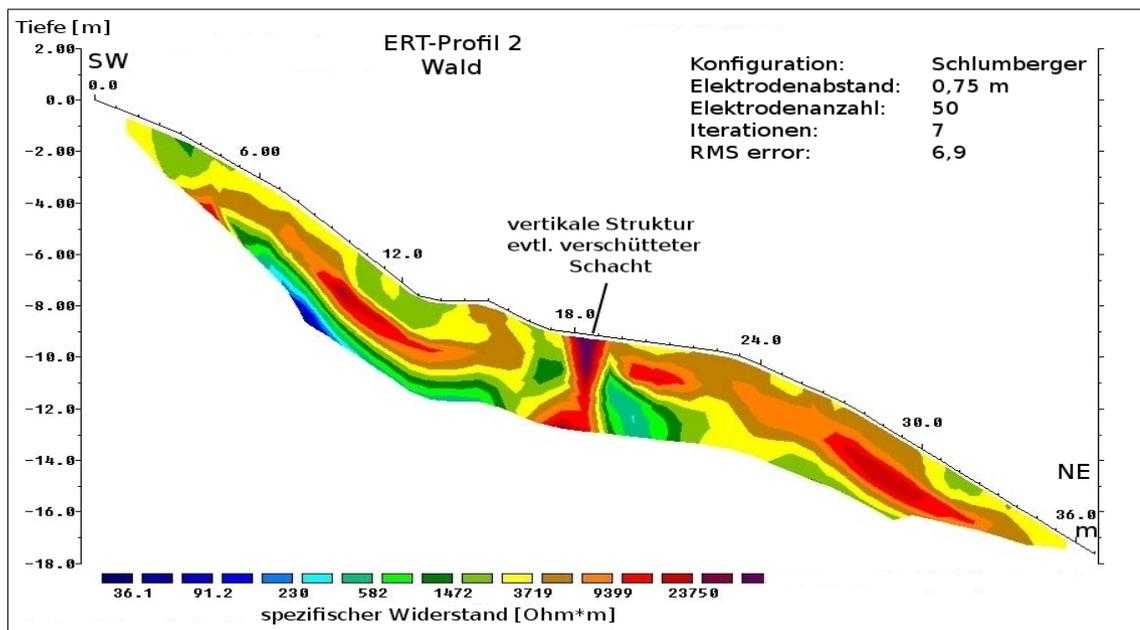


Abbildung 80: ERT-Profil 2 am Hang des Sackberges oberhalb des Grabungsgeländes im Grösseltal (vgl. dazu auch Abb. 78). Zu erkennen ist eine vertikale Struktur mit hohen Widerstandswerten im oberflächlich sichtbaren Terrassenbereich, bei der es sich eventuell um einen verschütteten Schacht handelt. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung; auch in GASSMANN ET AL. 2011, S. 115.

Da in diesem Gelände der Hangneigungswinkel an vielen Stellen 10° überschreitet, sind topographische Korrekturen hier unerlässlich (vgl. Kap. 2.1.5). Abbildung 81 zeigt das ERT-Profil 2 (vgl. Abb. 80) ohne Topographie-Informationen (oben), bei dem die Aufweitung der Schachtstruktur im unteren Bereich des Profils weniger stark auftritt. Die mögliche Ursache dafür soll mit Hilfe künstlich erstellter Modelle geklärt werden (siehe Kapitel 4.2.5). Da die Struktur hauptsächlich vertikal verläuft, wurde das gemessene Profil mit zwei erhöhten Werten für den vertikalen Flatness Faktor (vertical/horizontal flatness filter ratio = 2,0 bzw. 9,0) erneut berechnet (Abb. 81, Mitte und unten). Wird der Quotient erhöht, kann erreicht werden, dass vertikale Strukturen vom Programm deutlicher dargestellt werden (vgl. Kap. 2.1.5). Die Erhöhung des vertikalen Filters bewirkte eine Verringerung der Aufweitung der Schachtstruktur im unteren Bereich des Profils, jedoch auch eine Verstärkung der Bereiche seitlich der vertikalen Struktur mit eher geringen Widerstandswerten, bei denen es sich um Artefakte handeln könnte. Dies soll ebenfalls durch die Erstellung und Untersuchung theoretischer Modelle geklärt werden.

Eine dritte Messung wurde zwischen den beiden ersten durchgeführt (Abb. 82). Das ERT-Profil zeigt im Bereich der oberen Terrasse erhöhte Widerstandswerte ($\rho \geq 4233 \Omega m$) mindestens bis zur Profiltiefe (ca. 4 m). Bei diesem Bereich könnte es sich ebenfalls um einen Schacht oder eine Pinge mit vorgelagerter Abraumhalde handeln, die Struktur ist jedoch nicht so eindeutig wie in ERT-Profil 1.

In der Verlängerung des ersten Profils, oberhalb des Weges (vgl. Abb. 78), war ebenfalls oberflächlich eine Terrasse zu sehen, über die eine vierte Messung gelegt wurde. Bei dieser kleinen Terrasse scheint es sich jedoch nur um einen Windwurf zu handeln. Es lässt sich zumindest im ERT-Profil (vgl. Abb. B.18, Anhang) keine tiefer reichende Struktur im Terrassenbereich ausmachen, die auf einen Erzabbau schließen lässt.

Die fünfte Messung wurde an einem etwas weniger steilen Hangabschnitt in einer leichten Senke in direkter Linie oberhalb der Grabungsflächen im Grösseltal angelegt (vgl. Abb. 78). In diesem Hangbereich waren mehrere kleinere Terrassen im Gelände sichtbar, von denen zwei durch die Messung annähernd zentral geschnitten wurden. Im Bereich der oberen Terrasse ist eine inzwischen verfüllte Hohlform zu erkennen (Abb. 83), der hangabwärts eine Halde vorgelagert ist. Wenn diese Hohlform auf Erzabbau zurückzuführen ist, hat es sich dabei um oberflächennahe Erzgewinnung gehandelt, da kein tieferer Schacht zu erkennen ist. Dies könnte darauf schließen lassen, dass es sich dabei um ältere Abbauspuren handelt. Nach G. Gassmann liegen hier „möglicherweise die Spuren der Materialgewinnung, die zu den im Tal untersuchten keltischen Verhüttungsplätzen gehören“ (GASSMANN ET AL. 2011, S. 117). Um diese Hohlform genauer zu untersuchen, wurden weitere Messungen darüber durchgeführt. Das ERT-Profil 5b (Anhang, Abb. B.19, oben), welches ebenfalls über die obere Terrasse, jedoch in abweichender Richtung verlief, zeigt, dass es sich bei der Hohlform um eine leichte Vertiefung handelt, die in eine größere Abraumhalde übergeht. Auch im ERT-Profil 5c (Anhang, Abb. B.19, unten), welches über die untere Terrasse ebenfalls in abweichender Richtung verlief, zeigt sich im Terrassenbereich keine Einmündung mit erhöhten Widerstandswerten, wie sie bei der oberen Terrasse gefunden wurde. Um die Frage zu klären, ob es sich bei den gefunde-

nen Hohlformen tatsächlich um eisenzeitliche Abbauspuren handelt, sind umfangreiche archäologische Untersuchungen unumgänglich (GASSMANN ET AL. 2011).

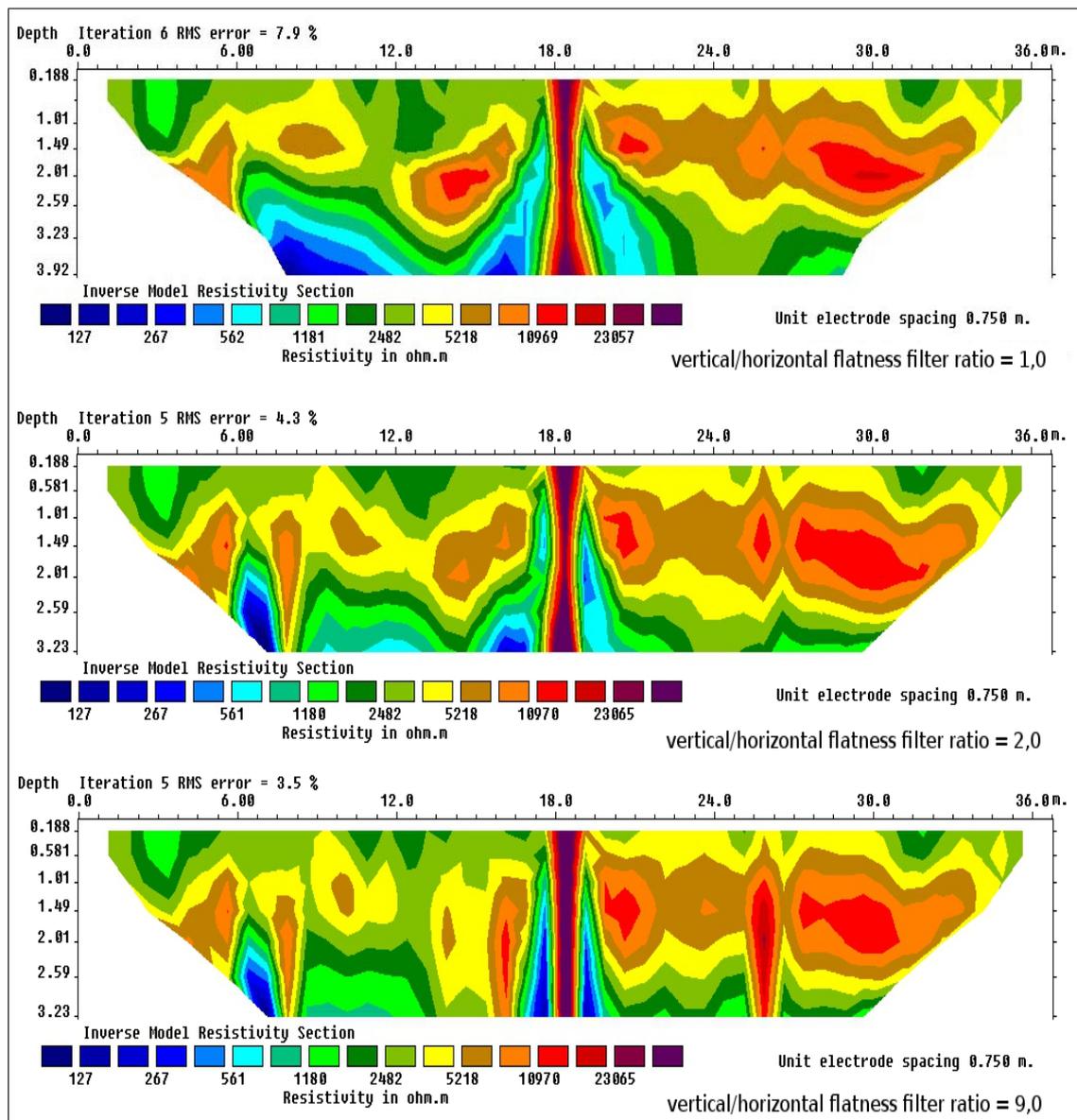


Abbildung 81: ERT-Profil 2 (vgl. Abb. 80) ohne Topographie-Information mit verschiedenen Werten für das Verhältnis des vertikalen zum horizontalen Filters: vertical/horizontal flatness filter ratio = 1,0 (oben), vertical/horizontal flatness filter ratio = 2,0 (Mitte) und vertical/horizontal flatness filter ratio = 9,0 (unten). Die vertikale Struktur tritt bei Erhöhung des vertikalen Filters deutlicher hervor und die Aufweitung im unteren Bereich wird verringert, jedoch werden auch die Artefakte seitlich der Struktur verstärkt. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

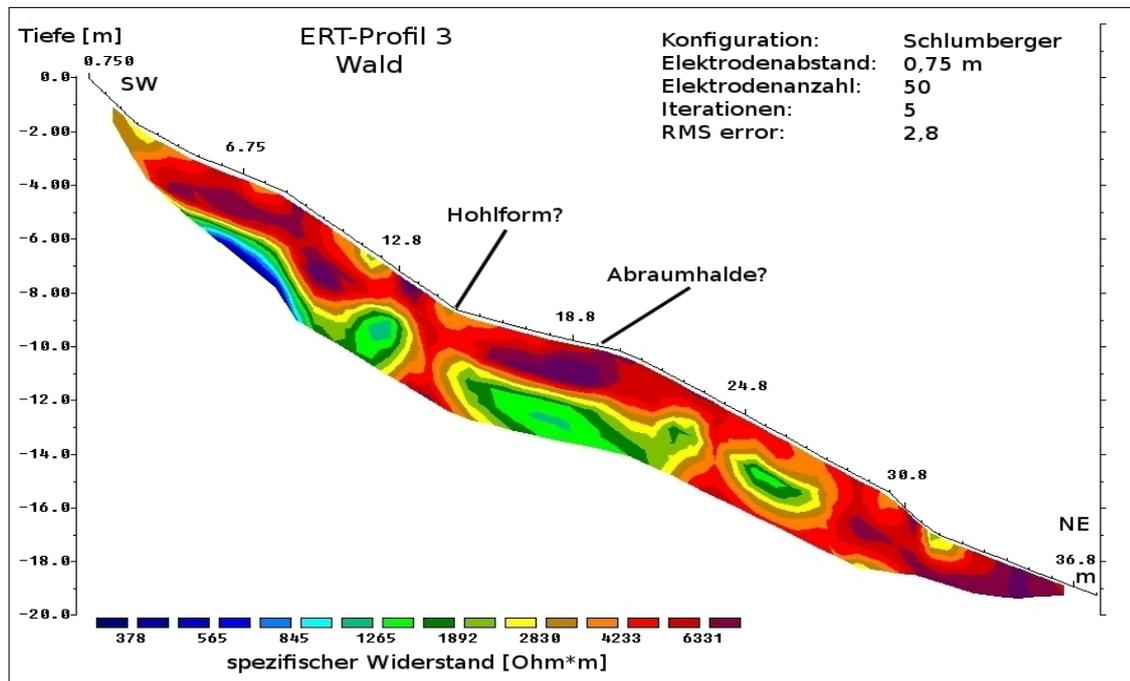


Abbildung 82: ERT-Profil 3 am Hang des Sackberges oberhalb des Grabungsgeländes im Grösseltal (vgl. dazu auch Abb. 78). Im oberen Terrassenbereich ist eine tiefer reichende Hohlform zu sehen, die jedoch nicht so deutlich als vertikale Struktur zu erkennen ist wie bei ERT-Profil 2 (vgl. Abb. 80). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

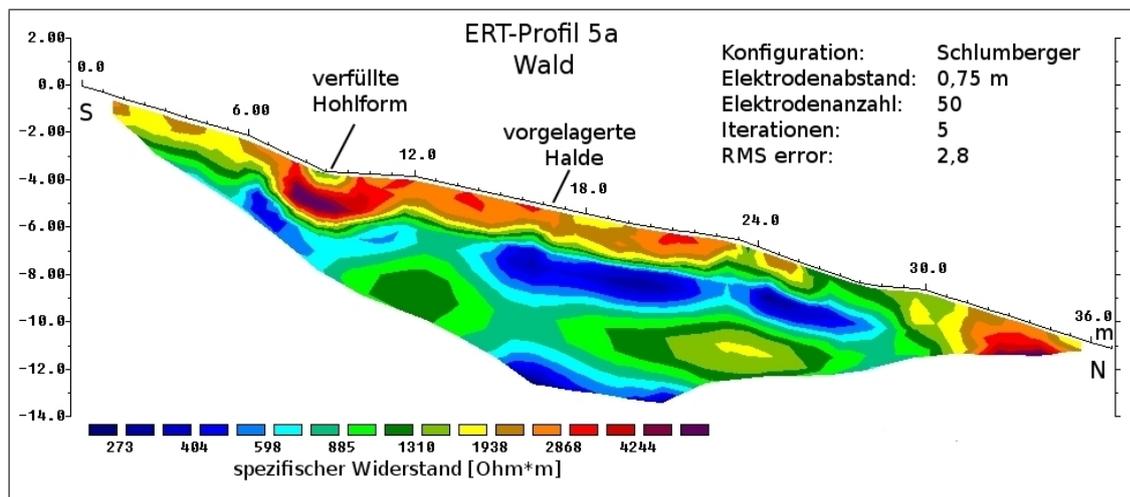


Abbildung 83: ERT-Profil 5a am Hang des Sackberges oberhalb des Grabungsgeländes im Grösseltal (vgl. dazu auch Abb. 78). Im Terrassenbereich ist eine inzwischen verfüllte Hohlform zu sehen, der eine Abraumhalde vorgelagert ist. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

4.2.5 Modellberechnungen verschiedener vertikaler Strukturen

Da bei den gemessenen Strukturen ohne nachfolgende archäologische Grabungen nicht geklärt werden kann, ob es sich um Schächte, Pingen oder sonstige Hohlformen handelt, wurden zu diesen Formen Modelle mit RES2MOD erstellt. Die Vergleiche dieser Modelle mit den real durchgeführten Messungen sollen zeigen, wie sich die verschiedenen vertikalen Strukturen in einem homogenen Untergrund im ERT-Profil darstellen und wie es zur Ausbildung von Artefakten seitlich der vertikalen Strukturen kommt. Es soll auch untersucht werden, wie sich eine Erhöhung des vertikalen Filters auf das Ergebnis der Inversion auswirkt. Für die verschiedenen vertikalen Strukturen und Hohlformen, wie sie bei den Messungen im Waldgebiet westlich oberhalb der Grabungsflächen erfasst worden waren, wurden jeweils Modelle erstellt. Simuliert wurden zwei unterschiedlich breite Schächte und eine Hohlform mit den drei oben verwendeten Konfigurationen. Ein Schacht hatte eine Breite von 3 m und einen Widerstandswert von $23000 \Omega m$ in einer Umgebung von $100 \Omega m$. Die Abbildungen 84, 85 und 86 zeigen für die drei Konfigurationen (Wenner, Dipol-Dipol und Schlumberger) jeweils das mit RES2MOD erstellte Modell des Schachtes und die Widerstandsverteilungen mit zwei unterschiedlichen Werten für das Verhältnis zwischen vertikalem und horizontalem Filter (vertical/horizontal flatness filter ratio = 1,0 bzw. 2,0). Bei der Simulation mit der Wenner-Konfiguration (Abb. 84) kommt es zu einer starken Aufweitung der vertikalen Struktur im unteren Bereich, wodurch auch der Eindruck entsteht, dass diese bereits in geringer Tiefe endet. Das erhaltene Ergebnis lässt keine eindeutige Interpretation als Schacht zu, es könnte sich ebenso um eine Schachtpinge, einen Graben oder eine andere Hohlform handeln. Bei der real durchgeführten Messung, die mit der Schlumberger-Konfiguration durchgeführt worden war, kam es zu einer Aufweitung im unteren Bereich, die durch die Verwendung eines erhöhten vertikalen Filters stark reduziert werden konnte (vgl. Abb. 81). Auch bei der simulierten Messung mit der Schlumberger-Konfiguration (Abb. 86) kommt es zu der Aufweitung im unteren Bereich, die Struktur des Schachtes ist aber noch deutlich zu erkennen. Auch bei der Modellberechnung bewirkte die Erhöhung des vertikalen Filters eine deutliche Verringerung der Aufweitung im unteren Bereich. Mit der Dipol-Dipol-Konfiguration (Abb. 85) erhält man ein Widerstandsmodell, welches die vorgegebene Form des Schachtes am genauesten wiedergibt. Die Erhöhung des vertikalen Filters führt hierbei im Widerstandsbild zu einem scharf begrenzten Schacht mit annähernd der vorgegebenen Breite. Nach KARDEIS (2009) besitzen sowohl die Schlumberger- als auch die Wenner-Konfiguration die Schwäche, dass sie schmale, vertikale Strukturen schlecht auflösen. Bei beiden kommt es zu Artefaktausbildungen in den Randbereichen. Ebendies wurde durch die hier durchgeführten simulierten Messungen bestätigt. Da die Schlumberger-Konfiguration jedoch nur relativ geringe Artefakte aufweist und die vertikale Struktur annähernd erfasst, rechtfertigt dies und vor allem der deutlich geringere zeitliche Aufwand den Einsatz dieser Konfiguration für die real durchgeführten Messungen.

4.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen und Messungen im Grösseltal bei Neuenbürg, Enzkreis

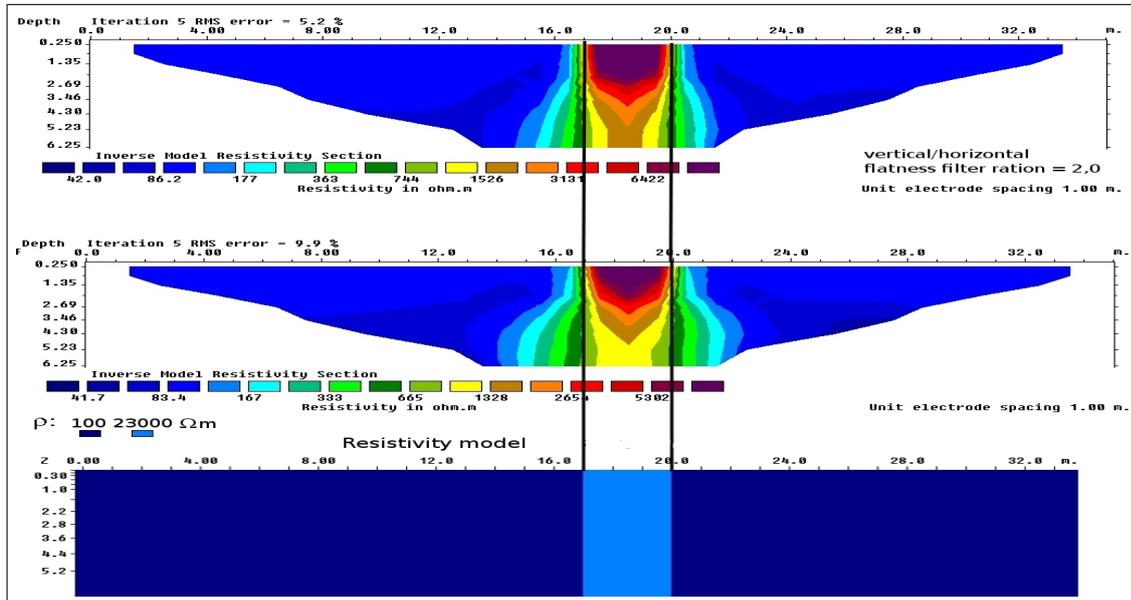


Abbildung 84: Mit RES2MOD erstelltes Modell eines 3 m breiten Schachtes (unten). Mit der Wenner-Konfiguration simulierte Widerstandsverteilungen ohne Erhöhung (Mitte) und mit Erhöhung des vertikalen Filters (2,0). Quelle: Eigene Darstellung.

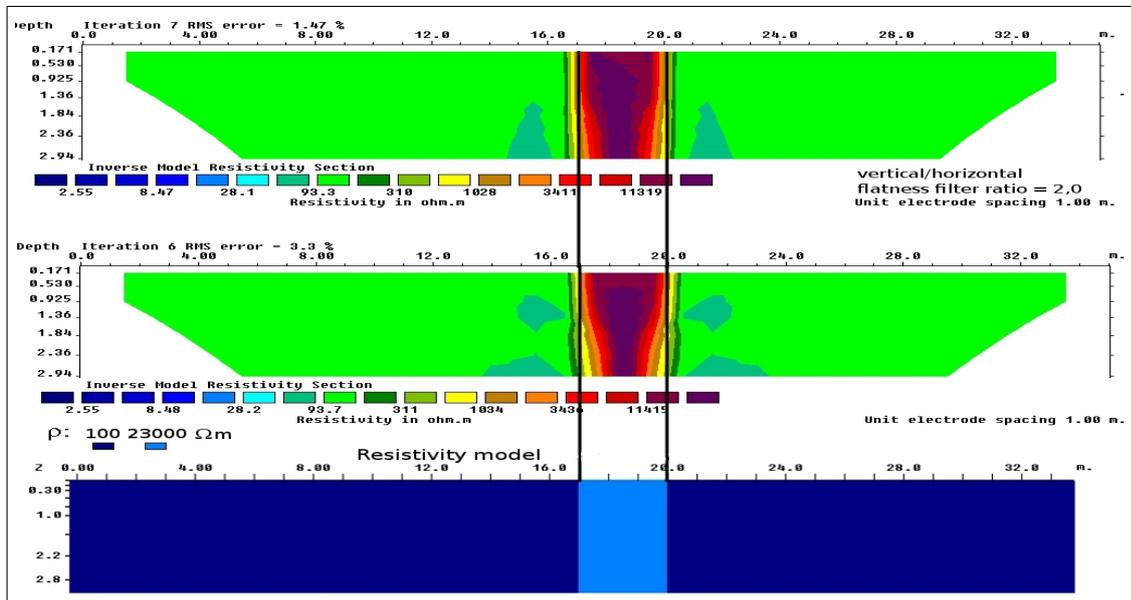


Abbildung 85: Mit RES2MOD erstelltes Modell eines 3 m breiten Schachtes (unten). Mit der Dipol-Dipol-Konfiguration simulierte Widerstandsverteilungen ohne Erhöhung (Mitte) und mit Erhöhung des vertikalen Filters (2,0). Quelle: Eigene Darstellung.

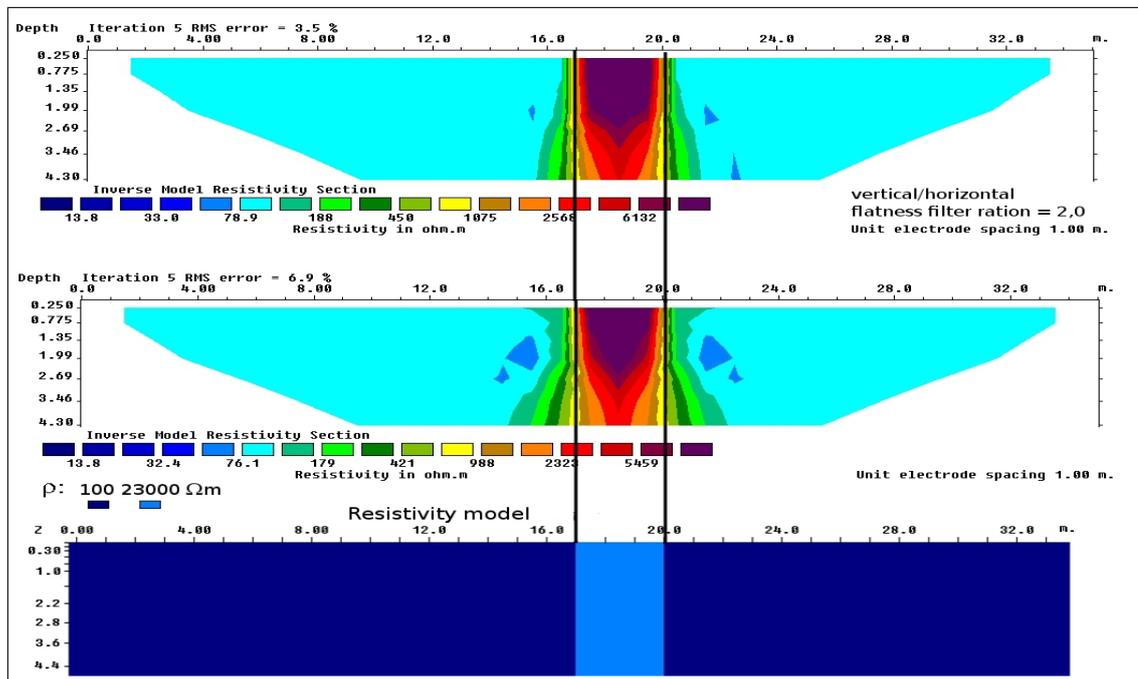


Abbildung 86: Mit RES2MOD erstelltes Modell eines 3 m breiten Schachtes (unten). Mit der Schlumberger-Konfiguration simulierte Widerstandsverteilungen ohne Erhöhung (Mitte) und mit Erhöhung des vertikalen Filters (2,0). Quelle: Eigene Darstellung.

Bei der Berechnungen des zweiten Schachtmodelles (0,5 m Breite) mit den drei Konfigurationen (vgl. Abb. 87) zeigt sich bei der Wenner-Konfiguration (a) eine starke Aufweitung des Schachtes im unteren Bereich, die sogar noch stärker ausfällt als bei dem breiteren Schacht. Die Berechnung mit der Dipol-Dipol-Konfiguration (b) führt zu einer starken Verzerrung des Schachtes und zu zahlreichen Artefakten seitlich des Grabens. Bei der Simulation mit der Schlumberger-Konfiguration (c) ist einerseits die Aufweitung im unteren Bereich nicht so stark wie bei der Wenner-Konfiguration, andererseits treten auch weniger Artefakte auf als bei der Dipol-Dipol-Konfiguration und keine Verzerrung. Da bei der real durchgeführten Messung über dem vermuteten Schacht (ERT-Profil 2; vgl. Abb. 80) die Schlumberger-Konfiguration verwendet wurde, helfen die Modellberechnungen (0,5 m und 3 m breiter Schacht), das ERT-Profil zu interpretieren. Da die Stelle nicht archäologisch untersucht wurde, ist nicht gesichert, dass es sich tatsächlich um einen Schacht handelt und wie breit er ist. Das ERT-Profil der realen Messung zeigt Ähnlichkeiten zum Modell-Profil des schmaleren Schachtes, an der Oberfläche scheint die Struktur eine Breite von ca. 0,75 bis 1 m zu haben.

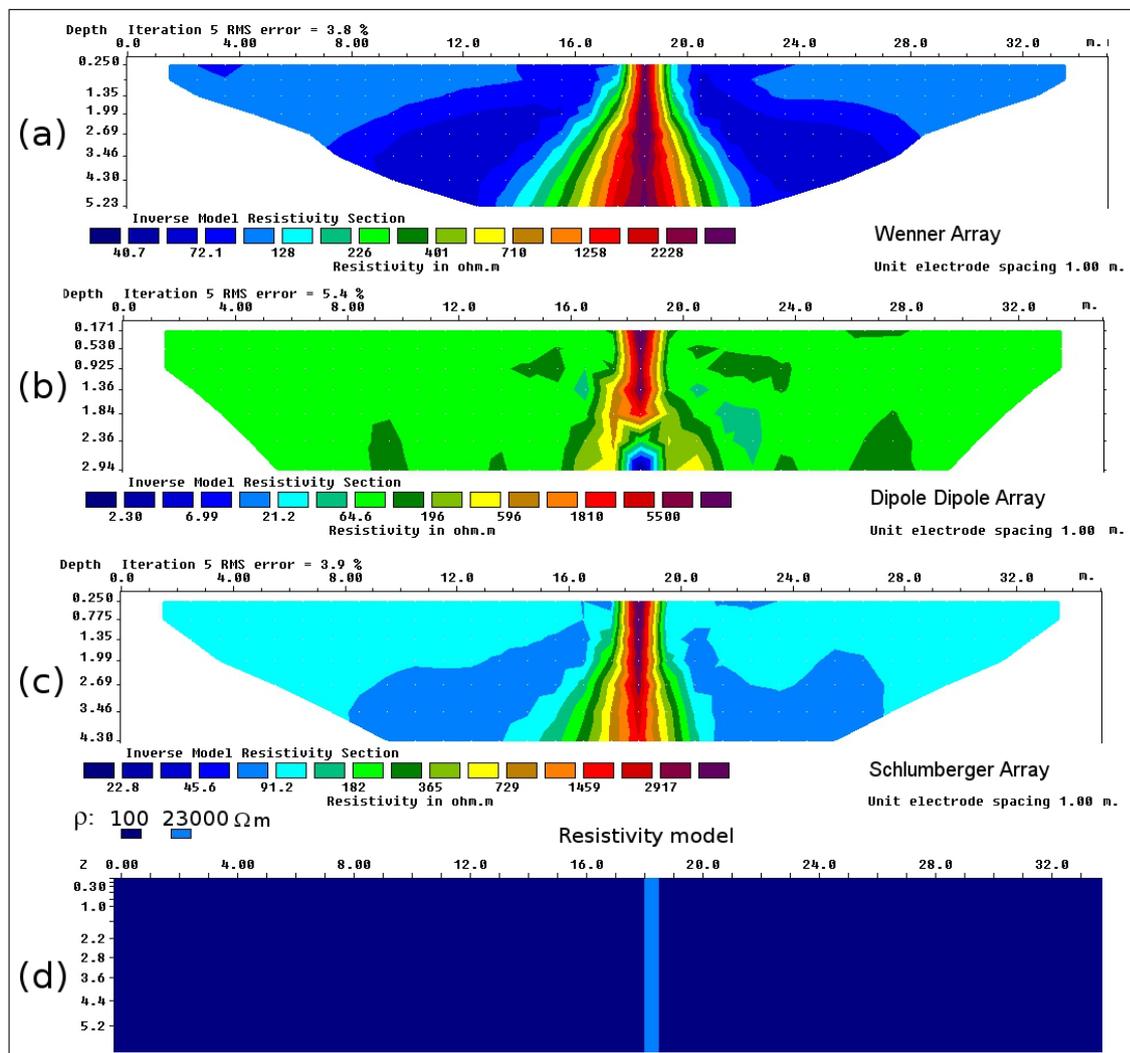


Abbildung 87: Mit RES2MOD erstelltes Modell eines 0,5 m breiten Schachtes (d) und die Widerstandsverteilungen simuliert mit der Wenner- (a), der Dipol-Dipol- (b) und der Schlumberger-Konfiguration (c). Die Berechnung mit der Dipol-Dipol-Konfiguration zeigt starke Verzerrungen, die besten Ergebnisse zeigt die Schlumberger-Konfiguration. Quelle: Eigene Darstellung.

Da bei einer der Messungen (vgl. Abb. 83) im Waldgebiet oberhalb des Grösseltals eine inzwischen verfüllte Hohlform vermutet wurde, wurde das Modell einer Hohlform mit einer oberen Breite von ca. 3 m und einer Tiefe von ca. 1,5 m mit RES2MOD erstellt und mit den drei Konfigurationen simuliert (Abb. 88). Die Widerstandsskalen im Modell waren dabei 10 Ωm für den Bereich außerhalb und 5000 Ωm für den Bereich innerhalb der Hohlform. Hierbei zeigen alle Konfigurationen ähnlich gute Ergebnisse. Die Tiefe der Hohlform wird in allen Fällen nur leicht überschätzt, die obere Breite und die Form werden gut erfasst. Alle Konfigurationen zeigen deutliche Artefaktausbildungen,

die bei der Wenner- (a) und der Schlumberger-Konfiguration (c) sehr ähnlich liegen und verlaufen. Bei der Dipol-Dipol-Konfiguration (b) sind sie stärker gestreut und weniger zusammenhängend als bei den anderen beiden Konfigurationen.

Die Struktur der Hohlform ist derjenigen des Spitzgrabens sehr ähnlich, nur liegen hier die Widerstandsverhältnisse umgekehrt. Hier weist der Bereich innerhalb der Struktur die größeren Widerstandswerte auf. Die Ergebnisse der Berechnung und vor allem die Artefakte weisen Ähnlichkeiten zu denjenigen beim Spitzgraben auf (vgl. Kap. 3.2.5).

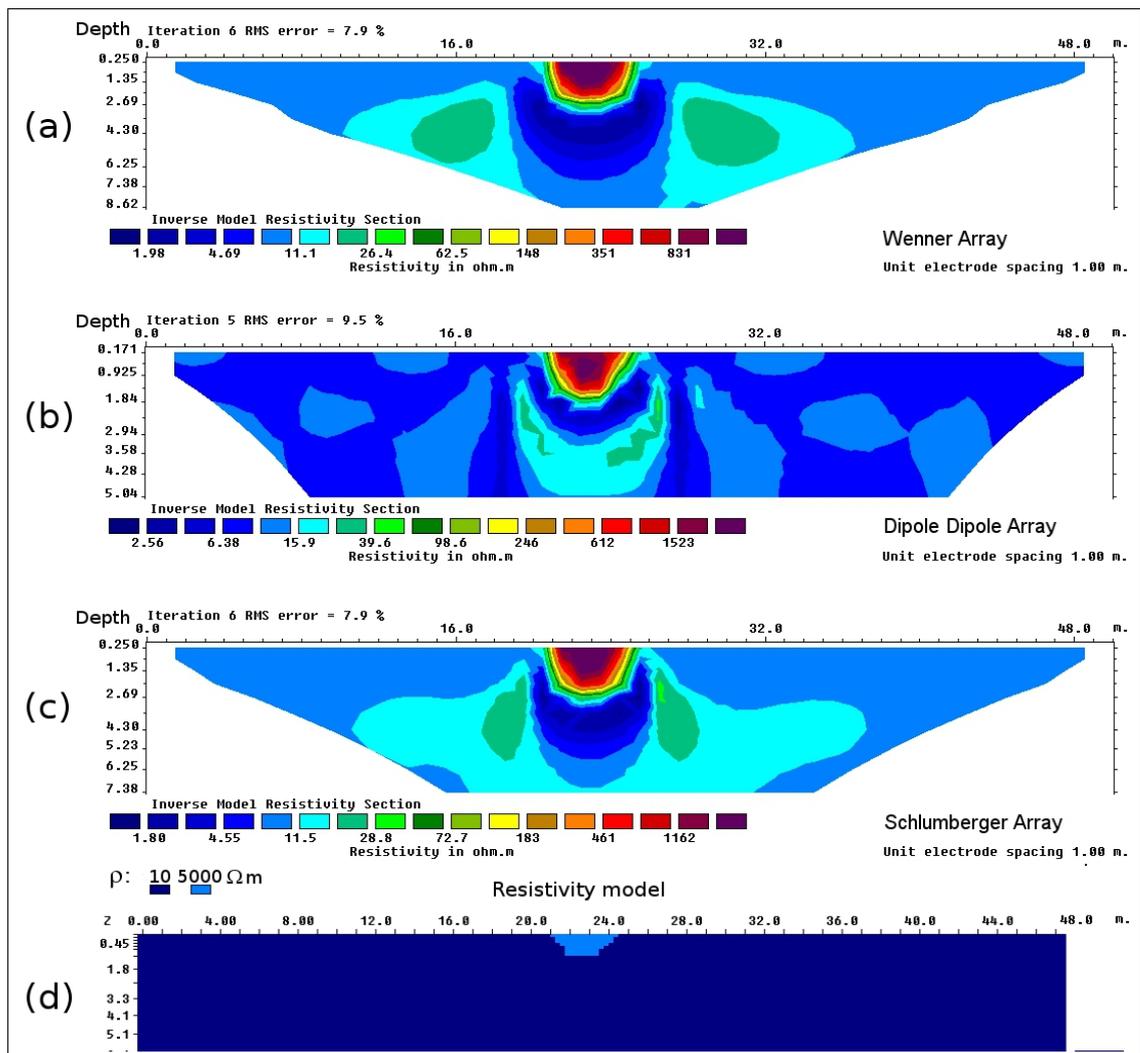


Abbildung 88: Mit RES2MOD erstelltes Modell einer Hohlform (d) und die Widerstandsverteilungen simuliert mit der Wenner- (a), der Dipol-Dipol- (b) und der Schlumberger-Konfiguration (c). Hierbei liefern alle drei Konfiguration ähnlich gute Ergebnisse. Quelle: Eigene Darstellung.

4.2.6 Zusammenfassung der Ergebnisse des Untersuchungsgebietes Grösseltal bei Neuenbürg (Enzkreis)

Im Untersuchungsgebiet Grösseltal bei Neuenbürg (Enzkreis) zeigten die bodenkundlichen Untersuchungen, dass der Standort stark anthropogen überprägt ist. Da bereits bekannt war, dass es sich hierbei um ein Gelände handelt, welches mindestens seit der Eisenzeit von Menschen genutzt wird (vgl. auch Kap. 4.1.2), war die anthropogene Prägung zu erwarten.

Es konnten zahlreiche Messungen im direkten Grabungsgelände durchgeführt werden. Die geoelektrischen Messungen und deren Vergleiche mit den archäologischen Profilskizzen oder auch dem Gesamtplan ergaben, dass bei der hier vorliegenden Befundlage eine Interpretation der ERT-Profile schwierig ist. Die Bereiche der Schlackenhalden lassen sich einigermaßen abgrenzen, es lassen sich jedoch Steinansammlungen nicht eindeutig davon unterscheiden. In Kombination mit der Geomagnetik, die im Ofenbereich zumeist relativ deutlich ausgeprägte magnetische Dipole zeigt, kann im geoelektrischen Profil auf die Lage eines Ofens geschlossen werden. Da bei den Messungen ein Ofen direkt geschnitten wurde, konnte gezeigt werden, dass er sich zwar im ERT-Profil erkennen lässt, jedoch nicht so eindeutig, dass eine zuverlässige Deutung als Rennofen oder eine Abschätzung seiner Ausdehnung möglich wäre. Jüngere Störungen ließen sich in den ERT-Profilen gut erkennen, was auch durch die Vergleiche mit den Grabungsbefunden bestätigt wurde.

Auch bei den Untersuchungen im Gebiet Grösseltal zeigte sich wieder, dass die Dipol-Dipol-Konfiguration die archäologischen Befunde am besten erfasste.

Die Untersuchung vereinfachter Modelle von Schlackenhalden ergab, dass die Tiefenausdehnung mit jeder der drei Konfigurationen deutlich überschätzt wurde. Das Auftreten von Artefakten erschwerte die Abschätzung der Ausdehnung der Schlackenhalden, wobei die Artefaktausbildung am schwächsten bei der Dipol-Dipol-Konfiguration auftrat. Die verschiedenen Bereiche der Schlackenhalden ließen sich bei der höher gelegenen Halde bei jeder der drei Konfigurationen deutlich voneinander abgrenzen. Bei der tiefer gelegenen Halde zeigte sich die Dreiteilung am deutlichsten bei der Dipol-Dipol-Konfiguration. Die Tiefe, in der die simulierten Schlackenhalden jeweils lagen, hatte einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der Geoelektrischen Widerstandstomographie. Die Widerstandsverteilung für das Modell einer Schlackenhalde, die direkt an der Oberfläche beginnt und nur geringe Tiefenausdehnung besitzt, unterscheidet sich deutlich von derjenigen einer tiefer gelegenen Halde. Die tiefer gelegene Halde zeigte bei den Modellberechnungen deutlich schlechtere Übereinstimmungen zwischen dem erstellten Modell und den Ergebnissen der Inversion. In beiden Fällen war die Tiefenabschätzung ungenau, die seitlichen Begrenzungen und die Dreiteilung der Halden wurde jedoch im Widerstandsmodell gut erfasst. Die Erhöhung des horizontalen Filters erbrachte eine geringe Verbesserung der Tiefenabschätzung. Mit der robusten Inversion wurde eine schärfere Begrenzung der Halde gegenüber ihrer Umgebung erreicht, jedoch auch keine zuverlässige Aussage zur Tiefenausdehnung.

Die Messungen im angrenzenden Waldgebiet, die zur Lokalisierung der zur Erzverhüttung im Grösseltal zugehörigen Abbauspuren dienten, bestätigten, dass die Methode der Geoelektrischen Widerstandstomographie gut geeignet ist, in topographisch schwierigem

Gelände mit Baumbewuchs verschüttete Schächte oder Pingen im Bereich oberflächlich sichtbarer Mulden bzw. Terrassen zu lokalisieren. Die unterschiedliche Art des Abbaus bzw. die unterschiedliche Abbautiefe lässt darauf schließen, dass der Abbau verschiedenen Zeiten zuzuordnen ist (GASSMANN ET AL. 2011). Ohne abschließende archäologische Grabungen lässt sich jedoch dazu keine weitere Aussage machen.

Anhand eines ERT-Profiles, welches eine deutlich vertikal orientierte Struktur, bei der es sich vermutlich um einen Abbauschacht handelt, zeigte, wurde die Auswirkung eines erhöhten vertikalen Filters untersucht. Dadurch verringerte sich die Aufweitung der vertikalen Struktur im unteren Profilbereich, es verstärkten sich jedoch die Artefakte seitlich der Struktur. Desweiteren wurde bei einer Messung eine inzwischen verfüllte Hohlform lokalisiert, bei der es sich um die Spuren älteren Erzabbaus handeln könnte (GASSMANN ET AL. 2011).

Die Erstellung vereinfachter Modelle zu vertikalen Strukturen und Hohlformen ermöglichte die Untersuchung verschiedener Einflüsse auf das Inversionsergebnis. Die Konfiguration, die sowohl die Schacht- als auch die Hohlformstruktur am besten erfasste, war die Schlumberger-Konfiguration, die größte Aufweitung der Schachtstruktur ergab sich mit der Wenner-Konfiguration. Bei der Modellberechnung des Schachtes ergab sich, dass die Verwendung eines erhöhten vertikalen Filters eine deutliche Verbesserung bei der Abgrenzung des Schachtes gegenüber seiner Umgebung brachte. Die Aufweitung im unteren Bereich konnte dadurch stark reduziert werden.

5 Zusammenfassung der Ergebnisse beider Untersuchungsgebiete im Vergleich und Ausblick

Die Untersuchung der Abbildung archäologischer Strukturen durch die Methode der Geoelektrischen Widerstandstomographie lieferte in den beiden Untersuchungsgebieten sehr unterschiedliche Ergebnisse. Zum einen waren die archäologischen Befunde sehr unterschiedlich, zum anderen lagen auch völlig andere Umgebungsbedingungen vor.

Die Untersuchungen an den beiden archäologischen Standorten ergaben, dass die Übergänge zwischen den verschiedenen geologischen Schichten, im ersten Untersuchungsgebiet Keuper bzw. Keuper-Fließerdunen, Löss und Kolluvien, im zweiten Untersuchungsgebiet Sandstein, Kolluvien und Auensedimente, gut durch die geoelektrischen Messungen erfasst wurden. Eine feinere Differenzierung z. B. verschiedener Bodenhorizonte war jedoch nicht möglich. Die direkten Vergleiche der geoelektrischen Messungen zu den vorliegenden archäologischen Befunden ergaben, dass sich der Spitzgraben der keltischen Viereckschanze in Sinsheim-Dühren gut durch die Methode der ERT erfassen ließ. Es zeigte sich auch, dass sich der Spitzgraben in der Lössumgebung sehr viel deutlicher im ERT-Profil erkennen ließ als in der Keuper- bzw. Keuper-Fließerdunenumgebung. In der Lössumgebung war sogar eine relativ genaue Aussage zur Erhaltungstiefe möglich, deren Genauigkeit hier im Dezimeterbereich lag. Einzelne archäologische Schichten bzw. Verfüllschichten des Grabens ließen sich jedoch nicht voneinander unterscheiden. Laboruntersuchungen zeigten, dass sie sich hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilungen nicht so stark voneinander unterscheiden, dass diese Unterschiede im geoelektrischen Profil sichtbar werden. Oft liegt die Ausdehnung einer archäologischen Befundschicht auch unterhalb der Auflösungsgrenze der ERT.

Die Methode der ERT erwies sich als weniger gut geeignet, um die teilweise eng miteinander verzahnten Befunde des eisenzeitlichen Verhüttungsplatzes im Grösseltal bei Neuenbürg (Enzkreis) zu identifizieren bzw. voneinander zu unterscheiden und abzugrenzen. In machen Fällen ließen sich Bereiche mit vergleichsweise höheren Widerstandswerten zwar den Schlackenhalde zuordnen, die gewünschte Tiefeninformation war jedoch nicht eindeutig, oft auch, da die Tiefenausdehnung der Befunde unterhalb der Auflösungsgrenze lag. Es ließ sich mit Hilfe der Methode zwar abschätzen, wo Befunde vorliegen könnten, da sich die Ausdehnung der Schlackenhalde jedoch im Magnetogramm auch sehr deutlich zeigte und dort auch die Lage der Rennöfen zu lokalisieren war, brachte die ERT in diesem Fall keinen entscheidenden Erkenntnisgewinn. Gut erkennen ließen sich jüngere Störungen im Bereich des Verhüttungsplatzes, die im Magnetogramm weniger deutlich hervortraten.

Die Untersuchungen vereinfachter, mit RES2MOD erstellter Modelle ergaben im Fall des Spitzgrabens, dass Artefakte, die seitlich des Grabens auftraten, durch die Inversionsroutine zustande kamen. Im Fall der verschiedenen Schlackenhalde zeigte sich, dass eine Tiefenaussage auch bei den Modellen nicht zuverlässig möglich war. Die Tiefenausdehnung der simulierten Halde wurde in allen Fällen überschätzt. Durch den Vergleich zweier unterschiedlich tief gelegener, simulierter Halde, zeigte sich, dass sich die durch RES2DINV erhaltenen Widerstandsmodelle abhängig von der Tiefenlage der

Halde stark unterschieden. Desweiteren bestätigten die Untersuchungen der Modelle, dass die Dipol-Dipol-Konfiguration am besten geeignet ist, sowohl den Spitzgraben einer Viereckschanze als auch die Befunde eines Erzverhüttungsplatzes zu erfassen. Am wenigsten geeignet erschien die Wenner-Konfiguration, die Schlumberger-Konfiguration kann als Kompromiss dienen, da sie vor allem den Vorteil der kürzeren Messzeit bietet. Die geoelektrischen Messungen, die durchgeführt wurden, um die zum keltischen Erzverhüttungsplatz zugehörigen Erzabbaustellen zu finden, ergaben, dass die Methode gut geeignet ist, um in steilem Gelände, auch mit Baumbewuchs, zufriedenstellende Ergebnisse zu liefern. Der Vergleich der Messergebnisse mit dazu erstellten vereinfachten Modellen zu verschiedenen Abbauspuren, wie z. B. Schächten oder sonstigen Hohlformen, zeigte Schwierigkeiten bei der Interpretation auf, die in solchen Fällen berücksichtigt werden müssen. Da die Topographie im Gelände oft nur abgeschätzt werden kann bzw. auch beim Einsatz von Hangneigungsmessern Ableseungenauigkeiten vorkommen können, stimmt die Topographie im ERT-Profil nie exakt mit der „echten“ überein. Bei vorwiegend vertikal orientierten Strukturen und sehr steilem Gelände sollte deswegen das ERT-Profil sowohl mit als auch ohne Topographiedaten betrachtet und interpretiert werden. Die Erhöhung des vertikalen Filters brachte bei der Berechnung der Schachtstruktur deutliche Verbesserungen. Außerdem zeigte sich, dass in solchen Fällen die Schlumberger-Konfiguration die besseren Resultate lieferte, da diese auch, neben der Wenner-Konfiguration, am besten geeignet ist, um vertikale Störkörper aufzulösen, mit dem zusätzlichen Vorteil der deutlich kürzeren Messzeit (vgl. dazu auch Kap. 2.1.4).

In beiden Untersuchungsgebieten wären weitere archäologische Grabungen wünschenswert, deren Ergebnisse mit bereits vorliegenden ERT-Profilen verglichen werden könnten. Im Untersuchungsgebiet Neuenbürg-Grösseltal wäre es interessant, die bislang nicht im Verlauf der archäologischen Grabungen erfassten Bereiche der Schlackenhalde bzw. den Bereich zwischen den bisher geöffneten Flächen durch weitere Grabungskampagnen zu untersuchen. Da der Bau einer Abwasserleitung durch das Gelände geplant ist, werden im Herbst 2012 weitere Grabungen im Gelände durchgeführt, um die Befunde dort weiter zu dokumentieren. Sehr interessant wären auch archäologische Ausgrabungen der Erzabbauspuren im Waldgebiet oberhalb des Grabungsgeländes Grösseltal, um auch dort direkte Vergleiche zu den Ergebnissen der geoelektrischen Messungen zu ermöglichen. Die Spurensuche zum zugehörigen Bergbau im angrenzenden Waldgebiet könnte durch zahlreiche weitere Messungen auf das gesamte Gebiet rund um den Schlossberg in Neuenbürg ausgedehnt werden. Da sich die Methode der ERT in diesem Gelände bewährt hat, wären auch Messungen auf den Terrassen des Schlossberges möglich, im Rahmen der Erforschung früherer Siedlungsaktivitäten in diesem Gebiet in Zusammenarbeit mit der Universität Straßbourg (BERNARD & WIELAND 2011).

Wichtig wären auch weitere Vergleiche zwischen Ergebnissen der Geoelektrischen Widerstandstomographie und noch anderen archäologischen Befunden, um die Interpretation von ERT-Profilen zu erleichtern und die Methode, die inzwischen in der Archäologie immer häufiger benutzt wird, noch besser an die Anforderungen anzupassen. Es könnte eine Sammlung an Vergleichsdaten geschaffen werden, die für eine Vielzahl archäologischer Befunde die Vor- und Nachteile der Methode der Geoelektrischen Widerstandstomo-

graphie abwägt, Vorschläge zur geeigneten Konfiguration bietet und die Grenzen der jeweiligen Tiefenabschätzung der Befunde aufzeigt. Durch eine Verbesserung der Tiefenvorhersage der archäologischen Befunde könnten zerstörungsfreie Messungen an machen Stellen die Grabungen ersetzen und dennoch zu einem Gesamtbild der Ausgrabungsstätte führen.

In diesem Zusammenhang könnten auch weitere Modelle zu den unterschiedlichsten archäologischen Befunden mit RES2MOD erstellt und mit RES2DINV daraus Inverse Modelle berechnet werden. Damit könnten weitere Stärken und Schwächen der unterschiedlichen Konfigurationen deutlich werden und Empfehlungen zur Wahl der Konfiguration für die entsprechende Fragestellung gegeben werden.

Auch wären weitere methodische Arbeiten sinnvoll, die die verschiedenen Parameter der Inversionsroutine systematisch untersuchen. Die Erstellung eines „Interpretationskatalogs“ für geoelektrische Messungen über archäologischen Strukturen wird nicht möglich sein, da die beeinflussenden Faktoren zu vielzählig sind und somit keine eindeutige Interpretation getroffen werden kann. Es können aber Hilfestellungen zur Interpretation gegeben werden, indem versucht wird, mögliche Fehlerquellen aufzudecken oder auch, indem weitere Grenzen der Methode aufgezeigt werden.

Literaturverzeichnis

- AG BODEN (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. verbesserte und erweiterte Auflage, Hrsg: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Geologische Landesämter in der BRD, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover, 392 S.
- ALAIÀ, R., PATELLA, D. & MAURIELLO, P. (2008): Application of geoelectrical 3D probability tomography in a test-site of the archaeological park of Pompei (Naples, Italy). *Journal of Geophysics and Engineering* **5**: 67-76.
- ARCHIE, G.E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Min., Met. und Petr. Eng.* **146**: 54-62.
- ASPINALL, A. & GAFFNEY, C. (2001): The Schlumberger array-potential and pitfalls in archaeological prospection. *Archaeological Prospection* **8**: 199-209.
- ATZEMOGLU, A., TSOURLOS, P. & PAVLIDES, S. (2003): Investigation of the tectonic structure of the NW part of the Amynteon Basin (NW Greece) by means of a vertical electrical sounding (VES) survey. *Journal of the Balkan Geophysical Society* **6** (4): 188-201.
- BARKER, R.D. (1992): A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface. *First Break* **10**, S. 53-62.
- BARSCHE, H., BILLWITZ, K. & BORK, H.R. (2000): Arbeitsmethoden in der Physiogeographie und Geoökologie. Ernst Klett Verlag, Stuttgart, 612 S.
- BEBLO, M. (1997): Umweltgeophysik. Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 465 S.
- BEESER J. (1990): Die keltischen Viereckschanzen. *Jahrbuch für schwäbisch-fränkische Geschichte*. **32**: 13-33.
- BENDER, F. (1985): Angewandte Geowissenschaften. Band 2. Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften. Enke Verlag, Stuttgart, 766 S.
- BERNARD, L. & WIELAND, G. (2011): Keltische Siedlungsspuren auf den Nordterrassen des Neuenbürger Schlossberges. In: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2010. Konrad Theiss Verlag GmbH, Stuttgart: 117-120.
- BICHLER, A., BOBROWSKY, P., BEST, M., DOUMA, M., HUNTER, J., CALVERT, T. & BURNS, R. (2004): Three-dimensional mapping of a landslide using multi-geophysical

-
- approach: the Quesnel Forks landslide. *Landslide* **1**: 29-40.
- BITTEL, K., SCHIEK, S. & MÜLLER, D. (1990): Die Keltischen Viereckschanzen. Atlas archäologischer Geländedenkmäler in Baden-Württemberg **1**. Stuttgart, 398 S.
- BÖRNER, R.U. (2005): Vorlesungsskript Geoelektrik. Technische Universität Bergakademie Freiberg. Institute of Geophysics and Geoinformatics. WS 2005/2006.
- BROYDEN, C.G. (1965): A Class of Methods for Solving Nonlinear Simultaneous Equations. *Mathematics of Computation (American Mathematical Society)* **19** (92): 577-593.
- BUDÄUS, K. (1996): Zweidimensionale geoelektrische Tomographie mit ausgewählten Beispielen aus dem Raum Osnabrück. Diplomarbeit an der Universität Osnabrück. Diplomstudiengang Angewandte Systemwissenschaft, 115 S.
- CAGLAR, I. & DUVARCI, E. (2001): Geoelectric structure of inland area of Gökova rift, southwest Anatolia and its tectonic implications. *Journal of Geodynamics* **31**: 33-48.
- CARA, M. (1994): Geophysik. Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 210 S.
- CARDARELLI, E. & FISCHANGER, F. (2006): 2D data modelling by electrical resistivity tomography for complex subsurface geology. *Geophysical Prospecting* **54**: 121-133.
- CARLÉ, W. (1950): Erläuterungen zur geotektonischen Übersichtskarte der Südwestdeutschen Großscholle. Stuttgart (Württ.Stat.L.-Amt), 31 S.
- CHOUKER, F. (2001): Archaeological site investigation by geoelectrical measurements in Tel-Halawi (northern Syria). *Archaeological Prospection* **8**: 257-263.
- CLARK, A. (1990): Seeing Beneath the Soil - Prospecting Methods in Archaeology. Batsford, London, 192 S.
- CONSTABLE, S.C., PARKER, R.L. & CONSTABLE, C.G. (1987): Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics* **52** (3): 289-300.
- DABAS, M., TABBAGH, A. & TABBAGH, J. (1994): 3-D Inversion In Subsurface Electrical Surveying-I. Theory. *Geophysical Journal International* **119**: 975-990.
- DAHLIN, T. & OWEN, R. (1998): Geophysical investigations of alluvial aquifers in Zimbabwe. Proceedings of the IV Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society (European Section), September, Barcelona: 151-154.

- DE GROOT-HEDLIN, C. & CONSTABLE, S. (1990): Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics* **55**: 1613-1624.
- DEY, A. & MORRISON, H.F. (1979): Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting* **27** (1): 106-136.
- 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.
- DÖRRER I. (1993): Kraichgau und Heilbronner Raum. In: BORCHERDT, C. (Hrsg.): Geographische Landeskunde von Baden-Württemberg. Schriften zur politischen Landeskunde Baden-Württembergs. Band **8**, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt: 251-272.
- 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.
- EBERL, B. (1932): Die Viereckschanze bei Olgishofen (Illertissen). *Das Schwäbische Museum* **8**: 49 ff.
- EDWARDS, L.S. (1977): A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics* **42**: 1020-1036.
- EGGERS, H.J. (1959): Einführung in die Vorgeschichte. Piper, München, 317 S.
- EICHLER, H. (2003): Der Kraichgauer Löß: Bodenerosion als Ressourcenproblem einer alten Kulturlandschaft. *Kraichgau* **30**, 62 S.
- EITEL, B. (1989): Morphogenese im südlichen Kraichgau unter besonderer Berücksichtigung tertiärer und pleistozäner Deckensedimente. *Stuttgarter Geographische Studien* Band **111**. Geographisches Institut der Universität Stuttgart, 205 S.
- EITEL, B. (2001): Bodengeographie. Das geographische Seminar. Westermann Schulbuchverlag GmbH, Braunschweig, 109 S.
- ELLIS, R. & OLDENBURG D.W. (1994): Applied geophysical inversion. *Geophysical Journal International* **116**: 5-11.
- FISCHER, F. (1986): Dühren. In: BECK, H. (Hrsg.): Reallexikon der Germanischen Altertumskunde **6**. de Gruyter, Berlin: 225-226.

-
- FLATHE, H. (1955): Possibilities and limitations in applying geoelectrical methods to hydrogeological problems in the coastal areas of Northwest Germany. *Geophysical Prospecting* **3**: 95-110.
- FRIEDEL, S., JACOBS, F., FLECHSIG, CH., REISSMANN, C. & BRUNNER, I. (1998): Large-scale DC resistivity imaging at Merapi volcano. In: ZSCHAU, J. & WESTERHAUS, M. (Hrsg.): Decade-volcanos under investigation. Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Sonderband III: 35-41.
- GABER, S., EL-FIKY, A.A., ABOU SHAGAR, A. & MOHAMADEN, M. (1999): Electrical resistivity exploration of the Royal Ptolemic Necropolis in the Royal Quarter of Ancient Alexandria, Egypt. *Archaeological Prospection* **6**: 1-10.
- GASSMANN, G. (1996): Untersuchung von Verhüttungsanlagen in Neuenbürg „Schnaizteich“, Enzkreis. In: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 1995. Konrad Theiss Verlag GmbH, Stuttgart: 155-158.
- GASSMANN, G. (2001): 2500 Jahre keltisches Eisenwesen im Neuenbürger Erzrevier. In: LORENZ, S. (Hrsg.): Der Nordschwarzwald - Von der Wildnis zur Wachstumsregion. Markstein Verlag für Kultur- und Wirtschaftsgeschichte, Filderstadt: 172-176.
- GASSMANN, G. (2006): Ein bisschen Zeit für Eisen - Vom Experimentieren mit nachgebauten Rennöfen. In: KEEFER, E. (Hrsg.): Lebendige Vergangenheit - vom archäologischen Experiment zur Zeitreise. Konrad Theiss Verlag GmbH, Stuttgart: 90-93.
- GASSMANN, G. & WIELAND, G. (2005): Frühkeltische Eisenproduktion im Nordschwarzwald: Rennöfen des 5. Jhds v. Chr. bei Neuenbürg-Waldrennach, Enzkreis. In: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2004. Konrad Theiss Verlag GmbH, Stuttgart: 102-107.
- GASSMANN, G. & WIELAND, G. (2006): Weitere Erkenntnisse zur frühkeltischen Eisenproduktion im Nordschwarzwald bei Neuenbürg-Waldrennach, Enzkreis. In: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2005. Konrad Theiss Verlag GmbH, Stuttgart: 97-101.
- GASSMANN, G. & WIELAND, G. (2007): Archäologische Untersuchung eines Schlackenhügels der späten Hallstatt- und Frühlatènezeit im „Hirschgarten“ bei Neuenbürg-Waldrennach, Enzkreis. In: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2006. Konrad Theiss Verlag

- GmbH, Stuttgart: 82-85.
- GASSMANN, G. & WIELAND, G. (2008a): Heißes Eisen beim kalten Herz - Keltische Eisenproduktion bei Neuenbürg im Nordschwarzwald. In: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): Denkmalpflege in Baden-Württemberg. *Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege* **37**, Jahrgang 3: 140-143.
- GASSMANN, G. & WIELAND, G. (2008b): Systematische Untersuchungen an Eisenproduktionsstätten der Späthallstatt- und Frühlatènezeit im Erzrevier von Neuenbürg, Enzkreis. In: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2007. Konrad Theiss Verlag GmbH, Stuttgart: 88-93.
- GASSMANN, G. & WIELAND, G. (2009): Weitere Untersuchungen zur frühkeltischen Stahlproduktion im Montanrevier von Neuenbürg, Enzkreis. In: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2008. Konrad Theiss Verlag GmbH, Stuttgart: 94-97.
- GASSMANN, G. & WIELAND, G. (2010): Fortsetzung der montanarchäologischen Untersuchungen im Grösseltal. In: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2009. Konrad Theiss Verlag GmbH, Stuttgart: 109-113.
- GASSMANN, G., HAUPTMANN, A., HÜBNER, CH., RUTHARDT, TH. & YALÇIN, Ü. (2005): Forschungen zur keltischen Eisenerzverhüttung in Südwestdeutschland. In: Regierungspräsidium Stuttgart, Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.): Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg. Band **92**. Verlags- und Redaktionsbüro Wais und Partner, Stuttgart, 168 S.
- GASSMANN, G., RÖSCH, M. & WIELAND, G. (2006): Das Neuenbürger Erzrevier im Nordschwarzwald als Wirtschaftsraum während der Späthallstatt- und Frühlatènezeit. *Germania* **84**: 273 ff.
- GASSMANN, G., MATTHES, B. & WIELAND, G. (2011): Vorläufiger Abschluss der montanarchäologischen Untersuchungen im Grösseltal bei Neuenbürg. In: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2010. Konrad Theiss Verlag GmbH, Stuttgart: 112-117.
- GEOLOG (2012): <http://www.geolog2000.de>. GEOLOG Fuß/Hepp GdB, Ingenieurbüro für Geophysik und Geologie. zuletzt abgefragt am 07.07.2012.
- GIUDICI, M. & ALFANO, L. (1997): Comparison between geoelectric and electromagne-

-
- tic sounding responses in volcanic areas. *Annali di Geofisica* **XL**: 287-295.
- GODIO, A. & BOTTINO, G. (2001): Electrical and electromagnetic investigation for landslide characterisation. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial and Planetary Science* **26** (9): 705-710.
- GOESSLER, P. (1952): Auf den Spuren altkeltischer Religionsübung in Süddeutschland. Neue Beitr. zur Archäologie und Kunstgeschichte Schwabens. Festschr. J. Baum, Stuttgart: 27 ff.
- GRABUNGSDOKUMENTATION GRÖSSELTAL (2008 bis 2010) der archäologischen Grabungen im Grösseltal bei Neuenbürg, im Rahmen des DFG-Projektes: *Das Neuenbürger Erzrevier im Nordschwarzwald als Wirtschaftsraum während der Späthallstatt- und Frühlatènezeit*, unveröffentlicht. Regierungspräsidium Karlsruhe, Referat 26 für Denkmalpflege und Landesamt für Denkmalpflege Esslingen.
- GRABUNGSDOKUMENTATION SINSHEIM-DÜHREN (2006 und 2008) der archäologischen Grabungen im Gewann „Steinbock“ bei Sinsheim Dühren, unveröffentlicht. Regierungspräsidium Karlsruhe, Referat 26 für Denkmalpflege.
- GREINWALD, S. & THIERBACH, R. (1997): Elektrische Eigenschaften der Gesteine. In: BEBLO, M. (Hrsg.): Umweltgeophysik. Ernst und Sohn, Berlin: 89-96.
- GRIFFITHS, D.H., TURNBULL, J. & OLAYINKA, A.I. (1990): Two-dimensional resistivity mapping with a computercontrolled array. *First Break* **8**: 121-129.
- GRUHNE, M. (1999): Überwachung von Untergrundkontaminationen mit Messungen der komplexen elektrischen Leitfähigkeit. Dissertation, Universität Leipzig. Schriftenreihe Proceedings des DGFZ e.V. Heft 16, 164 S.
- GUTHARDT, A. (1973): Caesar - Bellum Gallicum. Verlag Aschendorff, Münster Westfalen, 272 S.
- HECHT, S. (2007): Sedimenttomographie für die Archäologie - Geoelektrische und refraktionsseismische Erkundungen für on-site und off-site studies. In: WAGNER, G.A. (Hrsg.): Einführung in die Archäometrie. Springer, Heidelberg, Berlin, New York: 95-112.
- HECHT, S. & FASSBINDER, J. (2006): der Blick in den Untergrund: Magnetometrie und Geoelektrische Tomographie in der Geoarchäologie. *Geographische Rundschau* **58** (4): 38-45.
- HECHT, S., EITEL, B., SCHUKRAFT, G. & HERRMANN, K. (2008): Erkundung der

- Kladeos-Mauer im antiken Olympia mit Hilfe geoelektrischer Tomographien (2D/3D) - vorläufige Ergebnisse - (Messkampagne vom 7.-12.03.2005). In: Deutsches Archäologisches Institut (Hrsg): Bericht über die Ausgrabungen in Olympia. Bd. **13**. (Im Druck).
- HERBICH, T., MISIEWICZ, K. & TESCHAUER, O. (1997): Multilevel resistivity prospecting of architectural remains: the Schwarzach case study. *Archaeological Prospection* **4**: 105-112.
- HERRMANN L. & STAHR K. (2000): Einfluß der Landbewirtschaftung auf Boden und Landschaft - Beispiele aus dem Kraichgau. Exkursionsführer zur bodenkundlich-agrarökologischen Exkursion, VDLUFA-Tagung 18.-22.9.2000, Hohenheim.
- HYPERSOIL (2012): <http://www.hypersoil.uni-muenster.de>. zuletzt abgefragt am: 24.06.2012.
- IBRAHIM, E.H., SHERIEF, M.R. & AL-METWALLY, A.A. (1998): Shallow geophysical investigations on Tell el Farama, north-west Sinai, Egypt. *Archaeological Prospection* **5**: 91-100.
- JACOBS, F., DANCKWARDT, E., PETZOLD, G., BRUNNER, I., BEIER, H.J. & JÄGER, K.D. (1994): Geoelektrisch-tomographische Messungen an ortsfesten Bodendenkmalen. *Ausgrabungen und Funde* **39**: 169-179.
- JENSEN, I. (1986): Der Schlossberg von Neuenbürg - Eine Siedlung der Frühlatènezeit im Nordschwarzwald. In: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): *Materialhefte zur Archäologie in Baden-Württemberg* **8**. Konrad Theiss Verlag, Stuttgart, 173 S.
- JOHNSON, W. (2003): Applications of the Electrical Resistivity Method for Detection of Underground Mine Workings. *Geophysical Technologies for Detecting Underground Coal Mine Voids*. Lexington, Kentucky.
- JONGEN, S. (2006): Entwicklung schneller Löser für Randwertprobleme in der geoelektrischen Widerstandstomographie. Diplomarbeit, Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Festkörperforschung (IFF), 86 S.
- JUST, A., HELBIG, K., HEINSE, R., FLECHSIG, CH., JACOBS, F. & ENDLER, R. (2000): Messungen mit der Elektrischen In Situ Apparatur (ELISA) in der Ostsee. Proc. IX. Arbeitsseminar Hochauflösende Geoelektrik. Bucha/Sachsen, 4.-6.10.2000.
- KARDEIS, G. (2009): Evaluierung geoelektrischer Tiefensondierungen im Neogen und Pleistozän des nördlichen Burgenlandes. Diplomarbeit an der Universität Wien. Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie, 124 S.

-
- KELLER, G.V. & FRISCHKNECHT, F.C. (1966): Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon, Oxford: 117-119.
- KERTZ, W. (1992): Einführung in die Geophysik I. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg-Berlin-Oxford, 232 S.
- KNEISEL, C. (2003): Electrical resistivity tomography as a tool for geomorphical investigations - some case studies. *Zeitschrift für Geomorphologie Suppl.* Bd. **132**: 37-49.
- KNEISEL, C. (2004): New insights into mountain permafrost occurrence and characteristics in glacier forefields at high altitude through the application of 2D resistivity imaging. *Permafrost and Periglacial Processes* **15** (3): 221-227.
- KNEISEL, C. & HAUCK, C. (2003): Multi-method geophysical investigation of a sporadic permafrost occurrence. *Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge Suppl.* Vol. **132**: 145-159.
- KNÖDEL, K., KRUMMEL, H. & LANGE, G. (2005): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Bd. 3. Geophysik. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005.
- KRETZSCHMAR, R. (1984): Kulturtechn. - bodenkundliches Praktikum - Labormethoden. Institut für Wasserwirtschaft und Meliorationswesen, Uni Kiel.
- KROMER, B. (2007): Radiokohlenstoffdatierung. In: WAGNER, G.A. (Hrsg.): Einführung in die Archäometrie. Springer, Heidelberg, Berlin, New York: 3-10.
- LANGE, G. (2005): Gleichstromgeoelektrik. In: KNÖDEL, K., KRUMMEL, H. & LANGE, G. (Hrsg.): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Bd. 3. Geophysik. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Springer Verlag Berlin, Heidelberg: 128-173.
- LENGERT, D., KILLINGER, S. & BRENNER, C. (2001): Archäologische Funde - frühe Spuren der Besiedelung. In: LORENZ, S. (Hrsg.): Der Nordschwarzwald - Von der Wildnis zur Wachstumsregion. Markstein Verlag für Kultur- und Wirtschaftsgeschichte, Filderstadt: 26-34.
- LESER, H. (1977): Feld- und Labormethoden der Geomorphologie. 1. Aufl. Walter de Gruyter und co., Berlin, New York, 464 S.
- LOKE, M.H. (1995): User´s Manual: RES2DINV - Version 2.12. Malaysia.

- LOKE, M.H. (2002): RES2MOD ver. 3.01 - Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite-difference and finite-element methods. www.geoelectrical.com, 28 S.
- LOKE, M.H. (2010): Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. www.geoelectrical.com, 148 S.
- LOKE, M.H. (2011a): RES2DINVx32 ver. 3.71 - Rapid 2-D Resistivity and IP inversion using the least-squares method. www.geoelectrical.com, 152 S.
- LOKE, M.H. (2011b): RES3DINVx32 ver. 2.23 - Rapid 3-D Resistivity and IP inversion using the least-squares method. www.geoelectrical.com, 87 S.
- LOKE, M.H. & BARKER, R.D. (1995): Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics* **60**: 1682-1690.
- LOKE, M.H. & BARKER, R.D. (1996): Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* **44**: 131-152.
- LUBW (2012): <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de>. Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. zuletzt abgefragt am 07.07.2012.
- MATTHES, B., VON DER OSTEN-WOLDENBURG, H. & WIELAND, G. (2007): Geophysikalische, bodenkundliche und archäologische Prospektionen im Umfeld des jüngerlatènezeitlichen Prunkgrabes von Sinsheim-Dühren, Rhein-Neckar-Kreis. In: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 2006. Konrad Theiss Verlag GmbH, Stuttgart: 86-90.
- MAURIELLO, P., MONNA, D. & PATELLE, D. (1998): 3D geoelectric tomography and archaeological applications. *Geophysical Prospecting* **46**: 543-570.
- MAURITSCH, H.J., SEIBERL, W., ARNDT, R., RÖMER, A., SCHNEIDERBAUER, K. & SENDLHOFER, G.P. (2000): Geophysical investigations of large landslides in the Carnic Region of southern Austria. *Engineering Geology* **56** (3-4): 373-388.
- MCGILLIVRAY, P.R. & OLDENBURG, D.W. (1990): Methods for Calculating Fréchet Derivatives and Sensitivities for the Non-linear Inverse Problem: a Comparative Study. *Geophysical Prospecting* **38** (5): 499-524.
- MESCHEDE, D. (2010): Gerthsen Physik. 24. überarbeitete Auflage. Springer, Berlin Heidelberg, 1162 S.
- METZ, R. (1971): Mineralogisch-landeskundliche Wanderungen im Nordschwarzwald,

-
- besonders in dessen alten Bergbaurevieren. Vereinigung der Freunde der Mineralogie und Geologie (VFMG) e.V. Heidelberg, 516 S.
- MEYNEN, C. & SCHMITHÜSEN, J. (1962): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Band 1. Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung. Selbstverlag Bad Godesberg, 1340 S.
- MILITZER, H. & WEBER, F. (1985): Angewandte Geophysik 2: Geoelektrik - Geothermik - Radiometrie - Aerogeophysik. Springer Wien, Akademie-Verlag Berlin, 324 S.
- MILSOM, J. (1996): *Field Geophysics*. Wiley, Chichester, 187 S.
- MOHR, B. (1993): ‚Der Schwarzwald. In: BORCHERDT, C. (Hrsg.): Eine geographische Landeskunde von Baden-Württemberg. 3. überarb. und erw. Auflage. Landeszentrale für politische Bildung. Verlag W. Kohlhammer GmbH, Stuttgart: 155-191.
- MONTEIRO, S.F.A., ANDRADE, A.A.R. & MENDES, V.L.A. (1997): Study of the caves geothermal field using 3D resistivity modeling. *Journal of Applied Geophysics* **37**: 85-102.
- MUNDRY, E. (1985): Gleichstromverfahren. In: BENDER, F. (Hrsg.): Angewandte Geowissenschaften Band II: Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften. Enke, Stuttgart: 299-434.
- MUNSELL SOIL COLOR CHARTS (1975): Macbeth Division of Kollmorgen Corporation, Baltimore.
- NEIGHBOUR, T., STRACHAN, R. & HOBBS, B.A. (2001): Resistivity imaging of the linear earthworks at the Mull of Galloway, Dumfries and Galloway. *Archaeological Prospection* **8**: 157-162.
- NIST (2010): <http://physics.nist.gov>. zuletzt abgefragt am 06.07.2012.
- NITSCHKE, U. (1992): Petrophysikalische Bohrkernuntersuchungen mit transversalen Messkonfigurationen - Modellversuche zur räumlichen Bestimmung des elektrischen Widerstandes. Diplomarbeit, Universität Leipzig.
- NITSCHKE, U. & DANCKWARDT, E. (1992): Räumliche Bestimmung des elektrischen Widerstandes an Bohrkernen. Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG) **3**: 10-14.
- NOEL, M. (1991): Multielectrode Resistivity Tomography for Imaging Archaeology. *British Archaeological Reports*. Oxford.

- NOEL, M. & XU, B. (1991): Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophysical Journal International* **107**: 95-102.
- PAPADOPOULOS, N.G., TSOURLOS, P., TSOKAS, G.N. & SARRIS, A. (2006): Two-dimensional and Three-dimensional Resistivity Imaging in Archaeological Site Investigation. *Archaeological Prospection* **13**: 163-181.
- PARK, S.K. & VAN, G.P. (1991): Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes. *Geophysics* **56** (7): 951-960.
- PERRONE, A., IANNUZZI, A., LAPENNA, V., LORENZO, P., PISCITELLI, S., RIZZO, E. & SDAO, F. (2004): High-resolution electrical imaging of the Varco d'Izzo earthflow (southern Italy). *Journal of Applied Geophysics* **56** (1): 17-29.
- PINAR, R. & AKCIG, Z. (1997): Geophysical investigations at Kosemtug tumulus, Bandirma (northwest Turkey). *Archaeological Prospection* **4**: 15-23.
- POWELL, H.M., BARBER, D.C. & FREESTON, I.L. (1987): Impedance imaging using linear electrode arrays. *Clin. Phys. Physiol. Meas. Suppl. A* **8**: 109-118.
- PROTOKOLLE GELÄNDEPRAKTIKUM PHYSISCHE GEOGRAPHIE BEI NEUENBÜRG-GRÖSSEL-TAL (2008): SS 2008, WS 2008/2009. Geographisches Institut, Universität Heidelberg.
- PROTOKOLLE GELÄNDEPRAKTIKUM PHYSISCHE GEOGRAPHIE BEI SINSHEIM-DÜHREN (2006 bis 2008): SS 2006, WS 2006/2007, SS 2007, SS 2008. Geographisches Institut, Universität Heidelberg.
- POSSELT, M. & ZICKGRAF, B. (2012): <http://www.pzp.de>. Posselt & Zickgraf Prospektionen GbR. zuletzt abgefragt am: 20.Juni 2012.
- REICHENBERGER, A. (1991): Temenos - Templum - Nemeton - Viereckschanze. Bemerkungen zu Namen und Bedeutung. *Jahrbuch RGZM* **35**: 285 ff.
- REIMER, P.J. ET AL. (2004): IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 26-0 cal kyr BP. *Radiocarbon* **46** (3): 1029-1058.
- REINECKE, P. & BÖHNER, K. (1965): Mainzer Aufsätze zur Chronologie der Bronze- und Eisenzeit. Rudolf Habelt, Bonn, 156 S.
- REYNOLDS, J.M. (1997): An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons, Chichester, 806 S.

-
- RIZZO, E., CHIANESE, D. & LAPENNA, V. (2005): Magnetic, GPR and geoelectrical measurements for studying the archaeological site of Masseria Nirgo (Viggiano, southern Italy). *Near Surface Geophysics* **3** (1): 13-19.
- ROTHER, P. (2005): Die Geologie Deutschlands - 48 Landschaften im Porträt. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 224 S.
- SABELBERG, U. & LÖSCHER, M. (1978): Neue Beobachtungen zur Würmlöß-Stratigraphie südlich Heidelberg. - Beiträge zur Quartär- und Landschaftsforschung. Festschrift zum 60. Geburtstag von Julius Fink: 473-487.
- SASAKI, Y. (1992): Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting* **40**: 453-464.
- SCHAEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde: Schaeffer/Schachtschabel. 14., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Enke, Stuttgart, 510 S.
- SCHLUMBERGER (2012): <http://www.slb.com/about/history>. zuletzt abgefragt am 06.07.2012.
- SCHÖN, J. (1983): Petrophysik. Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen. Enke, Stuttgart, 405 S.
- SCHROTT, L. & HECHT, S. (2006): Potenziale geophysikalischer Methoden in der Geomorphologie. In: Deutscher Arbeitskreis für Geomorphologie (Hrsg.): Die Erdoberfläche, Lebens- und Gestaltungsraum des Menschen. *Zeitschrift für Geomorphologie* N.F. Suppl. Bd. **148**: 110-115.
- SCHROTT, L. & SASS, O. (2008): Application of field geophysics in geomorphology: Advances and limitations exemplified by case studies. *Geomorphology* **93**: 55-73.
- SCHUMACHER, K. (1889): Mittel -La Tene-Grab von Dühren. Abschrift durch SPOHN, J.. Philosophische Fakultät, Universität Tübingen, unveröffentlicht.
- SCHUMACHER, K. (1890): Ein gallisches Grab bei Dühren (ca. 200 v. Chr.). *Zeitschr. f. Gesch. d. Oberrheins N.F.* **5**: 409-424.
- SCHUMACHER, K. (1931): Dühren bei Sinsheim a. d. Elsenz : Bilder aus dem mehr als 5000jährigen Werdegang einer Siedlungsstätte im Neckarhügelland. Doll.
- Shima, H. & Sakayama, T. (1987): Resistivity Tomography: An Approach to 2-D Resistivity Inverse Problems. SEG Annual Meeting, October 11 - 15, 1987. New Orleans, Louisiana, 3 p.

- SIART, C. (2010): Geomorphologisch-geoarchäologische Untersuchungen im Umfeld der minoischen Siedlung von Zominthos. Ein Beitrag zur Erforschung der holozänen Landschaftsgeschichte Zentralkretas. *Heidelberger Geographische Arbeiten* **130**, 198 S.
- SMITH, N.C. & VOZOFF, K. (1984): Two-Dimensional DC Resistivity Inversion for Dipole-Dipole Data. *Geoscience and Remote Sensing. IEEE Transactions*: 21-28.
- SPOHN, J. (2008): Das spätkeltische Prunkgrab von Sinsheim-Dühren - ein Zeugnis sozialer „Eliten“ am Unterlauf des Neckars. In: KARL, R. & LESKOVAR, J. (Hrsg.): Interpretierte Eisenzeiten - Studien zur Kulturgeschichte von Oberösterreich. Tagungsbericht der 3. Linzer Gespräche zur interpretativen Eisenzeitarchäologie, Folge **22**: 65-80.
- STÖCKER, H. (1998): Taschenbuch der Physik. 3., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main.
- STORZ, H., STORZ, W. & JACOBS, F. (2000): Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust. *Geophys. Prosp.* **48**: 455-471.
- TÄSCHNER, D. (2008): Geophysik - Geoelektrik unter Wasser. Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, 89 S.
- TELFORD, W.M., GELDART, L.P. & SHERIFF, R.E. (1993): Applied Geophysics, Second Edition. Cambridge University Press, Cambridge, 792 S.
- TONKOV, N. (1996): Geophysical survey of tumuli in the Valley of the Kings, central Bulgaria. Prognosis and archaeological evidence. *Archaeological Prospection* **3**: 209-217.
- TRENKLE, H. & VON RUDLOFF, H. (1980): Das Klima im Schwarzwald. In: LIEHL, E. & SICK, W.D. (Hrsg.): Der Schwarzwald: Beiträge zur Landeskunde. Bühl: 59-100.
- TRIPP, A.C., HOHMANN, G.W. & SWIFT, C.M. (1984): Two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics* **49** (10): 1708-1717.
- TSOURLOS, P. (1995): Modelling interpretation and inversion of multielectrode resistivity survey data. Unpublished PhD thesis, University of York.
- ULLRICH, B., MEYER, C. & WELLER, A. (2007): Geoelektrik und Georadar in der archäologischen Forschung: geophysikalische 3D-Untersuchungen in Munigua (Spanien). In: WAGNER, G.A. (Hrsg.): Einführung in die Archäometrie. Springer, Heidelberg, Berlin, New York: 75-93.

-
- VAFIDIS, A., SARRIS, A., SOURLAS, G. & GANIATSOS, Y. (1999): Two and three dimensional electrical tomography investigations in the archaeological site of Itanos, Crete, Greece. Second Balkan Geophysical Congress and Exhibition, Istanbul, 5.-9. July.
- VON DER MÜHLL, D. (1993): Geophysikalische Untersuchungen im Permafrost des Oberrengadins. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*. ETH Zürich **122**, 222 S.
- WAGNER, E. (1911): Fundstätten und Funde aus vorgeschichtlicher, römischer und alamannisch-fränkischer Zeit im Großherzogtum Baden Das badische Unterland: Kreise Baden, Karlsruhe, Mannheim, Heidelberg, Mosbach, Band 2. Mohr, 480 S.
- WEIDELT, P. (2005): Grundlagen der Geoelektrik. In: KNÖDEL, K., KRUMMEL, H. & LANGE, G. (2005): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Bd. 3. Geophysik. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Springer, Berlin, Heidelberg: 65-94.
- WETZEL, K.F., SASS, O. & VON RESTORFF, C. (2006): Mass Movement Processes in unconsolidated Pleistocene Sediments - A Multi-Method Investigation at the Hochgraben (Jenbach/Upper Bavaria). *Erdkunde*, Band **60**: 246-260.
- WIELAND, G. (1995): Die spätkeltischen Viereckschanzen in Süddeutschland - Kultanlagen oder Rechteckhöfe?. In: HAFFNER, A. (Hrsg.): Heiligtümer und Opferkulte der Kelten. *Archäologie in Deutschland, Sonderheft 1995*, Stuttgart: 85 ff.
- WIELAND, G. (1996): Die Spätlatènezeit in Württemberg. Forschungen zur jüngeren Latènekultur zwischen Schwarzwald und Nördlinger Ries. *Forsch. und Ber. zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg* **63**. Theiss Verlag GmbH, Stuttgart, 459 S.
- WIELAND G. (1999): *Keltische Viereckschanzen - Einem Rätsel auf der Spur*. Theiss Verlag GmbH, Stuttgart, 221 S.
- WILHELMI K. (1830): Beschreibung der vierzehnen alten Deutschen Todtenhügel. Verlag von Joseph Engelmann, Heidelberg, 182 S.
- XU, B. & NOEL, M. (1993): On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity survey. *Geophysical Prospecting* **41**: 791-801.
- ZICKGRAF, B. (1999): Naturwissenschaft und Technologie - Band 2 - Geomagnetische und geoelektrische Prospektion in der Archäologie - Systematik, Geschichte, Anwen-

dition. Verlag Marie Leidorf GmbH, Rahden/Westf, 221 S.

verwendete Karten:

GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.) (1962): Geologische Übersichtskarte von Baden-Württemberg 1:200000, 4. Auflage 1962, unv. Neudruck der 2. Auflage aus dem Jahr 1948.

GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.) (1982): Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden 1:25000, Birkenfeld 7117.

GROSSHERZOGLICHE BADISCHE GEOLOGISCHE LANDESANSTALT (Hrsg.) (1895): Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden 1:25000, Sinsheim 6719, Blatt 42, abgeschlossen im Herbst 1895.

GROSSHERZOGLICHE BADISCHE GEOLOGISCHE LANDESANSTALT (Hrsg.) (1902): Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Baden 1:25000, Wiesloch 6718, Blatt 41, II. Auflage, abgeschlossen im Herbst 1902.

LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG, AUSSENSTELLE KARLSRUHE (Hrsg.) (1977): Deutsche Grundkarte 1:5000, Dühren Südwest, Blatt 6718.24.
Zusatz: ©Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (www.lgl-bw.de), 20.11.2012, Az.: 2851.3-A/703.

LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.) (1991): Topographische Karte 1:25000, Wiesloch 6718.

LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.) (1991): Topographische Karte 1:25000, Sinsheim 6719.

LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.) (2006): Top 50, Version 4, CD-ROM.

A Anhang Untersuchungsgebiet Sinsheim-Dühren

A.1 Schürfgruben

Tabelle A.1: Ergebnisse der Laboranalysen der Proben aus der Schürfgrube P1 (Abb. 20). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

P1: Pararendzina, R 3487690, H 5455509							
Tiefe [cm]	Horizont	m_{org} [%]			m_{Kalk} [%]		Bodenart
		H_2O_2	Glühverlust	Feld	Glühverlust	Feld	
0 - 10	Ah	4,35	10,75	2 - 8	11,11	2 - 10	Ts2
10 - 25	Ap	0,88	7,74	0	10,43	7 - 10	Lt3
50 - 60	ICv	0	5,96	0	37,02	10 - 25	Uls

Tabelle A.2: Korngrößenverteilung der Proben aus der Schürfgrube P1 (Abb. 20). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

P1: Pararendzina, R 3487690, H 5455509								
Tiefe [cm]	fG [%]	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]
0 - 10	0,61	0,45	0,70	3,25	15,11	14,63	13,97	51,33
10 - 25	0,51	0,76	1,25	8,13	14,93	17,70	13,68	43,09
50 - 60	1,42	4,11	3,21	12,98	24,35	25,37	13,94	14,64

Tabelle A.3: Ergebnisse der Laboranalysen der Proben aus der Schürfgrube P2 (Abb. 21). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

P2: Kolluvisol, R 3487778, H 5455469							
Tiefe [cm]	Horizont	m_{org} [%]			m_{Kalk} [%]		Bodenart
		H_2O_2	Glühverlust	Feld	Glühverlust	Feld	
0 - 10	Ah	2,78	5,41	4 - 8	4,29	0	Ut4
25 - 35	M	0,47	2,85	0	3,34	0	Ut4
65 - 75	IIM	0,06	1,93	0	2,91	0	Ut3

Tabelle A.4: Korngrößenverteilung der Proben aus der Schürfgrube P2 im Gewinn „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (Abb. 21). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

P2: Kolluvisol, R 3487778, H 5455469								
Tiefe [cm]	fG [%]	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]
0 - 10	0,81	1,24	1,81	6,89	43,77	20,83	6,06	18,66
25 - 35	1,41	2,01	2,93	7,89	45,06	19,64	5,51	16,59
65 - 75	0,30	1,85	2,30	5,70	45,81	21,91	6,81	15,26

Tabelle A.5: Ergebnisse der Laboranalysen der Proben aus der Schürfgrube P3 im Gewinn „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (Abb. 22). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

P3: Parabraunerde, R 3487740, H 5455493							
Tiefe [cm]	Hori-zont	m_{org} [%]			m_{Kalk} [%]		Bodenart
		H_2O_2	Glühverlust	Feld	Glühverlust	Feld	
0 - 10	Ah	3,16	6,63	2 - 8	6,10	0	Tu3
20 - 30	Bt	0,35	4,12	0	6,18	0	Lu
70 - 80	IC	0,04	1,40	0	33,20	10 - 25	Ut2

Tabelle A.6: Korngrößenverteilung der Proben aus der Schürfgrube P3 im Gewinn „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (Abb. 22). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

P3: Parabraunerde, R 3487740, H 5455493									
Tiefe [cm]	fG [%]	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]	
0 - 10	0,24	0,57	1,04	2,92	41,29	17,82	5,42	30,67	
20 - 30	0,21	4,80	1,30	3,96	40,30	16,26	4,33	28,81	
70 - 80	0,11	0,67	1,38	3,18	51,94	25,94	4,95	11,87	

Tabelle A.7: Ergebnisse der Laboranalysen der Proben aus der Schürfgrube P4 im Gewinn „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (Abb. 23). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

P4: Pelosol, R 3487644, H 5455481							
Tiefe [cm]	Hori-zont	m_{org} [%]			m_{Kalk} [%]		Bodenart
		H_2O_2	Glühverlust	Feld	Glühverlust	Feld	
0 - 20	Ah/Ap	2,58	6,70	4 - 8	7,94	0 - 0,5	Tu2
20 - 40	P	0	4,10	4 - 8	13,52	0	Tu2

Tabelle A.8: Korngrößenverteilung der Proben der Schürfgrube P4 im Gewinn „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (Abb. 23). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

P4: Pelosol, R 3487644, H 5455481									
Tiefe [cm]	fG [%]	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]	
0 - 20	0,05	1,67	2,03	5,24	16,29	13,81	14,02	46,86	
20 - 40	0,06	0,26	3,27	7,93	14,31	13,85	11,80	48,52	

Tabelle A.9: Feldbestimmungen der Schürfgruben P6 bis P40 im Gewinn „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (vgl. auch Abb. 17). Quelle: Eigene Darstellung; Daten aus PROTOKOLLE GELÄNDEPRAKTIKUM PHYSISCHE GEOGRAPHIE BEI SINSHEIM-DÜHREN (2006 bis 2008).

P6: (initiale) Braunerde, R3487611, H 5455490							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 20	Ah/Ap	–	Ut2/3	10YR4/4	Subpolyeder	0,5 - 2	1 - 2
20 - 30	Bv	–	Ut2/3	10YR4/4	Subpolyeder	2 - 10	0
30 - 50	1C	–	Ut2	10YR5/4	Kohärent	10 - 25	0
50 - 80	IIC	–	Tu3/4	10YR3/4	Kohärent	2 - 10	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 20	Horizont diffus						
20 - 30	Ziegelstücke, Wurzelgänge						
30 - 50	hoher Lössanteil, Schneckenschalen, sandig, feinkiesig						
50 - 80	Keuper-Fließerde						
P7: Pararendzina, R 3487597, H 5455503							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 20	Ah/Ap	7,7	Ut2/3	10YR4/3	Krümel	10 - 25	2 - 4
20 - 56	1C	7,9	Ut2/3	10YR5/4	Kohärent	10 - 25	0,5 - 1
56 - 79	IIC	7,5	Ut4	5YR4/3	Kohärent	10 - 25	0
79 - 90	IIIC	7,9	Uu	10YR5/6	Kohärent	10 - 25	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 20	Ziegelstücke (2,5YR4/8), Grabgänge bis 31 cm (Krotowinen)						
20 - 56	Löss mit Keupermergeln (sekundär, solifluidal) → Fließerde						
56 - 79	rötlich-brauner Keuper, starke Carbonatausfällungen in Wurzelgängen						
79 - 90	Löss mit Lössschnecken						
P8: Pararendzina, R 3487581, H 5455518							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 25	Ah/Ap	7,4	Lt	10YR3/3	Krümel	2 - 10	2 - 4
25 - 75	1C	7,8	Us, Tl	10YR5/4	Kohärent	10 - 25	0
75 - 240	IIIC	7,8	Us	10YR5/4	Kohärent	10 - 25	0
> 240	IIC	7,8	Uls	2,5Y5/4	Kohärent	2 - 10	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 25	Ziegelstücke						
25 - 75	Löss-Keuper-Fließerde (→ Solifluktionsschicht), Lössschnecken						
75 - 240	verstärkt Lössschnecken						
> 240	verschiedenfarbige Keupermergel (rot, grau, oliv)						
P9: Kolluvisol, R 3487568, H 5455491							

Tabelle A.9: Fortsetzung

Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]	
0 - 25	Ah/Ap	7,4	Ut2	10YR3/3	Krümnel	10 - 25	2 - 4	
25 - 75	M	7,7	Ts	10YR5/4	Kohärent	10 - 25	0 - 1	
75 - 130	IIM	7,8	Ut3/4	10YR4/4	Kohärent	10 - 25	1 - 2	
130 - 175	IIIM	–	Ut2/3	10YR5/4	Kohärent	10 - 25	0	
175 - 215	IVM	–	Ls2/3	10YR5/4	Kohärent	10 - 25	0	
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale							
0 - 25	Ziegelstücke							
25 - 75								
75 - 130	Lössschnecken							
130 - 175								
175 - 215	Rostflecken (10YR4/6)							
P10: Pelosol, R 3487692, H 5455534								
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]	
0 - 20	Ah	–	Lt	10YR3/3	Kohärent	0	4 - 8	
20 - 40	P	–	Tl	10YR5/3	Kohärent	0	0	
> 40	C	–	Tl	10YR5/3	Kohärent	7 - 10	0	
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale							
0 - 20	Bioturbation							
20 - 40	verwitterter Gipskeuper, Quell- und Schrumpfdynamik							
> 40	Keuper-Fließerde							
P11: Pararendzina, R 3487696, H 5455551								
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]	
0 - 22	Ap	–	Tu4	10YR3/3	Polyeder	0,5 - 2	1 - 2	
22 - 50	lC	–	Ut2	10YR4/4	Kohärent	1 - 2	0	
50 - 65	IIC	–	Uls	2,5Y5/4	Kohärent	25 - 50	0	
				10R4/6		–		0,5 - 2
				5Y6/1		–		0,5 - 2
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale							
0 - 22								
22 - 50	Mn- und Fe-Konkretionen, gelbe Aggregate (2,5Y5/4), stark carbonathaltig							
50 - 65	Keupermergel							
P12: Pararendzina-Pseudogley, R 3487680, H 5455577								
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]	
0 - 35	Ap	7		10YR4/3	Kohärent		1 - 2	
35 - 55	lC	–	Ul	10YR5/4	Kohärent	10 - 25	0	
55 - 65	Sw	–	Lt2/3		Kohärent		0	

Tabelle A.9: Fortsetzung

65 - 70	IISd	-	Lt2/3		Kohärent		0
> 70	IIC	-					0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 35							
35 - 55	lösshaltig						
55 - 65	starke Marmorierung (Pseudovergleyung), Nassbleichung, Rostfleckigkeit						
65 - 70	Keupermaterial (stauend)						
> 70	vereinzelt Sandsteine → solifluidale Prozesse						
P13: Pararendzina, R 3487671, H 5455601							
Tiefe [cm]	Hori- zont	pH- Wert	Boden- art	Boden- farbe	Gefügeform	Carbonat- gehalt [%]	Humus- gehalt [%]
0 - 14	Ah	-	Lu	10YR3/3	Kohärent	0	1 - 2
14 - 35	IC	-	Ut2/3	10YR4/4	Kohärent	0	0
35 - 75	IIC	-	Uls	7,5YR6/1 5YR5/8 10YR4/6	Kohärent	0	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 14	Bioturbation						
14 - 35							
35 - 75	Keupermergel grau, rot, braun						
P14: Kolluvisol, R 3487651, H 5455581							
Tiefe [cm]	Hori- zont	pH- Wert	Boden- art	Boden- farbe	Gefügeform	Carbonat- gehalt [%]	Humus- gehalt [%]
0 - 10	Ah	-	Ut3/4	10YR3/2	Kohärent	0,5 - 2	1 - 2
10 - 60	M	-	Ut2	10YR4/3	Kohärent	0,5 - 2	0
> 60	IC	-	Uls	7,5YR6/1 5YR5/8 10YR4/6	Kohärent	0,5 - 2	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 10	Bioturbation						
10 - 60	Keramikbruchstücke, Kohlestück (bei ca. 57 cm)						
> 60	Keupermergel grau, rot, braun, Keuper-Fließerde						
P15: (gekappte) Parabraunerde, R 3487749, H 5455492							
Tiefe [cm]	Hori- zont	pH- Wert	Boden- art	Boden- farbe	Gefügeform	Carbonat- gehalt [%]	Humus- gehalt [%]
0 - 25	Ah/Ap	-	Ut2/3	10YR4/3	Kohärent	0	2 - 4
25 - 60	Bt	-	Ut2/3	10YR4/6	Kohärent	0	0
60 - 180	IC	-	Uu	10YR5/6	Kohärent	10 - 50	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 25	Ziegelstücke, Keupersteinchen, Untergrenze durch Bioturbation verschleppt						

Tabelle A.9: Fortsetzung

25 - 60	erhöhter Tonanteil, Toncutane, Bioturbation						
60 - 180	Lössschnecken (unbeschädigt), Nadelstichporen, Bioturbation						
P16: Braunerde, R 3487755, H 5455491							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 25	Ah/Ap	–	Ut2/3	10YR4/3	Kohärent	0	2 - 4
25 - 35	Bv	–	Lu	10YR4/4	Kohärent	10 - 25	1 - 2
35 - 85	1C	–	Lu	10YR4/6	Kohärent	10 - 50	0
> 85	IIIC	–	Uu	10YR5/4	Kohärent	10 - 50	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 25							
25 - 35							
35 - 85	Löss-Keuper-Bänder (Solifluktion, Fließerde)						
> 85	Löss mit Lössschnecken, Keuperband bei ca. 1 m						
P17: Kolluvisol (mehrschichtig), R 3487769, H 5455484							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 15	Ah/Ap	–	Ut2/3	10YR4/3	Kohärent	0	1 - 2
15 - 50	M	–	Ut2/3	10YR4/4	Kohärent	0	0
50 - 65	IIMfBvSw	–	Ut4		Subpolyeder	0	0
65 - 90	IIIMSd	–	Ut4		Subpolyeder	0	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 15	Stein (gräulich-braun)						
15 - 50	Ziegelbruchstücke, Reste von Keupermaterial						
50 - 65	Ziegelbruchstücke, Reduktion/Oxidation (Mn, Fe), fossiler Braunerde-Horizont						
65 - 90	Ziegelstück, stauwassergeprägt, einlaufendes Wasser älteres Kolluvium (in dem einmal Bodenbildung stattgefunden hat)						
P18: Kolluvisol-Pseudogley, R 3487782, H 5455479							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 15	Ah/Ap	–	Ut2/3	10YR3/3		10 - 25	1 - 2
15 - 120	MSw	–	Lt2/3	10YR4/6		10 - 25	0
120 - 170	IIIMSd	–	Ut3/4	10YR5/4		10 - 25	0
> 170	IIIMSd	–	Ut3/4	10YR5/4		10 - 25	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 15	Ziegelstücke, Bioturbation						
15 - 120	Mn-Konkretionen (Punkte)						
120 - 170	Nassbleiche, Rostflecken, Grenze durch Sandsteine gekennzeichnet						
> 170	längere Wassersättigung, Ferrihydratausfällungen						
P19: Pelosol, R 3487660, H 5455443							
Tiefe	Hori-	pH-	Boden-	Boden-	Gefügeform	Carbonat-	Humus-

Tabelle A.9: Fortsetzung

[cm]	zont	Wert	art	farbe		gehalt [%]	gehalt [%]
0 - 15	Ah	5	Lt2/3	7,5YR3/2	Kohärent	0 - 0,5	5
15 - 40	P	5,5	Tl	7,5YR4/2	Subpolyeder	0 - 0,5	0
> 40	C	6,5	Tl	5YR3/3	Kohärent	10 - 25	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 15	Einschlüsse, Ziegelstücke						
15 - 40	Keuperstücke (grünlich, rötlich)						
> 40	Lössader (10YR6/6)						
P20: Pelosol, R 3487671, H 5455427							
Tiefe [cm]	Hori-zont	pH-Wert	Boden-art	Boden-farbe	Gefügeform	Carbonat-gehalt [%]	Humus-gehalt [%]
0 - 13	Ah	6	Tl	7,5YR4/2	Kohärent	0	1 - 2
13 - 43	P	6	Tl	7,5YR4/2	Subpolyeder	0	0
> 43	C	6	Tl	5YR3/4 10YR5/2	Subpolyeder	0 - 0,5	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 13							
13 - 43	vermehrt Keupermergel, fleckig, hoher Tonanteil (>45%)						
> 43	Schilfsandsteinstücke, marmoriert: rot, grau, oxidiertes Hämatit						
P21: Braunerde-Kolluvisol, R 3487698, H 5455419							
Tiefe [cm]	Hori-zont	pH-Wert	Boden-art	Boden-farbe	Gefügeform	Carbonat-gehalt [%]	Humus-gehalt [%]
0 - 10	Ah	6 - 7	Lt2/3	10YR3/3	Kohärent	0	1 - 2
10 - 35	Bv	6 - 7	Lt2/3	10YR4/4	Subpolyeder	0	0
35 - 55	MfBv	6 - 7	Lt2/3	10YR4/3	Subpolyeder	2 - 10	0
55 - 85	IIMfBv	6 - 7	Lt2/3	10YR5/4	Kohärent	0	0
85 - 100	Cv	6 - 7	Lt2/3	10YR4/4	Subpolyeder	2 - 10	0
> 100	C	6 - 7	Lt2/3	10YR5/4	Kohärent	10 - 25	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 10	hoher Tonanteil, Trockenrisse						
10 - 35	verdichteter Horizont, hoher Tongehalt						
35 - 55	Streifen mit Keupergrus (10YR4/3) bei 35 - 55 cm, fossiler Bv?						
55 - 85	Kolluvium, allochthon						
85 - 100	verwittertes Ausgangsgestein, Fließerde						
> 100	Ausgangsgestein						
P22: Kolluvisol-Pseudogley, R 3487721, H 5455413							
Tiefe [cm]	Hori-zont	pH-Wert	Boden-art	Boden-farbe	Gefügeform	Carbonat-gehalt [%]	Humus-gehalt [%]
0 - 10	Ah	7	Lt2/3	10YR3/3	Kohärent	0	3
10 - 120	MSw	7	Uu	10YR4/4	Kohärent	0	0
Tiefe	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						

Tabelle A.9: Fortsetzung

[cm]							
0 - 10	Konkretionen, marmoriert						
10 - 120	Eisenkonkretionen, Verbraunungsmerkmale						
P23: Parabraunerde-Pseudogley, R 3487716, H 5455306							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 10	Ah	4	Lu	10YR6/4	Krümel	0	1 - 2
10 - 25	Al	4	Uu	10YR5/6	Kohärent	0	0 - 1
25 - 45	Bt	4,5	Ut2/3	10YR5/6	Kohärent	0	0
45 - 100	BtSw	5	Tl	10YR4/6	Kohärent	0 - 0,5	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 10							
10 - 25	schwach humusreich, Mangankonkretionen						
25 - 45	Kalkkonkretionen, Bleichung, Rostflecken, Parabraunerde überwiegt						
45 - 100	Marmorierung durch reduzierende Verhältnisse, stauwasser geprägt						
P24: Braunerde-Pseudogley, R 3487720, H 5455282							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 5	Ah	4,5	Ut2/3	10YR3/3		0	4 - 8
5 - 26	Bv	4,5	Ls2/3	10YR4/4		0	0
26 - 48	ISw	5	Ls2/3	10YR4/4		0	0
48 - 62	IISw	5	Ls2/3	10YR4/4		0	0
> 62	C	5	Ts3	10YR4/4		0	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 5							
5 - 26	Verbraunung, Pseudovergleyung						
26 - 48	Pseudogley-Merkmale, Mangankonkretionen						
48 - 62	Schilfsandsteine, hoher Steinanteil weist auf solifluidale Verlagerung hin, Mangan						
> 62	Gipskeuper mit roter und heller Bänderung (wasserstauend)						
P25: Pararendzina, R 3487696, H 5455507							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 15	Ah	6 - 7	Ut4	10YR3/3	Krümel	0,5 - 2	1,5
15 - 35	Ap	6 - 7	Lt3	10YR4/3	Kohärent	10 - 25	1,4
35 - 90	C	6 - 7	Tu3	2,5Y5/2	Krümel	25 - 50	1,2
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 15	Tonscherbe, Ziegelstücke						
15 - 35	Kalkkonkretionen, ehemaliger Pflughorizont						
35 - 90	Gipskeuper-Fließerde, Kalkkonkretionen (Sekundärcarbonat)						
P26: Braunerde, R 3487715, H 5455491							
Tiefe	Hori-	pH-	Boden-	Boden-	Gefügeform	Carbonat-	Humus-

Tabelle A.9: Fortsetzung

[cm]	zont	Wert	art	farbe		gehalt [%]	gehalt [%]
0 - 10	Ah	5	Lt2/3	10YR3/3	Subpolyeder	0	2 - 4
10 - 30	Ap	5	Lt2/3	10YR4/4	Polyeder	0	0
30 - 55	Bv	5	Tu2	10YR4/6	Krümel	0	0
55 - 90	1C	5	Tu2	10YR5/8	Krümel	0 - 0,5	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 10	Ziegelstückchen						
10 - 30	große Wurzeln (Baum)						
30 - 55	große Wurzeln						
55 - 90	Löss						
P27: Braunerde, R 3487734, H 5455474							
Tiefe [cm]	Hori-zont	pH-Wert	Boden-art	Boden-farbe	Gefügeform	Carbonat-gehalt [%]	Humus-gehalt [%]
0 - 15	Ah	6	Ut2/3	10YR4/3	Polyeder	0	3
15 - 60	Bv	5	Lu/Tu3	10YR5/4	Kohärent	0	0
60 - 100	1C	5	Tu3/4	10YR5/4	Kohärent	10 - 25	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 15	Taschen durch starke Bioturbation, Wurmgänge						
15 - 60	Sandsteine						
60 - 100	Lössschnecken (teilweise zerbrochen), Mergel aus Gipskeuper → Fließerde						
P28: Kolluvisol, R 3487593, H 5455474							
Tiefe [cm]	Hori-zont	pH-Wert	Boden-art	Boden-farbe	Gefügeform	Carbonat-gehalt [%]	Humus-gehalt [%]
0 - 15	Ah		Lt2/3	10YR2/3	Subpolyeder	2 - 10	4 - 5
15 - 90	M		Lt2/3	10YR4/3	Polyeder	25 - 50	0
90 - 180	IIM		Lt2/3	10YR4/3	Polyeder	25 - 50	0
> 180	C			2,5Y5/2		25 - 50	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 15	vermehrt Ziegelstücke, Lösskindl, Kohle						
15 - 90	Tiergang (bei ca. 50 cm), ab 70 cm: Schnecken, Lösskindl						
90 - 180	Mangankonkretionen, helle Flecken						
> 180	Keuper						
P29: Kolluvisol, R 3487588, H 5455474							
Tiefe [cm]	Hori-zont	pH-Wert	Boden-art	Boden-farbe	Gefügeform	Carbonat-gehalt [%]	Humus-gehalt [%]
0 - 20	Ah	6,5	Lt3	7,5YR3/2	Kohärent	10 - 25	3
20 - 290	M	6,5	Tu4	10YR4/4	Kohärent	25 - 50	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 20	Kohle, Ziegelstücke						
20 - 110	Wurm- und Maulwurfslöcher, Kalkkonkretionen, Pflanzenreste						

Tabelle A.9: Fortsetzung

P30: Kolluvisol, R 3487574, H 5455478							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 8	Ah	6,5		10YR3/2	Krümel	10 - 25	3
8 - 22	Ap	6,5		10YR3/3	Kohärent	10 - 25	0
22 - 130	M	6,2	Ut3	10YR4/4	Kohärent		0
130 - 195	IC						0
195 - 200	IIC						
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 8	Feuerstelle (Südwestecke)						
8 - 22	Bioturbation, Wühlgänge, Ziegelstücke, Holzkohle, Schnecken, Keupersteine						
22 - 130	vereinzelt Keuperstücke, Schnecken, Ziegelstücke, Holzkohle						
130 - 195	Löss-Keuper-Fließerde						
195 - 200	Keuper						
P33: Braunerde, R 3487583, H 5455456							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 15	Ah		Tu3	10YR4/3	Krümel	0	
15 - 30	Bv		Lt3	7,5YR5/4	Krümel	0	
30 - 55	C			2,5YR4/2		0	
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 15	kleine Humusauflage						
15 - 30	schwache Bodenentwicklung, schwache Tonmineralbildung						
30 - 55	Keuper						
P34: Kolluvisol, R 3487602, H 5455462							
Tiefe [cm]	Horizont	Besonderheiten / Sonstige Merkmale					
0 - 15	Ah						
15 - 50	M	Keramik bei ca. 25 cm					
> 50	C	Keuper					
P35: Pelosol, R 3487695, H 5455526							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 23	Ah	6	Ts2	10YR3/3		0	
23 - 51	P	7,5	Tl	10YR5/3		0,5 - 2	
51 - 80	C	6,5 7 7	Tl	10YR5/8 10YR6/8 10YR5/1		10 - 25	
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 23	Schrumpfrisse, Trockenrisse						
23 - 51	Kalkausfällungen, sehr tonhaltig						

Tabelle A.9: Fortsetzung

51 - 80	bunte Mergel, mehrere Mergelbänder						
P36: Pararendzina, R 3487634, H 5455521							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 20	Ah/Ap	7	Ts2	10YR4/3		2 - 10	
20 - 70	1C	8 6,5 7,5	Ut2	10YR5/4 5YR4/3 7,5YR5/1		> 50 10 - 25 0,5 - 2	
70 - 120	IIC	7	Ts4			> 50	
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 20	Pflughorizont in ehemaligem Ah, Übergangshorizont						
20 - 70	Lössband, vereinzelt Krotowinen (Bioturbation, Wurzelgänge), leichte Verbraunung						
70 - 120	rotes Mergelband (5YR4/3), graue Keuper-Tonsteine (7,5YR5/1)						
P37: Pararendzina, R 3487617, H 5455541							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 20	Ah	7 - 8	Ut2	10YR4/3		0	
20 - 80	1C	7 - 8	Ut3	10YR5/3		0	
> 80	IIC						
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 20							
20 - 80	rotes Band (bei 30 cm), Fließerde, Pseudovergleyung (redoximorphe Bedingungen)						
> 80	Keuper						
P38: Kolluvisol-Pseudogley, R 3487553, H 5455480							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 25	Ah/Ap	7	Ut3/4	7,5YR4/2		2 - 10	
25 - 128	MSw	7 - 8	Ut2	10YR5/4		> 50	
128 - 200	IIfBtSd	7 - 8	Ut3	10YR5/3		25 - 50	
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 25	in-situ-Bildung (auf Kolluvium)						
25 - 128	viel Pseudomycel, fossile Wurzelgänge, Holzkohle, sehr hoher Tongehalt						
128 - 200	Pseudovergleyung einer ehemaligen Parabraunerde, Eisenhydroxide, rostfleckig						
P39: Kolluvisol-Pseudogley, R 3487711, H 5455360							
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]	Humusgehalt [%]
0 - 8	Ah	7	Uls	7,5YR4/2			
8 - 25	M	7	Uls	7,5YR4/4			
25 - 55	IIMSw	7 - 8	Ut2	10YR5/4			
55 - 80	IIIfBtSd		Ut4	10YR5/3			
Tiefe	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						

Tabelle A.9: Fortsetzung

[cm]							
	Kolluvisol auf einer fossilen, gekappten, hydromorph überprägten Parabraunerde						
0 - 8							
8 - 25	Löss mit Sand und Kies, vereinzelt Holzkohlestücke						
25 - 55	stauwasserleitendes Kolluvium, Nassbleichung, Rostflecken, Keramik, Holzkohle						
55 - 80	toniger, weniger Kies, wasserstauend, (evtl. Bt von fossiler Parabraunerde)						
P40: Parabraunerde-Pseudogley, R 3487720, H 5455327							
Tiefe [cm]	Hori- zont	pH- Wert	Boden- art	Boden- farbe	Gefügeform	Carbonat- gehalt [%]	Humus- gehalt [%]
0 - 10	Ah		Us			0	
10 - 20	Al		Ut2			0	
20 - 45	AlSw		Ut2			0	
45 - 60	fBtSd		Ut2/3			0	
60 - 80	IIfBtSd					0	
Tiefe [cm]	Besonderheiten / Sonstige Merkmale						
0 - 10	alter Ap-Horizont?						
10 - 20	Ziegelbruch bei ca. 15 cm, hoher Lössanteil						
20 - 45	Löss-Fließerde, Sandsteine (Solifluktion), Nassbleichung, Rostfleckung, Manganoxide, Pseudovergleyung						
45 - 60	Tonanreicherung auf Oberfläche						
> 60	deutlich toniger						
> 70	noch älterer fossiler Horizont (Farbänderung)						

A.2 Rammkernsondierungen und Pürckhauer-Bohrstockkartierung

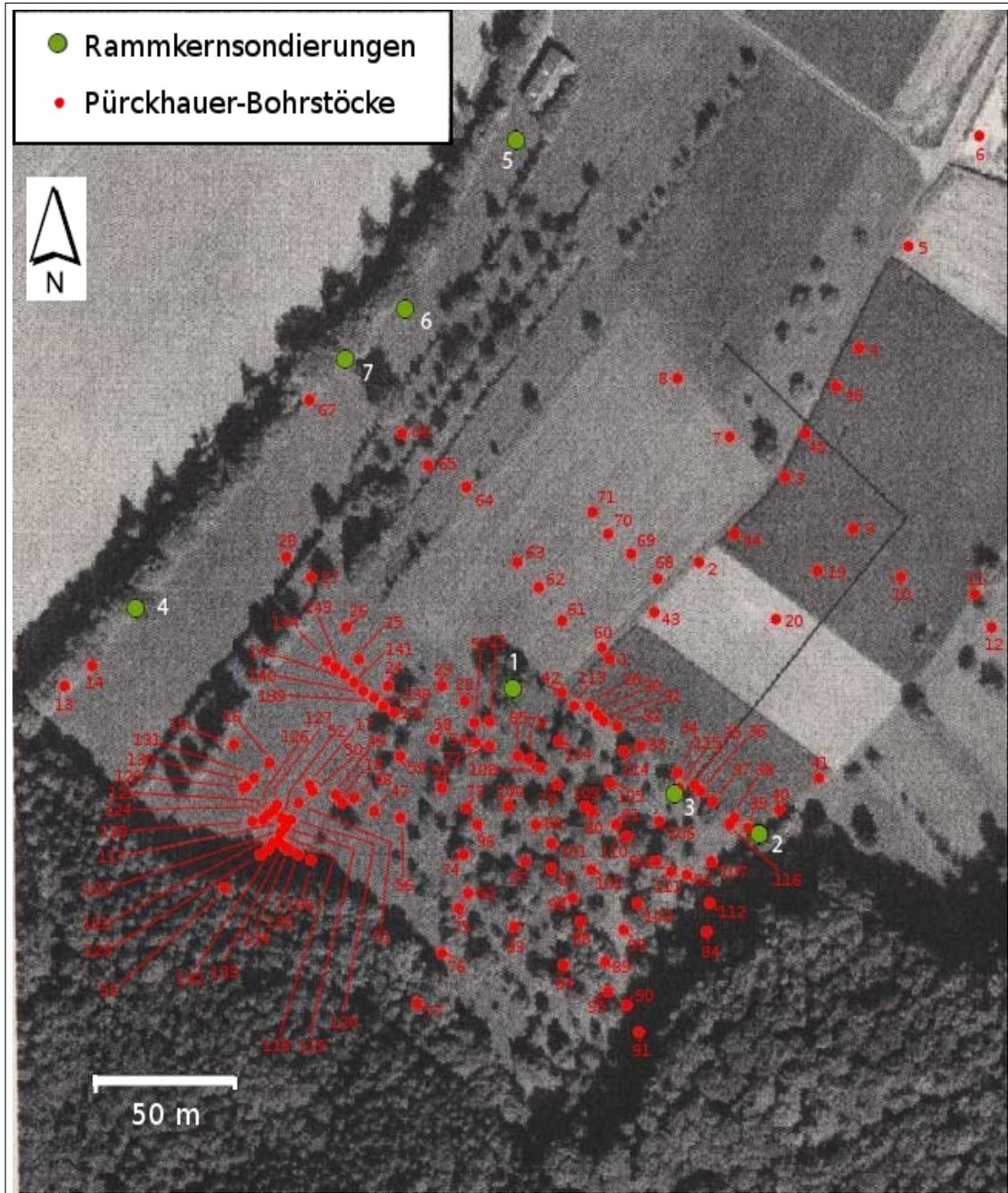


Abbildung A.1: Übersichtskarte über die Rammkernsondierungen und Pürckhauer-Bohrungen im Gewinn „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren.

A ANHANG UNTERSUCHUNGSGEBIET SINSHEIM-DÜHREN

Tabelle A.10: Rammkernsondierungen im Gewinn „Steinbock“ bei Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. A.1). Quelle: Eigene Darstellung; Daten aus PROTOKOLLE GELÄNDEPRAKTIKUM PHYSISCHE GEOGRAPHIE BEI SINSHEIM-DÜHREN (2006 bis 2008).

R1: R 3487700, H 5455522				
Tiefe [cm]	Bodenart	Bodenfarbe	Carbonatgehalt %	Sonstige Merkmale
0-10	Tu3	10YR3/3	0	
10-25	Tu2	10YR6/6	0	schwarze Linie bei 21 cm, tonige Bänder
25-27	Tu2	10YR3/4	0	
27-31	Ut2	10YR5/4	0-0,5	
31-49	Tu4	10YR5/6	0	Linie bei ca. 50 cm
49-66	Tu2	10YR6/6	0	dunkelgraue Linien (Eisen, Mangan)
66-78	Tu3	2,5YR4/4	0	rötlich (flächenhaft), grau (linienhaft)
78-88	Ut2	10YR7/4	7-10	weißlich hellbraun
88-90	Tu3	10YR4/1	2-4	dunkelgrau
90-94	Tu4	10YR5/3	7-10	braun, mit Steinen
94-100	Tu4	10YR5/2	10-25	braun, mit dunkelgrauen Streifen
100-111	Tu4	10YR5/2	10-25	Fließerde mit Tonsteineinlagerungen
111-127	Tu3	10YR5/4	2- 10	Fließerde mit Tonsteineinlagerungen
127-128	Tu4	10YR3/3	10-25	rotes Band
128- 167		10YR5/4		
167-177	Tu4		10-25	plattige Steine
177-185	Tu4		10-25	violett gefärbt
185-200	Tu3	10YR5/4	2-10	gräulich
R2: R 3487782, H 5455478				
Tiefe [cm]	Bodenart	Bodenfarbe	Carbonatgehalt %	Sonstige Merkmale
0-14	Tu4	10YR4/3	0	rote und gelbe Anteile
14-32	Ut4	10YR5/4	0	schwarze und gelbe Anteile
32-66	Ut4	10YR5/4	0	rote Anteile
66-87	Tu4	10YR4/4	0	rote, grüne und schwarze Partikel
87-100	Tu4	10YR5/4	0	
100-109	–	–	–	unbrauchbar
109-118	Tu4	10YR4/4	0	schwarze, gelbe, rote und grüne Partikel
118-153	Sl3	10YR3/6	0	große Einsprenglinge von Keuper
153-178	Ut4	10YR4/3		Tonsteine, Holzkohle
178-195	Ls4	10YR4/4		Siltstein-Elemente
195-200	Tl	10YR4/3		schwarze Partikel, Holzkohlereste
200-232	Ut3	10YR4/4	0	helle reduzierte, dunkle oxidierte Bereiche
232-245	Ut3	10YR4/4	0	Akkumulationshorizont des Keupers
245-300	Ut4	10YR4/3	0	Oxidations- und Reduktionsbereiche
300-351	Ut4	10YR4/4	0	Fließerdehorizont mit stark verw. Keuper
351-363	Ut4	10YR4/4	2-10	Mischhorizont aus Keuper und Siltstein
363-366	Ul	10YR5/4	2-10	sehr kalkhaltig, vermutlich Löss
366-400		10YR4/6	0	verwittertes Anstehendes, grobkörnig
R3: R 3487750, H 5455489				

Tabelle A.10: Fortsetzung

Tiefe [cm]	Bodenart	Bodenfarbe	Carbonatgehalt %	Sonstige Merkmale
0-5	Ut3	10YR3/3	0	beginnende Bodenbildung, Verbraunung
5-50	Ut2	10YR4/4	0,5-2	ca. 30 cm: 0,5-10, Keuperbänder
50-100	Uu	10YR5/4	7-10	Regenwurmgang, Kalkkonkretionen
100-120	Uu	10YR5/6	7-10	
120-130	Uu	10YR5/6	10-25	kleine Schnecken (Gehäuse intakt)
130-140	Uu	10YR5/6	10-25	Mangan
140-200	Uu	10YR5/6	10-25	wenig umgelagerter Löss, Keuperstücke
R4: R 3487538, H 545556				
Tiefe [cm]	Bodenart	Bodenfarbe	Carbonatgehalt %	Sonstige Merkmale
0-30	Ut3	10YR3/4	2-4	Pflughorizont
30-70	Ut2	10YR4/6	7-10	einsetzende Bodenbildung
70-100	Ut2	10YR4/6	4-7	variierender Kalkgehalt → Umlagerung?
100-200	Ut1/2	10YR5/6	0,5-2	mit der Tiefe abnehmender Tongehalt
200-				
300-314	Ut3	10YR4/4	0	
314-318	Ut2	10YR4/4	0	
318-338	Ut2	10YR4/4	0	
338-358	Ut2	10YR4/4	0	
358-378	Ut3	10YR4/4	0	
378-384	Ut2	10YR4/4	4-7	
384-391	Ut2	10YR5/4	7-10	
391-393	Ut3	10YR4/3	7-10	
393-400	Ut2	10YR5/4	7-10	
400-435	Ut4	10YR3/3	0	
435-455	Ut3	10YR5/4	0	
455-458	Ut4	10YR3/3	0	
458-500	Ut3	10YR5/4	0	
500-520				verbraunte kalkarme Schicht
520-530				Kalkgehalt nimmt zu
530-600				sehr hoher Kalkgehalt, Lösskindl
600-663	Ut2	10YR5/8	2-4	Feinsand, verschiedenfarbig
663-681	Uu	10YR5/6	2-4	bunte Mergel, Schilfsandstein
681-692	Ut3	10YR3/4	2-4	Feinmaterial mit kleinen Steinen
692-700	Ut2	10YR6/2	2-4	kantengerundete Keupersteine, Grundwasser
R5: R 3487685, H 5455725				
Tiefe [cm]	Sonstige Merkmale			
0-40	geringe Durchsetzung mit Feinmaterial, homogen			
40-60	mittlere Durchsetzung mit Feinmaterial			
60-100	starke Durchsetzung mit Feinmaterial (Buntsandstein, Keuper), Ziegelreste			

Tabelle A.10: Fortsetzung

	vereinzelt Holzkohlereste, ab 60 cm: hellere Bodenfarbe			
100-145	größtenteils Ton und Schluff			
145-175	Übergang vom Kolluvium zum anstehenden Gestein			
175-200	Keuper (graugrün) und bunte Mergel (rötlich)			
R6: R 3487647, H 5455672				
Tiefe [cm]	Boden- art	Boden- farbe	Carbonat- gehalt %	Sonstige Merkmale
0-30	Tu4	10 YR4/4	0	organisches Material, homogen verteilt
30-50	Tu4			
50-80	Tu4		2-4	Keupereinlagerungen
80-100	Tu4		0,5-2	
100-130	Tu4		4-7	
130 -150			0,5-2	Keuper-Fließerde, kein Löss
150-180		5Y5/3	2-4	Tonsteine und bunte Mergel
180-200		10YR5/2	0,5-2	Derivate aus sedimentärem Ausgangsgestein
R7: R 3487620 , H 5455647				
Tiefe [cm]	Boden- art	Boden- farbe	Carbonat- gehalt %	Sonstige Merkmale
0-100	fein geschichtete, kolluviale Sedimente			
0-37	Tu3	10YR3/3	0	Quarz- und Muskovitpartikel
37-52	Tu4	10YR3/3	0,5-2	bunter Keupermergel, Ziegelbruchstück
52-100	Tu4	10YR3/3	0,5-2	ca. 3% Grobbodenanteil
100-200	Übergang von feinem zu grobem Material			
100-110	Tu2	10YR3/3	4-7	Keuperanteil steigt
110-135	Uu	10YR5/6	10-25	Lössschicht mit Lössderivaten
135-200		10YR3/2	0-0,5	kalkhaltiger Keuper, 30% Grobbodenanteil
200-300	körnige Sandsteinreste und tonhaltige Steine			
200-203	Lu	rötlich	0,5-2	rötlich, bunt, mehlig, rissig
203-230	Ts2		0	orange-gelblich
230-300	Ut3		10-25	gröbere Schicht mit Gipskeuperresten

Tabelle A.11: Pürckhauer-Bohrstock-Kartierung im Gewinn „Steinbock“ (vgl. Abb. A.1). Quelle: Eigene Darstellung; Daten teilweise aus PROTOKOLLE GELÄNDEPRAKTIKUM PHYSISCHE GEOGRAPHIE BEI SINSHEIM-DÜHREN (2006 bis 2008).

1: Kolluvisol, R 3487726, H 5455536				2: Pararendzina, R 3487763, H 5455574			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-15	Ap	Lt2/3	10YR3/4	0-23	Ap	Ut2/3	10YR5/3
15-100	M	Tu2	10YR6/6	23-70	lCv	Ut2/3	10YR5/6
				70-100	lC	Uu	10YR6/6
3: Pararendzina, R 3487796, H 5455607				4: Pararendzina, R 3487831, H 5455650			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-23	Ap	Ut2/3	10YR5/3	0-25	Ap	Ut2/3	10YR5/3

Tabelle A.11: Fortsetzung

23-45	ICv	Ut2/3	10YR5/6	25-75	ICv	Ut2/3	10YR5/6
45-100	IC	Uu	10YR6/6	75-100	IC	Uu	10YR6/6
5: Pararendzina, R 3487843, H 5455689				6: Pararendzina, R 3487375, H 5455727			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-25	Ap	Ut2/3	10YR5/3	0-8	–	–	–
25-65	ICv	Ut2/3	10YR5/6	8-100	ICv	Ut2/3	10YR5/6
65-100	IC	Uu	10YR6/6				
7: Pararendzina, R 3487789, H 5455620				8: Pararendzina, R 3487766, H 5455640			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-25	Ap	Ut3	10YR4/4	0-25	Ap	Ut4	10YR4/3
25-75	ICv	Ut4	10YR5/4	25-70	ICv	Ut4	10YR5/4
75-100	C	Ut4	10YR5/6	70-100	C	Ut3	10YR5/6
9: Pararendzina, R 3487821, H 5455588				10: Kolluvisol, R 3487840, H 5455567			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-23	Ap	Ut2/3	10YR5/3	0-23	Ap	Ut2/3	10YR5/3
23-70	ICv	Ut2/3	10YR5/6	23-70	M	Ut4	10YR5/3
70-100	IC	Uu	10YR6/6	70-100	IC	Uu	10YR6/6
11: Kolluvisol, R 3487869, H 5455565				12: Pararendzina, R 3487874, H 5455549			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-10	Ah	Ut2	10YR4/4	0-10	Ah	Ut3/4	10YR4/4
10-65	M	Ut3	10YR5/3	20-100	C	Ut4	10YR4/4
65-100	IIM	Ut4	10YR5/4				
13: Kolluvisol, R 3487520, H 5455527				14: Kolluvisol, R 3487515, H 5455518			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Ut3	10YR5/4	0-20	Ap	Ut3	10YR5/4
20-45	M	Ut2/3	10YR5/4	20-50	M	Ut2/3	10YR5/4
45-100	IIM	Ut3	10YR5/6	50-100	IIM	Ut3	10YR5/6
15: Pararendzina, R 3487578, H 5455508				16: Pararendzina, R 3487591, H 5455502			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Ut3	10YR4/4	0-20	Ap	Ut2/3	10YR3/2
20-80	ICv	Ut3/4	10YR5/4	20-50	ICv	Ut2/3	10YR5/4
80-100	IC	Us	10YR5/4	50-95	IC	Uu	10YR5/4
				95-100	IICv	Ut4	10R3/6
17: Pararendzina, R 3487607, H 5455493				18: Pararendzina, R 3487619, H 5455486			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Ut2/3	10YR3/2	0-20	Ap	Ut2/3	10YR4/4
20-80	ICv	Ut2/3	10YR5/4	20-95	ICv	Ut2	10YR5/4
80-100	IC	Uu	10YR5/6	95-100	IIC	Tu3/4	5YR4/3
19: Pararendzina, R 3487806, H 5455570				20: Pararendzina, R 3487803, H 5455549			

Tabelle A.11: Fortsetzung

Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-23	Ap	Ut2/3	10YR5/3	0-23	Ap	Ut2/3	10YR5/3
23-75	lCv	Ut2/3	10YR5/6	23-70	lCv	Ut2/3	10YR5/6
75-100	lC	Uu	10YR6/6	70-100	lC	Uu	10YR6/6
21: Pelosol, R 3487677, H 5455516				22: Pelosol, R 3487668, H 5455524			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Tl	10YR4/3	0-20	Ap	Lt2/3	10YR4/3
20-40	P	Tl	10YR4/3	20-50	P	Tl	10YR4/3
40-60	Cv	Lt2/3	10YR5/3	50-80	Cv	Ut3	10YR5/4
60-100	C	Lt2/3	10YR5/4	80-100	lICv	Lt2/3	10YR4/4
23: Pararendzina, R 3487658, H 5455533				24: Pararendzina, R 3487634, H 5455517			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Lu	10YR4/3	0-30	Ap	Lu	10YR3/3
20-100	lC	Uu	10YR6/4	30-80	lCv	Us	10YR5/4
				80-100	lIC	Lt2/3	10YR6/4
25: Pararendzina, R 3487626, H 5455534				26: Pararendzina, R 3487622, H 5455549			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Lt2/3	10YR3/3	0-20	Ap	Lt2/3	10YR3/3
20-50	lCv	Lt2/3	10YR4/3	20-45	lCv	Ut3	10YR3/3
50-85	lICv	Ut2/3	10YR5/4	45-64	lIC	Tl	10YR3/3
85-95	lICv	Lt2/3	10YR5/3	64-85	lIC	Tl	10YR5/4
95-100	lVICv	Ut2/3	10YR6/6	85-95	lIC	Tl	10YR4/3
				95-100	lIC	Uu	10YR6/6
27: Kolluvisol, R 3487608, H 5455568				28: Pararendzina, R 3487610, H 5455567			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Lt2	10YR3/3	0-20	Ap	Lt2/3	10YR3/3
20-45	M	Ut3	10YR3/3	20-100	lC	Lt2/3	10YR5/4
45-95	lC	Ut2/3	10YR5/4				
95-100	lIC	Lt2/3	10YR6/4				
29: Pelosol, R 3487718, H 5455525				30: Pelosol, R 3487726, H 5455536			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Ut4	10YR3/3	0-35	Ap	Ut3	10YR3/3
20-60	P	Tl	10YR4/4	35-72	P	Tl	10YR4/4
60-100	C	Ut4	10YR3/4	72-100	Cv	Tl	10YR4/3
31: Pararendzina, R 3487703, H 5455532				32: Pararendzina, R 3487728, H 5455520			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Ut2	10YR3/3	0-20	Ap	Tu4	10YR3/4
20-64	lCv	Ut2	10YR4/4	20-100	lC	Uu	10YR5/6
64-75		Ut3	10YR4/4				

Tabelle A.11: Fortsetzung

75-100	IC	Ut4	10YR5/4				
33: Braunerde, R 3487738, H 5455512				34: Kolluvisol, R 3487757, H 5455504			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-25	Ap	Ut4	10YR3/4	0-11	Ah	Ut2	10YR4/3
25-60	Bvt	Ut4	10YR3/4	11-100	M	Tu4	10YR4/4
60-100	IC	Uu	10YR5/6				
35: Kolluvisol, R 3487758, H 5455502				36: Kolluvisol, R 3487757, H 5455503			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Ut2	10YR4/3	0-30	Ah	Ut4	10YR4/3
20-100	M	Ut2	10YR4/4	30-100	M	Ut4	10YR3/4
37: Kolluvisol, R 3487764, H 5455497				38: Kolluvisol, R 3487774, H 5455481			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Ut2	10YR4/3	0-20	Ap	Ut2	10YR4/3
20-100	M	Ut3	10YR3/4	20-100	M	Ls3	10YR3/4
39: Kolluvisol, R 3487780, H 5455476				40: Kolluvisol, R 3487793, H 5455497			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Ut2	10YR4/3	0-20	Ap	Ut2	10YR4/3
20-100	M	Ut2	10YR3/4	20-80	M	Ut3	10YR4/4
				80-100	IIM	Ls2	
41: Kolluvisol, R 3487803, H 5455496				42: Pelosol, R 3487706, H 5455526			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Ut2	10YR4/3	0-15	Ap	Tu2	10YR3/3
20-75	M	Ut2	10YR5/4	15-50	P	Tu2	10YR4/4
75-90	IIM	Ut3/4	10YR4/4	50-100	C	Tu2/Tt	10YR3/3
90-100	IIM	Ls2					
43: Braunerde, R 3487743, H 5455555				40: Braunerde, R 3487774, H 5455585			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Ut4	10YR5/4	0-10	Ah	Ut3	10YR5/4
20-35		Tu4	10YR4/6	10-25	Ap	Ut2	10YR6/8
35-38		Ut4	10YR5/4	25-30	Bv	Ut2	10YR5/6
38-55		Tu4	10YR5/6	30-35	ICv	Ut2	10YR4/4
55-62		Tu4	10YR4/3	35-100	IC	Uu	10YR6/6
62- 100		Tu4	10YR5/8				
45: Pararendzina, R 3487801, H 5455620				46: Pararendzina, R 3487814, H 5455637			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-25	Ap	Ut2/3	10YR5/4	0-20	Ap	Ut2/3	10YR3/3
25-70	ICv	Ut3	10YR5/4	20-100	IC	Uu	10YR5/6
70-100	IC	Ut4	10YR4/4				
47: Pelosol, R 3487632, H 5455482				48: Pelosol, R 3487624, H 5455487			

Tabelle A.11: Fortsetzung

Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-27	Ap	Tu2	10YR4/4	0-20	Ap	Ut4	10YR4/4
27-50	P	Tl	5YR3/4	20-40	P	Tl	10YR3/4
50-100	Cv	Tu2	10R3/4	40-100	C	Tu2	10YR3/4
49: Braunerde, R 3487624, H 5455487				50: Pararendzina, R 3487607, H 5455489			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-15	Ap	Ut2/3	10YR4/4	0-40	Ap	Ut2/3	10YR3/2
15-38	Bv	Ut3	10YR4/4	40-100	lCv	Ut2/3	10YR3/4
38-80	lCv	Tu3	10R 3/4	100-200	lC	Uu	10YR5/6
80-100	IllCv	Ut2	10YR5/6				
51: Pararendzina, R 3487602, H 5455486				52: Pararendzina, R 3487595, H 5455480			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-35	Ap	Ut2/3	10YR3/2	0-30	Ap		10YR3/2
35-70	lCv	Ut2/3	10YR5/4	30-100	C		10YR3/4
70-100	lC	Uu	10YR5/4				
53: Pararendzina, R 3487573, H 5455454				54: Pelosol, R 3487672, H 5455508			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ah	Ut3	10YR4/4	0-13	Ah	Lt2/3	10YR3/4
20-84	lCv	Us	10YR5/4	13-40	P	Tl	10YR4/3
84-100	lIC	Lu2	10YR3/4	40-100	Cv	Lt2/3	10YR4/4
55: Pelosol, R 3487659, H 5455491				56: Pelosol, R 3487642, H 5455480			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-11	Ah	Lt2/3	10YR4/3	0-15	Ah	Lt2/3	10YR4/3
11-35	P	Tl	5YR4/3	15-40	P	Tl	5YR4/3
35-66	Cv	Lt2/3	5YR4/4	40-100	Cv	Lt2/3	5YR4/4
66-80	lICv	Lt2/3	5Y5/1				
80-100	C	Lt2/3	10YR4/3				
57: Braunerde, R 3487671, H 5455514				58: Braunerde, R 3487661, H 5455503			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-10	Ah	Lu	10YR3/3	0-12	Ah	Lu	10YR3/2
10-30	Bv	Ut2/3	10YR4/3	12-55	Bv	tL	10YR4/3
30-100	Cv	Ut2/3	10YR4/4	55-60		tL	10YR4/2
				60-84	Cv	tL	10YR5/3
				84-100	lICv	tL	10YR5/3
59: Braunerde, R 3487643, H 5455502				60: Kolluvisol, R 3487721, H 5455541			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-12	Ah	Lu	10YR4/3	0-30	Ap	Lt2/3	10YR3/4
12-37	Bv	Ut2/3	10YR4/3	30-100	M	Tu2	10YR6/6
37-60	Cv	Lt2/3	10YR5/3				

Tabelle A.11: Fortsetzung

60-85	IICv	Lt2/3	10YR5/4				
85-100	IC	Uu	10YR5/6				
61: Kolluvisol, R 3487707, H 5455557				62: Pararendzina, R 3487700, H 5455566			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-30	Ap	Lt2/3	10YR3/4	0-30	Ap	Ut2/3	10YR3/4
30-100	M	Tu2	10YR6/6	30-60	IC	Uu	10YR5/4
				60-100	IIC	Ut2/3	10YR4/6
63: Pararendzina, R 3487687, H 5455578				64: Pararendzina, R 3487668, H 5455601			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-30	Ap	Ut2/3	10YR5/4	0-25	Ah	Tu3	10YR5/3
30-100	IC	Uu	10YR6/4	25-60	ICv	Lt2/3	10YR4/6
				60-100	C	Tl	10YR5/4
65: Pararendzina, R 3487659, H 5455606				66: Pararendzina, R 3487644, H 5455621			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ah	Tu3	10YR4/2	0-30	Ap	Lt2/3	10YR4/2
20-60	ICv	Lt2/3	10YR4/6	30-100	ICv	Ts2	10YR6/2
60-100	C	Lt2/3	5YR3/4				
67: Kolluvisol, R 3487604, H 5455637				68: Braunerde, R 3487743, H 5455567			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-30	Ah	Lt2/3	10YR4/2	0-25	Ap	Lt2/3	10YR4/4
30-100	M	Ut3/4	10YR5/4	25-53	Bv	Lu/Tu3	10YR5/4
				53-90	Cv	Lu/Tu3	10YR5/3
				90-100	IC	Uu	10YR4/4
69: Braunerde, R 3487733, H 5455576				70: Pararendzina, R 3487723, H 5455577			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-27	Ap	Lu/Tu3	10YR4/3	0-19	Ap	Lu/Tu3	10YR5/6
27-50	Bv	Uls	10YR4/4	19-40	ICv	Lu/Tu3	10YR4/4
50-93	Cv	Us	10YR4/3	40-100	IC	Uu	10YR4/3
93-100	IC	Uu	10YR4/4				
71: Pararendzina, R 3487712, H 5455595				72: Pelosol, R 3487675, H 5455507			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Lt2/3	10YR4/3	0-22	Ap	Lt2/3	10YR4/3
20-43	ICv	Lt2/3	7.5YR4/6	22-48	P	Tl	10YR4/4
43-100	IC	Uu	10YR5/6	48-100	Cv	Lt2/3	10YR5/3
73: Pelosol, R 3487668, H 5455485				74: Pelosol, R 3487661, H 5455431			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-15	Ap	Lt2/3	10YR4/4	0-24	Ap	Lt2/3	10YR4/3
15-40	P	Tl	10YR4/4	24-60	P	Tl	10YR4/3
40-57	Cv	Lt2/3	10YR4/3	60-100	Cv	Lt2/3	10YR7/1

Tabelle A.11: Fortsetzung

60-100	C	Ls3	10YR7/1				
75: Pelosol, R 3487665, H 5455443				76: Pararendzina, R 3487657, H 5455429			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-10	Ah	-	-	0-16	Ah	-	-
10-42	P	Tl	10YR3/3	16-80	Cv	Lt2/3	10YR4/3
42-80	Cv	Lt2/3	10YR4/3	70-80	C	Lt4	10YR4/4
80-100	C	Ls2	10YR4/3	80-100	C	Ut4	5YR4/4
77: Parabraunerde, R 3487648, H 5455412				78: Pelosol, R 3487693, H 5455501			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ah	Ut3	-	0-10	Ah	Lt2/3	10YR4/3
20-50	Bt	Us	10YR3/3	10-25	P	Tl	10YR3/3
50-100	lCv	Us	10YR5/4	25-50	Cv	Lt2/3	5YR5/3
				50-100	C	Lt4	5YR5/3
79: Pelosol, R 3487706, H 5455493				80: Pararendzina, R 3487719, H 5455482			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-10	Ah	Lt2/3	5YR3/2	0-15	Ap	Ut4	10YR3/3
10-40	P	Tl	10YR3/3	15-100	Cv	Ut4	10YR5/8
40-100	Cv	Lt4	10YR4/4				
81: Pararendzina, R 3487725, H 5455478				82: Kolluvisol, R 3487743, H 5455464			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-15	Ap	Ut4	10YR3/3	0-15	Ah	Ut4	10YR4/4
15-100	Cv	Ut4	10YR5/8	15-92	M	Ut4	10YR5/4
				92-100	IIM	Ut3	10YR5/6
83: Kolluvisol, R 3487755, H 5455459				84: Kolluvisol, R 3487764, H 5455436			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-10	Ah	Ut3	10YR4/4	0-10	Ah		10YR4/4
10-100	M	Ut4	10YR5/4	10-70	M	Ls2	10YR5/4
				70-100	IIM	Tu3	10YR5/6
85: Pelosol, R 3487693, H 5455504				86: Pararendzina, R 3487696, H 5455477			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-15	Ah	Lt2/3	10YR4/4	0-25	Ap	Lt2/3	10YR4/3
15-30	P	Tl	10YR4/4	25-38	C	Ut2/3	5YR4/4
30-75	C	Lt2/3	5YR5/3	38-60	C	Lt2/3	2.5Y5/4
75-100	C	Lu	5YR5/3	60-67	C	Ut2/3	2.5Y5/4
				67-100	C	Lt2/3	5YR4/3
87: Kolluvisol, R 3487702, H 5455463				88: Kolluvisol, R 3487723, H 5455428			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-30	Ap	Lu	10YR4/4	0-30	Ap	Lu	10YR4/4
30-100	M	Lt2/3	10YR5/4	30-100	M	Lt2/3	10YR5/4

Tabelle A.11: Fortsetzung

89: Kolluvisol, R 3487732, H 5455411				90: Kolluvisol, R 3487713, H 5455442			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-20	Ap	Lu	10YR4/4	0-15	Ap	Lu	10YR5/4
20-100	M	Lt2/3	10YR5/4	15-100	M	Lu	10YR4/4
91: Kolluvisol, R 3487719, H 5455427				92: Pelosol, R 3487667, H 5455458			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-10	Ah	Lu	10YR5/4	0-15	Ah	Lt2/3	5YR3/2
10-100	M	Lu	10YR4/4	15-50	P	Tl	5YR3/3
				50-55	Cv	Lt2/3	7.5YR4/4
				55-100	C	Lt2/3	2.5YR3/4
93: Pelosol, R 3487687, H 5455440				94: Braunerde, R 3487707, H 5455427			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-15	Ap	Lt2/3	5YR3/2	0-5	Ah	Ut2/3	10YR3/3
15-37	P	Tl	5YR3/3	5-15	Ap	Ut2/3	10YR4/4
37-67	Cv	Lt2/3	7,5YR4/4	15-50	Bv	Lt2/3	10YR4/3
67-100	C	Lt2/3	2,5YR3/4	50-100	lC	Uu	10YR5/6
95: Braunerde, R 3487706, H 5455420				96: Pelosol, R 3487668, H 5455480			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-7	Ah	Ut2/3	10YR3/3	0-25	Ap	Tl	10YR3/3
7-60	Bv	Lt2/3	10YR4/3	25-62	P	Tl	10YR4/4
60-100	lC	Uu	10YR5/6	62-75	Cv	Tl	10YR4/3
				75-100	C	Lt2/3	10YR6/3
97: Pelosol, R 3487690, H 5455474				98: Pelosol, R 3487711, H 5455447			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-9	Ah	Lt2/3	10YR3/2	0-18	Ap	Lt2/3	7.5YR3/2
9-29	P	Tl	10YR3/3	18-100	P	Tl	7.5YR4/6
29-54	Cv	Lt2/3	10YR3/2				
54-100	C	Lt2/3	10YR5/3				
99: Braunerde, R 3487736, H 5455434				100: Pelosol, R 3487660, H 5455443			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-16	Ap	Lu	10YR3/3	0-15	Ah	Lt2/3	10YR3/3
16-88	Bv	Ut2/3	10YR5/4	15-57	P	Tl	10YR4/4
88-100				57-100	C	Lt2/3	10YR4/3
101: Pelosol, R 3487700, H 5455472				102: Pelosol, R 3487717, H 5455461			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-10	Ah	Lt2/3	10YR4/4	0-5	Ah	Lt2/3	10YR4/4
10-45	P	Tl	10YR3/3	5-45	P	Tl	10YR3/3
45-100	M	Tl	10YR5/4	45-100	M	Tl	10YR5/4
103: Braunerde, R 3487732, H 5455449				104: Pelosol, R 3487705, H 5455508			

Tabelle A.11: Fortsetzung

Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-5	Ah	Lt2/3	10YR3/3	0-30	Ap	Lt2/3	10YR3/3
5-35	Bv	Ut2/3	10YR5/4	30-60	P	Tl	10YR4/4
35-100	M/Sw	Ut2/3	10YR4/4	60-81	Cv	Tl	10YR4/4
				81-100	C	Lt2/3	5YR5/3
105: Braunerde, R 3487725, H 5455492				106: Braunerde, R 3487746, H 5455484			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-35	Ap	Lt2/3		0-25	Ah/Ap	Ut2/3	10YR3/4
35-40	Bv	Lt2/3		25-50	Bv	Ut2/3	10YR4/6
40-100	C	Lt2/3		50-100	lC	Uu	10YR5/4
107: Braunerde, R 3487765, H 5455460				108: Pelosol, R 3487698, H 5455498			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-10	Ah	Ut2/3	10YR3/3	0-16	Ap	Lt2/3	10YR3/3
10-53	Bv	Ut2/3	10YR4/4	16-42	P	Tl	10YR4/4
53-100	C	Ut2/3	10YR5/4	42-68	Cv	Tl	10YR4/4
				68-100	C	Lt2/3	5YR5/3
109: Pelosol, R 3487715, H 5455485				110: Pelosol, R 3487732, H 5455473			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-10	Ah	Lt2/3	10YR4/4	0-13	Ah	Lt2/3	10YR3/3
10-34	P	Tl	10YR4/4	13-40	P	Tl	10YR5/6
34-62	Cv	Tl	10YR4/4	40-100	C	Tl	10YR3/4
62-100	C	Lt2/3	10YR4/4				
111: Braunerde, R 3487751, H 5455461				112: Braunerde, R 3487776, H 5455451			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-15	Ap	Ut2/3	10YR3/4	0-25	Ap	Ut4	10YR3/4
15-34	Bv	Ut2/3	10YR3/4	25-50	Bv	Ut4	10YR3/4
34-100	lC	Ut2/3	10YR5/6	50-100	lC	Uu	10YR5/6
113: Pelosol, R 3487711, H 5455519				114: Braunerde, R 3487729, H 5455503			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-15	Ap	Lt2/3	10YR3/3	0-32	Ap	Ut2/3	10YR4/3
15-40	P	Tl	10YR4/4	32-50	Bv	Ut2/3	10YR4/6
40-50	Cv	Lt2/3	10YR3/4	50-100	lC	Uu	10YR5/6
50-100	C	Lt2/3	5YR5/3				
115: Braunerde, R 3487750, H 5455486				116: Kolluvisol, R 3487777, H 5455466			
Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe	Tiefe [cm]	Hori- zont	Boden- art	Farbe
0-30	Ap	Lt2/3	10YR4/3	0-12	Ap	Lt2/3	10YR4/3
30-43	Bv	Ut2/3	10YR4/6	12-64	M	Lu	
43-100	lC	Uu	10YR5/6	64-100	IIM	Ut2/3	
117: Kolluvisol				118: Kolluvisol, R 3487591, H 5455476			

Tabelle A.11: Fortsetzung

Tiefe [cm]	Horizont	Bodenart	Farbe	Tiefe [cm]	Horizont	Bodenart	Farbe
0-34	Ap	Lt2/3	10YR4/4	0-60	M	Lt2/3	10YR4/4
34-100	M	Lt2/3	10YR5/6	60-100	C	Lt3	10YR5/6
119: Kolluvisol, R 3487597, H 5455478				120: Pararendzina, R 3487591, H 5455466			
Tiefe [cm]	Horizont	Bodenart	Farbe	Tiefe [cm]	Horizont	Bodenart	Farbe
0-25	M	Lt2/3	10YR4/4	0-20	Ah	Lt2/3	10YR4/4
25-100	C	Lt3	10YR5/6	20-100	C	Lt3	10YR5/4
121: Kolluvisol, R 3487586, H 5455469				122: Kolluvisol, R 3487593, H 5455474			
Tiefe [cm]	Horizont	Bodenart	Farbe	Tiefe [cm]	Horizont	Bodenart	Farbe
0-40	Ah	Lt2/3	10YR3/3	0-10	Ah	Lt2/3	10YR4/4
40-95	Cv	Lt2/3	10YR4/4	10-290	M	Lt2/3	10YR4/3
95-100	IC	Uu	10YR6/4	290-300	IIM		2,5YR5/2
125: Kolluvisol, R 3487587, H 5455477				127: Kolluvisol, R 3487586, H 5455474			
Tiefe [cm]	Horizont	Bodenart	Farbe	Tiefe [cm]	Horizont	Bodenart	Farbe
0-25	Ah	Ut2/3	10YR4/4	0-12	Ah	Ut2/3	10YR4/4
25-90	M	Ut2/3	10YR4/4	12-75	M	Ut2/3	
90-190	IC			75-190	IC	Uu	10YR5/6
190-200	IC	Uu	10YR5/6	190-200	C		
				290-300	C	Ut2/3	5Y5/3

A.3 ERT-Profil

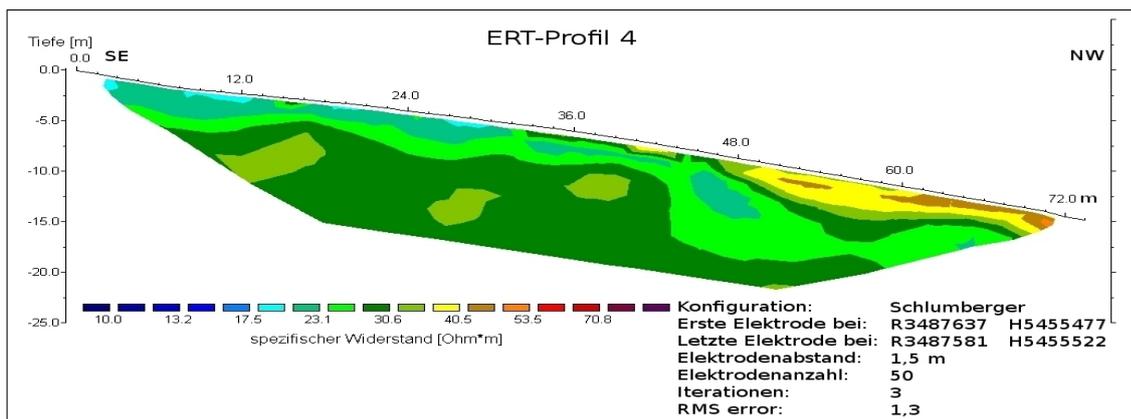


Abbildung A.2: ERT-Profil 4 im Gewinn „Steinbock“ (vgl. zur Lage auch Abb. 25). Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

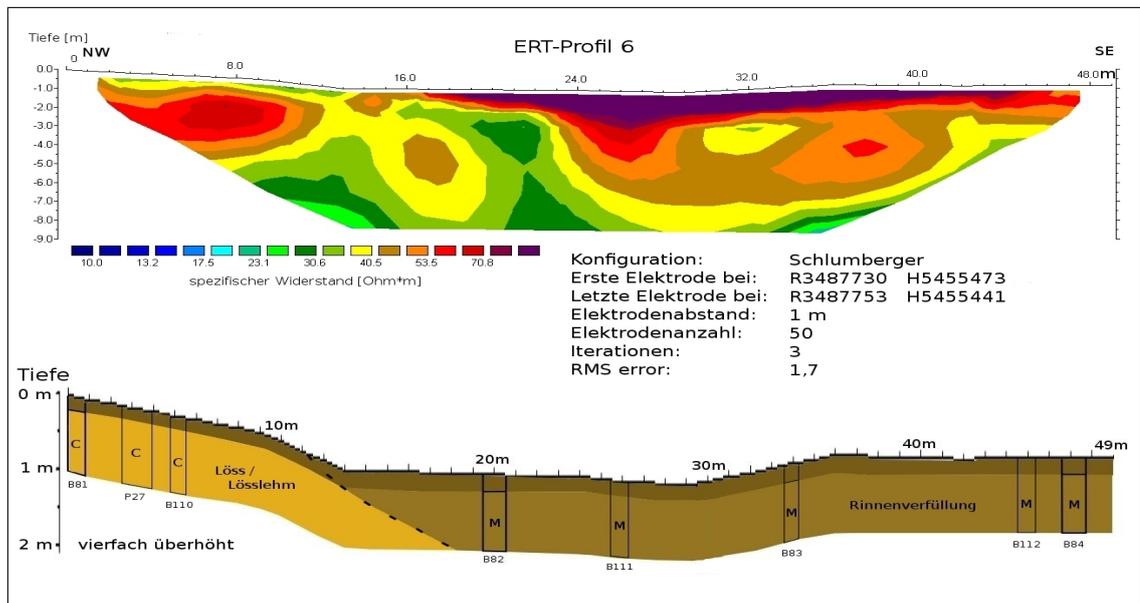


Abbildung A.3: Oben: ERT-Profil 6 im Gewann „Steinbock“ (vgl. zur Lage auch Abb. 25). Unten: Darstellung der Schürfgruben und Pürckhauer-Bohrungen entlang des ERT-Profiles. Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

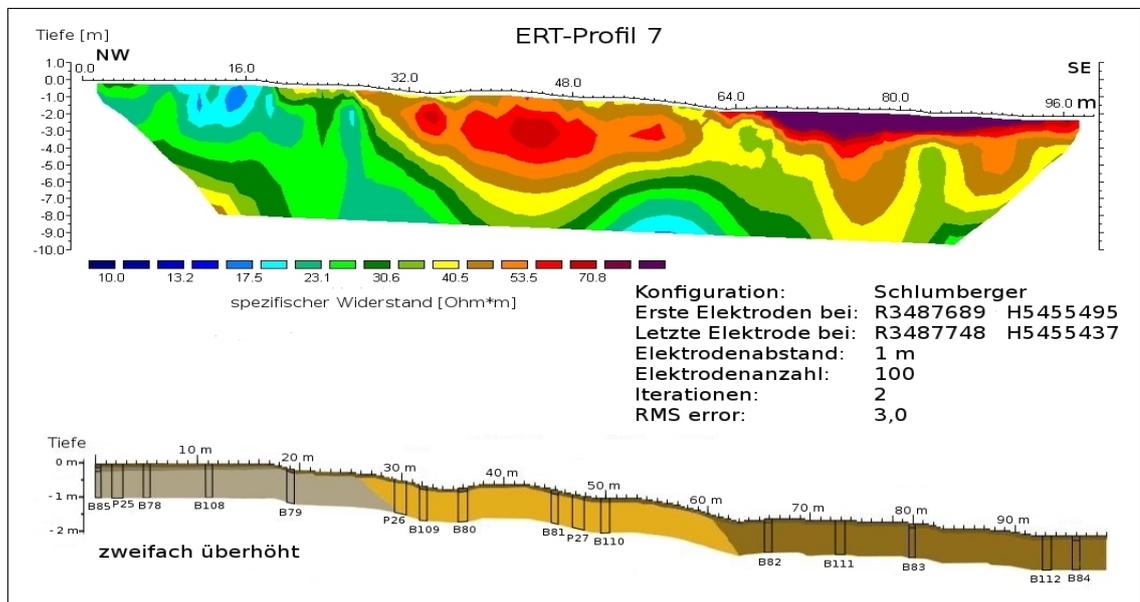


Abbildung A.4: Oben: ERT-Profil 7 im Gewann „Steinbock“ (vgl. zur Lage auch Abb. 25). Unten: Darstellung der Schürfgruben und Pürckhauer-Bohrungen entlang des ERT-Profiles. Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

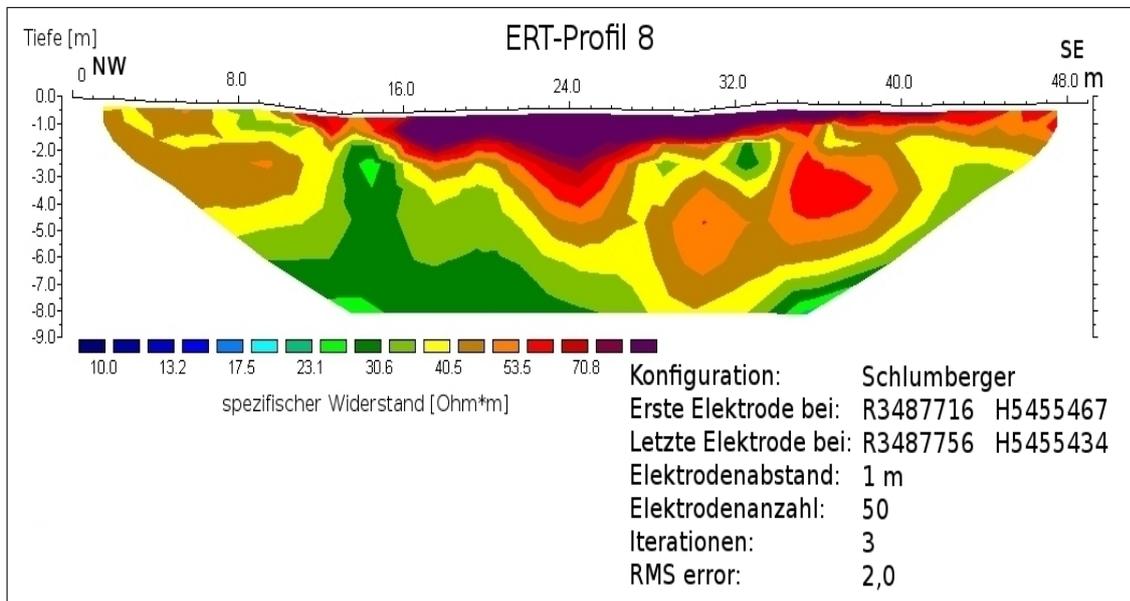


Abbildung A.5: ERT-Profil 8 im Gewann Steinbock (vgl. zur Lage auch Abb. 25). Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

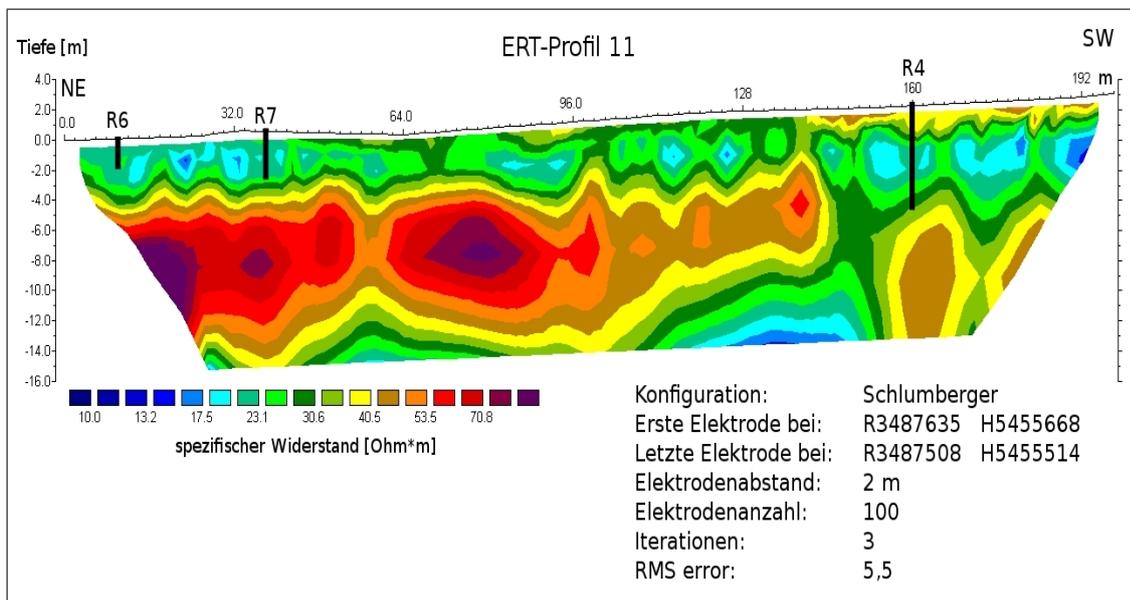


Abbildung A.6: ERT-Profil 11 auf der Niederterrasse des Wittigbaches im Gewann Steinbock (vgl. zur Lage auch Abb. 25). Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

A ANHANG UNTERSUCHUNGSGEBIET SINSHEIM-DÜHREN

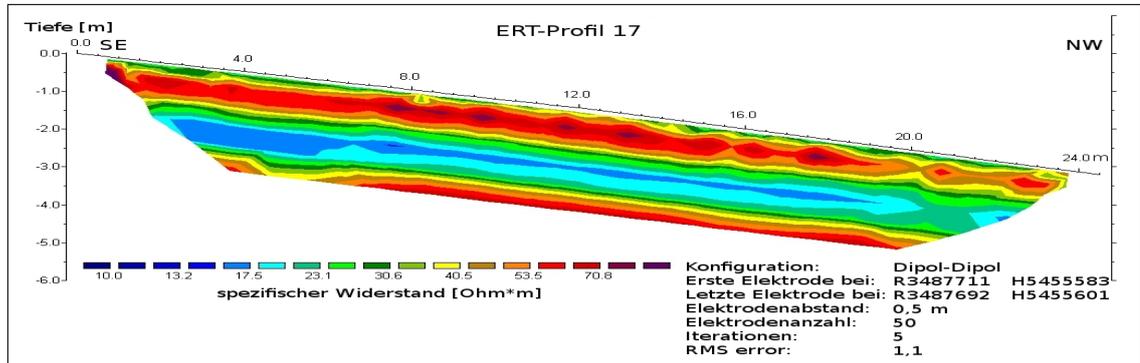


Abbildung A.7: ERT-Profil 17 im Gewinn Steinbock (vgl. zur Lage auch Abb. 25). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

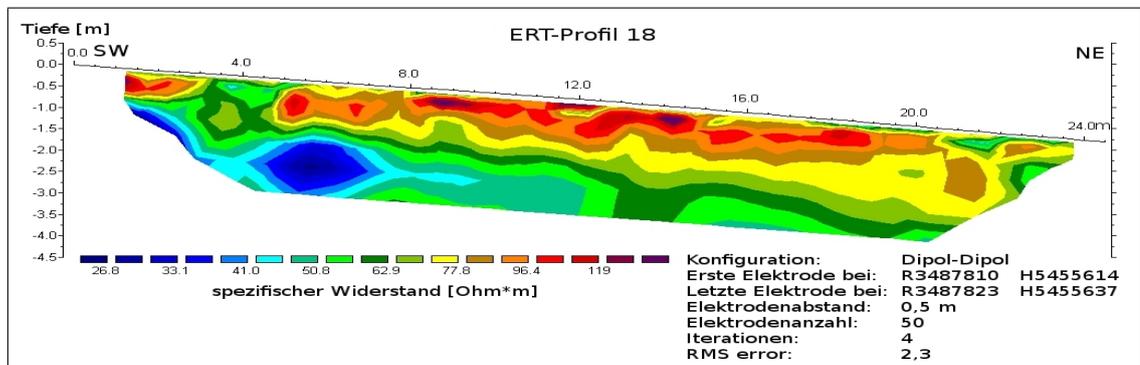


Abbildung A.8: ERT-Profil 18 im Gewinn Steinbock (vgl. zur Lage auch Abb. 25). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

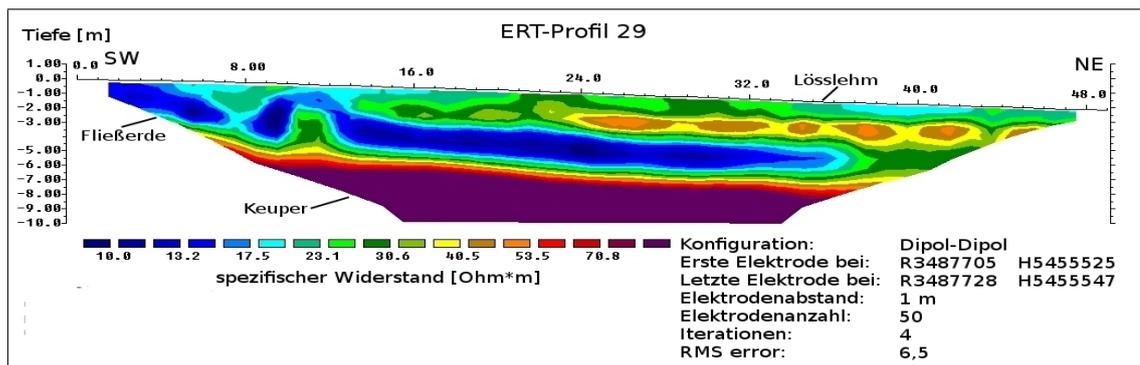


Abbildung A.9: ERT-Profil 29 im Gewinn Steinbock (vgl. zur Lage auch Abb. 25). Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

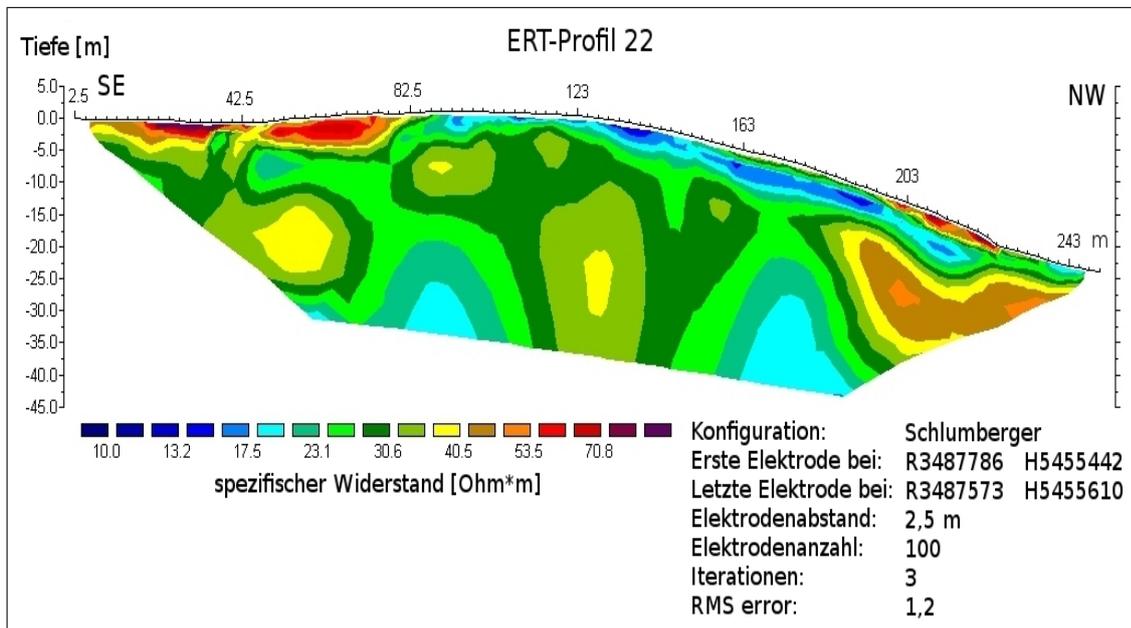


Abbildung A.10: ERT-Profil 22 im Gewinn Steinbock (vgl. zur Lage auch Abb. 25). Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

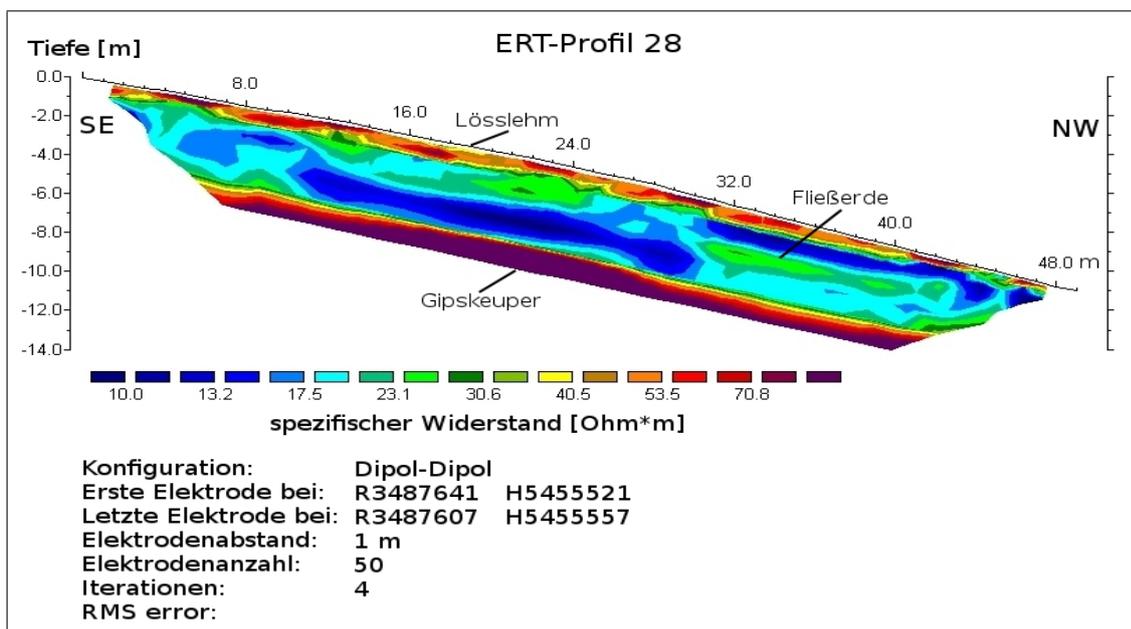


Abbildung A.11: ERT-Profil 28 im Gewinn Steinbock (vgl. zur Lage auch Abb. 25). Da das Profil 27 sehr ähnlich aussieht, ist es nicht aufgeführt. Quelle: Eigene Darstellung; ERT durchgeführt von Dr. S. Hecht.

A.4 Laborergebnisse zu den archäologischen Grabungen

Tabelle A.12: *Feldansprache der archäologischen Grabung im November 2006 in Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. 45). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.*

November 2006, R 3487734 H5455549				
Tiefe [cm]	Horizont	Bodenart	Bodenfarbe	Besonderheiten/Sonstige Merkmale
0-20	Ap	Ut4	10YR4/3	
20-30	M	Ut4	10YR4/4	Kohlereste
30-56	M	Ut4	10YR4/4	Brandschicht, Hüttenlehm, Holzkohle
56-160	M	Ut3/4	10YR4/4	geschichtet, Fließstrukturen, Knochen und Keramik
> 160	C	Ut4	10YR5/4	Keuper-Fließerde unterhalb des Grabens

Tabelle A.13: *Laboranalysen zur archäologischen Grabung im November 2006 in Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. 45). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.*

Tiefe [cm]	Befundnummer	m_{org} [%]		m_{Kalk} [%]	
		H_2O_2	Glühverlust	Glühverlust	Feld
0-15	1	0,50	4,23	6,58	0
24-30	2	0,14	2,83	15,74	10-25
35-45	3	0,16	3,16	22,72	10-25
56-70	5	0,08	2,96	13,85	10-25
ca. 140 (innen)	6	0,04	2,69	11,51	10-25
ca. 135 (außen)		0,08	3,28	8,60	7-25

Tabelle A.14: *Korngrößenverteilungen der Proben aus der archäologischen Grabung im November 2006 in Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. 45). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.*

Tiefe [cm]	Befundnummer	mG [%]	fG [%]	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]
0-15	1	–	0,84	1,56	4,09	6,26	27,76	16,74	7,11	35,68
24-30	2	–	–	0,63	1,86	5,70	41,47	21,02	5,62	23,59
35-45	3	–	0,26	2,23	3,12	4,22	36,05	22,64	9,20	22,30
56-70	5	1,16	0,65	1,50	1,83	5,60	35,90	18,78	7,17	27,45
ca. 140	6	1,80	2,75	6,02	4,66	7,97	24,83	16,64	8,35	26,97
ca. 135	außen	1,88	7,48	7,51	10,56	13,87	17,27	12,23	6,03	23,16

A.4 Laborergebnisse zu den archäologischen Grabungen

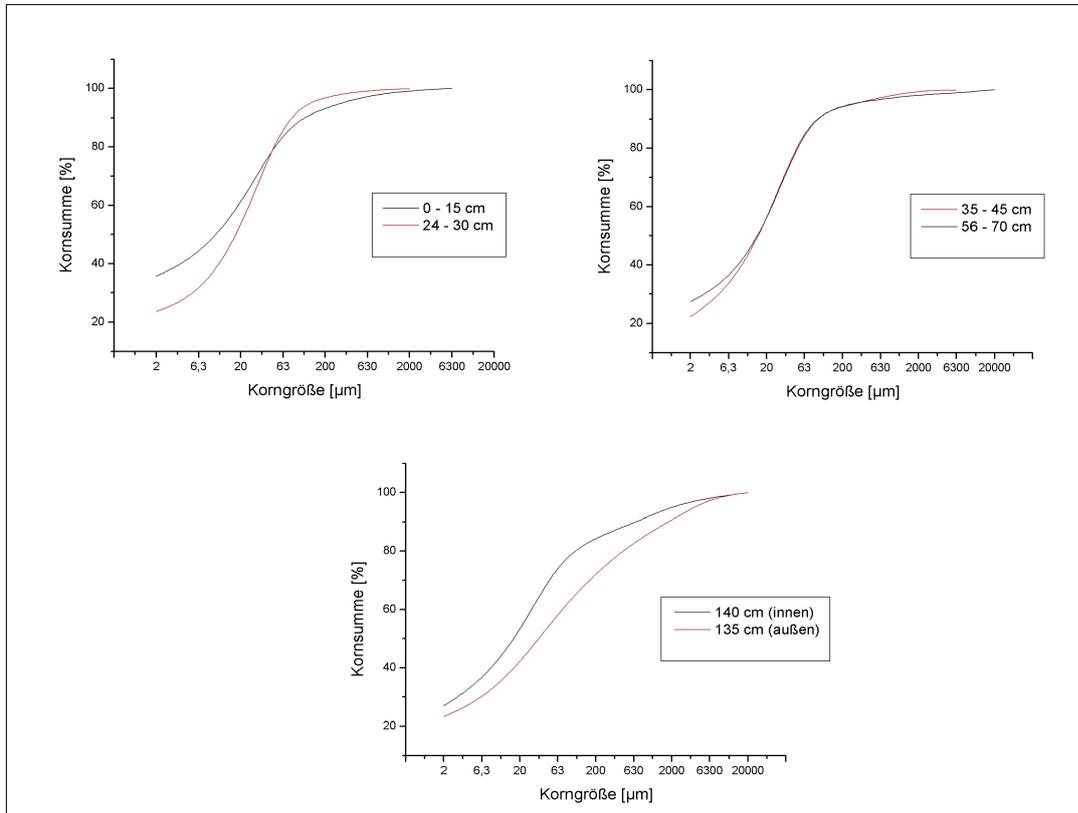


Abbildung A.12: Kornsummenkurven zu den Proben aus der archäologischen Grabung im November 2006 in Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. 45). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tabelle A.15: Feucht- und Trockendichte der Stechzylinder-Proben aus der archäologischen Grabung im November 2006 in Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. 45). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tiefe [cm]	V_{innen} [cm ³]	V_{Sand} [cm ³]	$V_{Füll}$ [cm ³]	$m_{feldfeucht}$ [g]	$m_{trocken}$ [g]	ρ_{feucht} [g/cm ³]	$\rho_{trocken}$ [g/cm ³]
5-8	68,7	2,0	66,7	122,9	115,7	1,84	1,73
25-28	67,6	2,5	65,1	131,5	94,7	2,02	1,65
65-68	66,4	3,0	63,4	117,8	100,5	1,86	1,49
87-90	68,7	2,0	66,7	131,9	109,2	1,98	1,64
94-97	68,7	1,5	67,2	138,0	107,7	2,05	1,71
147-150	66,4	2,0	64,4	122,2	115,0	1,90	1,56

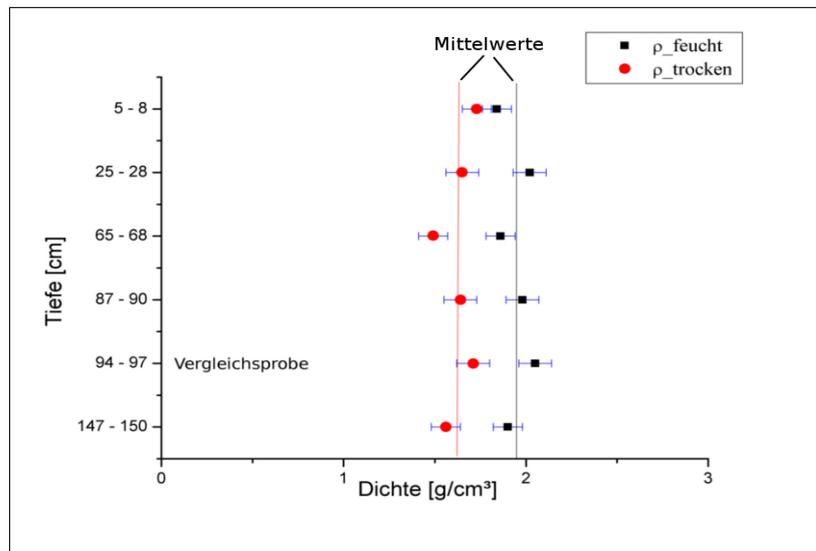


Abbildung A.13: Feucht- und Trockendichte mit entsprechenden Fehlerintervallen der Stechzylinder-Proben aus der archäologischen Grabung im November 2006 in Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. 45). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tabelle A.16: Feldansprache der archäologischen Grabung im März/April 2008 in Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. 50). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

März/April 2008, R 3487739, H 5455486				
Tiefe [cm]	Horizont	Bodenart	Bodenfarbe	Besonderheiten/Sonstige Merkmale
0-10	Ah	Ut2/3	10YR3/3	
10-30	M	Lu	10YR4/3	
30-50	M	Ut2/3	10YR5/4	
50-70	M	Lu	10YR5/4	helle Verfüllung, vermutlich Wallmaterial
70-95	M	Lt2/3	2,5Y2/0	Brandschicht, Holzkohle
95-110	M	Lu	10YR5/4	lehmige Verfüllung, stark fleckig, klebrig
110-140	M	Lu	10YR4/4	lösshaltig, streifig
140-160	M	Lu	10YR4/4	
160-180	M	Ut2/3	10YR5/4	hoher Lössanteil
180-200	M	Ut2/3	10YR5/4	hoher Lössanteil
100-110	C	Ut2/3	10YR5/4	Lösslehm-Fließerde, seitlich des Grabens
140-150	C	Ut2/3	10YR5/4	Keuperband in der Lösslehm-Fließerde
> 200	C	Ut2/3	10YR5/4	Unterhalb des Grabens, Löss /Lösslehm

A.4 Laborergebnisse zu den archäologischen Grabungen

Tabelle A.17: Laboranalysen zur archäologischen Grabung im März/April 2008 in Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. 50). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tiefe [cm]	Befund- nummern	m_{org} [%]		m_{Kalk} [%]	
		H_2O_2	Glühverlust	Glühverlust	Feld
0-10	1	2,93	5,21	6,38	0
10-30	2	1,17	2,86	5,67	0
30-50	3	0,25	1,59	5,31	0
50-70	4	0,12	1,40	19,90	10-25
70-95	5	0,58	5,80	15,86	7-10
98-110	6	0,27	2,01	6,32	0
110-140	7	0,14	1,28	11,25	7-10
140-160	8a	0,09	1,04	18,14	7-10
160-180	8b	0,02	0,83	24,32	25-50
180-200	8c	0,02	0,77	24,54	25-50
> 200	außen	0,03	0,62	26,53	25-50
100-110	außen	0,10	1,07	23,66	25-50
140-150	außen	0,05	0,63	29,34	25-50

Tabelle A.18: Korngrößenverteilung der Proben aus der archäologischen Grabung im März/April 2008 in Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. 50). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tiefe [cm]	Befund- nummer	fG [%]	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]
0-10	1	1,02	0,99	1,63	2,96	36,29	18,17	6,60	32,34
10-30	2	—	0,76	1,50	3,86	38,49	17,84	6,83	30,73
30-50	3	0,55	0,80	0,89	2,78	38,61	19,23	6,91	30,23
50-70	4	0,96	1,43	4,33	5,52	40,69	17,73	6,66	22,67
70-95	5	0,30	0,53	2,22	6,47	39,16	17,85	5,24	28,23
98-110	6	0,09	0,40	0,51	5,35	29,97	18,90	7,22	37,59
110-140	7	0,32	0,82	1,73	4,66	35,09	18,72	7,10	31,56
140-160	8a	1,47	1,58	6,87	11,45	35,30	15,36	5,46	22,49
160-180	8b	0,56	2,85	9,70	10,06	41,91	12,38	6,15	16,53
180-200	8c	0,08	1,70	6,84	8,49	36,33	21,26	6,85	18,43
> 200	außen	0,21	1,50	2,51	4,40	50,37	22,50	4,55	13,92
100-110	außen	1,75	2,83	10,00	9,90	33,27	15,29	6,56	20,41
140-150	außen	0,09	1,15	2,91	5,45	48,02	22,08	4,88	15,43

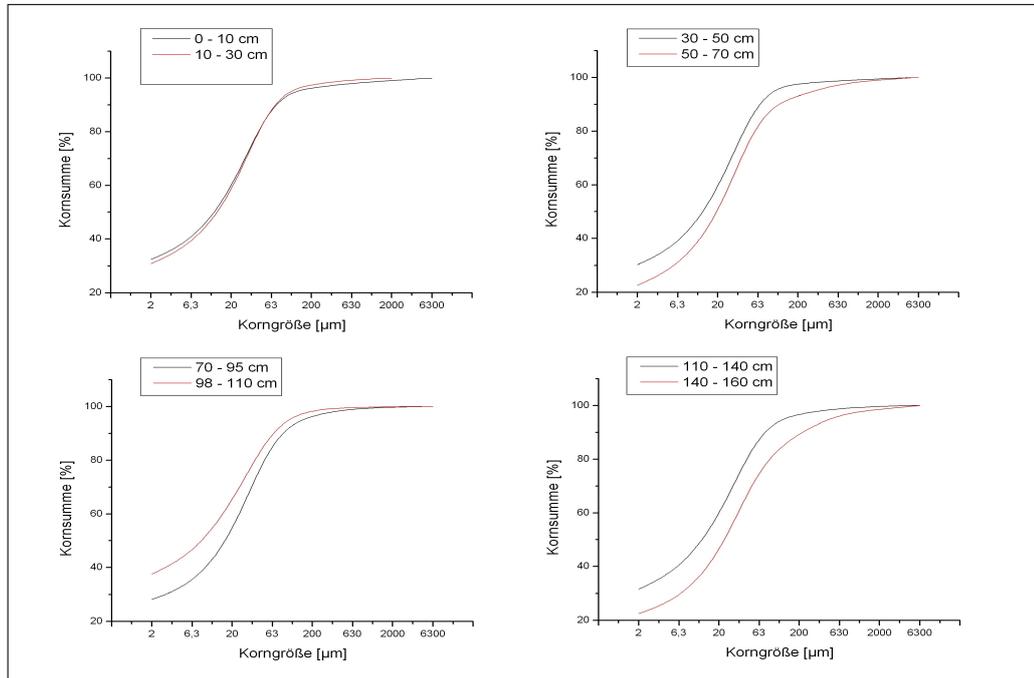


Abbildung A.14: Kornsummenkurven zu den Proben aus der archäologischen Grabung im März/April 2008 in Sinsheim-Dühren (vgl. Abb. 50). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

B Anhang Untersuchungsgebiet Neuenbürg-Grösseltal

B.1 Schürfgruben

Tabelle B.19: Feldansprachen der Schürfgruben im Grösseltal (vgl. Abb. 58). Quelle: Eigene Darstellung; Daten aus PROTOKOLLE GELÄNDEPRAKTIKUM PHYSISCHE GEOGRAPHIE BEI NEUENBÜRG-GRÖSSELTAL (2008).

1: Kolluvisol-Pseudogley, R: 3472177 H: 5411740						
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]
0 - 20	Ah	6 - 7	Sl2/3	7.5YR3/4	Subpolyeder	0
20 - 66	M/Sw	6 - 7	Sl2	7.5YR4/4	Kohärent	0
> 66	IIC/Sw	6 - 7		7.5YR4/6	Kohärent	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten/Sonstige Merkmale					
0 - 20	geringer Schluffgehalt					
20 - 66	Holzkohle, schwache Hydromorphierung					
> 66	Fließerde (gräulich), Rostflecken					
2: Kolluvisol, R: 3472161 H: 5411731						
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]
0 - 43	Ah	5 - 7	Sl2/3	7.5YR3/4	Subpolyeder	0
43 - 65	M	7	Sl2/3	7.5YR4/4	Kohärent	0
> 65	C	6	Sl2	10YR4/6	Kohärent	0
Tiefe [cm]	Besonderheiten/Sonstige Merkmale					
0 - 43	2 Ahg-Horizonte, Stillstandsphase					
43 - 65	Kolluvium, grobkörnig, steinig					
> 65	Fließerde, feinkörnig					
4: Regosol, R: 3472131 H: 5411749						
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]
0 - 20	Ah	7	Sl2/3	7.5YR3/2	Aggregat	
20 - 100	C	7		7.5YR4/4	Kohärent	
Tiefe [cm]	Besonderheiten/Sonstige Merkmale					
0 - 20						
20 - 100	große Wacker, oberflächenparallele Einregelung, Fließerde					
6: Kolluvisol-Gley, R: 3472179 H: 5411737						
Tiefe [cm]	Horizont	pH-Wert	Bodenart	Bodenfarbe	Gefügeform	Carbonatgehalt [%]
0 - 15	Ah	7		7.5YR4/3		
15 - 60	Ah/M	7				
60 - 120	Go	6,5		5YR5/2		
120 - 130	Gr	7		2.5YR4/6		

Tabelle B.19: Fortsetzung

Tiefe [cm]	Besonderheiten/Sonstige Merkmale					
0 - 15	Humus, körnig					
15 - 60	reliktscher Horizont					
60 - 120	gebleicht, Rostflecken, periodisch durchlüftet					
120 - 130	Grundwassereinfluss, ausgebleicht, Fermentation (Faulgeruch)					
7: Kolluvisol-Regosol, R: 3472179 H: 5411750						
Tiefe [cm]	Hori- zont	pH- Wert	Boden- art	Boden- farbe	Gefügeform	Carbonat- gehalt [%]
0 - 20	Ah		lS	7.5YR3/3		
20 - 45	M		lS	7.5YR4/4		
45 - 120	C		uS	7.5YR4/6		
Tiefe [cm]	Besonderheiten/Sonstige Merkmale					
0 - 20	stark durchwurzelt					
20 - 45	zunehmend verwitterte Sandsteine Holzkohle					
45 - 120	steinige Solifuktionsdecke, Löss-Einflüsse, hydromorph					
8: Kolluvisol-Regosol, R: 3472171 H: 54117510						
Tiefe [cm]	Hori- zont	pH- Wert	Boden- art	Boden- farbe	Gefügeform	Carbonat- gehalt [%]
0 - 15	Ah	7	uS	5YR4/3		
15 - 30	M	6	uS	7.5YR4/4		
30 - 75	IIM	6	sL	7.5YR4/4		
75 - 110	C	5,5	lT	7.5YR4/6		
Tiefe [cm]	Besonderheiten/Sonstige Merkmale					
0 - 15						
15 - 30	viele Steine					
30 - 75	Verbraunungsprozesse					
75 - 110	Solifuktionsdecke, Holzkohle					
9: Kolluvisol-Gley, R: 3472186 H: 5411749						
Tiefe [cm]	Hori- zont	pH- Wert	Boden- art	Boden- farbe	Gefügeform	Carbonat- gehalt [%]
0 - 18	Ah					
18 - 40	M					
40 - 150	Go					
> 150						
Tiefe [cm]	Besonderheiten/Sonstige Merkmale					
0 - 18						
18 - 40	Holzkohlestücke					
40 - 150	Hydromorphiemerkmale, Rostflecken					
> 150	Grundwasser, Vergleyung, keine Steine					
10: Kolluvisol-Regosol, R: 3472123 H: 5411756						
Tiefe	Hori-	pH-	Boden-	Boden-	Gefügeform	Carbonat-

Tabelle B.19: Fortsetzung

[cm]	zont	Wert	art	farbe	gehalt [%]
0 - 20	Ah	7	IS		
20 - 30	IM		IS		
30 - 45	IIM				
> 45	C		IS		
Tiefe [cm]	Besonderheiten/Sonstige Merkmale				
0 - 20	stark durchwurzelt, Ziegelbruchstücke				
20 - 30					
30 - 45	steiniges Kolluvium, Holzkohle, Solifluktsionsdecke				
> 45	Pseudovergleyung, Mg-Konkretionen, Rostflecken				

B.2 ERT-Profile

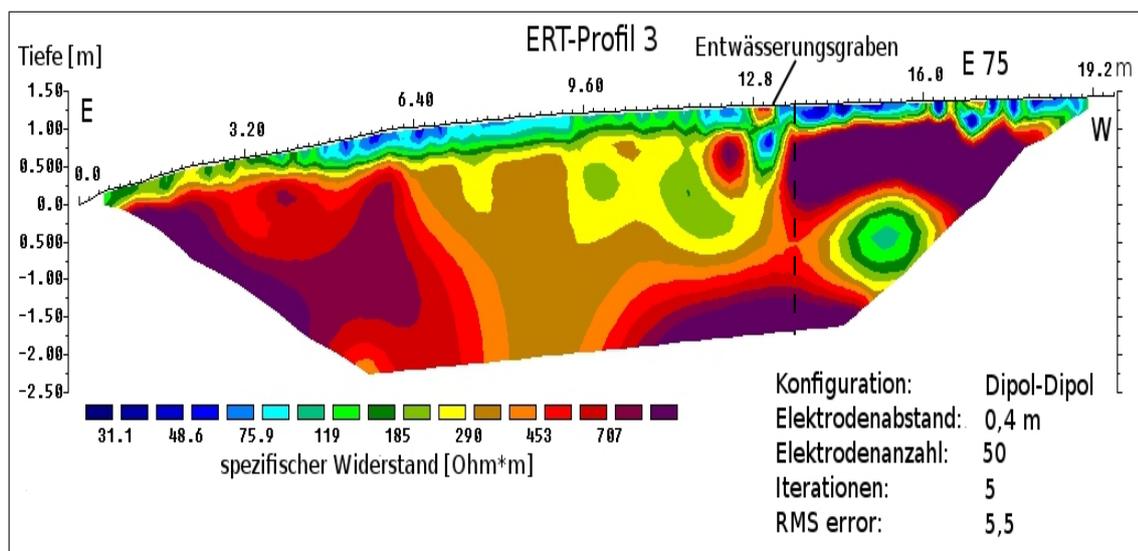


Abbildung B.15: ERT-Profil 3 im Grösseltal (vgl. Abb. 60). Die letzten 6 m des Profils verliefen auf einem Steg zwischen bereits geöffneten Grabungsflächen. Bei der oberflächennahen, auffälligen Struktur bei ca. 13 m handelt es sich um einen kleinen Graben, der im Laufe der archäologischen Grabung angelegt worden war, um die Grabungsflächen zu entwässern. Im Bereich zwischen 0 und ca. 14 m dieses Profils fand keine weitere Grabung statt, weswegen keine gesicherte Interpretation geliefert werden kann. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

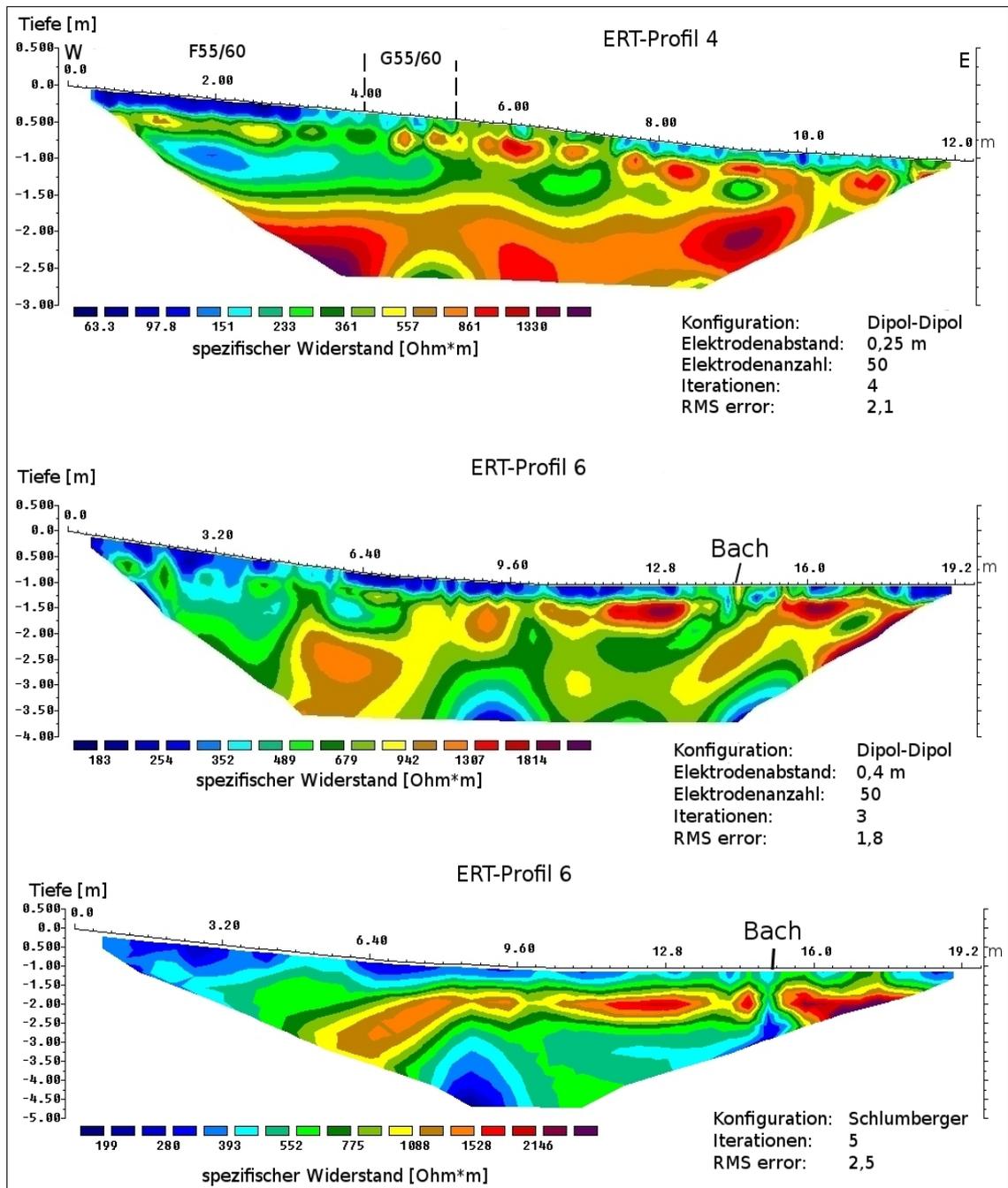


Abbildung B.16: ERT-Profile 4 (oben) und 6 mit Dipol-Dipol- (Mitte) und Schlumberger-Konfiguration (unten) im Grösseltal (vgl. Abb. 60). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

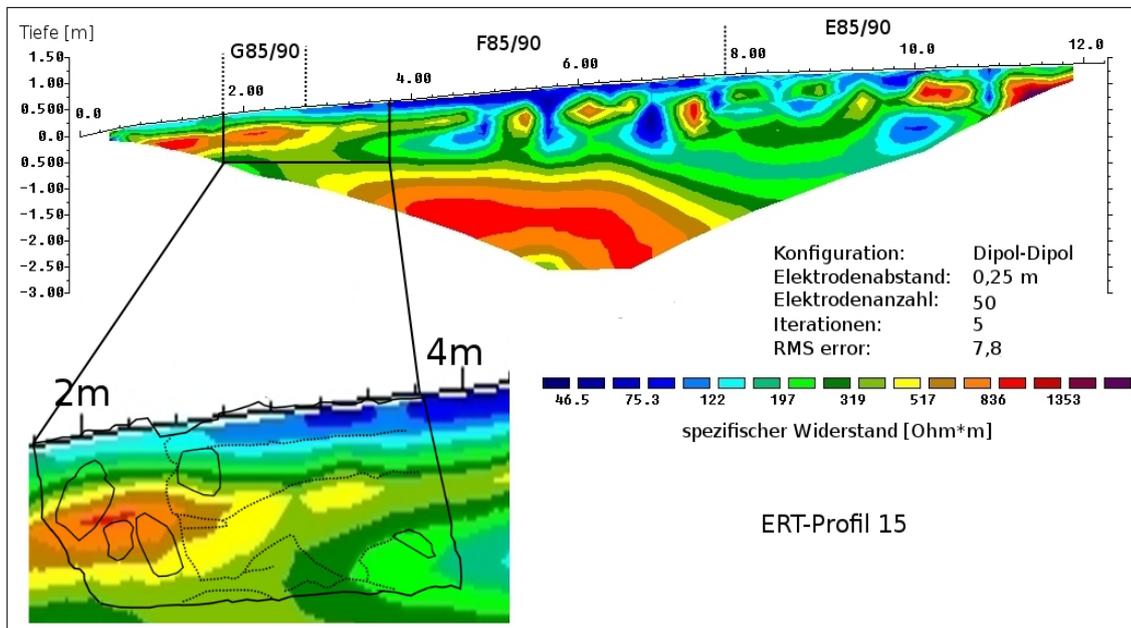


Abbildung B.17: Überlagerung des ERT-Profiles 15 mit der archäologischen Profilskizze des Südprofils der Grabungsflächen FG 85/90. Die Flächen E 85/90 und F 85/90 waren im Vorjahr bereits geöffnet, was sich in Form von Störungen erkennen lässt. Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

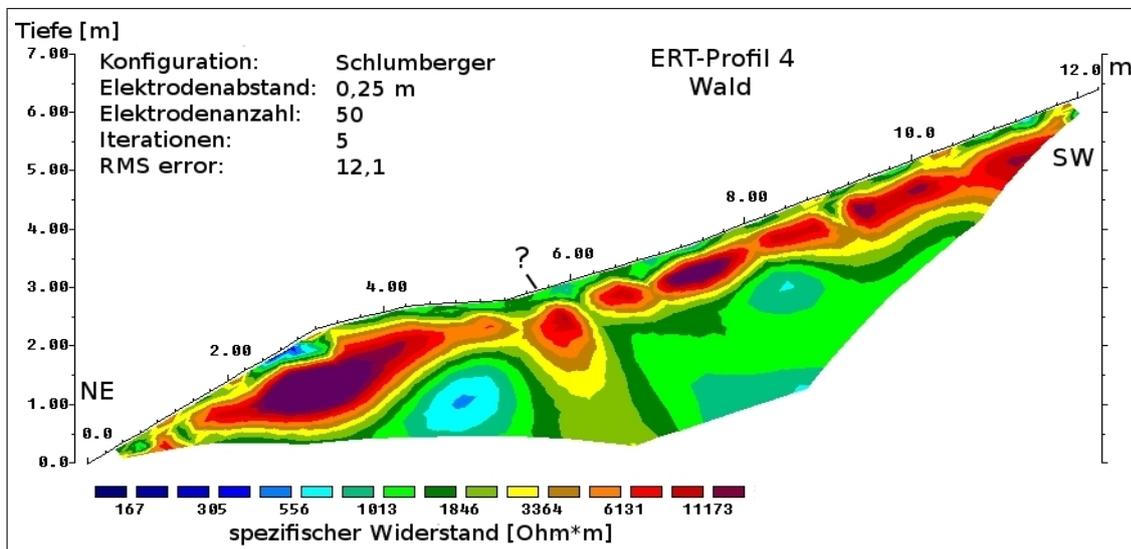


Abbildung B.18: Messung 4 am Hang des Sackberges oberhalb des Grabungsgeländes im Grösseltal (vgl. Abb. 78). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

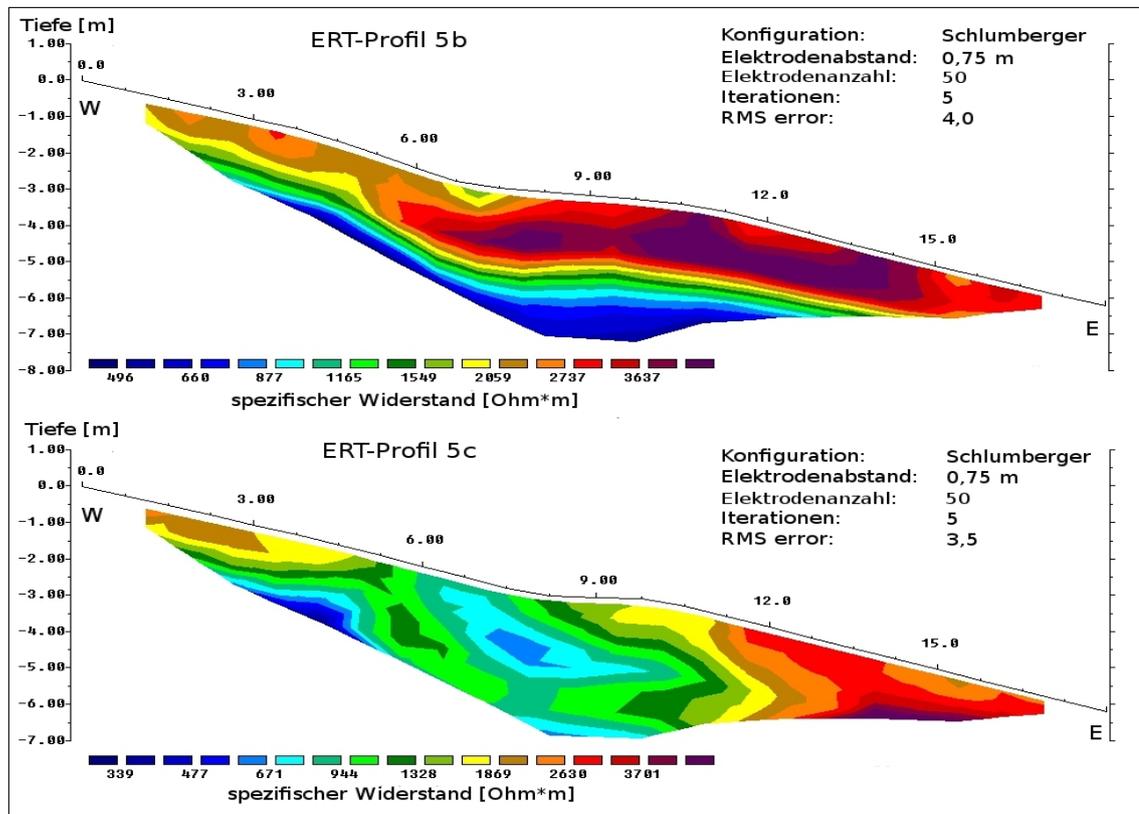


Abbildung B.19: Messungen 5b (oben) und 5c (unten) am Hang des Sackberges oberhalb des Grabungsgeländes im Grösseltal (vgl. Abb. 78). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

B.3 Laborergebnisse

Tabelle B.20: Laboranalysen zu den Proben aus dem Ostprofil der Flächen D 55 D 60 (vgl. Abb. 67). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tiefe [cm]	m_{org} [%]		m_{Kalk} [%]
	H_2O_2	Glühverlust	
0 - 20	1,70	3,24	4,06
30 - 40	0,99	2,07	3,58
55 - 65	0,50	1,83	3,00
90 - 100	1,02	8,61	5,34
110 - 120	0,32	0,82	3,35
120 - 130	0,22	0,58	2,82

Tabelle B.21: Korngrößenverteilung der Proben aus dem Ostprofil zu den Grabungsflächen D 55 und D 60 (vgl. Abb. 67). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tiefe [cm]	mG [%]	fG [%]	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]
0 - 20	—	0,31	4,86	30,87	20,75	11,81	10,80	5,09	15,51
30 - 40	—	0,16	3,59	32,04	21,35	9,14	14,24	4,66	14,84
55 - 65	1,61	4,37	9,65	28,45	20,52	10,29	9,40	4,58	11,13
90 - 100	3,79	4,37	10,28	27,06	18,43	8,24	10,39	8,17	9,27
110 - 120	—	2,26	5,58	29,83	19,23	9,53	11,63	6,62	15,32
120 - 130	32,64	6,98	5,24	17,74	11,85	6,59	7,39	3,57	8,01

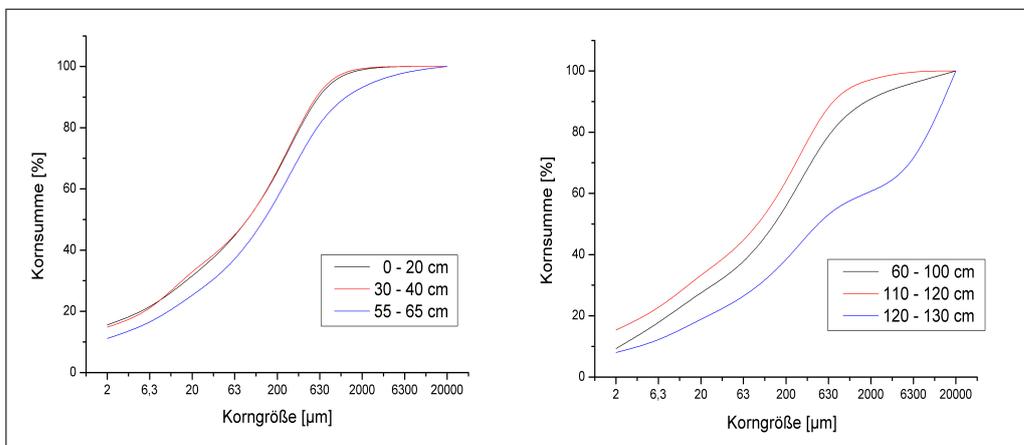


Abbildung B.20: Kornsummenkurven zu den Proben aus dem Ostprofil der Flächen D 55 und D 60 (vgl. Abb. 67). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tabelle B.22: Laboranalysen zu den Proben aus dem Nordprofil der Flächen F 75 (vgl. Abb. 70). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tiefe [cm]	Befund- nummer	m_{org} [%]		m_{Kalk} [%]
		H_2O_2	Glühverlust	Glühverlust
0 - 10	1	3,75	7,37	3,58
10 - 20	1	2,07	4,29	3,18
30 - 35	145	1,60	3,41	2,97
35 - 40	100	0,64	2,40	2,35
40 - 50	104	0,42	1,64	1,98
40 - 55 a	102	0,37	1,50	2,17
40 - 55 b	141	0,39	1,66	2,57
55 - 65 a	105	0,49	1,45	2,41
55 - 65 b	118	0,36	1,64	1,96
95 - 100	106	0,34	1,25	2,28

Tabelle B.23: Korngrößenverteilung der Proben aus dem Nordprofil zur Grabungsfläche E75 (vgl. Abb. 70). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Tiefe [cm]	Befundnummer	mG [%]	fG [%]	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]
0 - 10	1	—	0,25	3,49	28,16	20,90	10,47	12,71	5,65	18,47
10 - 20	1	—	0,74	4,14	27,88	18,30	11,70	12,05	6,27	18,94
30 - 35	145	1,45	0,81	7,55	26,26	16,74	11,61	11,94	5,65	17,98
35 - 40	100	2,52	7,92	10,77	27,83	16,27	9,21	9,23	4,54	11,74
40 - 50	104	—	3,21	8,48	34,48	20,47	10,69	8,89	4,19	9,58
40 - 55 a	102	5,35	2,19	6,95	31,54	19,27	10,31	9,12	4,47	10,79
40 - 55 b	141	4,55	0,49	4,70	28,14	19,49	10,62	11,95	5,01	15,07
55 - 65 a	105	—	2,78	4,94	31,71	20,10	11,46	10,60	4,45	13,97
55 - 65 b	118	—	1,60	8,43	35,28	19,00	10,07	9,72	4,92	10,97
95 - 100	106	5,88	5,40	8,08	29,87	16,86	8,67	8,35	3,82	13,07

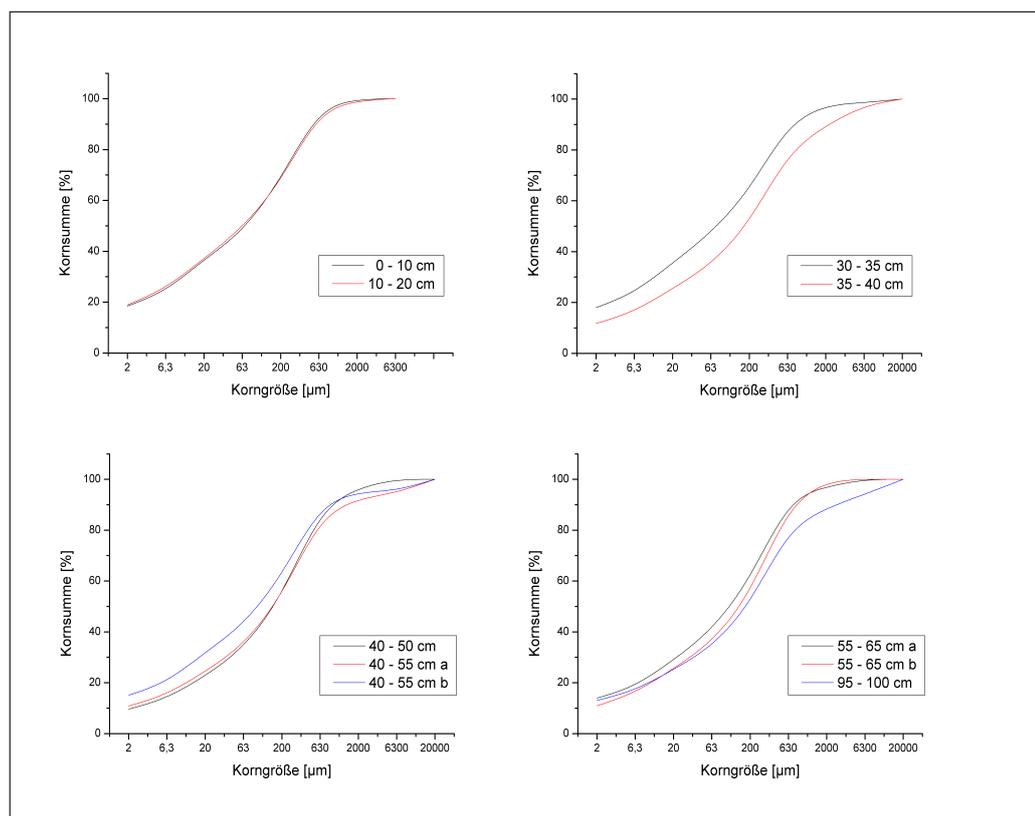


Abbildung B.21: Kornsummenkurven zu den Proben Nordprofil der Grabungsflächen E 75 (vgl. Abb. 70). Quelle: Eigene Darstellung und Datenerhebung.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die von mir vorgelegte Dissertation selbstständig angefertigt und die benutzten Quellen und Hilfsmittel, einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen, vollständig angegeben habe. Daten und Materialien, die nicht von mir selbst erhoben wurden, bzw. mir von anderen überlassen wurden, sind besonders kenntlich gemacht. Außerdem versichere ich, dass ich an keiner anderen Stelle ein Prüfungsverfahren beantragt habe, dass diese Dissertation noch keiner anderen Fakultät oder Universität zur Prüfung vorgelegen hat, dass sie noch nicht veröffentlicht worden ist und ich eine solche Veröffentlichung vor Abschluss des Promotionsverfahrens nicht vornehmen werde. Die Bestimmungen der Promotionsordnung sind mir bekannt.

Barbara Matthes