

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science RWTH Aachen University
(B.Sc. RWTH)

Geoelektrische Untersuchungen zum
Sedimentaufbau des
Schwemmfächers von El Almendral
(Andalusien, Spanien)

Prüfer:

Herr Prof. Dr. K. Reicherter

Vorgelegt von:

Name: Jessica Thomas

Matrikelnr.: 283134

Studiengang: Georessourcenmanagement

Aachen, September, 2010

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	3
TABELLENVERZEICHNIS	4
KURZFASSUNG	5
ABSTRACT	5
1. EINLEITUNG	6
2. GEOLOGIE UND GEOGRAPHIE	7
2.1. GEOLOGIE DES GROßRAUMES SÜDSPANIEN	7
2.2. GEOLOGIE UND GEOGRAPHIE DES ZAFARRAYA BASIN	8
3. MESSMETHODEN	12
3.1. GEOELEKTRIK	12
3.2. RAMMKERNSONDIERUNG (RKS)	16
3.2.1. DURCHFÜHRUNG	16
3.2.2. BOHRKERNAUFNAHME	17
3.3. KÖRNUNGSANALYSE	18
3.3.1. VORBEHANDLUNG	18
3.3.2. SIEBEN	19
3.3.3. KÖHN-VERFAHREN	20
3.3.4. BERECHNUNG DER ANALYSEERGEBNISSE	22
4. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	23
4.1. UNTERSUCHUNGSGEBIET	23
4.2. MESSUNGEN	24
5. ERGEBNISSE	25
5.1. GEOELEKTRIK	25
5.2. KÖRNUNGSANALYSE	31
6. DISKUSSION	40
7. FAZIT	45
LITERATURVERZEICHNIS	46
ANHANG	48
ERKLÄRUNG	76

Abbildungsverzeichnis

ABB. 1: GEOLOGISCHE KARTE MIT HÖHENINFORMATIONEN (SCHRAMM, 2010, VERÄNDERT).....	9
ABB. 2 A (LINKS): KLUFTRÖSE MIT FLÄCHENGLEICHHEIT DER SIERRA GORDA EINHEIT AM NÖRDLICHEN RAND DER ZAFARRAYA POLJE; ABB. 2 B (RECHTS): STEREO NETZ DER SCHICHTEN DER SIERRA GORDA EINHEIT AM NÖRDLICHEN RAND DER ZAFARRAYA POLJE (FLÄCHENGLEICHHEIT)	10
ABB. 3: GEOLOGISCHE UND HYDROGEOLOGISCHE SITUATION DES ZAFARRAYA POLJES (GISBERT J., 2002)	11
ABB. 4: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER VIERPUNKTANORDNUNG (KNÖDEL, 2005)	12
ABB. 5: WENNERANORDNUNG (A) UND DIPOL-DIPOL-ANORDNUNG (C) (LOWRIE, 2006, VERÄNDERT).....	15
ABB. 6: SCHLAGHAMMER	16
ABB. 7: HYDRAULISCHES ZIEHGERÄT MIT KLEMME	17
ABB. 8: SCHLITZSONDE.....	17
ABB. 9: BOHRKERNAUFNAHME IM FELD	17
ABB. 10: ÜBERSICHT DER PROFILE UND BOHRKERNE IM UNTERSUCHUNGSGEBIET	23
ABB. 11: UNTERGRUNDPROFIL ZUR MESSUNG 71 (DIPOL-DIPOL).....	27
ABB. 12: UNTERGRUNDPROFIL ZUR MESSUNG 73 (DIPOL-DIPOL).....	27
ABB. 13: UNTERGRUNDPROFIL ZUR MESSUNG 75 (WENNER_LONG)	28
ABB. 14: UNTERGRUNDPROFIL ZUR MESSUNG 78 (WENNER_LONG)	29
ABB. 15: UNTERGRUNDPROFIL ZUR MESSUNG 79 (WENNER_LONG)	30
ABB. 16: UNTERGRUNDPROFIL ZUR MESSUNG 102 (WENNER_LONG)	31
ABB. 17: EINTEILUNG DER BODENARTEN NACH DIN 4220 IM KONZENTRATIONSDREIECK SAND (S), SCHLUFF (U) UND TON (T) MIT BEURTEILUNG IHRER BEARBEITUNGSFÄHIGKEIT (KUNTZE, 1978).....	34
ABB. 18: ANTEILE DER EINZELNEN FRAKTIONEN DES FEINBODENS FÜR DIE UNTERSUCHTEN LAGEN DES BOHRKERNS 2 IN GEW.-% MIT ANGABE DER ZUGEHÖRIGEN BODENART.....	34
ABB. 19: ANTEILE DER EINZELNEN FRAKTIONEN DES FEINBODENS FÜR DIE UNTERSUCHTEN LAGEN DES BOHRKERNS 3 IN GEW.-% MIT ANGABE DER ZUGEHÖRIGEN BODENART.....	35
ABB. 20: ANTEILE DER EINZELNEN FRAKTIONEN DES FEINBODENS FÜR DIE UNTERSUCHTEN LAGEN DES BOHRKERNS 10 IN GEW.-% MIT ANGABE DER ZUGEHÖRIGEN BODENART.....	36
ABB. 21: MEDIAN DER UNTERSUCHTEN LAGEN DER BOHRKERNE 2, 3 UND 10	39
ABB. 22: ÜBERSICHTSKARTE DER BOHRPUNKTE UND PROFILE AUF DEM SCHWEMMFÄCHER.....	40

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: FALLZEITEN BEI DER KORNGRÖßENANALYSE (AUSZUG AUS DER DIN 19683-2)	20
TABELLE 2: UNVERÄNDERTE ERGEBNISSE DER KÖRNUNGSANALYSE (FEINBODEN ENTSPRICHT 100%).....	33
TABELLE 3: KORRIGIERTE ERGEBNISSE DER KÖRNUNGSANALYSE (FEINBODEN ENTSPRICHT 100%)	33
TABELLE 4: UNVERÄNDERTE ERGEBNISSE DER KÖRNUNGSANALYSE (GROB- + FEINBODEN ENTSPRECHEN ZUSAMMEN 100%).....	37
TABELLE 5: KORRIGIERTE ERGEBNISSE DER KÖRNUNGSANALYSE (GROB- + FEINBODEN ENTSPRECHEN ZUSAMMEN 100%)	38
TABELLE 6: MEDIAN (D_{50}) DER UNTERSUCHTEN LAGEN.....	39
TABELLE 7: SPEZIFISCHE ELEKTRISCHE WIDERSTÄNDE FÜR LOCKERSEDIMENTE, ORGANOGENE UND ANTHROPOGENE ABLAGERUNGEN, FESTGESTEINE UND WÄSSER (KNÖDEL, 2005)	41

Kurzfassung

Im Rahmen des Teilprojektes C1 des Sonderforschungsbereichs 806 werden archäologische und terrestrische Archive untersucht, um Hinweise auf Klimaveränderungen und Umweltbedingungen zu finden, die zur Ausbreitung des modernen Menschen und zum Aussterben des Neandertalers geführt haben. Ein solches Archiv ist der Schwemmfächer von El Almendral, der in dem Zafarraya Polje in Andalusien (Spanien) liegt. Durch geoelektrische Untersuchungen und Körnungsanalysen von Bohrkernen wurde der Aufbau dieses Schwemmfächers erforscht. Die Sedimente bestehen überwiegend aus Tonen und Schluffen und sind in der Mitte des Schwemmfächers mindestens 20 m mächtig. Darunter befindet sich kalkhaltiges, dichteres Material, welches vermutlich unter anderen Sedimentationsbedingungen entstanden ist.

Abstract

Archaeological as well as terrestrial archives will be studied in the context of the project C1 of the Collaborative Research Centre 806 to get new information about climatic changes and environmental settings which lead to the dispersal of the modern humans and the extinction of the Neanderthals. The alluvial fan of El Almendral which is situated in the Zafarraya polje at Andalusia (Spain) is one of those archives. The sedimentary structure of this alluvial fan was explored by using geoelectrical investigation and a grain-size analysis. The sediments have a thickness of at least 20 m in the middle of the alluvial fan and consist mainly of clay and silt. Thereunder is calcareous, denser material which is probably deposited upon other climatic conditions.

1. Einleitung

Der Sonderforschungsbereich 806, in dem die Universität zu Köln, die RWTH Aachen, die Universität in Bonn und das Neandertal-Museum in Mettmann gemeinsam forschen, beschäftigt sich sowohl mit kulturellen und sozialen als auch mit klimatischen und ökologischen Aspekten der Verbreitung des modernen Menschen von Afrika ins westliche Eurasien. Ebenfalls werden die Ursachen und der Verlauf des Aussterbens des Neandertalers erforscht. Hierbei sind sowohl die zeitliche Abfolge innerhalb der letzten 190.000 Jahre als auch regionale Strukturen von Bedeutung.

Diese Arbeit ist in das Cluster C dieses Sonderforschungsbereiches integriert, das sich mit einem potentiellen westlichen Verbreitungsweg des modernen Menschen von Afrika auf die Iberische Halbinsel über die Straße von Gibraltar beschäftigt und in zwei verschiedene Zeitperioden unterteilt ist. Das Unterprojekt C1 untersucht die Besiedelung Europas durch den modernen Menschen und das Aussterben des Neandertalers, der auf der Iberischen Halbinsel vermutlich länger überleben konnte als im übrigen Europa, im Zeitraum zwischen 45 und 25 ka vor heute (mittleres bis spätes Pleistozän). In diesem Zusammenhang sollen sowohl archäologische als auch terrestrische Archive auf der Iberischen Halbinsel untersucht werden, denn Klima und Umweltbedingungen haben großen Einfluss auf kulturelle Veränderungen und die Verbreitung von Populationen. Hierbei werden unter anderem neue sedimentologische Informationen gewonnen, die die Basis des Projektes bilden. Ausschlaggebend für diese Studie ist die große Anzahl an archäologischen Funden aus dieser Zeit auf der Iberischen Halbinsel.

Eines dieser terrestrischen Archive ist das Zafarraya Polje in Andalusien. Aus mikroskaliger Perspektive betrachtet birgt dieses Polje weitere interessante Archive, wie den Schwemmfächer von El Almendral im Norden des Poljes, der Gegenstand dieser Arbeit ist. Aus diesem Archiv können interessante Informationen zu regionalen Klimaveränderungen anhand der Änderung der Sedimentationsbedingungen gewonnen werden.

Um zu diesen Informationen zu kommen, sind zunächst Erkundungsuntersuchungen nötig, die erste Ergebnisse zum generellen Aufbau des Schwemmfächers und dessen Sedimente liefern. Hierfür ist vor allem die Geoelektrik ein geeignetes Verfahren, um die Struktur des Untergrundes bis in größere Tiefen zu erfassen. So können Änderungen des Materials erfasst werden und Rückschlüsse über die Gesamtsedimentmächtigkeit über dem anstehenden Gestein gezogen werden. In Kombination mit mehreren auf dem Schwemmfächer verteilten Bohrungen kann die Struktur der Oberflächensedimente analysiert und so eine genaue Charakterisierung dieser Sedimente vorgenommen werden.

Diese Arbeit legt in diesem Rahmen einen Schwerpunkt auf die Geoelektrik, die in Kombination mit einer Körnungsanalyse ausgewählter Proben die prinzipielle Struktur des Schwemmfächers von El Almendral aufzeigen soll.

2. Geologie und Geographie

2.1. Geologie des Großraumes Südspanien

Die Betische Kordillere in Südspanien wird im Westen durch das alpidische Orogen begrenzt und erstreckt sich bogenförmig Richtung Osten. Sie bildet den nördlichen Arm des Betikum-Rif-Bogens, der die Alborán-See, den westlichen Teil des Mittelmeers, umschließt und sich bis in das Rif-Gebirge Nordmarokkos erstreckt. Große Teile der alpidischen Betischen Kordillere und des Rifs werden seit dem Pliozän entlang der O-W verlaufenden Konvergenzzone zwischen der Europäischen und der Afrikanischen Platte deformiert. Seit dem oberen Miozän ist die Bewegung der Europäischen Platte OSO-gerichtet. Dies führt zu einer ca. N-S bis NW-SO gerichteten, subhorizontalen Hauptkompressionsrichtung. Die Betische Kordillere erstreckt sich vom Golf von Cádiz über Alicante bis zur Insel Mallorca und wird in eine Internzone und eine Externzone gegliedert. Von Süden nach Norden gibt es verschiedene tektono-stratigraphische Einheiten, die neogenen Becken und postorogenen Vulkanite, die Internzone, die Externzone, die Iberische Meseta und die Flysche von Campo de Gibraltar.

Bei den neogenen Becken handelt es sich um intramontane Becken, die durch strike-slip Störungen und Abschiebungen entlang der Intern-/Externgrenze im unteren bis mittleren Miozän entstanden sind. Sie haben seit dem Torton mächtige terrigene und marine Sedimente aufgenommen, die postorogenen Sedimente sind stellenweise mehr als 1000 m mächtig. Die Becken sind entweder als Synklinen, die während einer späteren Faltungsphase abgesenkt wurden, oder als Grabenstruktur ausgebildet. Die Sedimentfüllungen der Grabenstrukturen wurden durch die spätere Deformationsphase nicht beansprucht.

Während der neogenen Extension kam es zunächst zu basischem, intermediärem und saurem Vulkanismus, der im Mittelmiozän und Pliozän kalk-alkalisch wurde. Dies steht im Zusammenhang mit der Aktivierung großer Seitenverschiebungen. Von 5,9 Ma bis etwa 5,5 Ma vor heute, während der messinischen Salinitätskrise, gab es nur noch regionalen alkalischen Vulkanismus. Diese Krise ist auch in den Sedimentfüllungen der neogenen Becken konserviert.

Die Internzone wird in drei tektonische Komplexe gegliedert. Diese Komplexe weisen jeweils einen unterschiedlichen Metamorphosegrad auf, der vom Liegenden zum Hangenden jeweils sprunghaft abnimmt. Im Liegenden ist der Nevado-Filábride-Komplex zu finden, darauf folgt der Alpujárride-Komplex und im Hangenden schließlich der Malaguide-Komplex. Die Strukturen der Gesteine des Malaguide-Komplexes deuten auf mindestens eine variszische orogene Phase hin. Die beiden anderen Komplexe weisen viele tektonische Verdopplungen der Schichten auf.

Die Externzone besteht aus überwiegend nicht metamorphen mesozoischen und tertiären Sedimenten, die in eine Beckenserie (Subbetikum) und eine Schelfserie (Präbetikum) unterteilt werden. Während der Kreide war diese Zone ein stark gegliedertes Becken, das während der Oberkreide und dem Paläogen durch die Konvergenz der Iberischen und der Afrikanischen Platte geschlossen wurde. Im Torton bestand die Betische Kordillere dann aus marinen Becken, die die NO-SW gelegenen Gebirgsinseln umgaben. Aus den Gebirgsinseln entstanden durch Hebung ab dem Messin die heutigen Sierras.

Am Grenzkontakt hat sich die Externzone über die Internzone aufgefaltet und liegt diskordant über ihr.

(Reicherter, 2010)

2.2. Geologie und Geographie des Zafarraya Basin

Das Zafarraya Basin in Andalusien (Südspanien) liegt zwischen Granada und Malaga im südlichen Teil der Sierra Gorda, die zum zentralen Teil der betischen Kordillere gehört. Das Basin besteht aus mesozoischen Karbonaten, die zum Subbetikum der Externzone gehören. (López-Chicano et al., 2002)

Andalusien liegt in den winterfeuchten Subtropen. Das Klima ist ein mediterranes Mittelmeerklima mit milden, niederschlagsreichen Wintern und heißen, ariden bis semiariden Sommern.

Im Basin sind Terra rossa Böden (Schenkova & Zahradník, 1995) zu finden, die größtenteils landwirtschaftlich genutzt werden. Meist werden Gemüsesorten oder Olivenbäume angebaut.

Es gibt drei Ortschaften innerhalb des Basins, Zafarraya, Ventas des Zafarraya und El Almendral.

Morphologisch handelt es sich beim Zafarraya Basin um ein mit alluvialen und kolluvialen quartären Sedimenten (Reicherter et al., 2003) gefülltes Polje (vergl. **Abb. 1**).

Das Polje ist der größte Vertreter der Exokarstformen und als große wannenförmige Senke in der Landschaft zu erkennen. Die meisten Poljen, so auch das Zafarraya Polje, sind keine reinen Lösungsformen, sondern werden tektonisch begrenzt.

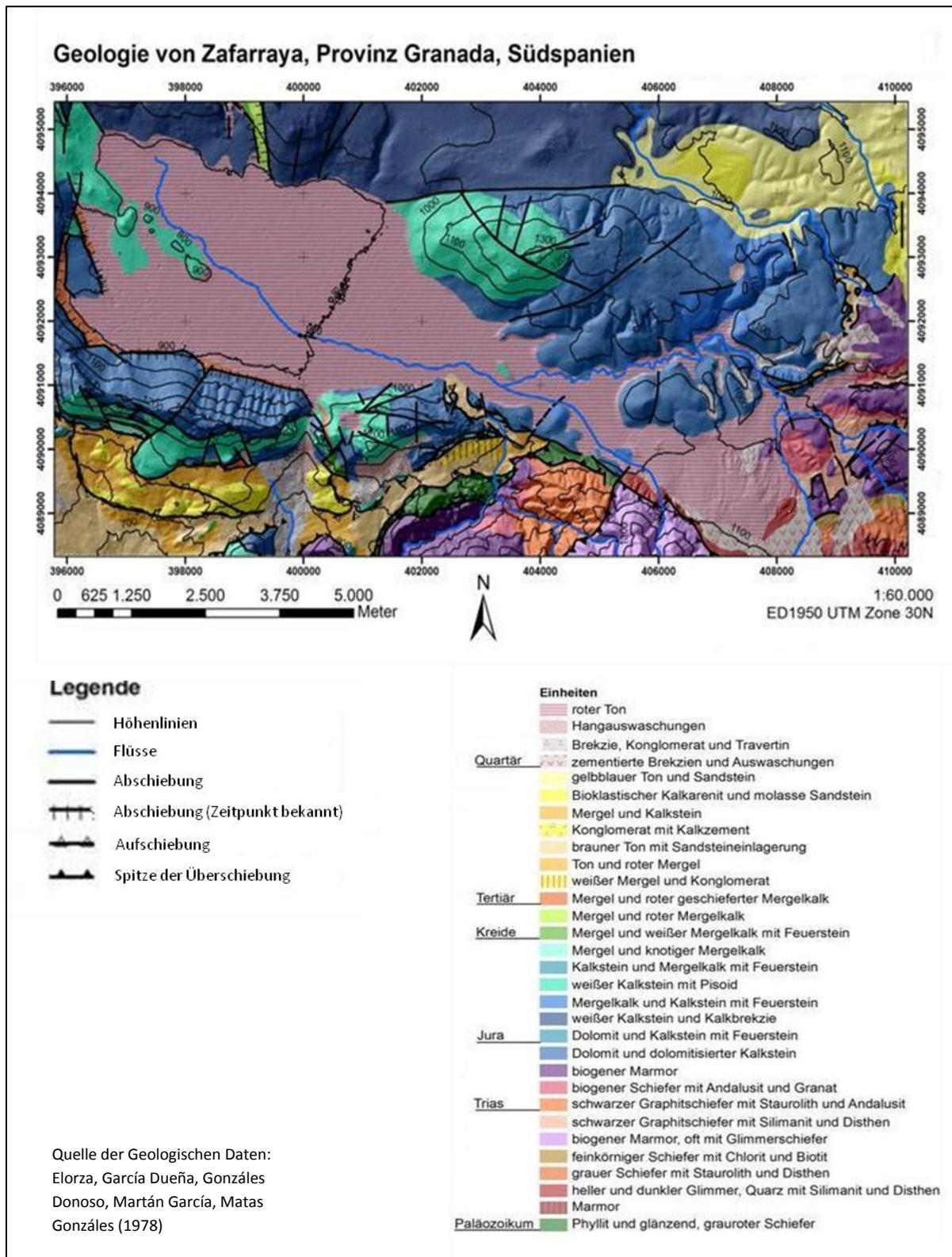


Abb. 1: Geologische Karte mit Höheninformationen (Schramm, 2010, verändert)

Das Zafarraya Polje liegt auf ca. 900 m über NN, hat eine elliptische Form und ist ca. 22 km² groß (10 km lang (OSO-WNW) und 3,5 km breit) (López-Chicano et al., 2002) und wird im Süden durch eine NNW-SSO-streichende (Schenkova & Zahradník, 1995) Störung begrenzt, die Ventas de Zafarraya Störung. Die Störung ist eine Abschiebung mit einer geringen rechtsseitigen Transversalkomponente. Sie streicht WNW-OSO und fällt mit einem Winkel von 60° nach NNO ein. Die Störung bildet eine Halbgrabenstruktur und schneidet die Intern-/Externgrenze der Betischen Kordillere. (Reicherter et al., 2003)

Im Norden wird das Polje durch das jurassische, weiße Kalksteinmassiv der Sierra Gorda begrenzt (vergl. **Abb. 3**) (García-Jerez et al., 2006). Die Schichten des Massivs streichen parallel zur Polje O-W und fallen nach Süden ein, wie in **Abb. 2 b** zu sehen. Die Kluftrose in **Abb. 2 a** zeigt, dass in diesem Gebiet zwei Hauptkluftrichtungen zu finden sind. Die eine Kluffgruppe streicht NNW-SSO, die andere NNO-SSW. Die Hauptrichtung beträgt ungefähr 340°.

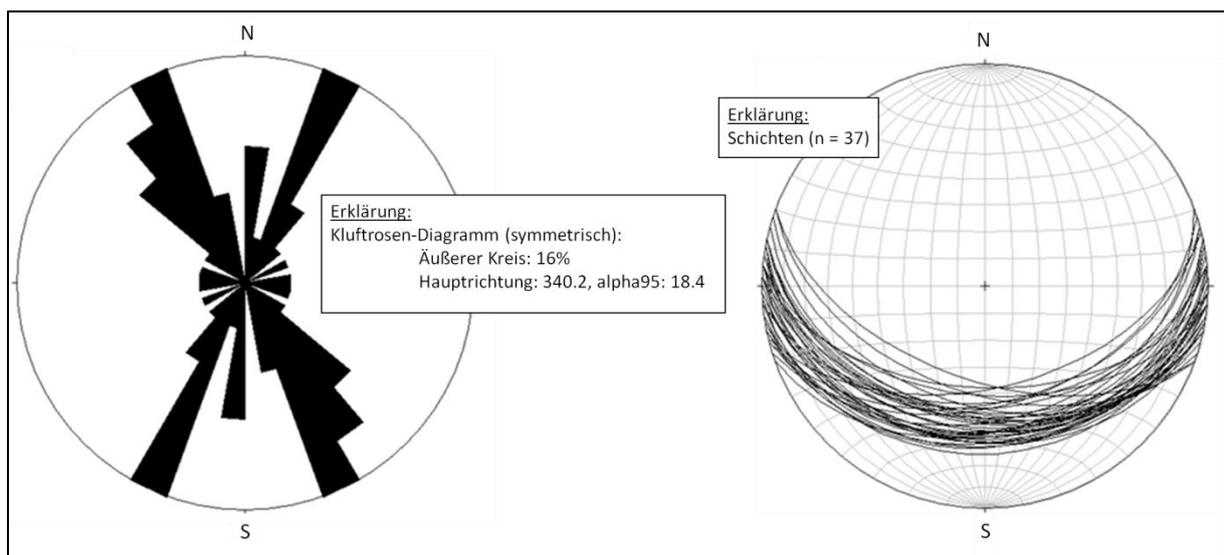


Abb. 2 a (links): Kluftrose mit Flächengleichheit der Sierra Gorda Einheit am nördlichen Rand der Zafarraya Polje; Abb. 2 b (rechts): Stereonetz der Schichten der Sierra Gorda Einheit am nördlichen Rand der Zafarraya Polje (Flächengleichheit)

Im Südosten begrenzt der nördlichste Teil der Sierra Tejeda das Polje. Die Einheiten der Sierra Tejeda, die dort zu finden sind, gehören zum Alpujarride-Komplex der Internzone und bestehen aus Schiefen und Mamor, wie auf der Karte in **Abb. 3** zu sehen ist (López-Chicano et al., 2002). Die übrigen Ränder des Zafarraya Basins werden durch die aus dolomitischen Kalkstein bestehende Zafarraya Einheit begrenzt (García-Jerez et al., 2006).

Im höheren Miozän war das Polje eine tektonische Depression in der marine Sedimentation stattfand (López-Chicano et al., 2002). Während des Pliozäns bis zum unteren Pleistozän änderten sich die Sedimentationsbedingungen und das Gebiet wurde zu einem fluvialen Basin mit einer exorheischen Entwässerung. Seit dem mittleren bis oberen Pleistozän hat das Basin aufgrund einer

neotektonischen Subsidenz keinen oberirdischen Abfluss mehr, sondern eine endorrheische Entwässerung, d.h. das oberflächige Entwässerungssystem versickert innerhalb des Poljes in Ponoren. (López-Chicano et al., 2002).

Es gibt zwei verschiedene hydrologische Einheiten im Zafarraya Basin. Zum einen handelt es sich um Geröllablagerungen aus dem Quartär und zum anderen um ein Karstaquifer, dass durch die jurassischen Kalksteine und Dolomitgesteine der Sierra Gorda gebildet wird. Letzteres kann bei Starkregen überlaufen, wodurch das Polje in regelmäßigen Abständen teilweise überflutet wird. (Gisbert et al., 2003)

Durch die hohe Permeabilität der intensiv verkarsteten Karbonatgesteine im Untergrund versickert in solchen Karstgebieten der größte Teil des Niederschlags in Ponoren. Im Zafarraya Polje infiltriert bis zu 60% des gefallen Niederschlags bis zum Zentrum des Poljes (López-Chicano et al., 2002). Dadurch gibt es einerseits nur wenig Oberflächenabfluss, andererseits ist das Polje aber auch anfällig für periodische Überflutungen bei Starkregen, wenn die Kapazität des Aquifers überschritten wird (Gisbert et al., 2003).

Die einzigen beiden saisonalen Flüsse des Poljes sind der Cazadores (García-Jerez et al., 2006) und der Arroyo de la Madre, der aus Quellen des Sierra Tejada Aquifers im Südosten entspringt, wie in der Karte in **Abb. 3** zu sehen ist, und in den Ponoren im Nordwesten des Polje versickert. (López-Chicano et al., 2002).

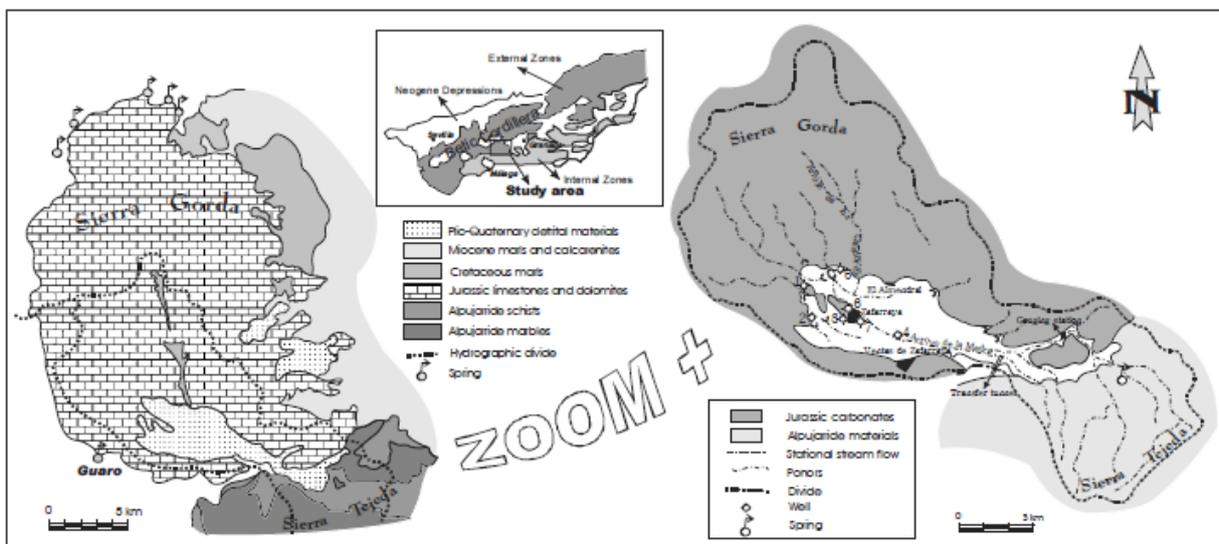


Abb. 3: Geologische und hydrogeologische Situation des Zafarraya Poljes (Gisbert J., 2002)

3. Messmethoden

3.1. Geoelektrik

Geoelektrische Untersuchungen haben das Ziel aus Parameterverteilungen auf Anomalien im Untergrund und ihre stofflichen Ursachen, sowie Bodenfeuchte und Untergrundaufbau zurückzuschließen.

Es wird zwischen elektrischen und elektromagnetischen Verfahren unterschieden. Im Folgenden wird die elektrische Gleichstrommethode, die zu den elektrischen Verfahren gehört, näher erläutert. (Weidelt, 2005)

Die Gleichstromgeoelektrik arbeitet mit stationären Strömen und Feldern auf der Basis einer Vierpunktanordnung, wie in **Abb. 4** gezeigt. Es wird Gleichstrom oder niederfrequenter Wechselstrom durch zwei geerdete Stromelektroden A und B in den Boden geleitet. Durch den leitfähigen Untergrund wird der Stromkreis geschlossen und es baut sich ein räumliches Potentialfeld auf, das durch die Leitfähigkeitsstrukturen im Untergrund beeinflusst wird. (Berkold, 1997), (Lange G., 2003)

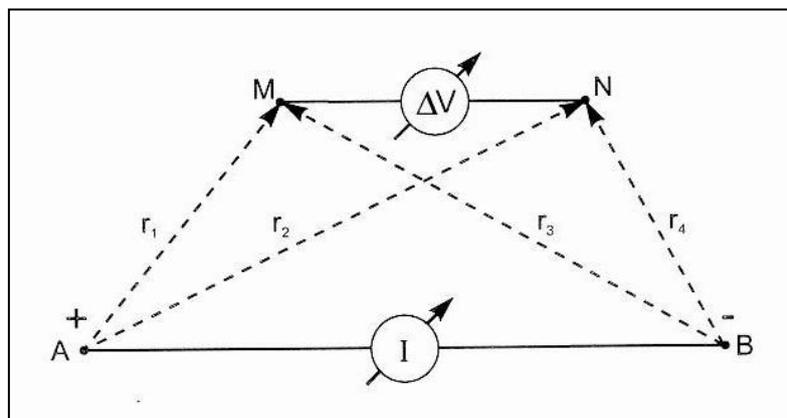


Abb. 4: Schematische Darstellung der Vierpunktanordnung (Knödel, 2005)

Bei der Einleitung von Wechselstrom an Stelle von Gleichstrom muss beachtet werden, dass sich dieser hinreichend langsam verändern muss. Es sind nur Frequenzen zwischen 1-100 Hz geeignet, da bei diesen Frequenzen Induktionseffekte und hiermit auch die Skin-Effekte noch vernachlässigbar gering sind. Die Einleitung von niederfrequentem Wechselstrom an Stelle von Gleichstrom hat den Vorteil, dass keine Polarisierungseffekte auftreten, d.h. der Einfluss von natürlichen Erdströmen auf das Messergebnis eliminiert wird. (Mundry et al., 1985)

Die elektrische Potentialdifferenz ΔV , oder auch die Spannung U, wird an zwei weiteren Elektroden M und N gemessen (vergl. **Abb. 4**). Die elektrische Leitfähigkeit σ im Untergrund wird dann mittels

des Geometriefaktors K der jeweiligen Auslage, der gegebenen Stromstärke I und der gemessenen elektrischen Potentialdifferenz ermittelt. Der scheinbare spezifische Widerstand ρ [Ωm] ergibt sich anschließend direkt als Kehrwert der Leitfähigkeit. (Berkold, 1997), (Lange & Jacobs, 2005)

Es handelt sich nur um einen scheinbaren spezifischen Widerstand, da bei dieser Berechnung von einem Halbraum mit homogener und isotroper Leitfähigkeit ausgegangen wird. In der Realität herrschen aber meist keine homogenen Verhältnisse vor, sondern das elektrische Feld wird durch Leitfähigkeitsstrukturen im Untergrund gegenüber dem homogenen Halbraum verändert und durch die Variation der Elektrodenanordnung wird kein konstanter Widerstand gemessen.

(Berkold, 1997), (Weidelt, 2005)

Zur Berechnung des Widerstandes wird zunächst davon ausgegangen, dass es im Medium einen Bereich der Länge L und des Querschnittes Q gibt, in dem die Leitfähigkeit σ homogen und isotrop ist. Senkrecht zu dem Querschnitt fließt ein Strom mit der Stromdichte j und der Stärke I . Unter diesen Voraussetzungen gilt die allgemeine Form des Ohmschen Gesetzes:

$$j = \sigma * E \quad 1)$$

Hier symbolisiert E das elektrische Feld.

(Berkold, 1997)

Außerdem gilt:

$$j = I/A \quad 2)$$

Hier ist A die Fläche, die vom Strom durchflossen wird.

Wird nun davon ausgegangen, dass es sich um einen stationären Strom handelt, der zeitunabhängig ist, vereinfacht sich die Maxwellsche Gleichung von:

$$\nabla \times E = - \delta B / \delta t \quad 3)$$

Zu:

$$E = - \nabla V \quad 4)$$

Hierbei ist E der elektrische Feldvektor und V das skalare elektrische Potential und somit $-\nabla V$ der negative Gradient eines skalaren Potentials V . B ist die magnetische Flussdichte und t die Zeit. (Lange G. , 2003), (Weidelt, 2005)

Der spezifische Widerstand ρ ergibt sich direkt als Kehrwert der Leitfähigkeit σ :

$$\sigma = 1/\rho \quad 5)$$

Wird nun von einer Punktquelle ausgegangen, die sich an der Oberfläche eines homogenen Halbraumes befindet und von einem Potential V im Abstand r mit einem Bezugspunkt im Unendlichen, gilt mit 2):

$$j_r = I / (2 \pi r^2) \quad 6)$$

Und aus 1), 5) und 6) folgt direkt:

$$E_r = I * \rho / (2 \pi r^2) \quad 7)$$

Mit 4) ergibt sich:

$$E_r = - \delta V / \delta r \quad 8)$$

Und somit gilt unter Verwendung von 7) und 8):

$$V_r = \int_r^\infty dV = I * \rho / (2 \pi r) \quad 9)$$

Hierbei wurde die Integrationskonstante gleich Null gesetzt, da angenommen wurde, dass kein räumlich konstantes Potential vorhanden ist.

(Berkthold, 1997), (Weidelt, 2005)

Für die Vierpunktanordnung, **Abb. 4**, die aus zwei Elektroden A und B zur Stromeinleitung und zwei Elektroden M und N zur Potentialdifferenzmessung besteht, ergibt sich durch Überlagerung der Einzelpotentiale aus 9) direkt die Neumannsche Formel:

$$\Delta V = I * \rho * [1/(2 \pi) (1/r_1 - 1/r_2 - 1/r_3 + 1/r_4)] \quad 10)$$

Nun wird zur Vereinfachung der Term in den eckigen Klammern als $1/K$ gesetzt und es ergibt sich für den spezifischen Widerstand des homogenen Halbraums:

$$\rho_s = K * \Delta V / I \quad 11)$$

Hier ist K der oben schon erwähnte Geometriefaktor, der für jede Elektrodenanordnung berechnet wird.

(Lange & Jacobs, 2005)

Die oben hergeleitete Beziehung 11) kann mit entsprechendem Geometriefaktor K für verschiedenste Elektrodenanordnung verwendet werden.

Es gibt verschiedene Auslagen, in denen die Elektroden unterschiedlich angeordnet werden. Die Auslageparameter sind jeweils andere. Auch das Auflösungsvermögen und die Erkundungstiefe einer Messung werden durch die jeweilige Anordnung der Elektroden bestimmt. Allgemein kann gesagt werden, dass das Auflösungsvermögen mit größerem Abstand zwischen den Elektroden abnimmt, die Erkundungstiefe hingegen mit wachsendem Abstand zunimmt. Das heißt je länger die Auslage ist, desto größer ist die Erkundungstiefe. (Lange G. , 2003)

Die Sensitivität einer Auslage ändert sich mit dem Abstand zu den Elektroden, sie nimmt mit größer werdendem Abstand ab. Sie gibt bei geoelektrischen Messungen an, wie sich das elektrische Potential durch eine Leitfähigkeitsänderung im Untergrund verändert. (Lange & Jacobs, 2005)

Im Folgenden wird nun näher auf die beiden Anordnungen Wenner und Dipol-Dipol eingegangen. Bei beiden Auslagen werden die Elektroden entlang einer geraden Linie in den Boden geschlagen.

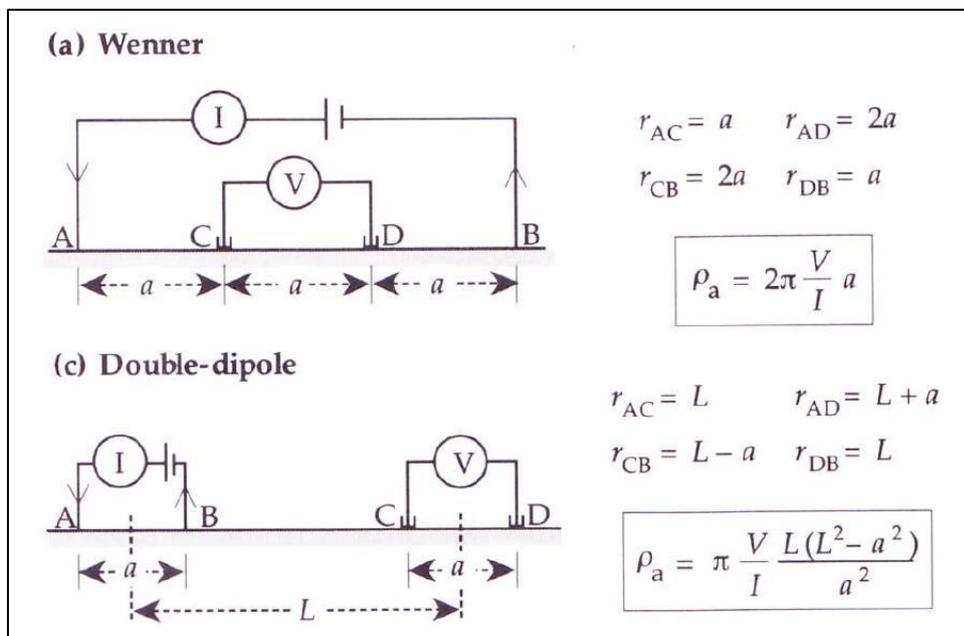


Abb. 5: Wenneranordnung (a) und Dipol-Dipol-Anordnung (c) (Lowrie, 2006, verändert)

Bei der Wenneranordnung haben die beiden Speiseelektroden, in die der Strom eingeleitet wird, und die beiden Elektroden, an denen die elektrische Potentialdifferenz gemessen wird, den gleichen Mittelpunkt, siehe **Abb. 5**. Außerdem ist bei dieser Anordnung der Abstand a zwischen allen Elektroden gleich und es gilt:

$$r_{AC} = r_{DB} = a \quad \text{und} \quad r_{AD} = r_{CB} = 2a$$

Somit ergibt sich unter Verwendung von 10) und 11) und mit $r_{AC} = r_1$, $r_{DB} = r_2$, $r_{AD} = r_3$ und $r_{CB} = r_4$ für die Wenneranordnung ein spezifischer Widerstand ρ_a :

$$\rho_a = 2\pi * V/I * a$$

Die Wenneranordnung wird vor allem für die laterale Erkundung von Widerstands-Kontrasten verwendet. Hier werden die Elektroden entlang einer Linie nach jeder Messung Schritt für Schritt weiter bewegt.

(Lowrie, 2006)

Dipol-Dipol-Messungen werden verwendet, wenn eine relativ große Eindringtiefe bei geringem Elektrodenabstand erreicht werden soll (Mundry et al., 1985). Die Elektrodenabstände zwischen den beiden Speiseelektroden und den beiden Elektroden, an denen die elektrische Potentialdifferenz gemessen wird, sind gleich und werden in **Abb. 5** als a bezeichnet. Die Abstand zwischen diesen beiden Elektrodenpaaren wird als L bezeichnet und ist größer als a (vergleiche **Abb. 5**). Also gilt:

$$r_{AC} = r_{DB} = L \quad \text{und} \quad r_{AD} = L + a \quad \text{und} \quad r_{CB} = L - a$$

Es ergibt sich unter Verwendung von 10) und 11) und mit $r_{AC} = r_1$, $r_{DB} = r_2$, $r_{AD} = r_3$ und $r_{CB} = r_4$ für die Dipol-Dipol-Anordnung ein spezifischer Widerstand ρ_a :

$$\rho_a = \pi * V/I * L (L^2 - a^2) / a$$

(Lowrie, 2006)

3.2. Rammkernsondierung (RKS)

3.2.1. Durchführung

Die Rammkernsondierung ist ein Bohrverfahren zur Bestimmung des Untergrundaufbaus von Lockersedimenten bis 15 m Tiefe.

Zur Durchführung wurde eine 1 m lange Schlitzsonde mit 10 cm Innendurchmesser (**Abb. 8**), 15 Verlängerungsstangen von je 1 m Länge, ein Schlaghammer mit Benzinmotor (**Abb. 6**), ein Schlagkopf und ein durch einen Benzinmotor betriebenes, hydraulisches Ziehgerät inklusive Klemme verwendet.

Zuerst wird eine geeignete Stelle ausgewählt und die Schlitzsonde senkrecht über dem Boden platziert. Nach dem Aufschrauben des Schlagkopfes wird die Sonde mit Hilfe des Schlaghammers senkrecht genau 1 m in den Boden gerammt, bis nur noch der Schlagkopf aus dem Bohrloch herauschaut. Bei diesem Vorgang wird der Boden in die hohle Stahlsonde gedrückt. Nach Abschrauben des Schlagkopfes



Abb. 6: Schlaghammer

und Aufschrauben einer Verlängerungsstange kann das hydraulische Ziehgerät aufgesetzt werden (**Abb. 7**). Zusätzlich wird eine Klemme verwendet, um ein Abrutschen des Gestänges zu verhindern

(**Abb. 7**). Anschließend wird die Sonde herausgezogen und horizontal mit der Öffnung nach oben für eine Bodenbestimmung im Feld abgelegt.

Zur Bodenansprache wird als erstes mit Hilfe eines Kittmessers die oberste Bodenschicht senkrecht zur Vortriebsrichtung abgeschält, um die einzelnen Schichten sichtbar zu machen. Es werden Schichtgrenzen bestimmt und einer Tiefe unter der Geländeoberkante zugeordnet. Dabei sollten Stauchungen, Verschleppungen und Bohrkernverluste z.B. bei Grundwassereinfluss berücksichtigt werden. Jede Schicht wird einzeln aufgenommen, wie in Kapitel 3.2.2. erläutert, und danach nummeriert in Probebeutel für weitere Untersuchungen im Labor verpackt und beschriftet.



Abb. 7: Hydraulisches Ziehgerät mit Klemme



Abb. 8: Schlitzsonde

Nach Reinigen der Schlitzsonde (**Abb. 8**) kann mit Hilfe einer Verlängerungsstange der zweite Meter gebohrt werden. Diese

Schritte werden wiederholt, bis die gewünschte Tiefe erreicht ist oder eine tiefere Bohrung aufgrund einer Kalkschicht oder Ähnlichem unmöglich ist.

3.2.2. Bohrkernaufnahme

Zur Aufnahme des Bohrkerns werden die einzelnen Lagen nummeriert und einer Tiefe unter Geländeoberkante mit einem Kürzel für die Art des Übergangs von einer Schicht zur nächsten angegeben. Nun wird an der feuchten Bodenprobe mit Hilfe von MUNSELL-Farbtafeln die Farbe der jeweiligen Schicht bestimmt. In **Abb. 9** ist die Bohrkernaufnahme anhand von MUNSELL-Farbtafeln im Feld dargestellt. Bei gefleckten Proben wird zusätzlich sowohl der Flächenanteil als auch die Größe der Flecken festgehalten.



Abb. 9: Bohrkernaufnahme im Feld

Um den Wassergehalt des Bodens zu bestimmen wird leicht gegen die Sonde geklopft. Es wird zwischen trockenem, feuchtem, nassem und wassergesättigtem Boden unterschieden.

Die Körnung wird durch Fingerproben bestimmt. Jede Lage wird einer der Bodenartenhauptgruppen Sande, Schluffe, Tone oder Lehme zugeordnet. Hierzu werden verschiedene Tabellen zur Bindigkeit

und Formbarkeit sowie ein Bestimmungsschlüssel herangezogen, in dem weitere Erkennungsmerkmale der jeweiligen Hauptgruppe aufgeführt sind (siehe Anhang 1 und Anhang 2). Auch der Skelettanteil wird im Feld abgeschätzt. Es wird notiert, ob Kies- oder Gruskörner erkennbar sind und der Anteil in Prozent abgeschätzt.

Außerdem wird der Karbonatgehalt durch Stärke und Dauer des Aufbrausens nach Behandlung mit Salzsäure grob bestimmt. Hierzu wird ein Stück der jeweiligen Schicht mit dem Kittmesser entnommen, um eine Kontamination der kompletten Schicht zu vermeiden.

Die Lagerungsdichte der einzelnen Schichten kann aufgrund von Sedimentstauchungen nur grob abgeschätzt werden. Es muss zudem festgehalten werden, wenn organisches Material, Karbonat-, Eisen- oder Mangananreicherungen in der Schicht zu finden sind oder ein Gefüge erkennbar ist. Hier ist es wichtig, sowohl die Art als auch die Größe und Härte der Anreicherungen zu bestimmen.

Abschließend sollten jegliche sonstige Besonderheiten aufgeführt werden, z.B. wenn das Material stark gestaucht ist oder keine Ansprache vorgenommen wurde. Letzteres ist der Fall, wenn es sich um verschlepptes Material handelt.

(Kehl, 2010)

3.3. Körnungsanalyse

3.3.1. Vorbehandlung

Bevor mit der Bestimmung der Korngrößenverteilung des Feinbodens begonnen werden kann, muss die Probe mehrere Tage getrocknet werden und danach der Skelettanteil, d.h. alle Körner mit einem Durchmesser > 2 mm, trocken abgeseibt werden. Nun werden 20 g des Feinbodens in ein Becherglas eingewogen. Danach müssen Proben mit einem Humusgehalt zwischen 1,5 und 15 Masse-% (Utermann et al., 2000) oder einem Kohlenstoffgesamtgehalt größer 0,5 % chemisch vorbehandelt werden.

Zur Karbonatzerstörung wird die Probe mit 10-15 %iger HCl-Lösung versetzt. Nachdem alle Karbonate zerstört sind, werden die Salze herausgespült. Dazu wird die Probe mit destilliertem Wasser aufgefüllt, über Nacht stehen gelassen und am nächsten Tag abdekantiert.

Nun kann, wenn nötig, das organische Material zerstört werden. Hierzu wird 100 ml 15 %ige H_2O_2 -Lösung zu der Probe im Becherglas gegeben. Die Probe muss nun zugedeckt mindestens 15 Stunden stehen bleiben. Zwischendurch kann sie in einem Wasserbad hin und wieder erhitzt werden, um die

Reaktion zu beschleunigen. Anschließend wird die Probe eingeeengt, um das überschüssige H_2O_2 zu entfernen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Probe nicht vollständig eintrocknet, da sie sonst unbrauchbar wird. Nun wird die Probe wieder mit destilliertem Wasser aufgefüllt, über Nacht stehen gelassen und am nächsten Tag abdekantiert. So wird sichergestellt, dass auf keinen Fall ein Rest der H_2O_2 -Lösung in der Probe verbleibt. Dies ist nötig, da H_2O_2 -Reste zu erhöhtem Druck und so zum Platzen der Schüttelflaschen beim anschließenden Überkopfschütteln führen können. (Utermann et al., 2000)

Ist die chemische Vorbehandlung abgeschlossen, wird die Probe in einem Becherglas mit 25 ml 0,1 molarer Natriumpyrophosphat-Lösung ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) versetzt, gut vermischt und über Nacht stehen gelassen. (Utermann et al., 2000)

Die Natriumpyrophosphat-Lösung ist ein Dispergierungsmittel und bewirkt die Zerteilung der Probe in Primärteilchen. Das Phosphat bewirkt eine Komplexbildung der Aluminium-, Calcium- und Magnesium-Ionen, die koagulierende Eigenschaften besitzen. Diese Ionen werden durch peptisierend wirkende Natrium-Ionen ersetzt. (Blume et al., 2010)

Anschließend werden die Proben quantitativ in 0,7 – 1 L große Schüttelflaschen überführt. Proben, bei denen eine chemische Vorbehandlung nicht nötig ist, können direkt in die Schüttelflaschen eingewogen und mit Natriumpyrophosphat-Lösung versetzt werden. Die Vorbehandlung abschließend werden die Schüttelflaschen über Nacht mit einem Überkopfschüttler geschüttelt. (Utermann et al., 2000)

3.3.2. Sieben

Nach der Vorbehandlung müssen die Proben zur Bestimmung der Sandfraktionen ($> 0,063$ mm) durch drei Siebe nass gesiebt werden. Das erste Sieb fängt die Grobsandfraktion (0,63 - 2 mm) auf. Die Mittelsandfraktion (0,2 - 0,63 mm) bleibt im nächsten Sieb zurück und die Feinsandfraktion (0,063 - 0,2 mm) wird im letzten Sieb aufgefangen. Der Siebdurchgang wird direkt in einem 1000 ml Köhn-Zylinder mittels Trichter gesammelt.

Es muss dafür gesorgt werden, dass die komplette Probe quantitativ aus der Schüttelflasche überführt wird und keine der an ihrer bräunlichen Farbe gut zu erkennenden Tonpartikel in den Sieben zurück bleiben. Dazu wird mit destilliertem Wasser nachgespült. Es sollten jedoch nicht mehr als 750 ml destilliertes Wasser verbraucht werden, damit der Siebdurchgang 1000 ml nicht übersteigt.

Die Rückstände in den einzelnen Sieben werden nun mit destilliertem Wasser in vorher gewogene Petrischalen überführt und über Nacht in einem Trockenschrank bei 105 °C getrocknet. Die drei Sandfraktionen können am nächsten Tag zurückgewogen werden.

3.3.3. Köhn-Verfahren

Die Schluff- und die Tonfraktion, die sich im Siebdurchgang befinden, werden nun Mittels des Köhn-Verfahrens bestimmt. Das Köhn-Verfahren ist eine Pipettmethode, die auf dem Stokes'schen Sedimentationsgesetz beruht (1845):

$$v = 2 * r^2 * (\rho_F - \rho_W) * g / (9 * \eta)$$

Hier ist v die Geschwindigkeit, mit der ein Partikel sinkt, g die Erdbeschleunigung, η die Viskosität des Wassers, ρ_W die Dichte des Wassers, ρ_F die Dichte und r der Radius des Partikels (Blume et al., 2010). Aus der Gleichung ist zu entnehmen, dass kugelförmige Teilchen mit gleicher Dichte schneller sinken, wenn ihr Radius und somit ihr Durchmesser größer ist. Aufgrund der Plättchenform der Tonteilchen wird zur Ermittlung der Fallzeit der Tonfraktion ein Äquivalentradius als mittlerer Radius ermittelt (Blume et al., 2010). Da sowohl Viskosität als auch Dichte temperaturabhängige Größen sind, sind die Fallzeiten der jeweiligen Fraktion für jede Temperatur unterschiedlich (Utermann et al., 2000).

Tabelle 1: Fallzeiten bei der Korngrößenanalyse (Auszug aus der DIN 19683-2)

Korngrößenfraktion	Ton	fU	mU	gU
Korngrößenfraktion [mm]	< 0,002	0,002-0,006	0,006-0,020	0,020-0,063
Eintauchtiefe [cm]	5	10	10	20

Fallzeiten				
Temp. [°C]	Ton	fU	mU	gU
19,0	3h 58' 22"	48' 03"	4' 46"	0' 58"
19,5	3h 55' 29"	47' 28"	4' 43"	0' 57"
20,0	3h 52' 35"	46' 43"	4' 39"	0' 56"
20,5	3h 50' 00"	46' 22"	4' 36"	0' 56"
21,0	3h 47' 25"	45' 50"	4' 33"	0' 55"
21,5	3h 44' 50'	45' 19"	4' 30"	0' 54"

Für Ton z.B. beträgt die Fallzeit bei 20 °C Umgebungstemperatur laut **Tabelle 1** 3 h 52' 35". Die Eintauchtiefe der Pipette, in diesem Fall 5 cm, entspricht hier der Fallstrecke, die ein Tonteilchen in

dieser Zeit zurückgelegt hat. Die Schlufffraktionen haben nach dieser Zeit schon größere Strecken zurückgelegt und sind deshalb nicht in der entnommenen Bodensuspension enthalten.

Bevor mit der Köhn-Analyse begonnen werden kann, müssen die Köhn-Zylinder mit destilliertem Wasser genau bis zur 1000 ml Eichmarke aufgefüllt werden. Danach wird der mit einem Verschluss abgedichtete Zylinder eine Minute lang mehrmals über Kopf gestellt und geschüttelt, um die Suspension zu homogenisieren. Nach dem Abstellen wird unmittelbar eine Pipette gerade und ohne Erschütterungen 20 cm tief eingetaucht und langsam 10 ml der Suspension abgesaugt. Diese erste Pipettierung enthält sowohl die Schluff-, als auch die Tonfraktion. Die Pipette wird langsam aus dem Köhn-Zylinder gehoben, überschüssige Tropfen werden vorsichtig abgetropft, danach wird die Suspension aus der Pipette quantitativ in eine vorher gewogene Petrischale überführt. Dies wird für alle Köhn-Zylinder wiederholt. Vor der jeweiligen Homogenisierung und Abziehen der Suspension muss die Pipette mit destilliertem Wasser gereinigt werden, um Verunreinigungen zu vermeiden. (Utermann et al., 2000)

Dieser Vorgang muss ohne vorherige Homogenisierung der Suspension für jede Schlufffraktion zur jeweiligen Sedimentationszeit wiederholt werden. Die temperaturabhängigen Sedimentationszeiten sind in der **Tabelle 1** zu finden.

Die letzte Pipettierung erfolgt für die Tonfraktion. Hierzu muss die Pipette langsam und ohne Erschütterung 5 cm tief in den Köhn-Zylinder eingetaucht werden und dann wie oben beschrieben langsam die Suspension abgesaugt und quantitativ in eine vorher gewogene Petrischale überführt werden.

Die Petrischalen mit den verschiedenen Fraktionen werden über Nacht in einem Trockenschrank bei 105 °C getrocknet und können am nächsten Tag entnommen, abgekühlt und zurückgewogen werden. (Utermann et al., 2000)

Außerdem sollten noch Blindproben zur Bestimmung des Gewichtes des Natriumpyrophosphats durchgeführt werden. Hierzu werden 25 ml der 0,1 molare Natriumpyrophosphat-Lösung in einen Köhn-Zylinder gegeben. Danach wird der Köhn-Zylinder bis zur 1000 ml Eichmarke mit destilliertem Wasser aufgefüllt und durch mehrmaliges über Kopf stellen und schütteln gut vermischt. Nach Abstellen des Köhn-Zylinders wird, wie oben beschrieben, eine Pipette gerade in den Zylinder eingeführt, 10 ml abgesaugt und quantitativ in eine vorher gewogene Petrischale überführt. Dieser Vorgang wird mindestens dreimal wiederholt, damit mehrere Vergleichswerte vorliegen, aus denen später das Gewicht des Natriumpyrophosphat berechnet werden kann.

Danach können auch diese Petrischalen über Nacht in den Trockenschrank gestellt und am nächsten Tag aus dem Trockenschrank entnommen, abgekühlt und zurückgewogen werden.

3.3.4. Berechnung der Analyseergebnisse

Nachdem alle Petrischalen zurückgewogen sind, können die Anteile der einzelnen Fraktionen in Gewichtsprozent bezogen auf die Trockenmasse berechnet werden.

Für die Sandfraktion ergibt sich:

$$\text{Sandfraktion [Gew.\%]} = (\text{Brutto-Auswaage-Sand [g]} - \text{Taragewicht}_1 \text{ [g]}) * 100\% / \text{Gesamtprobe [g]}$$

Hier ist Taragewicht₁ das Gewicht der Petrischale für die jeweilige Sandfraktion und Brutto-Auswaage-Sand das Gewicht der dazugehörigen Rückwägung.

Für die Schluff- und Tonfraktion muss das Gewicht des Natriumpyrophosphat berücksichtigt und außerdem bedacht werden, dass nur 10 ml aus 1000 ml für die Analyse entnommen wurden, also zusätzlich mit einem Faktor 100 multipliziert werden muss.

Zuerst wird der der Mittelwert des Gewichtes der drei Blindproben bestimmt:

$$[\sum_{i=1}^3 (\text{Brutto-Auswaage-Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 - \text{Taragewicht}_2 \text{ [g]})] / 3 = \bar{X} \text{ [g]}$$

Hier ist Taragewicht₂ das Gewicht der jeweiligen Petrischale, Brutto-Auswaage-Na₄P₂O₇ das Gewicht der dazugehörigen Rückwägung und \bar{X} der Mittelwert der Natriumpyrophosphat-Gewichte der drei Blindproben.

Damit ergibt sich für die Tonfraktion:

$$\text{Tonfraktion [Gew.\%]} = (\text{Brutto-Auswaage-Ton [g]} - \text{Taragewicht}_3 \text{ [g]} - \bar{X} \text{ [g]}) * 100 * 100\% / \text{Gesamtprobe [g]}$$

Hier entspricht Taragewicht₃ dem Gewicht der Petrischalen für die letzte Pipettierung.

Die erste Pipettierung enthält alle Schlufffraktionen und die Tonfraktion. Also ergibt sich für den Gesamtschluffanteil in Gewicht-Prozent:

$$\text{Schlufffraktion [Gew.\%]} = [(\text{Brutto-Auswaage-Schluff [g]} - \text{Taragewicht}_4 \text{ [g]} - \bar{X} \text{ [g]}) * 100 * 100\% / \text{Gesamtprobe [g]}] - \text{Tonfraktion [Gew.\%]}$$

Diese Berechnung kann für Fein-, Mittel- und Grobschluff analog ausgeführt werden, in dem die jeweils feineren Fraktionen vom Ergebnis der jeweiligen Pipettierung abgezogen werden.

Alle Fraktionen zusammen sollten 100 % ergeben. Ist die Abweichung größer als 10 %, sollte die Analyse für die jeweilige Probe wiederholt werden, ist die Abweichung geringer als 10 %, wird der Fehler auf alle Fraktionen des Feinbodens umgerechnet (Utermann et al., 2000).

4. Experimentelle Untersuchungen

4.1. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet, in dem die Messungen für diese Arbeit durchgeführt worden sind, liegt westlich der Ortschaft El Almendral und erstreckt sich von der nördlichen Grenze des Zafarraya Poljes bis nördlich der Ortschaft Zafarraya, welche mittig in dem Polje liegt (**Abb. 10**). Das Gebiet wird durch den Madre Fluss durchquert, wie in **Abb. 10** zu sehen.

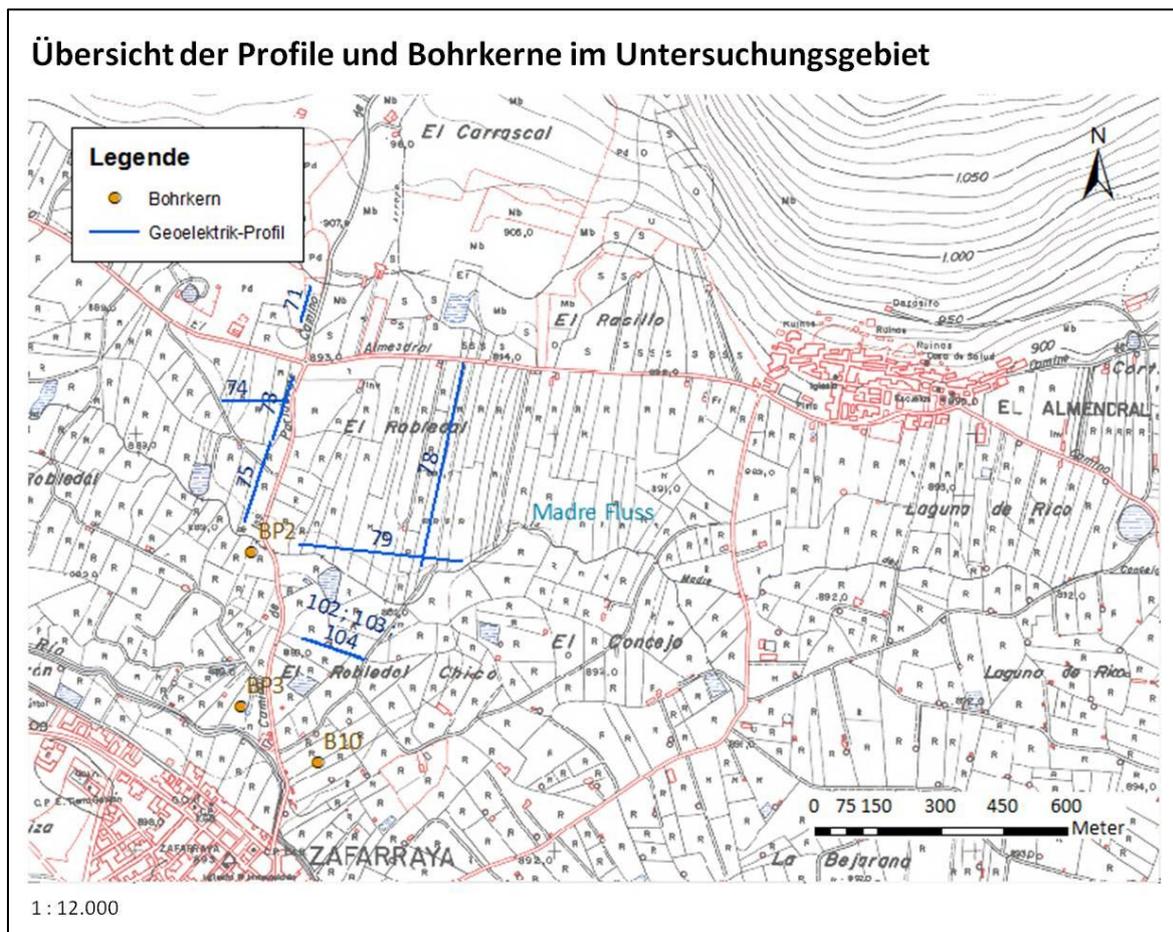


Abb. 10: Übersicht der Profile und Bohrkerne im Untersuchungsgebiet

Geomorphologisch handelt es sich bei diesem Gebiet um einen Schwemmfächer. Ein Schwemmfächer oder auch alluvialer Fächer entsteht durch Akkumulation von fluvialen Sedimenten oder Debris-flows in einem Fluss. Die Akkumulation beginnt, wenn die Fließgeschwindigkeit und so auch die Transportkapazität eines Flusses abnehmen. Dies geschieht z.B., wenn ein Fluss von einem Gebirge in eine Ebene fließt. Die typisch kegelförmige Form des Schwemmfächers entsteht durch die Verlagerung und Verzweigung des Flusses in der Ebene. Je mehr Material akkumuliert, desto mehr wird der Fluss durch den Schwemmfächer verdrängt und verzweigt sich. Ein Schwemmfächer hat ein konkaves Längsprofil und ein konvexes Querprofil parallel zur Gebirgskette. Oft sind auch tiefe Einschnidungen der Fließrinnen im Apex, dem oberen Teil des Schwemmfächers, dort wo der Fluss das Gebirge verlässt, zu finden. (Lecce, 1990)

4.2. Messungen

Wie in **Abb. 10** zu sehen liegen vier der sieben im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Profile in Richtung NNO-SSW. Dies sind die Profile 71, 73, 75, 78. Die anderen drei Profile (74, 79, 102-104) liegen quer dazu ungefähr in Richtung O-W, wodurch der Schwemmfächer sowohl in seiner Längs-, als auch in seiner Querausdehnung abgedeckt wird.

Bei den Messungen 102-104 handelt es sich um dasselbe Profil, das in verschiedenen Anordnungen gemessen wurde. Es ist 160 m lang und liegt auf dem unteren Teil des Schwemmfächers (vergl. **Abb. 10**). Profil 102 wurde in der Anordnung Wenner_Long gemessen, d.h. jede zweite Elektrode geht in die Messung ein. Profil 103 wurde in der Anordnung Wenner_Short gemessen, d.h. in der Mitte geht jede Elektrode in die Messung ein und außen nur jede zweite, so dass für genau die Hälfte des Gesamtprofils jede Elektrode in Messung eingeht. Das letzte Profil (104) wurde in der Dipol-Dipol-Anordnung gemessen. Die Geometrie der Wenner- und Dipol-Dipol-Anordnung ist in **Abb. 5** zu sehen.

Ebenfalls in der Dipol-Dipol-Anordnung gemessen wurden die beiden NNO-SSW ausgerichteten Profile 71 und 73. Profil 71 ist 80 m lang und befindet sich oberhalb des Schwemmfächers am Fuß des Gebirges in einem Gebiet, in dem das Festgestein an vielen Stellen an der Oberfläche ausstreicht. Profil 73 hat eine Länge von 160 m und befindet sich auf dem oberen Teil des Schwemmfächers.

Das 160 m lange Profil 74 schneidet Profil 73 ungefähr in dessen Mitte, liegt am westlichen Rand des Schwemmfächers und wurde in der Wenner_Short-Anordnung gemessen.

Die Profile 75, 78 und 79 wurden jeweils in der Wenner_Long-Anordnung als „roll a long“ gemessen, d.h. nach jeder Messung wurde das Profil hinten um 40 m (eine Kabeltrommel) gekürzt und vorne

um dieselbe Länge verlängert, so dass insgesamt ein längeres Profil entsteht. Die beiden Profile 75 und 78 liegen parallel zueinander, wobei Profil 75 240 m lang ist und direkt an Profil 73 angrenzt. Somit wird die Länge des Schwemmfächers vom Gebirge bis zum Madre Fluss abgedeckt. Das insgesamt 400 m lange Profil 79 liegt Richtung O-W und schneidet das 520 m lange Profil 78. Damit ist sichergestellt, dass auch eventuelle Unterschiede zwischen dem westlichen, dem mittleren und dem östlichen Teil des Schwemmfächers in der Messung sichtbar werden.

Die drei Bohrungen wurden im Bereich zwischen dem Madre Fluss im Norden und dem Entwässerungsgraben, der sich weiter südlich am Dorf Zafarraya vorbeizieht, mittels einer Rammsonde, wie in Kapitel 3.2.1. beschrieben, abgeteuft.

Die beiden Bohrungen BP3 und BP10 befinden sich auf dem untersten Teil des Schwemmfächers, in der Nähe des Entwässerungsgrabens kurz vor der Ortschaft Zafarraya, wie auch in **Abb. 10** zu sehen ist. Bohrung BP3 wurde bis zu einer Tiefe von 9,00 m abgeteuft, Bohrung BP10 bis zu einer Tiefe von 5,71 m. Bohrung BP2 befindet sich relativ mittig auf dem Schwemmfächer und ist 5,80 m tief.

Durch diese Anordnung der Bohrungen können durch eine spätere Körnungsanalyse Unterschiede in der Körnung und Bodenart in unterschiedlichen Tiefen in der Mitte und am untersten Ende des Schwemmfächers festgestellt werden.

5. Ergebnisse

5.1. Geoelektrik

Zur Ermittlung eines Untergrundprofils aus den Rohdaten der Messung wurde das Programm RES2DINV verwendet.

Um die Profile der verschiedenen Messungen später miteinander vergleichen zu können, wurde eine logarithmische Farbskala eingestellt, die Widerstände zwischen 10 und 500 Ω immer in den gleichen Farben darstellt, wobei der Erhöhungsfaktor auf 1,298 gesetzt wurde, um 500 Ω als Intervallgrenze des höchsten Intervalls zu erhalten. Außerdem wurde eine lineare Tiefenachse verwendet, um für jedes Profil die gleichen Tiefenintervalle zu erhalten. Dadurch sind die unterschiedlichen Untergrundprofile noch besser miteinander vergleichbar.

Nun wurden zu jeder Messung die Rohdaten in das Programm geladen und im Editing Fenster alle Datenpunkte, die sich überschneiden oder herausstechen, aus dem Daten-Set entfernt, um ein

besseres Ergebnis zu bekommen. Aus den Profilen 75, 78, 79, 103 und 104 mussten jeweils Datenpunkte entfernt werden (die unveränderten Originaldaten befinden sich im Anhang auf CD). Allein die vier Profile 71, 73, 74 und 102, die in der Dipol-Dipol-Anordnung gemessen worden sind, konnten unverändert verwendet werden.

Danach müssen die Rohdaten zur Erstellung eines Untergrundprofils invertiert werden. Da alle Profile ein recht regelmäßiges Datenmuster mit wenigen Störungen aufwiesen, wurde die Jacobian Inversions-Methode mit 5 Iterationen verwendet. Hierbei wurde die Jacobian Matrix für alle Iterationen neu berechnet. Außerdem wurde der initiale Dumpingfaktor auf 0,1 eingestellt und der minimale Dumpingfaktor auf 1/5 des initialen Dumpingfaktors, also 0,02.

Nun mussten einige der Profile in der Länge gekürzt oder verlängert werden, da sie nicht mit den im Feld aufgenommenen Längen übereinstimmten (Die Untergrundprofile zu den ungekürzten Daten befinden sich im Anhang auf CD). Dies liegt an einem noch nicht genau bekannten Fehler im Messgerät oder bei der Datenübertragung. Die Profile 75, 78, 79 und 102 wurden um die Hälfte gekürzt. Es handelt sich hier um die Profile, die in der Anordnung Wenner_Long gemessen wurden. Bei dieser Anordnung ist dieser Fehler auch in der Vergangenheit schon öfter aufgetreten und kann einfach in der *.dat-Datei des jeweiligen Profils korrigiert werden. Die beiden Profile 74 und 103, die in der Anordnung Wenner_Short gemessen wurden, mussten in ihrer Länge verdoppelt werden. Auch dieser Fehler kann einfach in der *.dat-Datei des jeweiligen Profils korrigiert werden. Der minimale vom Gerät gemessene Elektrodenabstand und die Widerstände bleiben unverändert, es ändert sich nur die Länge und somit auch die gemessene Tiefe des Profils, da diese voneinander abhängig sind. Die vom Messgerät erfassten Längen der Profile 71, 73 und 104 stimmten mit den im Feld aufgenommenen Daten überein und mussten nicht verändert werden. Es handelt sich hier um die Profile, die in der Dipol-Dipol-Anordnung gemessen wurden.

Im Folgenden werden die Untergrundprofile nacheinander erläutert, beginnend im Norden des Poljes mit der Messung 71 (**Abb. 11**), die im oberen Teil des Poljes im Festgestein durchgeführt wurde, wie in Kapitel 4.2. beschrieben.

Das Profil liegt am Fuß des Gebirges, auf einem schon leicht ansteigenden Hang (ca. 3 °). Links in **Abb. 11** ist das nördliche, obere Ende des Profils zu sehen. Der Fehler der Iteration des Untergrundprofils aus den Rohdaten zur Messung 71 ist mit 3,4 % sehr gering, d.h. die Annäherung ist sehr gut.

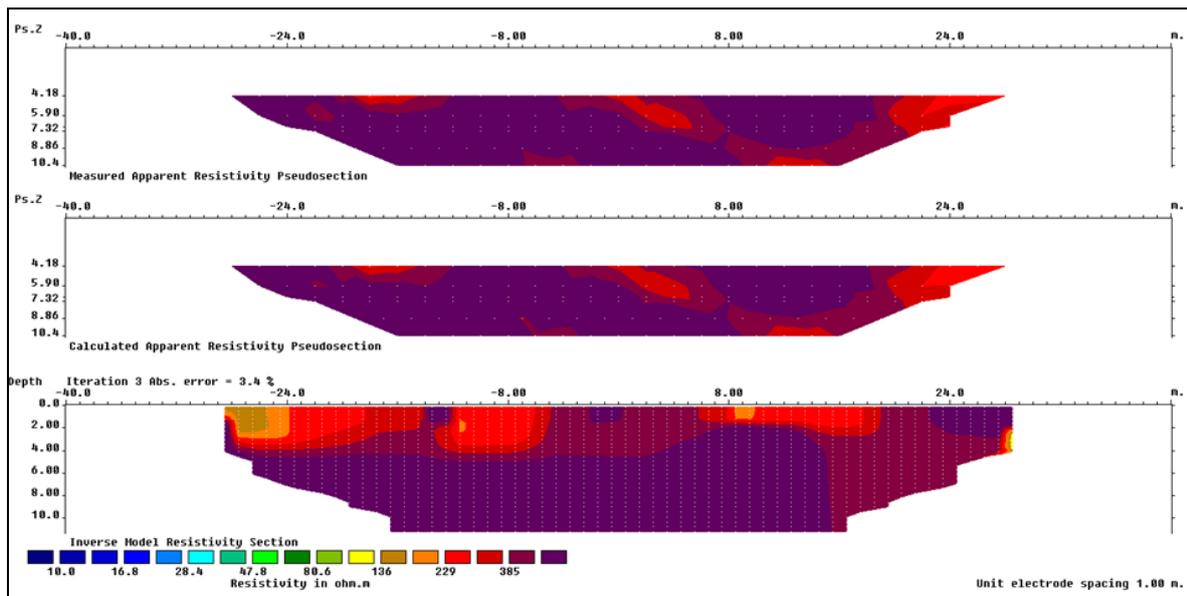


Abb. 11: Untergrundprofil zur Messung 71 (Dipol-Dipol)

In **Abb. 11** ist zu sehen, dass das Profil ca. 12 m Meter tief in den Untergrund reicht. Die gemessenen Widerstände sind durchgehend in allen Tiefen mit $\geq 385 \Omega$ sehr hoch. Nur an der Oberfläche bis in 4 m Tiefe sind an einigen Stellen etwas niedrigere Widerstände mit ca. 150-300 Ω zu finden (in der Grafik orange und rot).

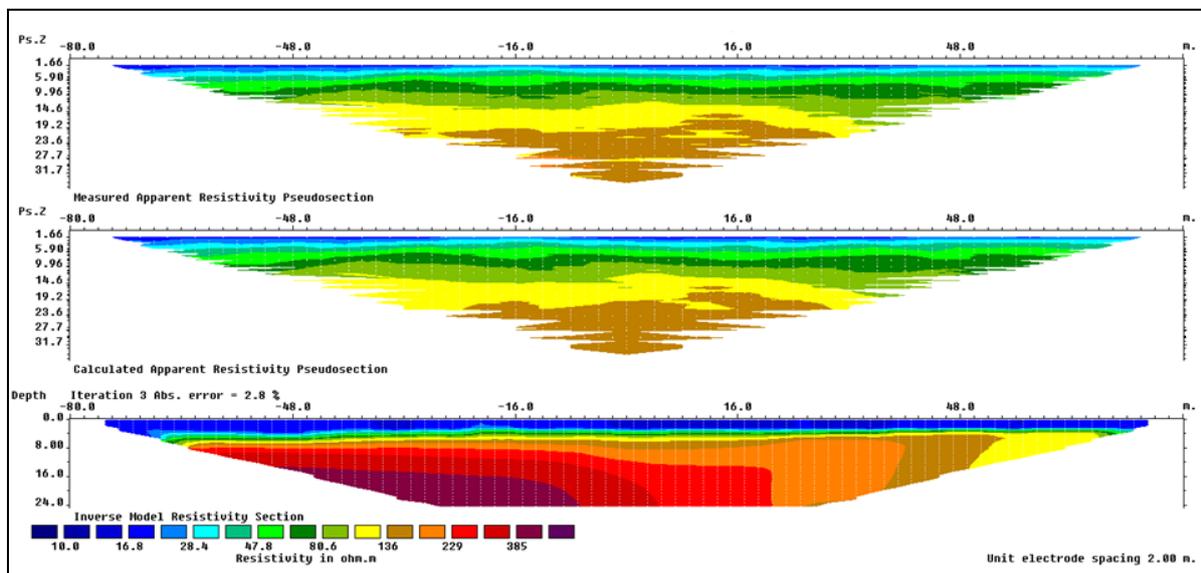


Abb. 12: Untergrundprofil zur Messung 73 (Dipol-Dipol)

Etwas südlicher, ungefähr auf einer Linie mit Profil 71, liegen hintereinander die Profile 73 und 75 (vergl. **Abb. 10**). Der Fehler des Untergrundprofils zur Messung 73 beträgt nur 2,8 %, wohingegen der Fehler des Untergrundprofils der Messung 75 mit 3,6 % etwas höher ist. Beide Fehler liegen aber mit weniger als 10 % in einem guten Bereich. Beide Profile reichen bis in eine Tiefe von etwa 24 m und

sind somit gut vergleichbar. Das nördliche Ende der beiden Profile 73 und 75 ist jeweils links in der Grafik zu sehen.

Es ist zu erkennen, dass in Profil 73 (**Abb. 12**) die Widerstände bis in eine Tiefe von 8 m auf der Gesamtlänge von 160 m konstant bei rund 20-25 Ω liegen (in der Grafik dunkelblau). In Profil 75 hingegen sind die Widerstände im gleichen Tiefenintervall zwar auch konstant, liegen aber mit ca. 50 Ω etwas höher als in Profil 73. Darunter folgt in beiden Profilen ein Bereich mit etwas höheren Widerständen von ca. 100-200 Ω , wobei dieser Bereich in Profil 75 auf der Gesamtlänge von 240 m gleichmäßig ist, wohingegen er in Richtung Süden des Profils 73 deutlich weiter in die Tiefe reicht (vergl. **Abb. 12** rechts).

In Profil 75 folgt darunter von etwa 8 m Tiefe bis 24 m Tiefe ein einheitlicher Bereich mit Widerständen $\geq 385 \Omega$ mit Ausnahme eines kleinen Bereiches rechts unten im Bild (rot), in dem die Widerstände im Vergleich zur Umgebung etwas geringer sind (ca. 300 Ω) (vergl. **Abb. 13**). In Profil 73 steigen die Widerstände von Süd nach Nord stetig an, bis sie links in **Abb. 12** ab einer Tiefe von ca. 12 m bei $\geq 385 \Omega$ liegen. Ab ungefähr 80 m Länge im südlichen Teil (rechts in **Abb. 12**) fallen die einzelnen Schichten mit gleichem Widerstand schräg nach unten ab, so sind in einer Tiefe von 24 m bei Profil 73 mit zunehmender Länge immer geringere Widerstände zu finden.

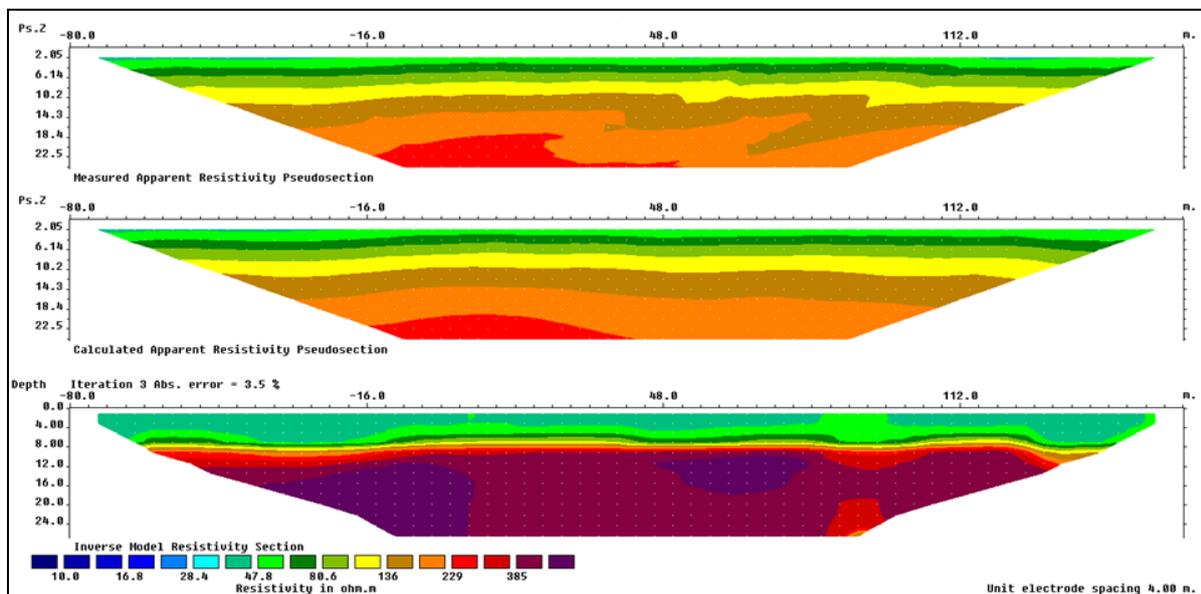


Abb. 13: Untergrundprofil zur Messung 75 (Wenner_Long)

Das Untergrundprofil zur Messung 74, die sich senkrecht zur Messung 73 befindet, hat einen Fehler von nur 1,9 %. Es reicht allerdings nur bis in eine Tiefe von 8 m und zeigt bis in eine Tiefe von ca. 7 m Widerstände $< 50 \Omega$. Die Grafik zu diesem Profil ist in Anhang 5 zu finden.

Das Untergrundprofil zur Messung 78, die östlich der Messungen 73 und 75 liegt (vergl. **Abb. 10**), hat einen Fehler von 4,5 % und reicht in eine Tiefe von 29 m. Es ist zu beachten, dass zwischen den beiden schwarzen Linien in **Abb. 14**, in der Mitte des Profils, aufgrund von einem Fehler in der Messung fast keine Datenpunkte mehr vorliegen.

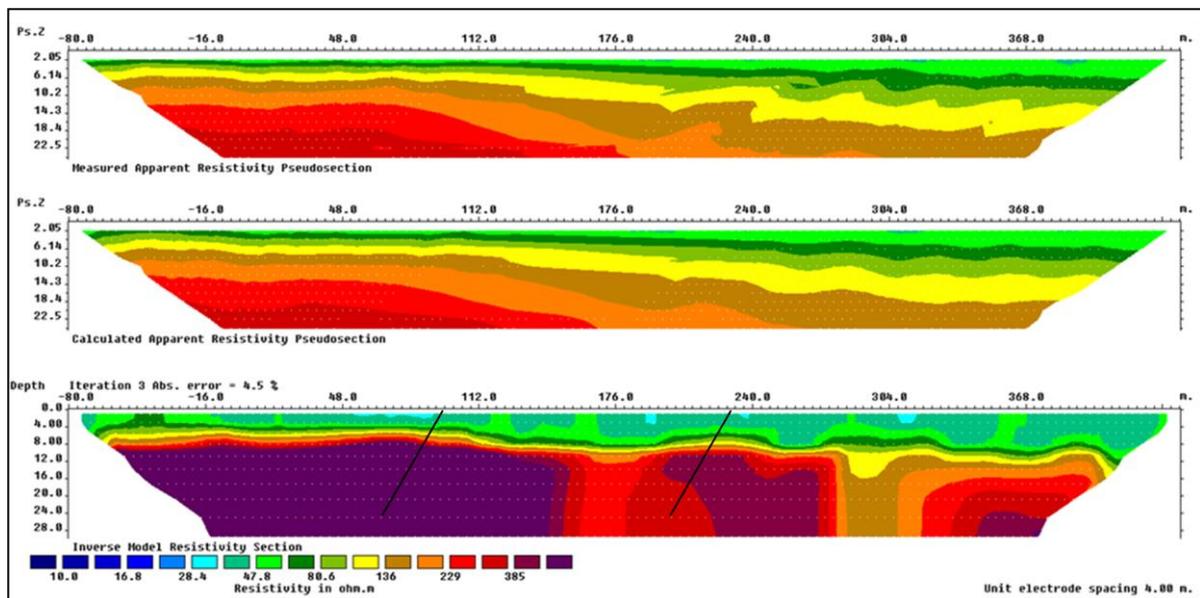


Abb. 14: Untergrundprofil zur Messung 78 (Wenner_Long)

Bis zu einer Tiefe von 8 m im nördlichen Teil (links) und 12 m im südlichen Teil (rechts) in **Abb. 14** liegen die Widerstände bei ca. 50 Ω (grün), darunter folgt wie im Profil 75 ein Bereich mit etwas höheren Widerständen, hier zwischen etwa 70 und ca. 100 Ω (dunkelgrüner, gelber, oranger Bereich in der Grafik). Darunter steigen die Widerstände links in der Grafik rasch auf $> 385 \Omega$ an. Dieser Bereich ist bis etwa zu Hälfte des 500 m langen Profils homogen (vergl. **Abb. 14**). Weiter südlich, in der rechten Hälfte des Untergrundprofils in **Abb. 14**, sind bis zur gemessenen Tiefe von 29 m zwischen den Bereichen mit hohen Widerständen von $\geq 385 \Omega$ auch Bereiche mit niedrigeren Widerständen von etwa 150 Ω (orange) und 200 Ω (rot) zu finden.

Abb. 15 zeigt das Untergrundprofil der Messung 79. Dieses Profil liegt Richtung O-W, quer zum Profil 78, und schneidet dieses am unteren Ende. Die Iteration hat einen Fehler von 2,5 % und reicht bis in eine Tiefe von 29 m. Somit ist das Profil gut vergleichbar mit dem Untergrundprofil zur Messung 78.

Im Gegensatz zum Profil 78 reichen bei Profil 79 die Widerstände von ca. 50 Ω bis in eine Tiefe von 16 m im östlichen Teil (links in der Grafik) und 12 m im westlichen Teil (rechts in der Grafik) des Profils. Dies ist im Schnitt 4 m tiefer als in Profil 78. Der Schnittpunkt beider Profile liegt im ersten Drittel des Profils 79 und ziemlich am Ende von Profil 78 (vergl. **Abb. 10**). Im Vergleich von **Abb. 14** und **Abb. 15** ist zu sehen, dass die Tiefen der einzelnen Intervalle mit gleichem Widerstand dort nicht genau übereinstimmen, sondern in Profil 79 etwas tiefer liegen als in Profil 78. Auch der Bereich darunter

mit Widerständen zwischen 100 und 200 Ω ist in **Abb. 15** im östlichen Teil (links in der Grafik) deutlich größer und auch tiefer, er reicht hier bis in eine Tiefe von ca. 24 m. Dies ist ebenfalls deutlich tiefer als im Untergrundprofil von Messung 78, dort reicht dieser Bereich im südlichen Teil (rechts in **Abb. 14**) bis maximal 16 m. Im westlichen Bereich des Profils 79 stimmt diese Tiefe mit 12 bis 16 m wieder mit denen im Profil 78 überein. Darunter folgt in der westlichen Hälfte des Profils 79 ein Bereich mit $\geq 385 \Omega$, der allerdings in einer im Vergleich zu Profil 78 deutlich größeren Tiefe von minimal 20 m beginnt. Dieser Bereich liegt im Osten des Profils in einer noch größeren Tiefe und ist ab dem Meter 50 der Messung im Untergrundprofil zu erkennen (vergl. **Abb. 15**).

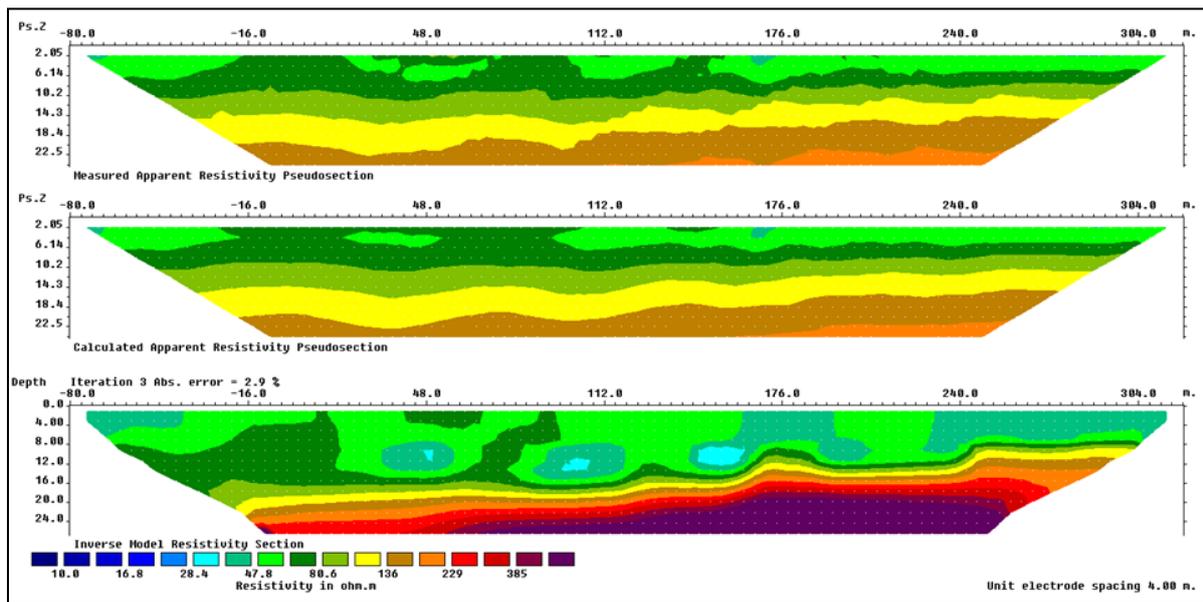


Abb. 15: Untergrundprofil zur Messung 79 (Wenner_Long)

Das letzte Profil, das untersucht worden ist, ist das Profil 102, 103, 104. Es liegt auf dem unteren Teil des Schwemmfächers, wie in Kapitel 4.2. beschrieben. Das in der Wenner_Short-Anordnung gemessene Profil 103 reicht bis in eine Tiefe von ca. 7 m bei einem Fehler $< 1\%$. Im gesamten Bereich sind Widerstände bis ca. 30 Ω zu finden, wobei die Widerstände im letzten Meter etwas geringer sind als in den oberen sechs Metern. Das Untergrundprofil zu dieser Messung befindet sich in Anhang 10. Die Profile 102 und 104 reichen beide bis in eine Tiefe von ca. 24 m, wobei das Profil 104, das in der Dipol-Dipol-Anordnung gemessen wurde, einen im Gegensatz zum Profil 102 (0,73 %) sehr hohen Fehler von 7,8 % hat. Das Untergrundprofil zur Messung 104 befindet sich in Anhang 11.

In **Abb. 16** ist zu sehen, dass direkt an der Oberfläche des Profils bis in ca. 8 m Tiefe ein Bereich mit höheren Widerständen von ca. 80 Ω zu finden ist. Darunter befindet sich bis in eine Tiefe von 16 m ein Bereich mit Widerständen zwischen etwa 30 und 50 Ω . Darunter folgt bis in eine Tiefe von 24 m ein Bereich, in dem etwas höhere Widerstände von bis zu ca. 150 Ω gemessen wurden.

Im gesamten Profil ist kein Bereich mit Widerständen von $>200 \Omega$ zu finden. Dies ist ein Unterschied zu den Profilen, die mittig auf dem Schwemmfächer gemessen worden sind und in diesem Tiefenbereich alle deutlich höhere Widerstände aufweisen.

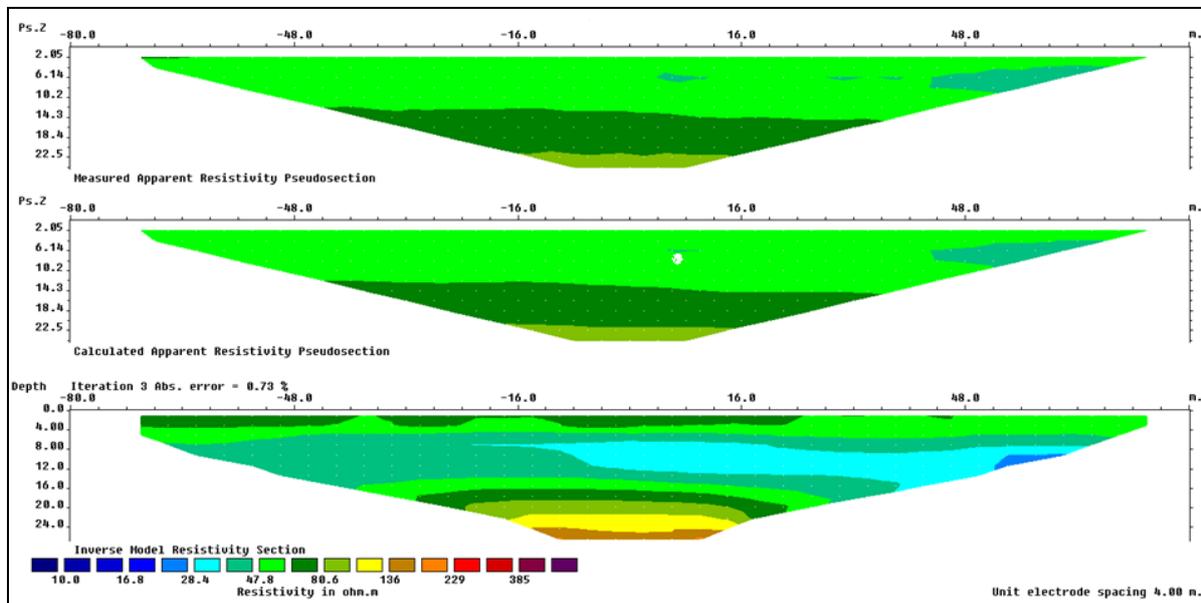


Abb. 16: Untergrundprofil zur Messung 102 (Wenner_Long)

Alle Untergrundprofile sind in größerer Darstellung in Anhang 3-11 zu finden.

5.2. Körnungsanalyse

Die Körnungsanalyse wurde als Ergänzung zu den geoelektrischen Untersuchungen für 20 ausgewählte Lagen der drei Bohrkern 2, 3 und 10 durchgeführt.

Die Lagen der Bohrkern wurden anhand des Aufnahmeprotokolls (siehe Anhang 14, 15, 18), das im Gelände für jeden Bohrkern erstellt und durch Untersuchungen im Labor erweitert worden ist, ausgewählt, so dass die Körnungsanalyse ein repräsentatives Ergebnis für den jeweiligen Bohrkern liefert.

Aus Bohrkern 2 wurden die Lagen L2, L6, L13 und L17 untersucht, aus Bohrkern 3 die Lagen L3, L9, L16, L19b, L22, L25, L28, L32, L34, L39 und L41 und aus Bohrkern 10 die Lagen L4, L8, L10, L15 und L21. Hierbei ist die Nummerierung beginnend mit der obersten Lage jeweils mit der Tiefe aufsteigend vorgenommen worden.

Bohrkern 2 hat insgesamt 19 Lagen. In den Lagen 18 und 19 ist schon Karbonat enthalten. Die Bohrung wurde in einer Teufe von 5,80 m in einer Kalkkruste abgebrochen. Bohrkern 3 hat insgesamt 41 Lagen und wurde in einer Teufe von 9,00 m im Grundwasserbereiche aufgrund von Kernverlust

abgebrochen. Bohrkern 10 hat 21 Lagen. Die Bohrung wurde aufgrund von zu sandigem Material in einer Teufe von 5,71 m abgebrochen.

Zur Durchführung der Körnungsanalyse wurden die ausgewählten Lagen zunächst an der Luft getrocknet und der Skelettanteil abgesiebt, wie in Kapitel 3.3.1. beschrieben. Auf eine chemische Vorbehandlung mit Salzsäure zur Entfernung des Karbonates konnte aufgrund des negativen Salzsäuretests im Gelände verzichtet werden. Der Kohlenstoffgesamtgehalt lag bei allen Messungen an ausgewählten Proben der oben genannten Bohrkern unter 0,5%, daher wurde auch auf eine Vorbehandlung mit Wasserstoffperoxid verzichtet. Die Kohlenstoffgehalte einiger Lagen der Bohrkern 2 und 3 sind im Anhang im jeweiligen Aufnahmeprotokoll des Bohrkerns zu finden.

Die Siebanalyse zur Bestimmung der Anteile der Fein-, Mittel- und Grobsandfraktion wurde wie in Kapitel 3.3.2. beschrieben durchgeführt. Die anschließende Köhn-Pipettmethode zur Bestimmung der Anteile der Schluff- und Tonfraktion wurde in verkürzter Form zur Bestimmung des Gesamtschluff- und des Gesamttonanteils mit nur zwei Pipettierungen durchgeführt. Hierzu wurde die erste Pipettierung unmittelbar nach Beginn der Sedimentationszeit wie in Kapitel 3.3.3. beschrieben durchgeführt. Die zweite Pipettierung wurde nach 2 h 52 min 35 sec durchgeführt, da im Labor eine Temperatur von 20 °C herrschte (vergl. **Tabelle 1**). Die Ergebnisse der Einwaagen, der einzelnen Auswägungen und der Fraktionen in Gramm sind nach Probennummer sortiert in einer Excel-Tabelle im Anhang auf CD zu finden.

Bei den Berechnungen der Gewichtsanteile der verschiedenen Fraktionen wurde der Wassergehalt der lufttrockenen Probe vernachlässigt. Die Berechnungen sind wie in Kapitel 3.3.4. beschrieben durchgeführt worden.

Zur Bestimmung der Bodenart, also der Korngrößenverteilung des Feinbodens, wird davon ausgegangen, dass der Gesamtanteil des Feinbodens 100 % ausmacht.

Mit dieser Annahme ergeben sich für die Sand-, Schluff- und Tonfraktion die in **Tabelle 2** aufgeführten Gewichtsanteile.

Tabelle 2: unveränderte Ergebnisse der Körnungsanalyse (Feinboden entspricht 100%)

Bohrkernnr.	Lagennr.	Sand [Gew.-%]	Schluff [Gew.-%]	Ton [Gew.-%]	Σ Feinboden [Gew.-%]
2	L2	13	54	37	104
2	L6	25	40	36	100
2	L13	45	11	42	98
2	L17	63	10	24	96
3	L3	47	27	32	106
3	L9	41	28	24	93
3	L16	59	20	19	97
3	L19b	37	42	23	102
3	L22	17	45	35	98
3	L25	41	31	25	97
3	L28	46	30	24	100
3	L32	15	49	33	97
3	L34	46	27	22	96
3	L39	57	18	20	95
3	L41	17	24	54	94
10	L4	32	34	32	98
10	L8	26	42	25	94
10	L10	14	59	32	105
10	L15	14	60	29	103
10	L21	26	44	30	101

Sand: 2 - 0,063 mm
 Schluff: 0,002 - 0,063 mm
 Ton: < 0,002 mm

Es ist zu sehen, dass die Summe der einzelnen Fraktionen des Feinbodens nicht bei jeder Lage genau 100 % ergibt. Dieser Messfehler liegt bei allen Proben unter 10 %. Zur Ableitung der Bodenart aus **Abb. 17** muss der Fehler korrigiert werden, so dass die Summe aller Fraktionen des Feinbodens für jede Lage 100 % ergibt (vergl. **Tabelle 3**). Hierzu wird die Abweichung der Summe des Feinbodens der jeweiligen Lage von 100 % anteilmäßig auf alle Fraktionen umgelegt.

Tabelle 3: korrigierte Ergebnisse der Körnungsanalyse (Feinboden entspricht 100%)

Bohrkernnr.	Lagennr.	Sand [Gew.-%]	Schluff [Gew.-%]	Ton [Gew.-%]	Σ Feinboden [Gew.-%]	Bodenart nach DIN 4220
2	L2	12	52	36	100	Ltu
2	L6	25	40	35	100	Lt
2	L13	46	11	43	100	Ts
2	L17	65	10	25	100	Ls
3	L3	44	26	30	100	Lts
3	L9	44	30	26	100	Lts
3	L16	60	21	19	100	Ls
3	L19b	36	41	23	100	Lsu
3	L22	18	46	36	100	Lt
3	L25	42	32	26	100	Ls
3	L28	46	30	24	100	Ls
3	L32	15	51	34	100	Ltu
3	L34	48	28	24	100	Ls
3	L39	60	19	21	100	Ls
3	L41	18	25	57	100	Tl
10	L4	32	35	33	100	Lts
10	L8	28	45	27	100	Lt
10	L10	14	56	30	100	Ltu/Lu
10	L15	13	59	28	100	Lu
10	L21	26	44	30	100	Lt

Nun wurde mittels des Konzentrationsdreiecks, das in **Abb. 17** zu sehen ist, die Bodenart für jede Lage bestimmt (vergl. **Tabelle 3**).

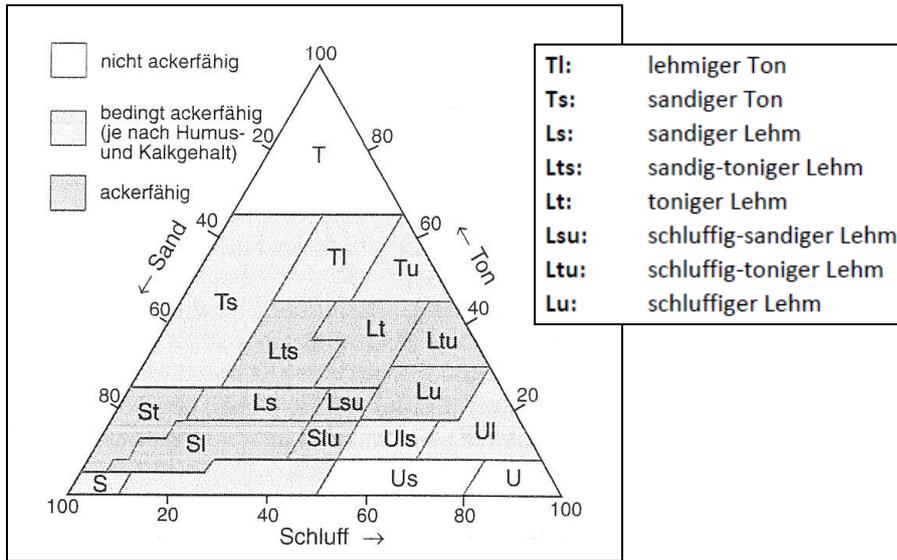


Abb. 17: Einteilung der Bodenarten nach DIN 4220 im Konzentrationsdreieck Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) mit Beurteilung ihrer Bearbeitungsfähigkeit (Kuntze, 1978)

In **Abb. 18** ist zu sehen, dass der Schluffanteil im Bohrkern 2 mit der Tiefe abnimmt, während der Sandanteil zunimmt und der Tonanteil fast unverändert bleibt. Dies spiegelt sich auch in der Bodenart wieder. In Lage 2, in einer Tiefe 44-64 cm, ist noch schluffig-toniger Lehm zu finden, wohingegen in Lage 6, in einer Tiefe von 151-179 cm, nur noch toniger Lehm zu finden ist. In Lage 13 beträgt der Schluffanteil in einer Tiefe von 323-353 cm schließlich nur noch 11 Gew.-% und ist so im Vergleich zu Lage 2 um 40 %, also fast die Hälfte, gesunken. Bei dieser Bodenart handelt es sich um sandigen Ton. Der Sandanteil steigt mit zunehmender Tiefe weiter, bis er in Lage 17 mit 65 % fast das 6-fache des Anteils in Lage 2 (12 %) erreicht. Die Bodenart die in Lage 17 zu finden ist, ist sandiger Lehm.

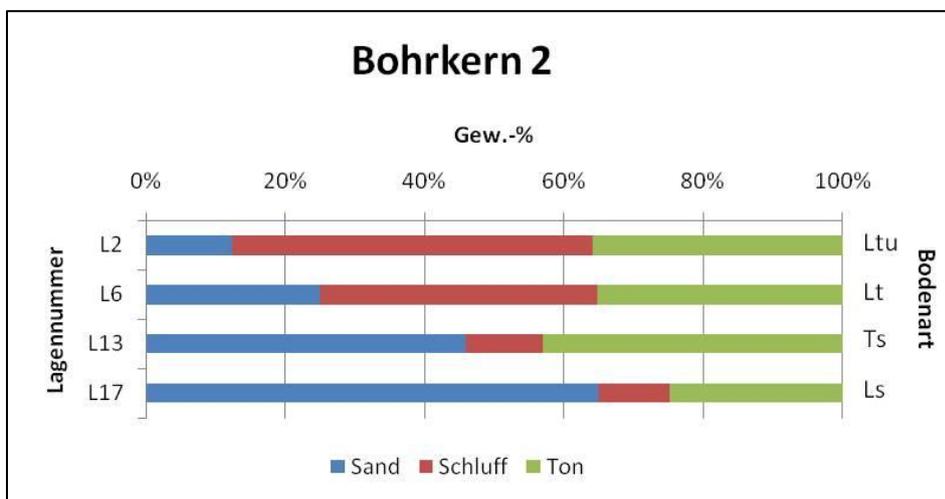


Abb. 18: Anteile der einzelnen Fraktionen des Feinbodens für die untersuchten Lagen des Bohrkerns 2 in Gew.-% mit Angabe der zugehörigen Bodenart

Im Gegensatz zu Bohrkern 2 kann in Bohrkern 3 keine eindeutige Zunahme oder Abnahme einer bestimmten Kornfraktion mit der Tiefe festgestellt werden (**Abb. 19**). Auch die Bodenart ist weitgehend gleichbleibend mit der Hauptkomponente Lehm und wechselnder Relevanz von Ton und Schluff. Die Sandgehalte sind in den meisten Lagen mit 40 % oder mehr dominant. In Lage 22, in einer Tiefe von 550-557 cm, und in Lage 32, in einer Tiefe von 712-744 cm, sind die Sandgehalte im Gegensatz zu den Lagen darüber und darunter mit nur 18 % und 15 % jeweils sehr gering. In diesen beiden Lagen ist allerdings deutlich mehr Schluff zu finden. Die Tonanteile schwanken zwischen 19 Gew.-% in Lage 16 und 36 Gew.-% in Lage 22. In der untersten Lage des Bohrkerns (Lage 41), in einer Tiefe von 886-900 cm, ist ein sprunghafter Anstieg der Tongehalte auf 57 Gew.-% zu erkennen, was sich auch in der Bodenart „lehmiger Ton“ widerspiegelt. Sand- und Schluffanteil sind mit 18 und 25 Gew.-% in dieser Lage etwa gleich groß.

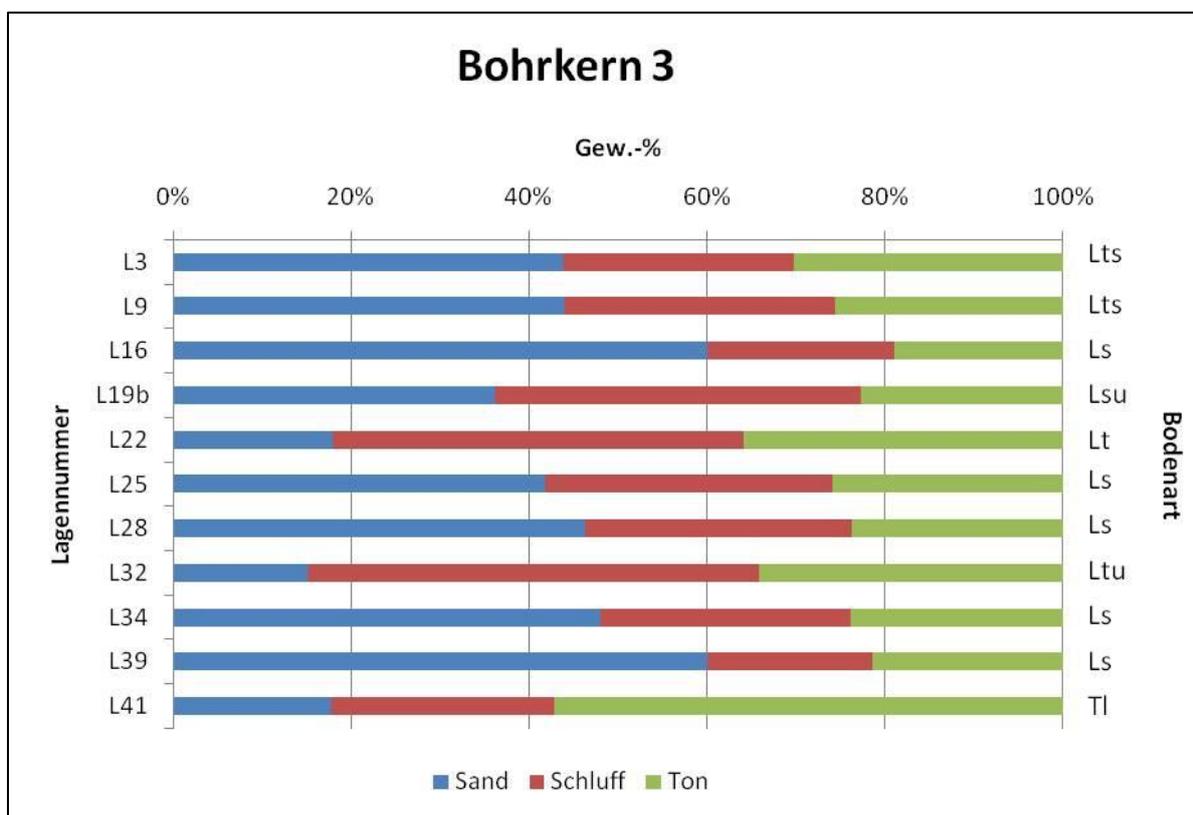


Abb. 19: Anteile der einzelnen Fraktionen des Feinbodens für die untersuchten Lagen des Bohrkerns 3 in Gew.-% mit Angabe der zugehörigen Bodenart

Bohrkern 10 zeigt über die gesamte Tiefe betrachtet die geringsten Schwankungen in den einzelnen Kornfraktionen. Auch die Anteile der drei Kornfraktionen Sand, Schluff und Ton sind annähernd gleich, wie in **Abb. 20** zu sehen. Die Bodenart ist „toniger Lehm“, wobei in Lage 4, in einer Tiefe von 134-171 cm, der Sandanteil noch etwas höher ist. Lediglich in Lage 10, in einer Tiefe von 284-302 cm, und in Lage 15, in einer Tiefe von 138-168 cm, sind höhere Schluff- und dafür geringere Sandgehalte bei annähernd gleich bleibenden Tongehalten zu finden. Die Bodenart wird hier von der Nebenkomponekte Schluff mitbestimmt.

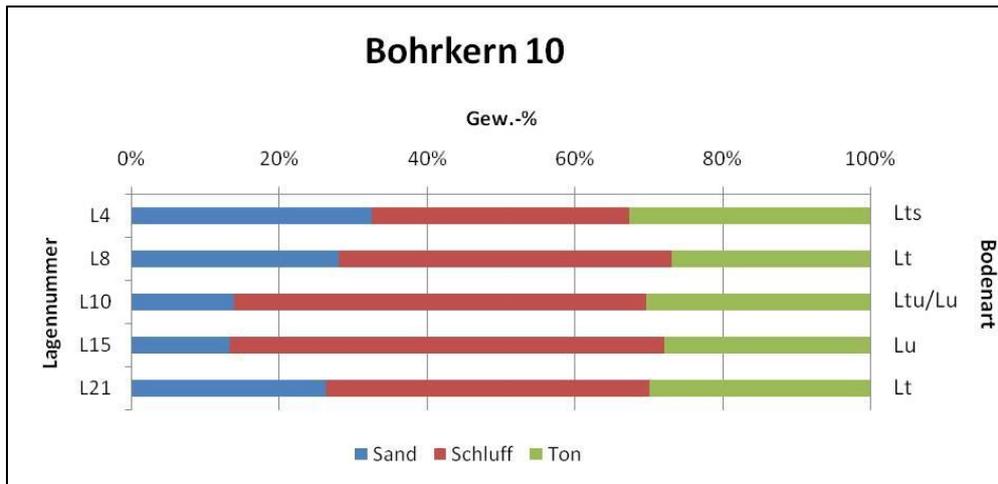


Abb. 20: Anteile der einzelnen Fraktionen des Feinbodens für die untersuchten Lagen des Bohrkerens 10 in Gew.-% mit Angabe der zugehörigen Bodenart

Zur Ermittlung des charakteristischen Korndurchmessers jeder Lage wurde eine Kornsummenkurve gezeichnet und daraus der Median d_{50} abgelesen. Der d_{50} -Wert entspricht dem mittleren Korndurchmesser einer Bodenprobe. Unter und über dieser Korngröße liegen jeweils 50 % der Körner, er entspricht also der Korngröße bei 50 %-igem Siebdurchgang.

Bevor aus den gemessenen Werten eine Kornsummenkurve gezeichnet werden kann, muss der Skelettanteil mit eingerechnet werden, d.h. der Feinboden entspricht nicht, wie oben bei der Bestimmung der Bodenart, 100 %. Mit dieser Annahme werden nun die Gewichtsanteile der einzelnen Kornfraktionen des Feinbodens berechnet und danach addiert.

In **Tabelle 4** sind die unveränderten Ergebnisse der Körnungsanalyse zu sehen. Die Summe der einzelnen Fraktionen des Feinbodens ergibt nicht bei jeder Lage genau 100%, dieser Messfehler liegt jedoch bei allen Proben unter 10 %. Nun muss wie oben zur Bestimmung der Bodenart der Fehler korrigiert werden, so dass die Summe aller Fraktionen des Feinbodens für jede Lage 100 % ergibt. Die korrigierten Werte sind in **Tabelle 5** zu finden.

Tabelle 4: unveränderte Ergebnisse der Körnungsanalyse (Grob- + Feinboden entsprechen zusammen 100%)

Bohrkernnr.	Lagennr.	Skelett[Gew.-%]	Feinboden [Gew.-%]	Sand [Gew.-%]	Sandfraktion	Schluff [Gew.-%]	Ton [Gew.-%]	Σ Grob- + Feinboden [Gew.-%]
2	L2	2,70	97,30	1,67	G	52,17	36,15	103,41
				3,24	M			
				7,48	F			
2	L6	0,50	99,50	1,54	G	39,42	35,42	100,01
				6,36	M			
				16,77	F			
2	L13	1,30	98,70	12,27	G	10,71	41,85	98,39
				25,91	M			
				6,35	F			
2	L17	0,05	99,95	1,21	G	9,91	23,49	96,18
				53,52	M			
				8,00	F			
3	L3	10,00	90,00	18,47	G	24,70	28,97	105,63
				14,03	M			
				9,47	F			
3	L9	3,58	96,42	10,52	G	27,29	22,92	93,10
				10,64	M			
				18,16	F			
3	L16	35,59	64,41	19,13	G	12,81	11,95	98,10
				12,36	M			
				6,25	F			
3	L19b	2,57	97,43	5,13	G	40,58	22,38	101,79
				12,95	M			
				18,17	F			
3	L22	10,74	89,26	0,61	G	40,33	31,23	97,87
				3,04	M			
				11,93	F			
3	L25	19,93	80,07	4,44	G	25,12	20,22	97,86
				12,20	M			
				15,95	F			
3	L28	16,57	83,43	7,36	G	24,72	19,64	99,63
				10,03	M			
				21,31	F			
3	L32	0,82	99,18	0,57	G	48,38	32,86	96,68
				2,15	M			
				11,90	F			
3	L34	17,03	82,97	11,32	G	22,57	18,65	96,83
				12,62	M			
				14,64	F			
3	L39	18,25	81,75	14,99	G	14,40	16,68	96,01
				20,69	M			
				11,00	F			
3	L41	2,18	97,82	1,15	G	23,03	52,36	93,84
				1,73	M			
				13,40	F			
10	L4	0,00	100,00	4,15	G	34,02	31,82	97,52
				7,16	M			
				20,37	F			
10	L8	0,65	99,35	4,35	G	42,21	25,20	94,34
				6,55	M			
				15,40	F			
10	L10	0,00	100,00	1,82	G	58,57	31,73	104,77
				2,45	M			
				10,20	F			
10	L15	0,00	100,00	1,06	G	60,42	28,74	102,74
				2,14	M			
				10,39	F			
10	L21	0,00	100,00	0,90	G	43,98	30,13	100,56
				5,20	M			
				20,34	F			

Tabelle 5: korrigierte Ergebnisse der Körnungsanalyse (Grob- + Feinboden entsprechen zusammen 100%)

Bohrkernnr.	Lagennr.	Skelett [Gew.-%]	Sand [Gew.-%]	Sandfraktion	Sandfraktion [Gew.-%]	Schluff [Gew.-%]	Ton [Gew.-%]	Σ Grob- + Feinboden [Gew.-%]
2	L2	3	2 3 7	G M F	12	50	35	100
2	L6	1	2 6 17	G M F	25	39	35	100
2	L13	1	13 26 6	G M F	45	11	43	100
2	L17	0	1 56 8	G M F	65	10	25	100
3	L3	10	18 13 9	G M F	40	23	27	100
3	L9	4	11 11 20	G M F	42	29	25	100
3	L16	36	20 13 6	G M F	39	13	12	100
3	L19b	2,5	5 12,5 18	G M F	35,5	40	22	100
3	L22	11	1 3 12	G M F	16	41	32	100
3	L25	20	5 12 16	G M F	33	26	21	100
3	L28	16	7,5 10 21,5	G M F	39	25	20	100
3	L32	1	1 2 12	G M F	15	50	34	100
3	L34	17	12 13 15	G M F	40	24	19	100
3	L39	18	16 22 11	G M F	49	15	18	100
3	L41	2	1 2 14	G M F	17	25	56	100
10	L4	0	4 7 21	G M F	32	35	33	100
10	L8	1	5 7 16	G M F	28	44	27	100
10	L10	0	2 2 10	G M F	14	56	30	100
10	L15	0	1 2 10	G M F	13	59	28	100
10	L21	0	1 5 20	G M F	26	44	30	100

Skelett:	> 2 mm
Grobsand (G):	0,63 - 2 mm
Mittelsand (M):	0,2 - 0,63 mm
Feinsand (F):	0,063 - 0,2 mm
Schluff:	0,002 - 0,063 mm
Ton:	< 0,002 mm

Mit den Werten aus **Tabelle 5** wird nun für jede Lage eine Kornsummenkurve auf halblogarithmischem Papier aufgezeichnet und daraus der Median abgelesen. Im Anhang (Anhang 19-21) ist jeweils ein Diagramm pro Bohrkern mit den jeweiligen Kornsummenkurven der einzelnen Lagen des Bohrkerns zu finden. In **Abb. 21** sind die charakteristischen Korndurchmesser (Median) für alle Bohrkern und Lagen graphisch dargestellt, in **Tabelle 6** finden sich die zugehörigen Werte.

Tabelle 6: Median (d_{50}) der untersuchten Lagen

Bohrkernnr.	Lagennr.	Median [mm]
2	L2	0,0055
2	L6	0,007
2	L13	0,02
2	L17	0,25
3	L3	0,06
3	L9	0,035
3	L16	0,85
3	L19b	0,021
3	L22	0,008
3	L25	0,075
3	L28	0,08
3	L32	0,006
3	L34	0,12
3	L39	0,3
3	L41	-
10	L4	0,01
10	L8	0,012
10	L10	0,0069
10	L15	0,007
10	L21	0,0092

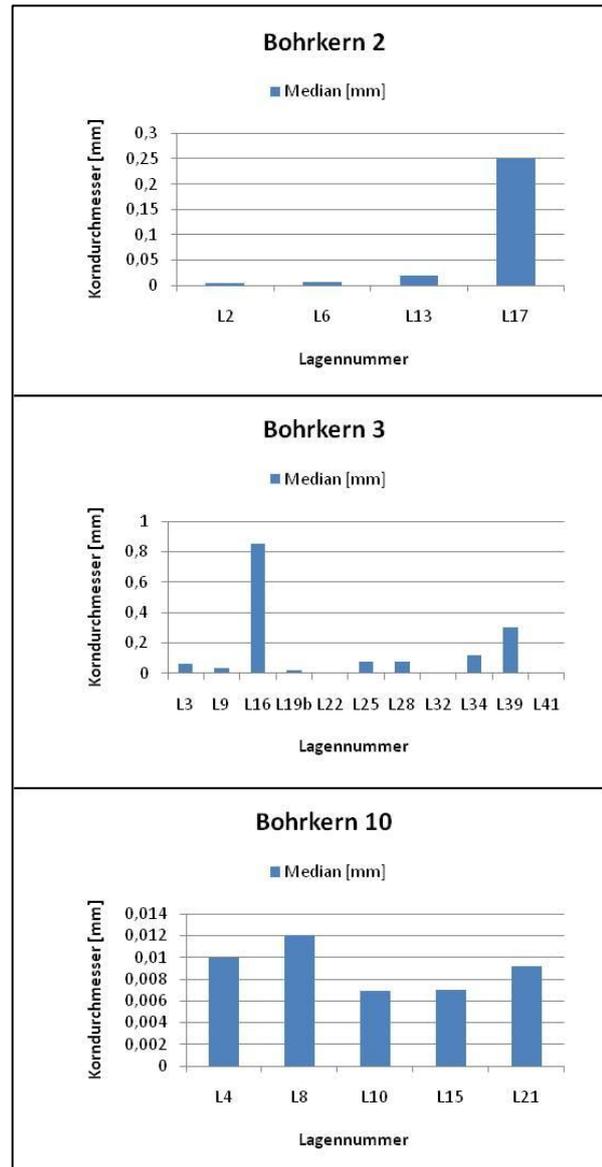
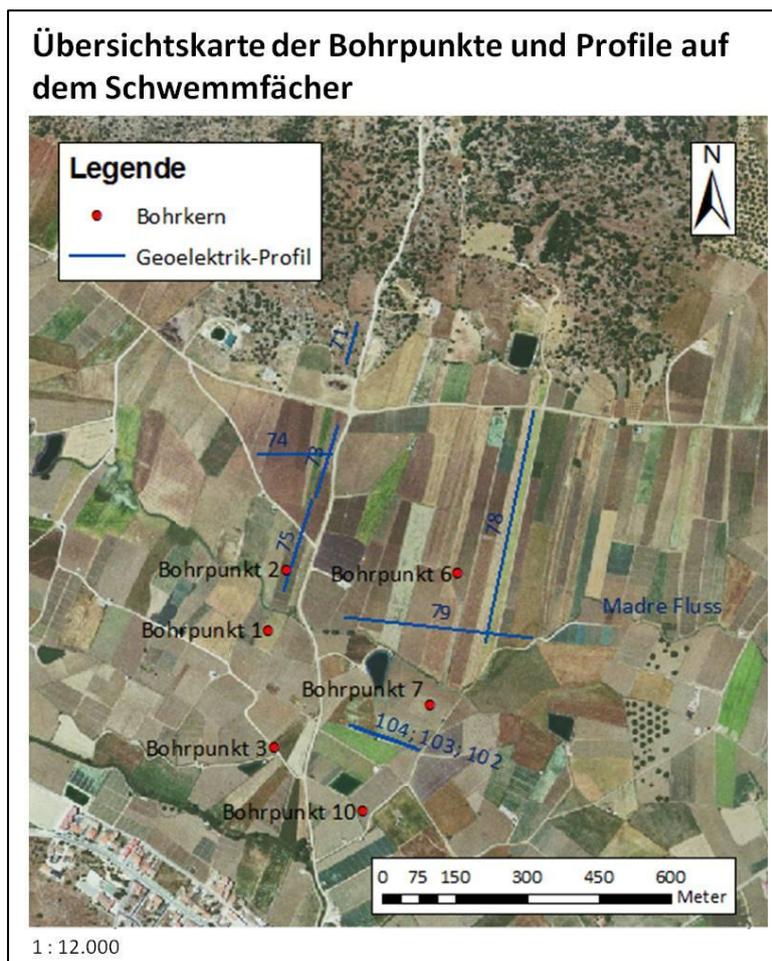


Abb. 21: Median der untersuchten Lagen der Bohrkerne 2, 3 und 10

Es ist zu erkennen, dass der Median der Lagen des Bohrkerne 2 mit der Tiefe zunimmt, wobei ein sprunghafter Anstieg zwischen Lage 13 und Lage 17 (vergl. **Abb. 21** oben) zu erkennen ist. In Bohrkerne 3 sind insgesamt ähnliche Korndurchmesser wie in Bohrkerne 2 zu finden. Es ist im Gegensatz zu Bohrkerne 2 allerdings kein klarer Anstieg des Medians mit der Tiefe zu erkennen. Lage 16 sticht mit einem im Gegensatz zu den anderen untersuchten Lagen des Bohrkerne sehr hohen Median von 0,85 mm hervor. Die charakteristischen Korndurchmesser in Bohrkerne 10 sind von der Größe her ähnlich denen der oberen Lagen des Bohrkerne 2, allerdings ist die Verteilung gleichmäßiger und es ist kein klarer Trend zu erkennen.

6. Diskussion

Im Folgenden werden nun die Ergebnisse der geoelektrischen Untersuchungen diskutiert und mit denen der Körnungsanalyse verglichen. Unter Berücksichtigung der Bodenart und der Widerstände in verschiedenen Tiefen werden Vermutungen über den Aufbau des Schwemmfächers angestellt und manifestiert. Es werden weitere Bohrungen, die auf dem Schwemmfächer abgeteuft wurden, mit einbezogen (siehe **Abb. 22**). Hier ist es vor allem interessant, in welcher Tiefe Kalk in den Bohrungen zu finden ist.



In **Abb. 22** ist zu sehen, dass zusätzlich zu den drei untersuchten Bohrkernen drei weitere Bohrungen auf dem Schwemmfächer abgeteuft wurden.

Bohrkern 1 liegt etwas südlich des Profils 75 und kann so zusätzlich zum Bohrkern 2 als Vergleich herangezogen werden. Bohrkern 6 und 7 befinden sich östlich auf dem Schwemmfächer, so dass auch die Profile 78 und 79 mit einer Bohrung abgeglichen werden können. Die Bohrprotokolle der zusätzlichen Bohrungen befinden sich in Anhang 13, 16 und 17.

Abb. 22: Übersichtskarte der Bohrpunkte und Profile auf dem Schwemmfächer

Zunächst ist bekannt, dass die beiden Bohrungen 1 und 2 nach 7,00 m bzw. 5,80 m aufgrund einer Kalkkruste im Untergrund abgebrochen wurden. Bohrung 3 und 7 erreichten deutlich größere Tiefen von 9,00 m bzw. 10,64 m. Bohrung 3 wurde aufgrund von Kernverlust im Grundwasserbereich und Bohrung 7 in sehr tonreichem, dichtem, rotem Material abgebrochen. In beiden Bohrungen ist kein Karbonat zu finden. Es ist also zu vermuten, dass die Sedimentdecke vom nördlichen zum südlichen Teil des Schwemmfächers an Mächtigkeit zunimmt.

Da Kalkstein eine sehr geringe Leitfähigkeit hat, sind die zu erwartenden Widerstände für dichten Kalkstein sehr hoch, wie in **Tabelle 7** zu sehen. Je geklüfteter der Kalkstein ist, desto höher wird die Leitfähigkeit und desto geringer die zu erwartenden Widerstände nach Formel 5) (Kapitel 3.1.). Da das Zafarraya Polje aus mesozoischen Karbonaten aufgebaut ist und es sich zudem um eine Karstform handelt, wie im Kapitel 2.2. beschrieben, wäre zu erwarten, dass Klüfte im Kalkstein zu finden sind. Zudem sind die beiden Bohrungen 1 und 2 in relativ geringer Tiefe auf harten Kalkstein gestoßen. Dies legt die Erwartung nahe, dass in den Geoelektrik-Profilen mittig auf dem Schwemmfächer (73, 75, 78, 79) Kalkstein zu erkennen ist, da diese eine deutlich höhere Erkundungstiefe aufweisen als die beiden Bohrungen 1 und 2.

Tabelle 7: Spezifische elektrische Widerstände für Lockersedimente, organogene und anthropogene Ablagerungen, Festgesteine und Wässer (Knödel, 2005)

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

Aus den Ergebnissen kann entnommen werden, dass die Widerstände im Profil 73 zunächst stetig mit der Tiefe ansteigen. Die Körnungsanalyse verschiedener Lagen in Bohrkern 2 zeigt, dass der Schluffanteil mit der Tiefe abnimmt, der Sandanteil hingegen zu. Dies ist auch am charakteristischen Korndurchmesser (Median) zu erkennen, der mit der Tiefe ebenfalls immer größer wird. Da die Leitfähigkeit von Sand deutlich niedriger ist als die von feuchtem Ton (vergl. **Tabelle 7**) ist anzunehmen, dass der Widerstandsanstieg am mit der Tiefe größer werdenden Sandanteil liegt. Unter diesem Bereich des stetig ansteigenden Widerstandes folgt, wie Kapitel 5.1. beschrieben, ein Bereich mit stark erhöhten Widerständen von $\geq 385 \Omega$ ab ca. 8 m Tiefe im Norden. Diese Widerstände sind im Süden etwas geringer und befinden sich in einer Tiefe von ≥ 12 m. Bei diesem Bereich handelt es sich aufgrund der sehr hohen Widerstände vermutlich um Kalkstein, der im Süden evtl. etwas mehr geklüftet ist. Das Abfallen aller Schichten nach unten im Süden des Profils 73 (**Abb. 12**) könnte aber auch eine Messungenauigkeit sein, da diese Widerstände nicht mit dem angrenzenden Profil 75 (**Abb. 13**) übereinstimmen, welches ab 8 m erhöhte Widerstände von $\geq 385 \Omega$ auf der gesamten Profillänge zeigt, wie oben beschrieben, die auf dichtes, weitgehend ungeklüftetes Karbonat hindeuten.

Seltsam ist, dass die beiden Bohrkern schon in deutlich geringeren Tiefen von knapp 6 m und 7 m, wie bereits zuvor erwähnt, auf eine harte Kalkschicht stoßen, was nicht mit den Ergebnissen der Geoelektrik übereinstimmt. Dies könnte an einer Messungenauigkeit der geoelektrischen Messungen oder auch an einer Ungenauigkeit bei der Inversion liegen. Alternativ wäre es auch möglich, dass die Kalkschicht in den Bohrkernen nur eine dünne Schicht ist, die in den Geoelektrik-Profilen nicht zu sehen ist und unter der wieder toniges bis schluffiges Material folgt bis schließlich erst in etwa 8 m Tiefe der anstehende Kalkstein zu finden ist, wie bei Profil 75 vermutet.

Das Querprofil 74 hat bis in eine Tiefe von 6 m Widerstände von bis zu 30Ω . Dies stimmt gut mit dem Profil 73 überein und würde aufgrund der Widerstände und der Körnungsanalyse auf Ton oder Schluff hindeuten (**Tabelle 7**).

In Profil 78 ist ähnlich wie im Profil 75 eine Schicht mit erhöhten Widerständen von $\geq 385 \Omega$ auf der gesamten Profillänge zu sehen. Allerdings ist eine Verlagerung der höherohmigen Schicht in die Tiefe von Nord (8 m) nach Süd (12 m) zu beobachten. Dies würde die Vermutung bestätigen, dass die Sedimentdecke von Norden nach Süden zunimmt, wie oben beschrieben.

Profil 79 liegt im Gegensatz zu den bisher erläuterten Profilen nicht längs auf dem Schwemmfächer, sondern deckt die laterale Ausdehnung des Schwemmfächers ab. Aus der Ergebnisdarstellung wird ersichtlich, dass die Schicht mit erhöhten Widerständen von $\geq 385 \Omega$ deutlich tiefer liegt als in Profil 78. Die beiden Profile sind auch in ihrem Schnittpunkt leicht gegeneinander verschoben, was auf eine

Ungenauigkeit der Messung hindeutet. Es ist jedoch in Profil 79 zu erkennen, dass die Mächtigkeit der oberen Schicht, bei der es sich aufgrund der Widerstände und der Körnungsanalyse vermutlich um toniges und schluffiges Material handelt, zur Mitte des Schwemmfächers hin zunimmt. Sie ist in der Mitte des Profils 20-22 m mächtig (**Abb. 15**). Das charakteristische konvexe Querprofil eines Schwemmfächers, deutet sich also hier an.

Die Profile 75, 78 (**Abb. 13, Abb. 14**) und 79 (**Abb. 15**) zeigen im oberen Bereich etwas höhere Widerstände als das Profil 73. Dies könnte an etwas feuchterem Bodenmaterial liegen, da bei feuchtem Ton höhere Widerstände zu erwarten sind, als bei trockenem, wie in **Tabelle 7** ersichtlich. In den Bohrprotokollen der Bohrkern 7 und 2 sind alle Lagen als feucht beschrieben worden, dies würde die Vermutung bestätigen, dass es sich um feuchtes Material handelt, allerdings wurde keine Bohrung im Bereich des Profils 73 abgeteuft, so dass nicht bestätigt werden kann, dass das Material dort trockener ist.

Nun ist in Profil 102 (**Abb. 16**) im südlichsten Teil des Schwemmfächers eine Schicht mit Widerständen von bis zu 80 Ω an der Oberfläche zu finden. Dies deutet auf einen höheren Sandanteil hin im Vergleich zu den Schichten mit Widerständen von 50 Ω . Darunter, ab ca. 8m Tiefe, befindet sich ein Bereich mit geringeren Widerständen zwischen 30 und ca. 50 Ω , wie in Kapitel 5.1. beschrieben. Dies legt, wie in den anderen Profilen auch, die Vermutung nahe, dass es sich aufgrund der höheren Leitfähigkeit von Ton im Gegensatz zu Sand (vergl. **Tabelle 7**) um toniges bis schluffiges Material handeln könnte. Um diese Vermutung zu bestätigen, werden die Ergebnisse der Körnungsanalyse der Lagen des Bohrkerns 3 herangezogen. Bei der Bodenart im Bohrkern 3 handelt es sich weitgehend um sandigen Lehm, außer in der letzten Lage, ab einer Tiefe von 8,86 m, dort ist eine deutliche Veränderung erkennbar. Das Material ist deutlich tonreicher und das Milieu reduzierend (siehe Anhang 15), wie es aufgrund des Geoelektrik-Profils, wie oben beschrieben, zu erwarten war. Somit ist die vermutete Sedimentschicht mit ca. 24 m in diesem Bereich des Schwemmfächers noch etwas mächtiger als im mittleren Teil (Profil 79). Im gesamten Profil ist keine Schicht mit Widerständen deutlich größer als 100 Ω und somit vermutlich auch kein Karbonat zu finden.

Bohrkern 10 liegt noch etwas südlicher am untersten Ende des Schwemmfächers und etwas östlicher als Bohrkern 3. Die Körnungsanalyse der untersuchten Lagen aus Bohrkern 10 zeigt etwas feinkörnigeres Material als die oberen Lagen des Bohrkerns 3. Die Bodenart ist hier toniger und schluffiger Lehm. Die Körnung ist auf der ganzen Teufe relativ konstant. Dies wird auch durch den konstanten relativ geringen charakteristischen Korndurchmesser von 0,002-0,014 mm deutlich. Es ist etwas mehr Schluff und dafür weniger Sand als in den oberen Lagen von Bohrkern 3 zu finden.

López-Chicano hat 1992 die Sedimentfüllung des Zafarraya Basins ebenfalls mittels geoelektrischer Methoden untersucht. Bei dieser Studie wurde ein Längsprofil von Ost nach West, südlich der Ortschaft Zafarraya, mittig durch die Polje gelegt, etwas unterhalb des hier untersuchten Gebietes. López-Chicano hat herausgefunden, dass an der Oberfläche des Poljes eine bis etwa 10 m mächtige Schicht bestehend aus Sand, Schluff und alluvialen Konglomeraten zu finden ist. Darunter folgt eine Schicht aus Ton und alluvialem Schluff, die im östlichen Teil des Basins bis zu 50 m mächtig ist. Darunter liegt im Westen das Grundgestein, das aus mesozoischen Karbonaten besteht, wie in Kapitel 2.2. beschrieben. Im südlichen und im mittleren Teil des Poljes ist zusätzlich eine mächtige Schicht aus Mergeln und im Osten aus Kalkareniten zu finden, die rund um den Madre Fluss bis zu 200 m mächtig ist. Darunter folgt das Grundgestein aus mesozoischen Karbonaten.

Dies würde bedeuten, dass der im hochohmigen unteren Bereich der Untergrundprofile vermutete Kalkstein, wie oben erläutert, nicht dem mesozoischen, karbonatischen Grundgestein entspricht, sondern dass es sich bei dieser Schicht um Kalkarenite oder sehr dichte kalkige Mergel handelt. Andererseits zeigt das auf dem Fuß des Gebirges schon im Festgestein gelegene Profil 71 (**Abb. 11**) auf dem gesamten Bereich hochohmige Widerstände im Bereich des vermuteten Kalksteins. Das würde wiederum bedeuten, dass es sich bei dem unteren hochohmigen Bereich der Profile um das mesozoische, karbonatische Grundgestein handelt. Um diese beiden Thesen zu überprüfen, wäre es sinnvoll, eine weitere, tiefere Bohrung auf dem Schwemmfächer abzuteufen und sowohl die Körnung als auch die chemische Zusammensetzung der Schichten in 10-30 m Tiefe zu analysieren. An den höheren Widerständen zeigt sich aber auf jeden Fall, dass das Material dichter ist und so wahrscheinlich unter anderen Sedimentationsbedingungen früher abgelagert wurde als das Material darüber. Es fand also vermutlich ein Wechsel der Klima- und Umweltbedingungen statt.

7. Fazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Messungen den Aufbau des Schwemmfächers in Ansätzen wiedergeben. So zeigen sie, dass die Sedimentdecke von der Mitte zu den Seiten des Schwemmfächers abnimmt, das Querprofil also eine konvexe Form hat. An der Oberfläche im Gelände ist das konkave Längsprofil zwar zu erahnen, kann jedoch durch diese Messungen nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden. Außerdem ist aus den Bohrungen zu schließen, dass die Sedimentschicht im Osten des Schwemmfächers in 6-7 m von einer Kalkschicht begrenzt wird und im Süden mächtiger wird. Das Material, das erbohrt wurde, ist relativ feinkörnig und enthält viel Ton und Schluff. Aus den Messungen ist nicht genau ersichtlich, ob unter dem feinkörnigen Sedimentbereich kalkhaltiger Mergel, Kalkarenite oder das mesozoische, karbonatische Grundgestein folgt. Es ist allerdings ersichtlich, dass dort eine Materialgrenze zu finden ist. Das Material im tieferen Bereich ist kalkhaltig und hat eine deutlich niedrigere Leitfähigkeit, was auf eine höhere Dichte und einen geringeren Wassergehalt hindeutet und so auf eine frühere Ablagerung unter vermutlich anderen Klima- und Umweltbedingungen.

Abschließend kann gesagt werden, dass diese Untersuchungen eine gute Basis bilden, um geeignete Stellen für weitere, aufwändigere, tiefere Bohrungen auszusuchen. Durch eine zeitaufwändige und genaue Analyse der Körnung und weitere chemische Analysen dieser neuen Bohrungen könnten der Aufbau, die Schichtung und die Entstehung des Schwemmfächers detaillierter und genauer geklärt werden.

Literaturverzeichnis

- Berkthold A. (1997). *Umweltgeophysik*. (M. Beblo, Hrsg.) Berlin, Deutschland: Ernst & Sohn Verlag.
- Blume H.-P., Brümmer G.W., Horn R., Kandeler E., Kögel-Knabner I., Kretzschmar R., Stahr K., Wilke B.-M. (2010). *Scheffer/Schachtschabel - Lehrbuch der Bodenkunde*. Heidelberg, Deutschland: Spektrum Akademischer Verlag.
- García-Jerez A., Luzón F., Navarro M., Pérez-Ruiz J.A. (Juni 2006). Characterization of the Sedimentary Cover of the Zafarraya Basin, Southern Spain, by Means of Ambient Noise. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 3, S. 957-967.
- Gisbert J., Calvache M.L., López-Chicano M., Martín-Rosales W. (2003). Importance of the Water Table Raising in the Floods of Zafarraya Polje (South Spain). (V.R. Thorndycraft, G. Benito, M. Barriendos, M.C. Llasat, Hrsg.). *Palaeofloods, Historical Floods and Climatic Variability: Applications in Flood Risk Assessment (Proceedings of the PHEFRA Workshop, Barcelona, 16-19th Oktober, 2002)*. S. 333-339.
- Kehl M. (2010). *Anleitung zur makroskopischen Beschreibung von Bohrkernen Im Gelände*. Universität zu Köln, Geographisches Institut.
- Lange G. (2003). *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten Band 8: Erkundungspraxis*. (G. Lange, K. Knödel, Hrsg.) Berlin, Heidelberg, Deutschland: Springer Verlag.
- Lange G., Jacobs F. (2005). *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten Band 3: Geophysik*. (K. Knödel, H. Krummel, G. Lange, Hrsg.) Berlin, Heidelberg, Deutschland: Springer Verlag. S. 128-138
- Lecce S.A. (1990). *Alluvial Fans - A Field Approach*. (A.H. Rachocki, M. Church, Hrsg.) Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.
- López-Chicano M. (1992). Contribución al conocimiento del sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda y su entorno (Granada y Málaga). Ph.D. Thesis, University of Granada, Spanien.
- López-Chicano M., Calvache M.L., Martín-Rosales W., Gisbert J. (2002). Conditioning factors in flooding of karstic poljes - the case of the Zafarraya polje (South Spain). *Catena* (49), S. 331-352.
- Lowrie W. (2006). *Fundamentals of Geophysics*. (W. Lowrie, Hrsg.) Cambridge, Großbritannien: Cambridge University Press.
- Mundry E., Greinwald S., Knödel K., Losecke W., Meiser P., Reitmayr G. (1985). *Angewandte Geowissenschaften Band II: Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften*. (F. Bender, Hrsg.) Stuttgart, Deutschland: Ferdinand Enke Verlag.
- Reicherter K. (2010). *Exkursionsführer-Spanienexkursion: Andalusia 2010*. RWTH Aachen.

- Reicherter K., Jabaloy A., Galindo-Zaldívar J., Ruano P., Becker-Heidmann P., Morales J., Reiss S. González-Lodeiro F. (2003). Repeated palaeoseismic activity of the Ventas de Zafarraya fault (S Spain) and its relation with the 1884 Andalusian earthquake. *International Journal of Earth Science* , S. 912-922.
- Schenkova Z., Zahradnik J. (1995). Interpretation of the microtremor spectra at the Zafarraya basin, southern Spain. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 15, S. 69-73.
- Utermann J., Gorny A., Hauenstein M., Malessa V., Müller U., Scheffer B. (2000). *Geologisches Jahrbuch, Reihe G, Heft 8: Labormethoden-Dokumentation*. (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Staatliche Geologische Dienste in der Bundesrepublik Deutschland, Hrsg.) Stuttgart, Deutschland: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller).
- Weidelt P. (2005). *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten Band 3: Geophysik*. (K. Knödel, H. Krummel, G. Lange, Hrsg.) Berlin, Heidelberg, Deutschland: Springer Verlag. S.71-89

Anhang

Anhang 1: Kriterien zum Schätzen der Bodenart mit der Fingerprobe (Kehl, 2010)

Kriterium Bindigkeit		
Stufe	Zusammenhalt der Probe	Zerbröckelt/zerbröseln/zerbricht
0	Kein	Sofort
1	Sehr gering	Sehr leicht
2	Gering	Leicht
3	Mittel	Wenig
4	Stark	Kaum
5	Sehr stark	Nicht

Kriterium Formbarkeit (Ausrollbarkeit¹)	
0	Nicht ausrollbar, zerbröckelt beim Versuch
1	Nicht ausrollbar, da die Probe vorher reißt und bricht
2	Ausrollen schwierig, da die Probe starke Neigung zum Reißen und Brechen aufweist
3	Ohne größere Schwierigkeiten ausrollbar, da die Probe nur schwach reißt oder bricht
4	Leicht ausrollbar, da die Probe nicht reißt oder bricht
5	Auf dünner als halbe Bleistiftstärke ausrollbar

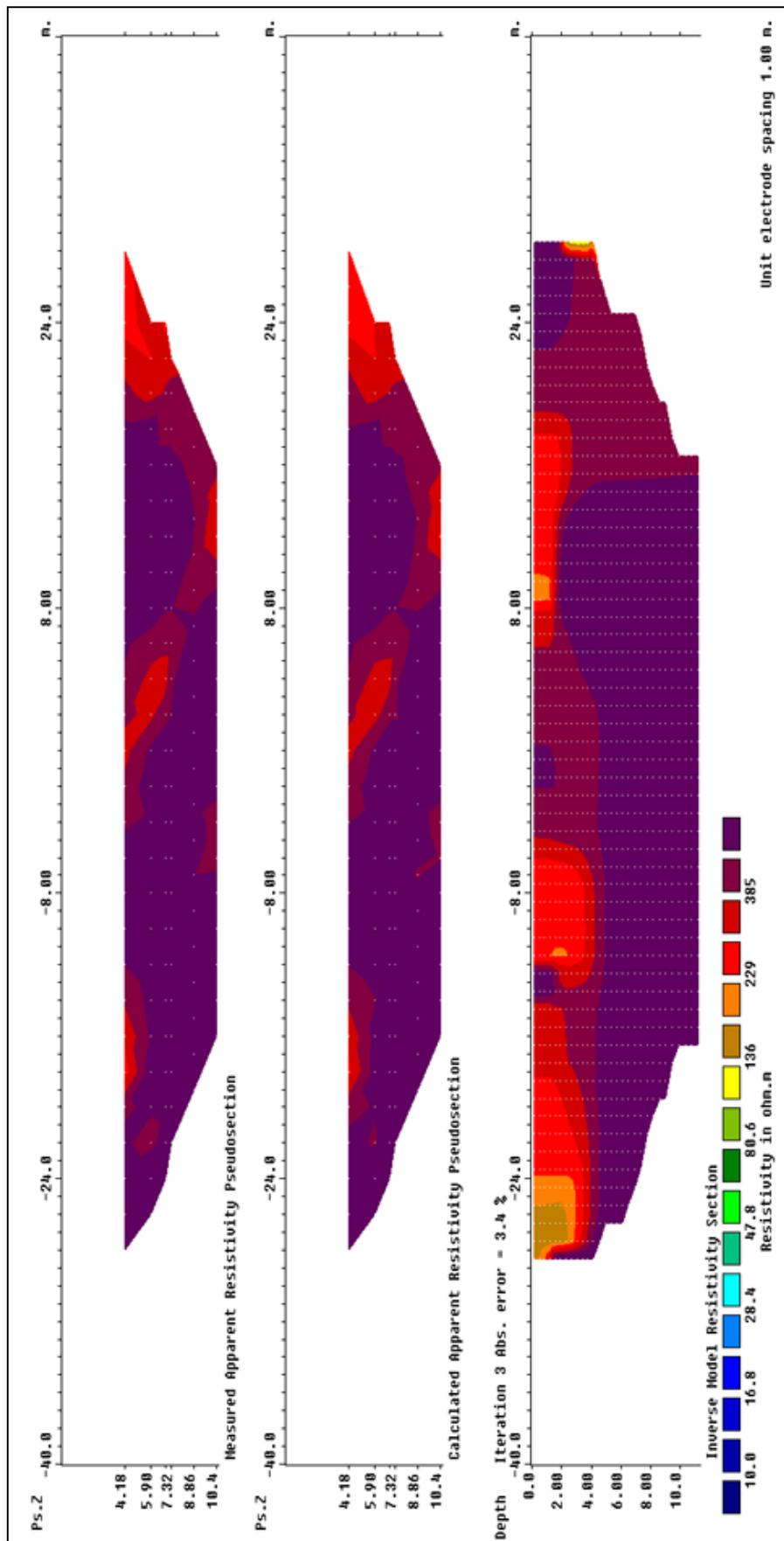
¹ Bewertung der Formbarkeit und Ausrollbarkeit einer Probe auf halbe Bleistiftstärke

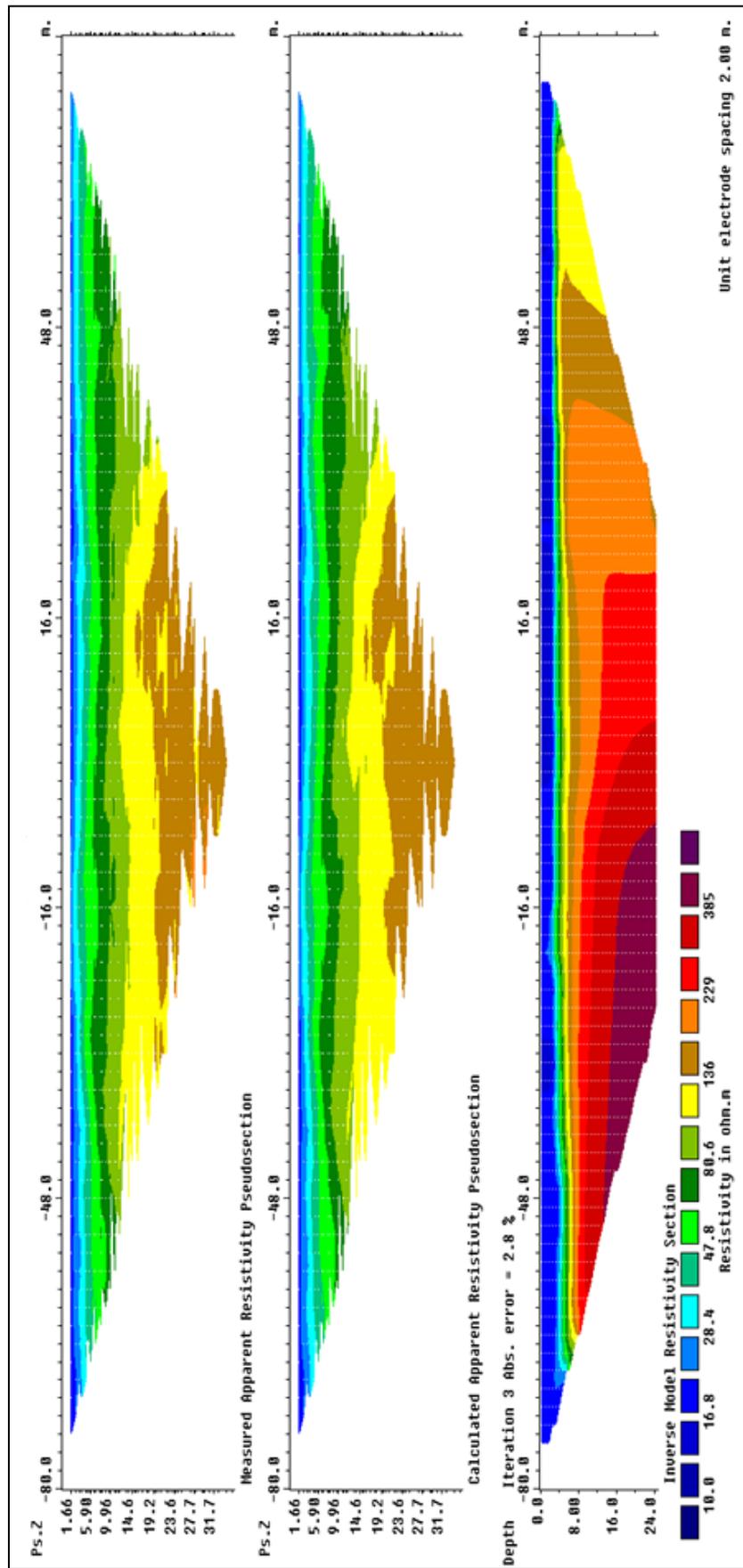
Anhang 2 a): Bestimmungsschlüssel Teil 1 (FS = Feinsubstanz hier Schluff und Ton) (Kehl, 2010)

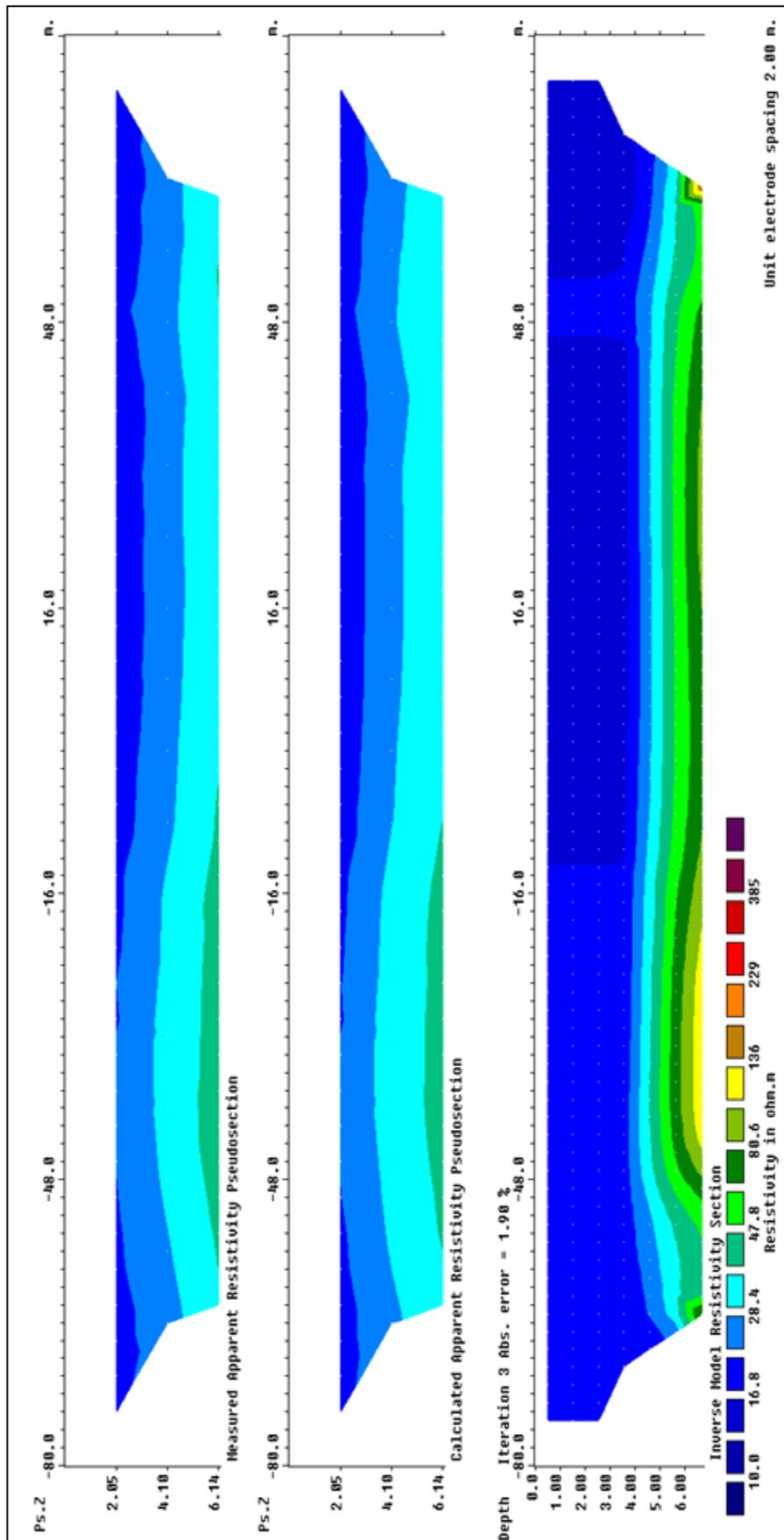
Hauptgruppe	Gruppe	Bodenart	Bindigkeit	Formbarkeit	Körnigkeit	Weitere Erkennungsmerkmale	
Sande	Reinsande	Ss	0	0	Nur Sandkörner, ohne erkennbare FS	In Fingerrillen haftet keine oder kaum FS	
	Lehmsande	Su2	0	0	Sandkörner gut sichtbar und fühlbar, sehr wenig FS	In Fingerrillen haftet sehr wenig FS	
		Sl2	1	1-2	Sandkörner deutlich sichtbar und fühlbar, sehr wenig FS	In Fingerrillen haftet wenig FS	
		Sl3	2	3	Sandkörner deutlich sichtbar und fühlbar, sehr wenig bis mäßig FS	In Fingerrillen haftet FS	
		St2	1-2	1-3	Sandkörner sichtbar und fühlbar, sehr wenig FS	In Fingerrillen haftet sehr wenig FS	
	Schluffsande	Su3	0-1	0-2	Sandkörner gut sichtbar und fühlbar, deutlich FS führend	In Fingerrillen haftet schwach mehlig FS	
		Su4	0-1	0-2	Sandkörner gut sichtbar und fühlbar, viel FS	In Fingerrillen haftet stark mehlig FS	
Lehme	Sandlehme	Slu	1-2	3	Sandkörner deutlich sichtbar und fühlbar, viel FS	FS ist deutlich mehlig	
		Sl4	2	3	Sandkörner gut sichtbar und fühlbar, mäßig bis viel FS	Schwach glänzende Reibfläche, walnussgroße Kugel formbar	
		St3	3	3	Sandkörner deutlich sichtbar und fühlbar, mäßig FS führend	Sehr klebrige FS („Honigsand“)	
	Normallehme	Ls2	3	3	Sandkörner deutlich sichtbar und fühlbar, viel FS	Sehr schwach mehlig FS	
		Ls3	3	3	Sandkörner deutlich sichtbar und fühlbar, viel FS	Glänzende Reibfläche, sehr deutlich körnig	
		Ls4	3	3	Sandkörner deutlich sichtbar und fühlbar, mäßig FS führend	Schwach glänzende Reibfläche, sehr deutlich körnig	
		Lt2	4	4	Sandkörner gut sichtbar und fühlbar, sehr viel FS	Schwach raue, schwach glänzende Reibfläche	
	Tonlehme	Lts	4-5	4-5	Sandkörner gut sichtbar und fühlbar, reich an FS	Sehr stark glänzende Reibfläche, körnig	
		Ts4	4	4	Sandkörner gut sichtbar und fühlbar, viel FS	Raue, glänzende Reibfläche, deutlich körnig	
		Ts3	5	5	Sandkörner deutlich sichtbar und fühlbar, sehr viel FS	Schwach raue, glänzende Reibfläche, deutlich körnig, klebrig, zähplastisch	
	Schluffe	Sand-schluffe	Uu	0-1	1	Sandkörner kaum oder nicht sichtbar und fühlbar, fast nur FS	Samtig-mehlig FS haftet deutlich in Fingerrillen, Reibfläche matt u. aufschuppend
			Us	0-1	1	Sandkörner sichtbar und fühlbar, FS überwiegt	Samtig-mehlig FS haftet deutlich in Fingerrillen, Reibfläche körnig, matt u. aufschuppend

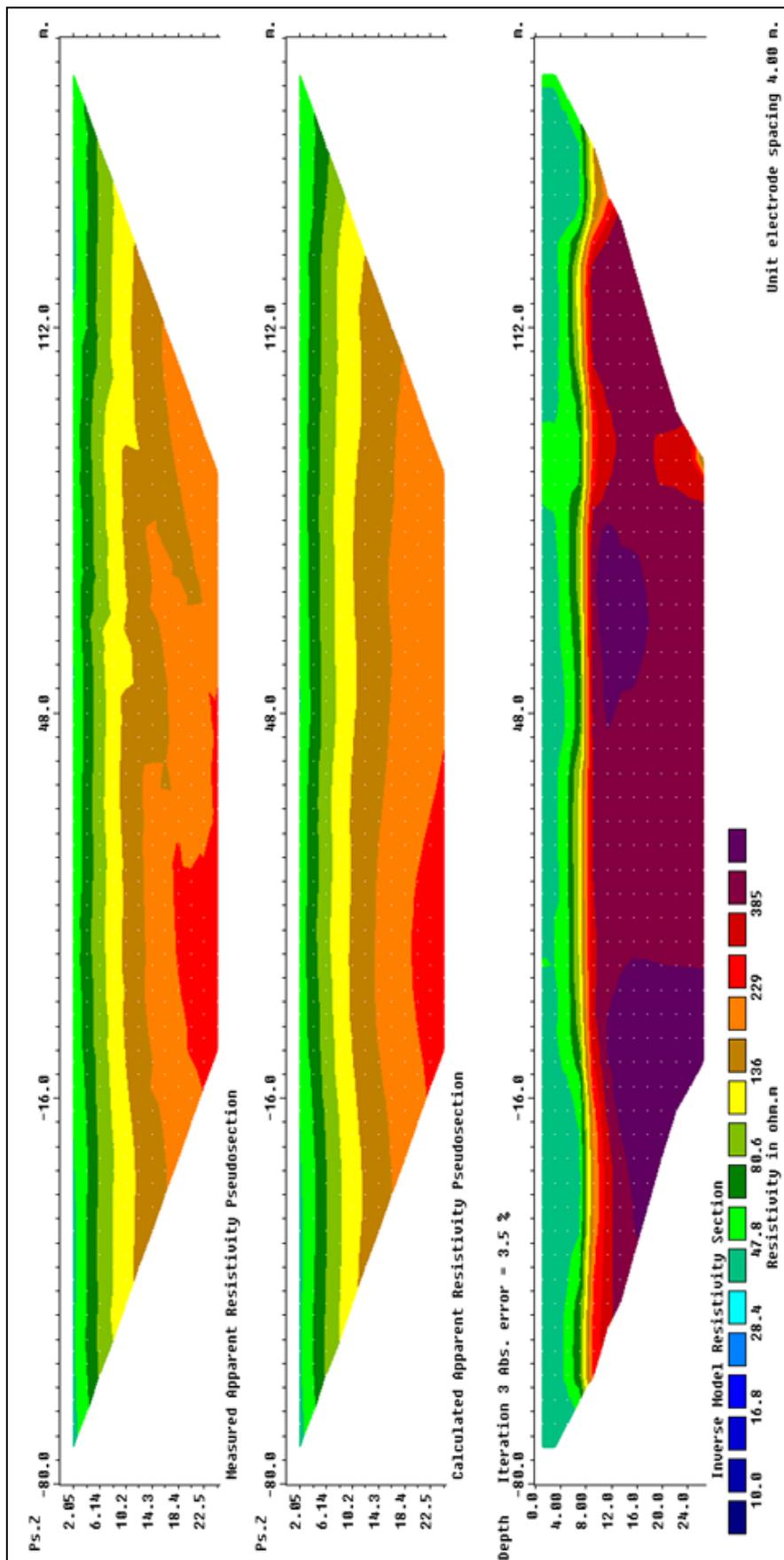
Anhang 3 b): Bestimmungsschlüssel Teil 2 (FS = Feinsubstanz hier Schluff und Ton) (Kehl, 2010)

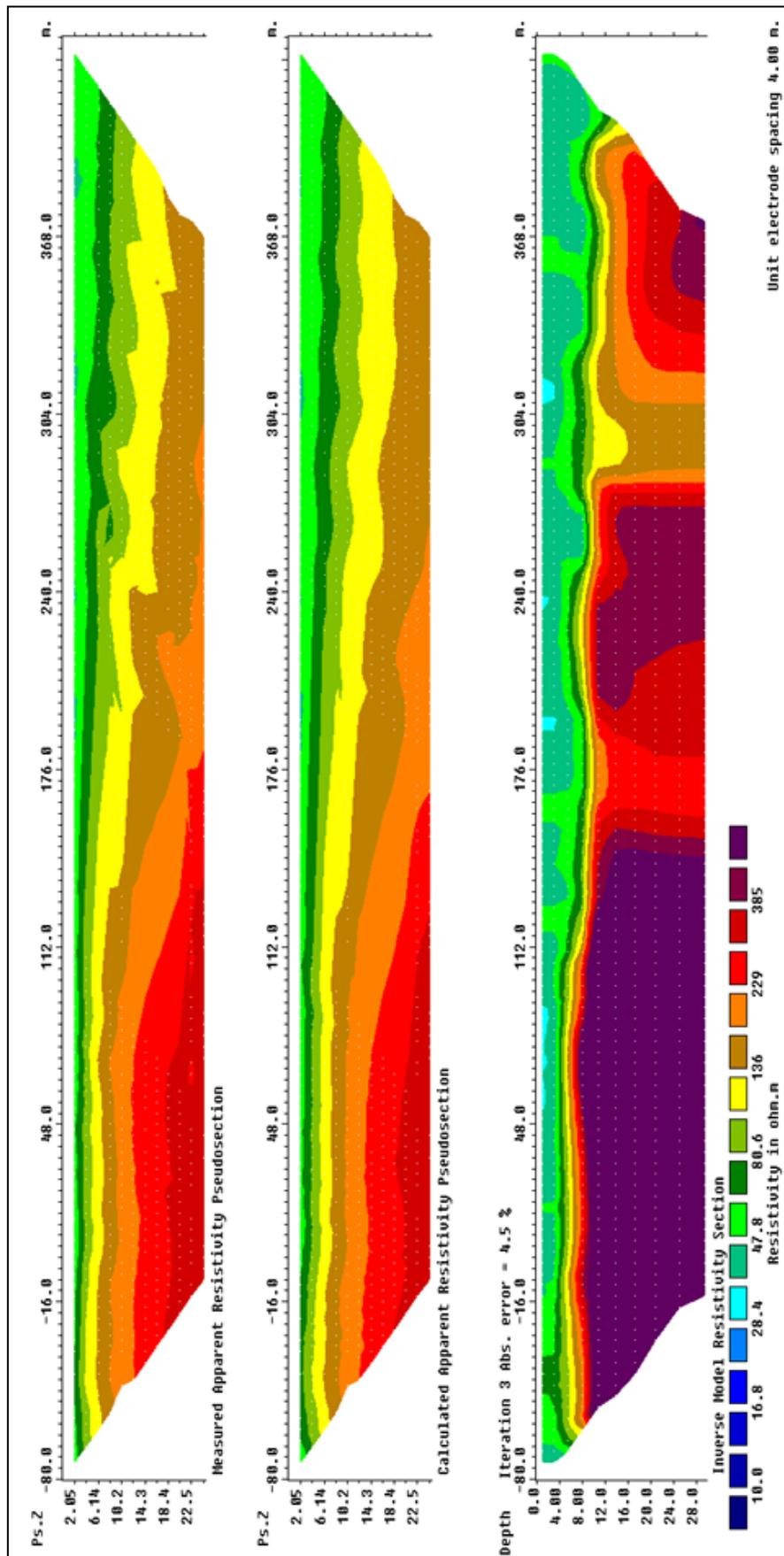
	Lehm- schluffe	Ut2	1	2	Sandkörner kaum oder nicht sicht- und fühlbar, fast nur FS	Stark mehlig FS haftet deutl. in Fingerrillen, raue, matte und aufschuppende Reibfläche
		Ut3	2	2	Sandkörner nicht sicht- und fühlbar, fast nur FS	deutlich mehlig FS haftet gut in Fingerrillen, Reibfläche matt und aufschuppend
		Uls	1-2	1-3	Sandkörner sicht- und fühlbar, FS überwiegt	Leicht mehlig FS haftet deutl. in Fingerrillen
	Ton- schluffe	Ut4	3	3	Sandkörner nicht sicht- und fühlbar, nur FS	Schwach mehlig FS haftet und klebt etwas, matte bis schwach glänzende Reibfläche, körnig und aufschuppend
		Lu	3-4	3-4	Sandkörner nicht oder kaum sicht- und fühlbar, sehr viel FS	Bindige FS, raue, matte bis schwach glänzende Reibfläche, körnig u. aufschuppend
Tone	Schluff- tone	Lt3	5	5	Sandkörner sicht- und fühlbar, sehr viel FS	Zähplastische FS, schwach raue, schwach körnige, glänzende Reibfläche
		Tu3	4-5	5	Sandkörner nicht sicht- und fühlbar, fast nur FS	Zähplastische FS, schwach raue, glänzende Reibfläche
		Tu4	4	4	Sandkörner nicht sicht- und fühlbar, nur FS	Raue, schwach glänzende Reibfläche, knirscht zwischen den Zähnen
	Lehm- tone	Ts2	5	5	Wenig Sandkörner sicht- und fühlbar, reich an FS	Stark glänzende Reibfläche, knirscht zwischen den Zähnen
		Tl	5	5	Sehr wenig sandkörner sicht- und fühlbar, sehr viel FS	Zähplastische FS, glänzende Reibfläche
		Tu2	5	5	Sandkörner nicht sicht- und fühlbar, fast nur FS	Stark plastische FS, schwach raue, glänzende Reibfläche
		Tt	5	5	Sandkörner nicht sicht- und fühlbar, nur FS	Stark plastische, mm-dünn ausrollbare FS, glatte, schwach glänzende bis glänzende Reibfläche

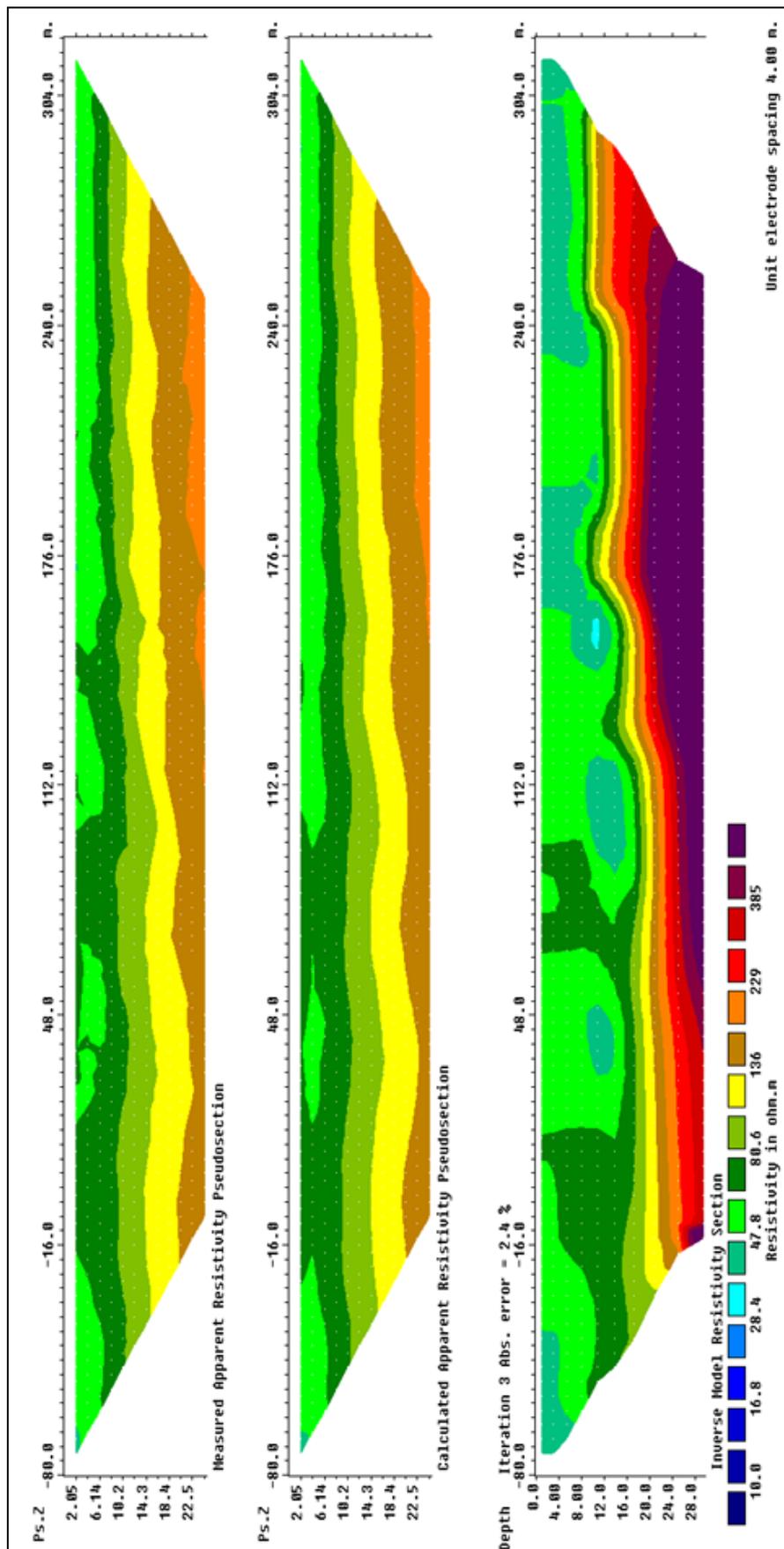


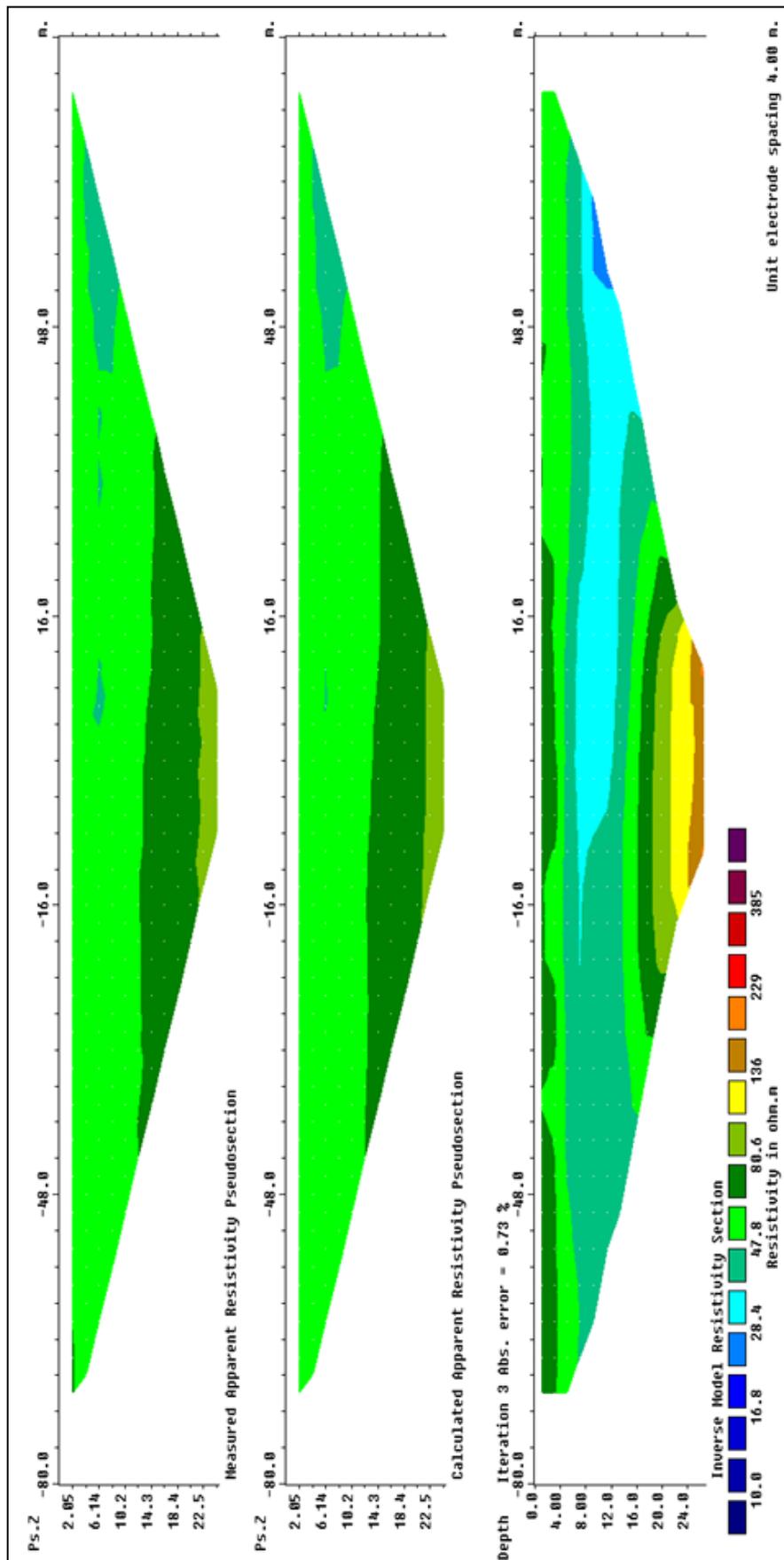


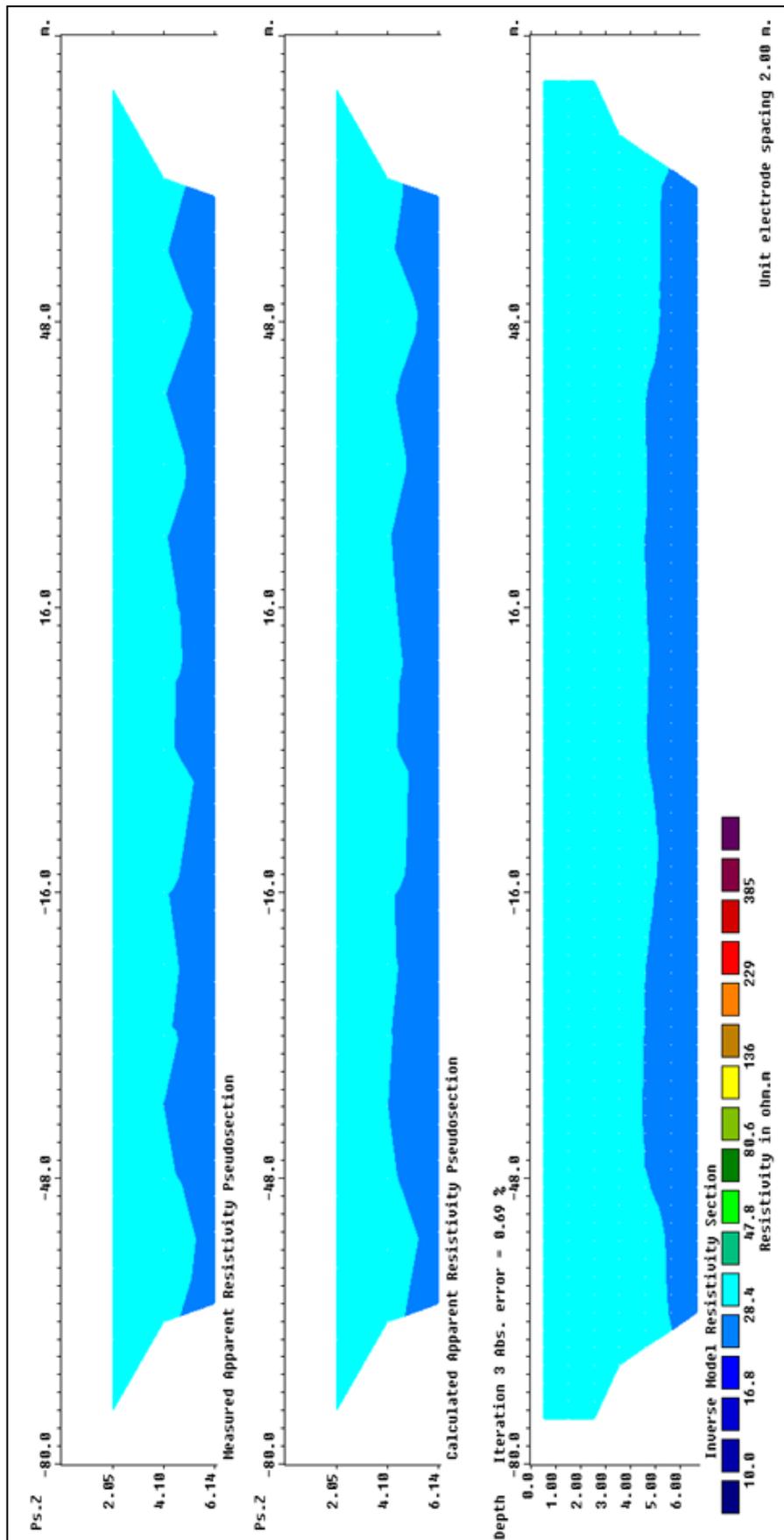


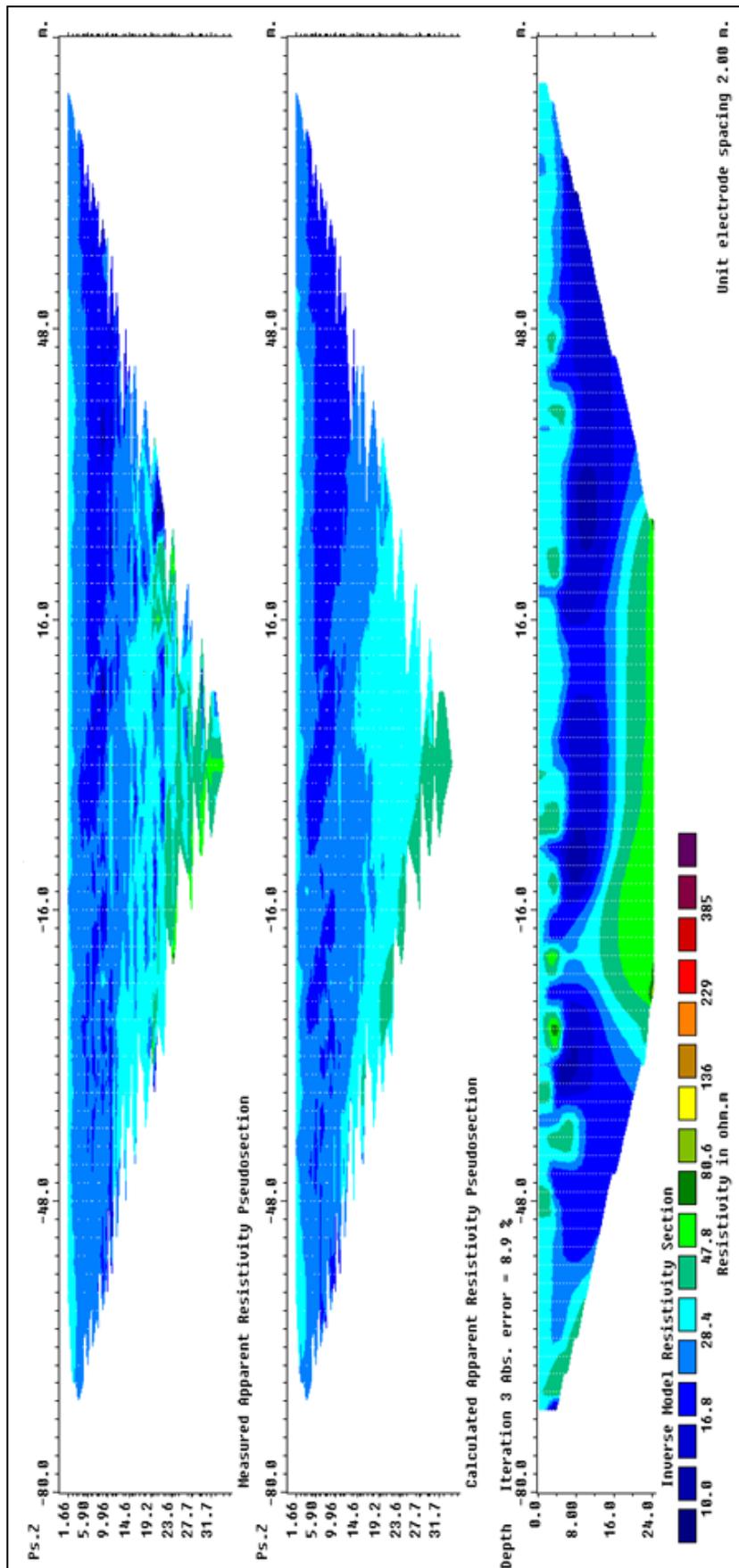












Anhang 12: Zusammenfassung aller Bohrungen

Bohrpunkt	Datum	RW	HW	Höhe	Teufe	Lokalität	Bemerkungen
1	10.03.2010	398236	4093661	887	7,00	Schwemmfächer El Almendral	Abbruch in Kalkkruste
2	11.03.2010	398273	4093788	895	5,80	Schwemmfächer El Almendral	Abbruch in Kalkkruste
3	12.03.2010	398248	4093415	897	9,00	Wasserscheide zwischen Entwässerungsgraben und Arroyo de la Madre	ab 9 m Kernverlust im Grundwasserbereich
4	13.03.2010	397486	4091829	885	6,10	Fußfläche südlich Zafarraya	ab 6.1 m kein weiterer Vortrieb in rosa Material, Schichtung (Zisterne!) in Bohrkern nicht erkennbar
5	15.03.2010	400056	4092055	899	6,00	Poljenboden, 500 m N von Arroyo de la Madre	Inlinerbohrung bis etwa 3.86, dann Rammkernsonde bis 6.0 m;
6	15.03.2010	398630	4093781	893	5,65	Schwemmfächer El Almendral	Inlinerbohrung bis etwa 6.0 m; Verlust der Sonde zwischen 5.65 und 6 m
7	16.03.2010	398572	4093505	893	10,64	Schwemmfächer El Almendral	Bohrung in rotem, sehr tonreichem Material abgebrochen
8	17.03.2010	397405	4094129	890	9,02	Poljenboden bei Schluckloch	Bohrung in rotem, sehr tonreichem Material abgebrochen
9	17.03.2010	397531	4094145	889	2,86	Poljenboden bei Schluckloch	Bohrung in rotem, sehr tonreichem Material abgebrochen; Schichtung nicht im Bohrstock erkennbar
10	18.03.2010	398431	4093281	892	5,71	Wasserscheide zwischen Entwässerungsgraben und Arroyo de la Madre	
11	18.03.2010	401530	4091180	908	7,02	Alluvionen, 20 m nördlich Arroyo de la Madre bei Pilas de Algaida	
12	20.03.2010	387755	4095528	880	3,00	Unterhang etwa 70 m südöstlich des Arroyo de Morales (Polje von Alfarnate)	Bohrung in sehr dichtem Ton und Kalk abgebrochen
13	20.03.2010				0,63	Fußfläche etwa 100 m nordwestlich des Arroyo de Morales (Polje von Alfarnate)	Bohrung in sehr dichtem Kalk abgebrochen
14	22.03.2010	389156	4095214	884	2,00	Unterhang etwa 250 m südöstlich des Canal Acequia (Polje von Alfarnate)	Bohrung in Bleichzone abgebrochen
15	22.03.2010	389168	4095226	889	3,25	Unterhang etwa 250 m südöstlich des Canal Acequia	Bohrung in Bleichzone abgebrochen
16	22.03.2010	389153	4095326		4,00	Wasserscheide zwischen Entwässerungsgraben und Canal Acequia	Bohrung in sehr trockenem rötlichem Ton abgebrochen
17	23.03.2010				10,09	Poljenboden bei Schluckloch	Bohrung in sehr dichtem Kalk abgebrochen

Anhang 13 a): Bohrprotokoll des Bohrkerns 1 (Teil 1)

Datum	Bohrpunkt	Rechtswert	Hochwert	Höhe ü NN	Hangneigung	Nutzung	Vegetation	Bemerkung	
10.03.2010	1	4093661	305398236	887 m ± 3 m	minimal	Landwirtschaft	keine/Gräser	WP53	
1	Lage	2	3	4	5	6	7	8	9
	Grenze	Farbe (feucht)	Fleckung, Bänderung	Menge, Größe	Feuchte	Körnung, Bodenart	Skelett	Carbonat	C-Gesamtgehalt
	Tiefe [cm]	Munsell					%	%	%
1	40 A	10 YR 3/3	K	nass	Tu 3	Tu 3	1	c0	
2	57 De	10 YR 3/4	Fe-Mn-Hydro S, SF/F	nass-feucht	Tu 3	Tu 3	2	c0	
3	75 De	10 YR 3/4	Fe-Mn-Hydro W, F	nass-feucht	UH 3	UH 3	2	c0	
4	100	10 YR 4/3	Fe-Mn-Hydro V, F	feucht	Lt 3	Lt 3	1	c0	
5	110	10 YR 3/3	Fe-Mn-Hydro S, SF/F	feucht	Tu 4	Tu 4	1	c0	
6	145	2,5 YR 3/3	Fe-Mn-Hydro V, F	trocken	Tu 4	Tu 4	2	c0	
7	160	10 YR 4/4	Fe-Mn-Hydro SV, F	trocken	Ts 2	Ts 2	2	c0	
8	179	10 YR 3/4	weiß S, SF	trocken	Tl	Tl	3	c0	
9	200	10 YR 3/4	Fe-Mn-Hydro weiß M, F	trocken	Lts	Lts	2	c0	
10	246	10 YR 3/4	Fe-Mn-Hydro S, SF	trocken	Ts 2	Ts 2	2	c0	
11	261	7,5 YR 3/4	K	trocken	Tu 2	Tu 2	1	c0	
12	300	7,5 YR 3/4	Fe-Mn-Hydro S, SF	trocken	Tt	Tt	1	c0	
12 B	304 s	7,5 YR 3/4	Fe-Mn-Hydro S, SF	trocken	Tt	Tt	1	c0	
13	327 di	7,5 YR 5/6 - 4/6	Fe-Mn-Hydro M F	feucht	Lts / Lt3	Lts / Lt3	1	c0	
14	342 di	7,5 YR 4/6	Fe-Mn-Hydro MG M	feucht	Lts / Lt3	Lts / Lt3	1	c0	
15	369 di	7,5 YR 4/6	Fe-Mn-Hydro W,F	feucht	Lts	Lts	2	c0	
16	400/414 di	7,5 YR 4/6	Fe-Mn-Hydro M F	feucht	Lts	Lts	2	c0	
16 B / 17	428 de	7,5 YR 4/4 - 4/6	Fe-Mn-Hydro SF	feucht	Lts	Lts	1	c0	
18	450 a	7,5 YR 4/4	Fe-Mn-Hydro SF + F	feucht	Lts	Lts	1-2	c0	
19	471 a	7,5 YR 5/8	Fe-Mn-Hydro F	trocken bis feucht	Ls 2	Ls 2	1	c0	
20	500 a	10 YR 5/8	Fe-Mn-Hydro MG	trocken bis feucht	Ls 3	Ls 3	1	c0	
21	519	7,5 YR 5/8 - 10 YR 7/8 - 6/8	Fe-Mn-Hydro SV, MG	feucht	Ls 3	Ls 3	1	c0	
22	541 S	7,5 YR 5/6 - 5/8	Fe-Mn-Hydro Vi, MG	feucht	Ls 4	Ls 4	1	c0	
23	595 a	10 YR 6/6 ua	Fe-Mn-Hydro Sv, MG	feucht	Ls 3	Ls 3	1	c0	
24	600							c3	
25	617								
26	634 s	10 YR 6/6	Fe-Mn-Bänderung M unbestimmt	feucht	Ls 3	Ls 3	1	c5	
27	649 s	10 YR 7/3	K	trocken	Kalkkruste >75%	Kalkkruste >75%	6	c5	
28	675 s	10 YR 6/6	Fe-Mn-Bänderung V, F - MG	feucht	Ls 2	Ls 2	2	c5	
29	700	10 YR 6/8,2	Fe-Mn-Bänderung W, F	feucht	Ls 2	Ls 2	3	c5	

1	10	11	12	13
Lage	Lagerung	Konzentrationen (Konkretionen)	Gefüge	Bemerkungen/Interpretationen
1	gering	g	kohärent	Humus, Gräser, Verschleppung, 1-14cm kein Material, Kernverlust
2	mittel	Fe-Mn-Hydro	kohärent	Verschleppung
3	mittel	Fe-Mn-Hydro	kohärent	Verschleppung
4	hoch	g Fe-Mn-Hydro	kohärent	Verschleppung, Kies
5	hoch	g	kohärent	
6	sehr hoch	Pedogene Tonanreicherung gr	kohärent	
7	sehr hoch	Pedogene Tonanreicherung g	kohärent	
8	sehr hoch	gr	kohärent	scharfkantiges Skelett, deutlicher Schichtwechsel
9	sehr hoch	g Fe-Mn-Hydro	kohärent	Mn-Konkretation bis 5mm
10	sehr hoch	g (weiß)	kohärent	Tonbelege?
11	sehr hoch		kohärent	Scherflächen
12	sehr hoch		kohärent	
12 B	sehr hoch		kohärent	
13	mittel		kohärent	rostfarbene Matrix
14	mittel		kohärent	rostfarbene Matrix graue Tonschnitze F
15	mittel		kohärent	rostfarbene Matrix
16	mittel		kohärent	rostfarbene Matrix
16B / 17				
18			kohärent	untersch. Große Mn-Flecken
19		Mn Kompression	kohärent	deutlich höherer Sandanteil, orangefarb. Matrix
20		Mn Kompression	kohärent	große Mn-Flecken, deutlich höherer Sandanteil
21	mittel	Fe-Mn-Hydro	kohärent	orangefarbene Matrix
22	mittel bis hoch	Fe-Mn-Hydro	kohärent	
23	mittel	Fe-Mn-Hydro	kohärent	
24				
25				Verschleppt, identisch zu Lage 24
26	hoch	Kalkkonkretationen	kohärent	Verschleppt, identisch zu Lage 25
27	sehr hoch	Kalkkonkretationen	Kittgefüge	Kruste
28	hoch	Kalkkonkretationen	kohärent	
29	hoch	Kalkkonkretationen	kohärent/Kittgefüge	

Anhang 14 a): Bohrprotokoll des Bohrkerns 2 (Teil 1)

Datum	Bohrpunkt	Bearbeiter	Rechtswert	Hochwert	Höhe ü NN	Hangneigung	Exposition	Nutzung	Vegetation
11.03.2010	2	Anna R., Janine G., Hannah B., Benedikt Z.	30 S 398273	UTM 4093788	895 m ± 4 m		Süd	Landwirtschaft	Gras

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lage	Grenze	Farbe (feucht)	Fleckung, Bänderung	Feuchte	Körnung, Bodenart	Skelett	Carbonat	C-Gesamtgehalt	Lagerung
	Tiefe [cm]	Munsell	Menge, Größe			%	%	%	
	44								
2	64 A	10 YR 3/3	K	feucht	Lu	0	c0		gering
3	100	7.5 YR 4/4	W,SF	feucht	Tu4	1 gr	c0		mittel
4	119 De	7.5 YR 4/4	S, SF Fe/Mn-Hydroxid	feucht	Ut4	0	c0		gering
5	151 A	10 YR 4/4	W,SF Fe/Mn-Hydroxid	feucht	Tu4	1-2 gr	c0		mittel
6	179 Di	10 YR 3/4	M, SF-F Fe/Mn-Hydroxid	feucht	Lu	1 gr	c0		hoch
7	200	10 YR 4/4	W, SF Fe/Mn-Hydroxid	feucht	Lu	1 gr	c0		hoch
8	234	10 YR 3/3	W, F Fe/Mn-Hydroxid	feucht	Lu	1 gr	c0		hoch
9	252 De	7.5 YR 4/3 - 3/3	M, SF-F Fe/Mn-Hydroxid	feucht	Ts4	3 gr	c0		hoch
10	269 A	10 YR 3/3	V, SF-MG Fe/Mn-Hydroxid	feucht	Ts4	4 gr	c0		hoch
11	300	5 YR 4/6 - 4/8	V, F-MG Fe/Mn-Hydroxid	feucht	Lts	3 gr	c0		sehr hoch
12	323 De	5 YR 4/8	V	feucht	Lts	2 gr	c0		mittel
13	353 De	5 YR 3/4	SV	feucht	Lts	2 gr	c0		hoch
14	367 De	5 YR 4/4	V	feucht	Lts	2 k	c0		hoch
15	400 De	5 YR 4/3	SV	feucht	Ls4	2 k	c0		hoch
16	412 De	7.5 YR 4/4	V (mehr Fe, weniger Mn)	feucht	Ls3	2 ?	c0		hoch
17 o	443 Di	7.5 YR 4/4	V (mehr Fe, weniger Mn)	feucht	Ls4	2 ?	c0		hoch
17 u	474	7.5 YR 4/4	V (mehr Fe, weniger Mn)	feucht	Sl2	2 ?	c0		hoch
18	500 De	10 YR 6/4	marmoriert	trocken	Sl2		c4		hoch
19	580	10 YR 6/4	marmoriert	trocken	Sl2	2-5%	c4		sehr hoch

LEGENDE

k = kantengerundet
 ? = kaum erkennbar, vermutl. Kantengerundet
 0 = kein Skelett vorhanden

Notizen

zusätzliche Bodenprobe zur Untersuchung B2 (L7) --> sollte ähnlich B2 L7-L8 sein
 Edelmanbohr 0-20 cm B2-E1
 20-40 cm B2-E2
 40-60 cm B2-E3

1 Lage	11 Konzentrationen (Konkretionen)	12 Gefüge	13 Bemerkungen/Interpretationen
1		Krümelfef.	Kernverlust
2	keine	kohärent	Acker (gepflügt)
3	keine	kohärent	Acker (gepflügt)
4	Fe, Mn	kohärent	Kernverlust
5	Fe, Mn	kohärent	
6	Fe, Mn	kohärent	
7	Fe, Mn	kohärent	
8	Fe, Mn	kohärent	
9	Fe, Mn	kohärent	
10	Fe, Mn	kohärent	Steine, kantengerundet
11	Fe, Mn	kohärent	deutlich verschleppte Anteil (entsorgt) --> 4cm übrig, enthält einige deutlich gelbe Flecken --> Lepidokorkit (?)
12	Fe, Mn; Mn: 6mm	kohärent	stark verwitterte weiße Körner --> Feldspat(?), stark rot verfärbt
13	Fe, Mn; Mn: 6mm	kohärent	stark verwitterte weiße Körner --> Feldspat(?)
14	Fe, Mn; Mn: 4mm	kohärent	stark verwitterte weiße Körner --> Feldspat(?)
15	Fe, Mn; Mn: 2mm	kohärent	
16	Fe, Mn; beide 4mm	kohärent	teils intensiv orangefarbene Flecken
17 o	Fe, Mn; beide 2mm	kohärent	Fleckung nimmt mit Tiefe ab, evtl. separate Schicht
17 u	Fe, Mn; beide 2mm	kohärent	
18	keine	Kitt	Kalksteinverwitterungszone od. Kalkkruste(?)
19	Kalk	Kitt	geht nicht bis 600 cm, weil zu hart

Anhang 15 a): Bohrprotokoll des Bohrkerns 3 (Teil 1)

Datum	Bohrpunkt	Rechtswert	Hochwert	Höhe ü NN	Hangneigung	Exposition	Nutzung	Vegetation	Bemerkung
12.03.2010	3	30 S 398248	UTM 4093415	897 m ± 4 m		Süd	Landwirtschaft	Kulturpflanzen	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lage	Grenze	Farbe (feucht)	Fleckung, Bänderung	Feuchte	Körnung, Bodenart	Skelett	Carbonat	C-Gesamtgehalt	Lagerung
	Tiefe [cm]	Munsell	Menge, Größe			%	%	%	
1	0,33	De		nass		1	CO		gering
2	0,69	A	S, SF	feucht		0	CO		mittel-hoch
3	1		S, SF	feucht		2	CO	0,32	hoch
4	1,26	S	K	nass		3	CO		gering
5	1,41	S	S, SF	feucht		2	CO		hoch
6	1,73	De	S	feucht		1	CO		hoch
7	2		S (Mangan)	feucht		1	CO		hoch
8	2,16	S	K	nass		0	CO		gering
9	2,31	A	S, SF (Mangan)	feucht		2	CO	0,23	hoch
10	3		V, F (Eisen)	feucht		1	CO		hoch-sehr hoch
11	3,15	De	W, SF (Mangan)	nass		0	CO		gering
12	3,42	A	V, F	feucht		0	CO		mittel
13	3,61	S	V, F	feucht		0-1	CO		mittel
14	4		V, MG	feucht		0	CO		hoch
15	4,1		K	feucht		0-1	CO		gering-mittel
16	4,2	S	K	feucht		2	CO	0,19	mittel
17	4,44	A	V, MG	feucht		0	CO		mittel
18	5		V, MG	feucht		1	CO		mittel-hoch
19	5,1/5,2	A	V ?????	nass		2	CO		gering
20	5,34		K	feucht		2	CO		mittel
21	5,5		K	feucht		0	CO		mittel
22	5,57	A	M, F	feucht		0	CO		dicht
23	5,87		V, F	feucht		0	CO		dicht
24	6		W, F	feucht		2	CO		?????
25	6,12		K	nass		1	CO		hoch
26	6,3		K	feucht		2	CO		mittel-hoch
27	6,53		K	nass		2	CO		hoch
28	6,57		W, F	feucht		2	CO		mittel
29	6,68		W, F	feucht		1	CO		mittel
30	7		V, (S?)	feucht		0	CO		dicht
31	7,12		k	feucht		1	CO		mittel
32	7,44		S, FS	feucht		0-1	CO		dicht
33	7,76		W, F	feucht		0-1	CO		dicht
34	8		W, F	feucht		1-2	CO		dicht
35	8,16		K	nass		2	CO		locker-mittel
36	8,3		K	sehr nass		2-3	CO		locker
37	8,4		K	feucht		1	CO		locker-mittel
38	8,45		K	nass		2	CO		locker
39	8,57		K	feucht		2	CO		dicht
40	8,86		W, F	feucht		3	CO		dicht
41	9		M, F	feucht		0-1	CO		sehr dicht

Anhang 15 b): Bohrprotokoll des Bohrkerns 3 (Teil 2)

1 Lage	11 Konzentrationen (Konkretionen)	12 Gefüge	13 Bemerkungen/Interpretationen
1			
2			
3			
4			Verschleppung
5			unterer Teil von 5
6			
7	Mangan		
8			Verschleppung
9			Verm. Teil von 7
10			graue Maserung/Schlieren + Stau/Bleichzone
11			Verschleppung
12			leicht marmoriert
13			
14			marmoriert
15			Verschleppung
16			Linse (?), Skelett auffällig
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			mit kies
27			dunkel, mit kies
28			mit kies
29			mit kies
30			
31			vermutlich verschleppt
32	Mangan?		
33	Mangan		
34	Mangan		große Steine: Kies
35			
36			
37			
38			
39			Mangankonkretionen
40			Mangankonkretionen
41			große Grustücke/ reduzierendes Milieu

Anhang 16: Bohrprotokoll des Bohrkerns 6 (Inliner-Bohrung)

Datum	Bohrpunkt	Rechtswert	Hochwert	Höhe ü NN	Hangneigung	Nutzung	Vegetation	Bemerkung
15.03.2010	6	30 S 398630	UTM 4093781	893 m		LW, Ackerwall	keine / Gräser	Inlinerbohrung

1 Lage 2 Grenze 3 Bemerkungen/Interpretationen

Tiefe [cm]

1	
2	vielleicht verschleppung?
3	eventuell kompaktiert
4	wegen Verschleppung
5	eventuell verschleppung, ev. Öl von Bohrung in Tüte
6	vielleicht verschleppung? 4,56m mit Maßband nachgemessen
7	vielleicht verschleppung?
8	vielleicht verschleppung?

Anhang 17 a): Bohrprotokoll des Bohrkerns 7 (Teil 1)

Datum	Bohrpunkt	Rechtswert	Hochwert	Höhe ü NN	Hangneigung	Nutzung	Vegetation	Bemerkung
16.03.2010	7	30 S 398572	UTM 4093505	893 m ± 12 ft		LW , Ackerwall	keine / Gräser	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lage	Grenze	Farbe (feucht)	Fleckung, Bänderung	Feuchte	Körnung, Bodenart	Skelett	Carbonat	C- Gesamtgehalt
	Tiefe [cm]	Munsell	Menge, Größe			%	%	%
1	0,44-0,52 de		k	feucht		0	CO	
2	0,74 al		k	feucht		0-1	CO	
3	1,0		k	feucht		1-10	CO	
4	1,29 di		S; SF-F	feucht		0	CO	
5	1,50 al		S; SF	feucht		0	CO	
6	1,75 al		W; SF-F	feucht		0	CO	
7	2,0		M; SF-F	feucht		0-1	CO	
8	2,34 a		W; F	feucht		0	CO	
9	2,675 di		M; SF-F	feucht		0	CO	
10	3,00+ 0,02		M; SF-F	feucht		0	CO	
11	3,06 a		SW; SF	feucht		0	CO	
12	3,27 a		SW; SF-F	feucht		0-1	CO	
13	3,48 de		W; SF-F	feucht		0	CO	
14 o	3,72		SW; SF-F	feucht		1-10	CO	
14u	3,9 de		SW; SF-F	feucht		1-10	CO	
15	4,00 + 0,08		SW; SF	feucht		0	CO	
16	4,05 - 415 de		SW; F	feucht		0-1	CO	
17	4,3 de		SW; SF	feucht		0	CO	
18	4,57 a		SW; SF	feucht		0	CO	
19	4,66 de		k	feucht		1-10	CO	
20	4,88 de		W; SF-F	feucht		0	CO	
21	5,00 + 0,001		M; F	feucht		0	CO	
22	5,03 - 5,2 s		W; SF	feucht		0-1	CO	
23	5,28 de		M; SF	feucht		0	CO	
24	5,54 a		SV; SF-F	feucht		0	CO	
25	5,76 a		V; SF	feucht		0	CO	
26	6,00 + 0,05		V; SF	feucht		0	CO	
27	6,24 de		M; SF-F	feucht		0-1	CO	
28	6,42 de		SW; SF	feucht		0-1	CO	
29 o	6,62 di		SW; SF	feucht		0-1	CO	
29 u	6,82 de		SW; SF	feucht		0-1	CO	
30	7,00 + 0,03		SW; SF	feucht		0-1	CO	
31	7,29 de		M; SF-F	feucht		0	CO	
32	7,48 al		W; SF-F	feucht		0-1	CO	
33	7,63 al	sehr dunkel	SW; SF	feucht		0-1	CO	
34	7,86 s	sehr dunkel	V; SF-F	feucht		1-10	CO	
35	8,00 + 0,04	orange	V; F	feucht		0	CO	
36	8,19 - 8,43 a	ora, gelb, rot, schw	V; SF-F	feucht		0	CO	
37 o	8,45 - 8,64	rot orange	V; SF-F	feucht		0	CO	
37 m	-8,88	rot orange schwarz	V; SF-F	feucht		0	CO	
37 u	9,99 + 9,07	rot orange schwarz	V; SF-F	feucht		0	CO	
38	9,13 - 9,34 a	orange, gelb, rot	V; F	feucht		0	CO	
39	9,81 a	rot orange	M; SF-F	feucht		0	CO	
40	10,00 + 0,02	rot orange	V; SF	feucht		0	CO	
41	10,00 + 0,12	rot orange	V; SF	feucht		0	CO	
42	10,05 - 10,25	rot orange	V; SF	feucht		0	CO	
43	10,34 de	rot	M;SF-F	feucht		0	CO	
44	10,48	orange rot	V;SF-F	feucht		0	CO	
45	10,64	rot	M; SF-F	feucht		0	CO	

Anhang 17 b): Bohrprotokoll des Bohrkerns 7 (Teil 2)

1	10	11	12	13
Lage	Lagerung	Konzentrationen (Konkretionen)	Gefüge	Bemerkungen/Interpretationen
1	gering			44 cm Kernverlust
2	hoch			
3	hoch			
4	mittel			
5	hoch			
6	hoch	Mn, Fe		
7	hoch	Mn, Fe		
8	hoch	Mn, Fe		Karbonatgrus
9	hoch	Mn, Fe		
10	hoch	Mn, Fe		
11	hoch	Fe, Mn		verschleppt?
12	hoch	Fe, Mn		
13	hoch	Fe, Mn		
14 o	hoch	Fe, Mn		
14u	hoch	Fe, Mn		Eigene Lage Fein-mittelkies
15	hoch	Fe, Mn		
16	mittel hoch	Mn, Fe		4,00-4,05 verschleppt
17	mittel hoch	Mn, Fe		
18	mittel hoch	Mn, Fe		
19	hoch			
20	hoch	Mn, Fe		
21	hoch	Mn !		
22	mittel	Fe, Mn		verschleppt?
23	mittel	Fe, Mn		verschleppt?
24	sehr hoch	Mn ! Fe		
25	sehr hoch	Fe, Mn		
26	sehr hoch	Fe, Mn		
27	hoch	Fe, Mn		verschleppt?
28	mittel hoch	Fe, Mn		verschleppt?
29 o	mittel hoch	Fe, Mn		
29 u	mittel hoch	Fe, Mn		
30	mittel hoch	Fe, Mn		
31	mittel hoch	Fe, Mn		verschleppt?
32	mittel hoch	Fe, Mn		
33	hoch	Mn		
34	hoch	Mn !		Fleckung unten zunehmend, verschleppt! Foto täuscht
35	sehr hoch	Fe, Mn		
36	sehr hoch	Fe, Mn		19 cm verschleppt, nicht beprobt
37 o	sehr hoch	Fe, Mn		2cm leer
37 m	sehr hoch	Fe, Mn		
37 u	sehr hoch	Fe, Mn		
38	sehr dicht			13 cm verschleppt, nicht beprobt
39	dicht			Tongerölle? Tonbeläge?
40	dicht			Tongerölle? Tonbeläge?
41	dicht			Tongerölle? Tonbeläge?
42	sehr dicht			Tonschlieren, MM1
43	sehr dicht			sehr tonreich
44	sehr dicht			Tonschlieren
45	sehr dicht			sehr tonreich, MM2

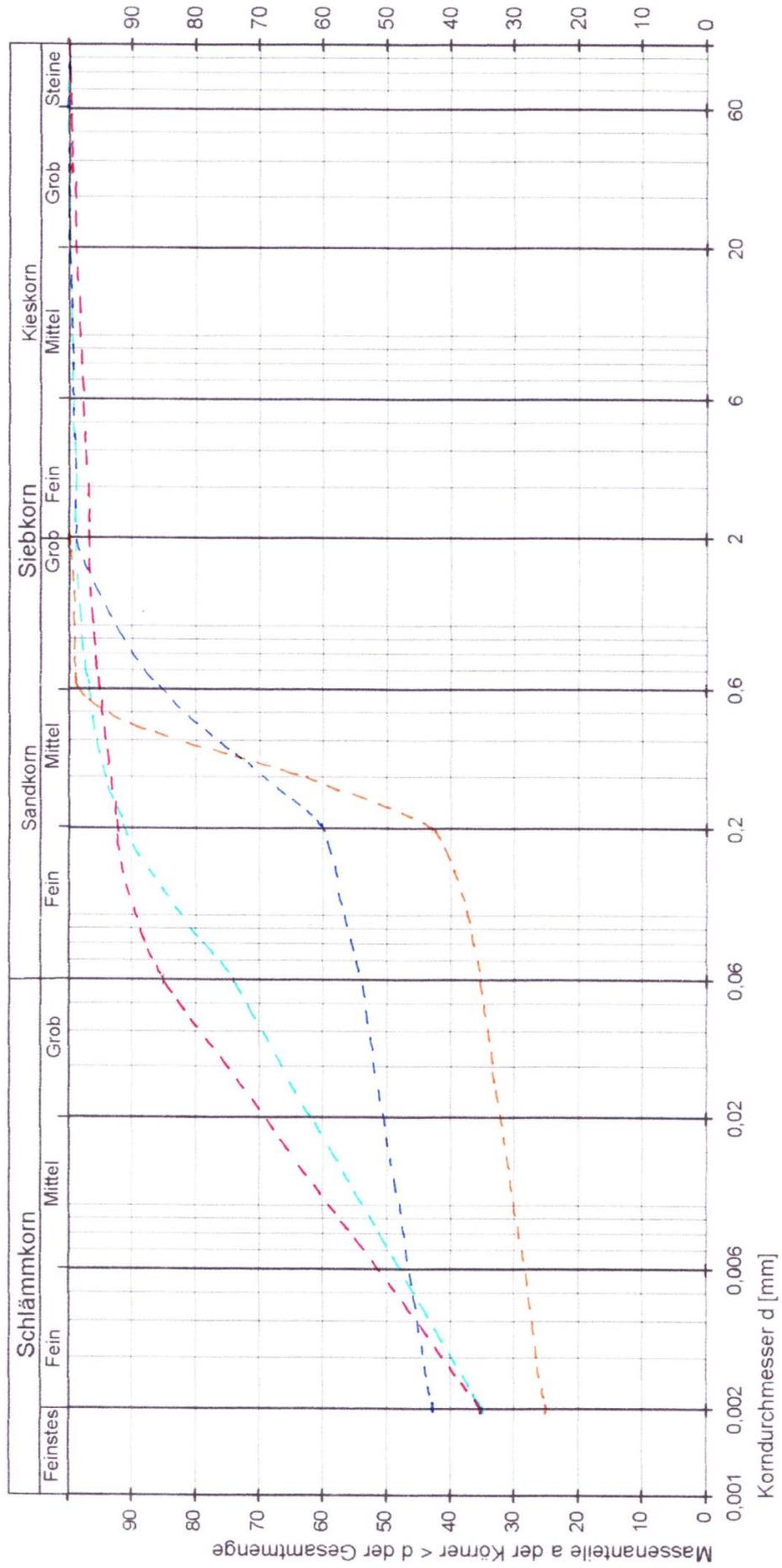
Anhang 18: Bohrprotokoll des Bohrkerns 10

Datum	Bohrpunkt	Rechtswert	Hochwert	Höhe ü NN	Hangneigung	Exposition	Nutzung	Vegetation
18.03.2010	10	30 S 998431	UTM 4093281	892 m ± 4 m		Süd	Ackerbrache	keine

Lage	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Bemerkungen/Interpretationen
Tiefe [cm]	Menge, Größe												
						%	%	%					
1	0,34			fe		2	C0		locker				durchwurzel, Humus feinverte
2	1	dunkelbraun	V, SF-F	fe		0-1	C0		mittel-hoch	Mn (viel), Fe			
3	1,34	heller braun	MV, SF-GR	fe		0-1	C0		hoch-sehr hoch	Mn, Fe			freies Wasser bei 1,38m
4	1,71		V, SF-F	fe		0-1	C0		hoch-sehr hoch	Mn, Fe			
5	2+0,02		MV, SF-F	fe		0	C0		hoch	Mn, Fe			
6	2,3		MV, SF-F	fe		0-1	C0		mittel	Mn, Fe			graded bedding?
7	2,4		V, F-MG	fe		2	C0		mittel	Mn, Fe			
8	2,8		W, SF	fe		0-1	C0		mittel	Mn, Fe			
9	2,84		M, F-MG	fe		2	C0		hoch	Mn, Fe			Grus
10	3+0,02		S, SF	fe		0	C0		mittel-hoch	Mn, Fe			
11	3,17		W, F	wassergesättigt		0-1	C0		locker	Mn, Fe			Verschleppt? Wassergesättigt marmoriert
12	3,71	rötlich	V, SF-F	fe		0-1	C0		mittel-hoch	Mn, Fe			
13	4+0,03	grauer	V, SF	fe		0-1	C0		mittel-hoch	Mn, Fe			
14	4,21			fe		0-1	C0		gering-mittel	Mn, Fe			verschleppt?
15	4,38	rotgrau	V, SF	fe		0-1	C0		hoch	Mn, Fe			
16	4,68	rötlich	V, F	fe		2	C0		hoch	Mn, Fe			
17	5,02	rötlich	V, F	fe		2	C0		hoch	Mn, Fe			
18	5,15	rötlich	SV, F	fe		2	C0		hoch	Mn, Fe			
19	5,23	rötlich	SV, F	fe		2	C0		hoch	Mn, Fe			
20	5,42	rötlich	SV, F	fe		0-1	C0		hoch	Mn, Fe			
21	5,71	rötlich-grau	SV, SF-F (MG)	fe		0-1	C0		hoch	Mn, Fe			Sande nur bis 5,71m gebohrt

Anhang 19: Kornsummenkurve der untersuchten Lagen des Bohrkerns 2

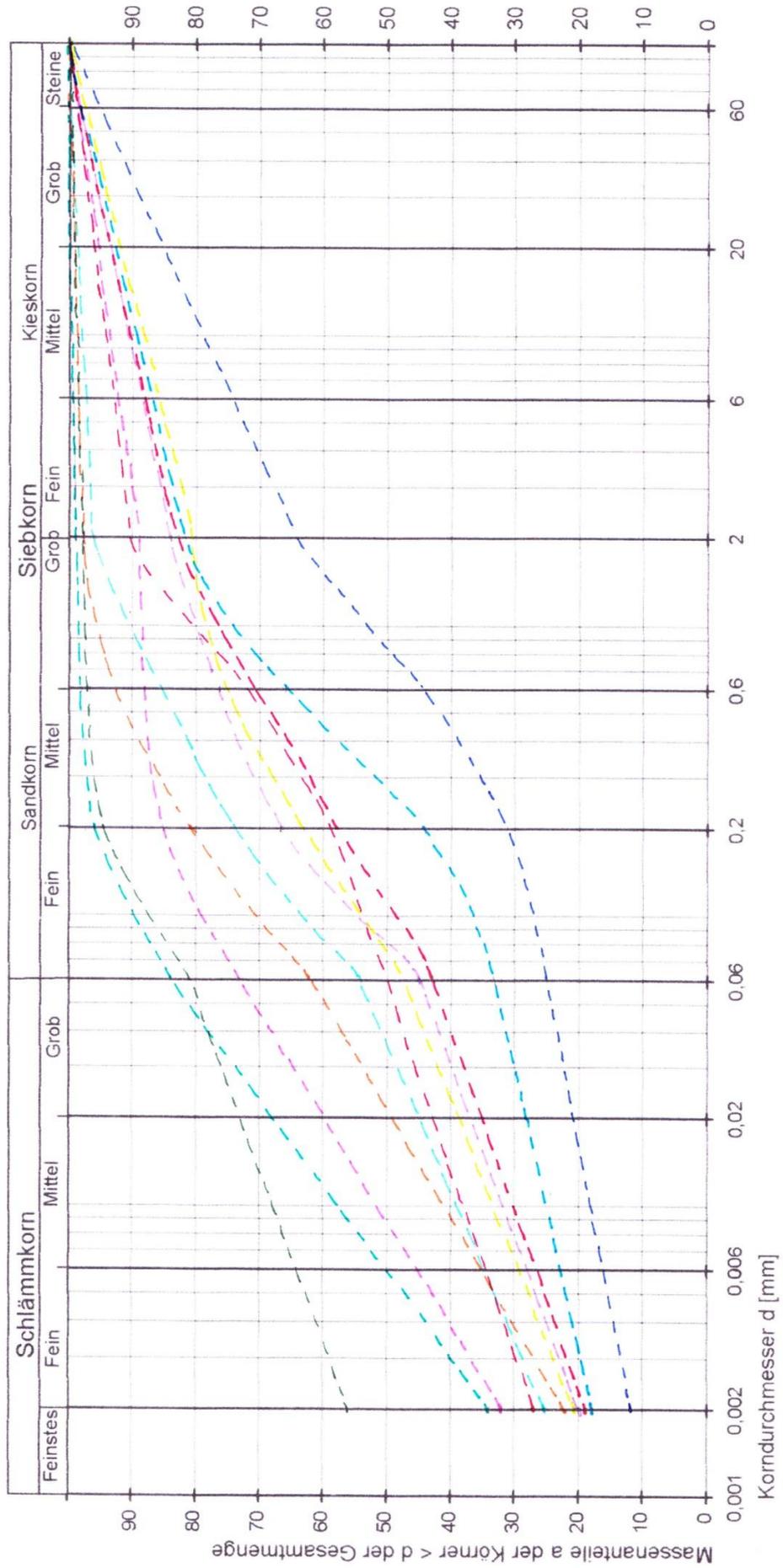
Bohrpunkt: 2
Datum: 11.03.2010
Koordinaten: RW: 30 S 398273
 HW: UTM 4093788
Vegetation: Gras
Landnutzung: Landwirtschaft
Lokalität: Schwemmfächer El Almendral
Höhe über NN: 895 ± 4 m (WPS4)
Teufe: 5,80 m
Exposition: Süd



Quelle der Vorlage: Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen (2008)
 Bearbeitung: Jessica Thomas (2010)

Anhang 20: Kornsummenkurve der untersuchten Lagen des Bohrkerns 3

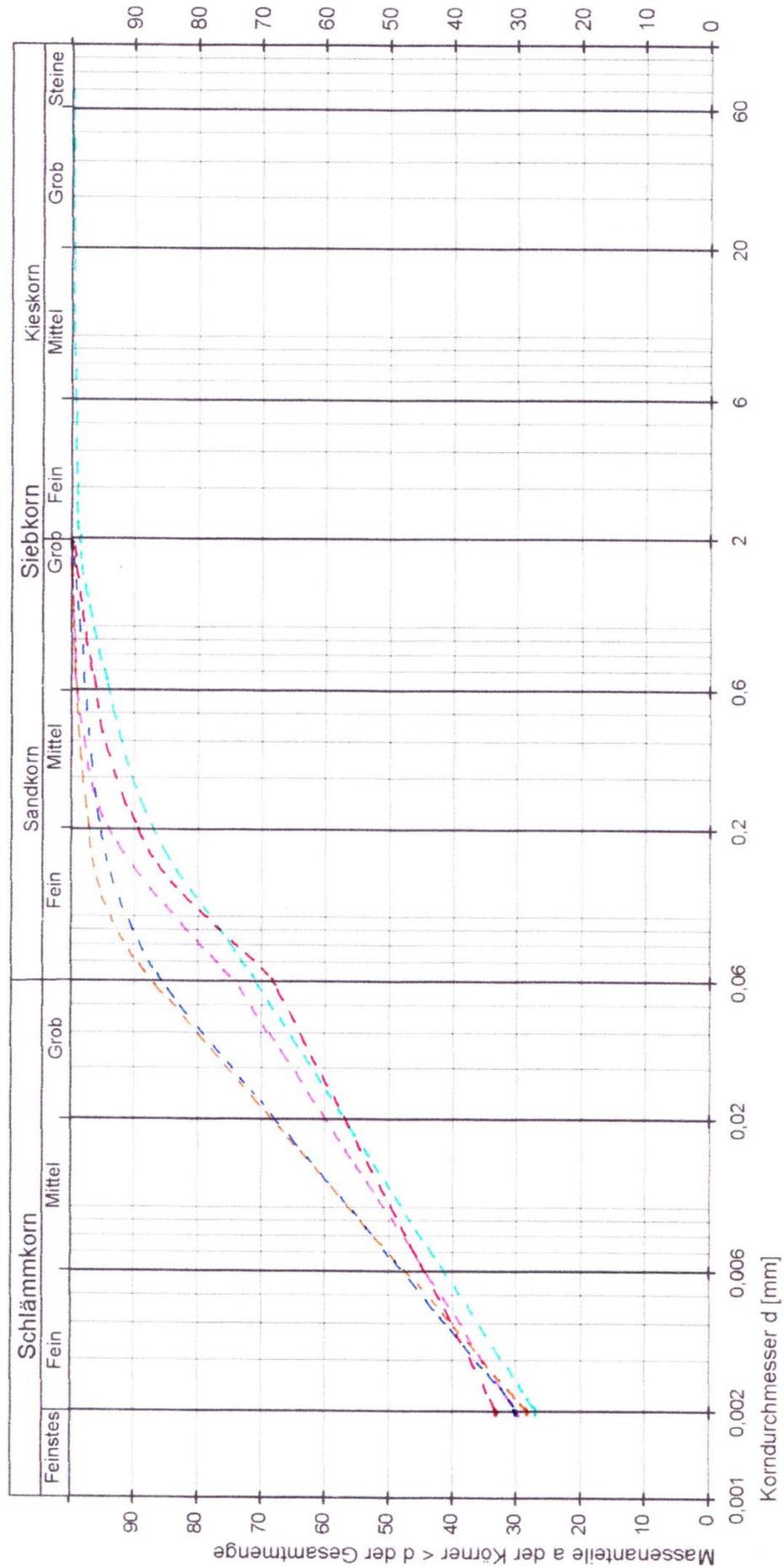
Bohrpunkt: 3
Datum: 12.03.2010
Lokalität: Wasserscheide zwischen Entwässerungsgraben und Arroyo de la Madre
Teufe: 9,00 m
Koordinaten: RW: 30 S 398248 HW: UTM 4093415
Höhe über NN: 897 ± 4 m (WPS4)
Exposition: Süd
Vegetation: Kulturpflanzen
Landnutzung: Landwirtschaft



Quelle der Vorlage: Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen (2008)
 Bearbeitung: Jessica Thomas (2010)

Anhang 21: Kornsummenkurve der untersuchten Lagen des Bohrkerns 10

Bohrpunkt: 10
Datum: 18.03.2010
Lokalität: Wasserscheide zwischen Entwässerungsgraben und Arroyo de la Madre
Tiefe: 5,71 m
Koordinaten: RW: 30 S 398431 HW: UTM 4093281
Höhe über NN: 892 ± 4 m (WPS4)
Exposition: Süd
Vegetation: keine
Landnutzung: Ackerbrache



Quelle der Vorlage: Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen (2008)
 Bearbeitung: Jessica Thomas (2010)

Anhang 22: Bild des Bohrkerns 1



Anhang 23: Bild des Bohrkerns 2



Anhang 24: Bild des Bohrkerns 3



Anhang 25: Bild des Bohrkerns 7



Anhang 26: Bild des Bohrkerns 10



Erklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Aachen, den 28.09.2010