

Aus dem Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften
(Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Reinhold Jahn)
der Naturwissenschaftlichen Fakultät III
(Dekan: Prof. Dr. Peter Wycisk)
der Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg

Ermittlung pflanzenbaulich relevanter Bodenkenndaten mit Hilfe
von ausgewählter Bodensensorik

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
doctor agriculturarum (Dr. agr.)

vorgelegt von
Diplom Ingenieur (FH) Stefan Hinck
geboren am 08.Juni 1970 in Bremervörde

Gutachter: Prof. Dr. Olaf Christen (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg)
Prof. Dr. Klaus Mueller (Fachhochschule Osnabrück)
Prof. Dr. Norbert Emeis (Fachhochschule Osnabrück)

Tag der Disputation: 18. Mai 2009

Halle/Saale 2009

Vorwort und Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im Rahmen des Forschungsschwerpunkts PIROL im Teilprojekt Boden an der Fachhochschule Osnabrück und in Kooperation mit dem Institut für Acker- und Pflanzenbau, Professur für Allgemeinen/Ökologischen Pflanzenbau an der Martin-Luther-Universität Halle/ Wittenberg. Der Forschungsschwerpunkt PIROL wurde von der VolkswagenStiftung gefördert.

Herr Professor Mueller hat diese Arbeit angeregt sowie die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit übernommen. Ich bedanke mich ganz herzlich für die Überlassung des Themas und für die fachliche und wissenschaftliche sowie motivierende menschliche Unterstützung. Besondere Unterstützung bot er mir durch seine wertvollen Anregungen, Ratschläge und durch den Freiraum, in dem ich meine eigenen Ansätze entwickeln konnte.

Auch gilt mein herzlicher Dank Herrn Professor Emeis für die fachliche und wissenschaftliche Unterstützung auf dem Themengebiet Elektrotechnik und Bodensensorik, insbesondere danke ich ihm für die vielen elektrotechnischen Erklärungen und die besondere Einführung in das Thema „Der komplexe elektrische Leitwert“.

Herrn Professor Christen an der Martin-Luther-Universität Halle/Wittenberg danke ich ebenso herzlich für die Betreuung der Arbeit sowie für seine fachliche und menschliche Unterstützung in der Schlussphase der Promotion. Ebenso danke ich seiner Arbeitsgruppe für ihre Zeit und Hinweise im kleinen Fachgesprächskreis.

Ich danke allen Mitgliedern des Forschungsschwerpunkts PIROL, den MitarbeiterInnen der Fachgebiete Landwirtschaft und Bodenkunde an der Fachhochschule Osnabrück sowie der Versuchsbetriebe für ihre Unterstützung und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Mein besonderer Dank gilt Imtraud Tiemann und Elke Nagel für die Korngrößenanalysen und Heinrich Nordmann für die tatkräftige Unterstützung in der Werkstatt. Den Versuchsbetrieben ein Dank für die zur Verfügungsstellung der Versuchsflächen und Maschinen. Ein großer Dank gilt auch Herrn Dr. Schön für die ausführlichen statistischen Erklärungen und Hinweise. Für die Fachgespräche im kleinen Kreis danke ich herzlichst allen TeilnehmerInnen des FoSeBo.

Thomas Rötscher danke ich für die gemeinsame Messung in Thüringen und für seine Erklärungen sowie Hinweise zur Bodenschätzung. Frau Dr. Lück und Herrn Gebbers danke ich für die Überlassung der Messergebnisse des Messsystems ARP03.

Ein besonderer Dank an Annegret Fier für die gegenseitige Hilfestellung und vielen Fragen sowie Antworten als Mitdotorandin; unsere gemeinsame Bürozeit hat meine eigene Promotionszeit sehr bereichert und unterstützt.

Für die Lektoratarbeit der Manuskripte ein Dank an Meike Otten und Katrin Börger.

Mein größter Dank von Herzen gilt Cornelia Saure, neben der Lektoratarbeit besonders für das Verständnis und die liebevolle Unterstützung während der gesamten Promotionszeit und für so vieles mehr!

*„Wir behalten von unseren Studien am Ende doch nur das,
was wir auch praktisch anwenden.“*

Johann Wolfgang von Goethe

In Erinnerung der Mutter gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1.	Problemstellung	1
1.2.	Zielsetzung.....	2
2.	Literaturteil.....	3
2.1.	Pflanzenstandort „Boden“	3
2.2.	Bodenschätzung.....	9
2.3.	Geoelektrische Messung	11
2.3.1.	Stromfluss im Boden.....	11
2.3.2.	Einfluss der Bodentemperatur auf die elektrische Leitfähigkeit des Bodens	15
2.4.	Beschreibung gängiger geoelektrischer Bodensensorsysteme	17
2.4.1.	Gleichstrom-Geoelektrische Bodensensorsysteme	17
2.4.2.	Elektromagnetisches Bodensensorsystem EM38	20
2.5.	Bodenaufnahme	27
2.5.1.	Bodenkundliche Kartierung.....	27
2.5.2.	Geoelektrische Kartierung	27
3.	Material und Methode.....	32
3.1.	Charakterisierung des Untersuchungsgebiets	32
3.2.	Geologie der Untersuchungsflächen	32
3.2.1.	Im Berge	32
3.2.2.	Wellenkamp	35
3.3.	Messprinzip „Komplexer elektrischer Leitwert“	38
3.4.	Bodentemperaturerfassung	43
3.5.	GPS-Signalerfassung	44
3.6.	Proben- und Messdatenaufbereitung	44
3.7.	Verwendete Software	47
4.	Ergebnisse	48
4.1.	Untersuchungsfläche „Im Berge“	48
4.1.1.	Statistische Kenngrößen für die Fläche „Im Berge“	48
4.1.2.	Geoelektrische Messung mit dem BOs - 1EP	51
4.1.2.1.	Elektrische Leitfähigkeit (BOs - 1EP).....	51
4.1.2.1.1.	Vergleich der Messtermine im Hinblick auf die elektrische Leitfähigkeit	52

4.1.2.1.2.	Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen EC25 und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt	53
4.1.2.1.3.	Schätzung der Korngröße anhand der EC25-Werte.....	58
4.1.2.2.	Elektrische Kapazität (BOs - 1EP).....	64
4.1.2.2.1.	Vergleich der Messtermine im Hinblick auf die elektrische Kapazität.....	65
4.1.2.2.2.	Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen elektrischer Kapazität und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt.....	67
4.1.2.3.	Analyse der Einflussstärke der Korngrößen und des organischen Kohlenstoffgehalts auf die Messgrößen elektrische Leitfähigkeit und elektrische Kapazität.....	70
4.1.2.4.	Elektrisches Rauschen für die Fläche „Im Berge“	73
4.1.2.5.	Bodentemperatur für die Fläche „Im Berge“	74
4.1.3.	Geoelektrische Messung mit dem Messsystem ARP03	74
4.1.3.1.	Elektrische Leitfähigkeit (ARP03)	74
4.1.3.2.	Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen EC1 und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt.....	75
4.1.3.3.	Schätzung der Korngröße anhand der EC1-Werte.....	76
4.1.3.4.	Analyse der Einflussstärke der Korngrößen und organischen Kohlenstoffgehalt auf die Messgröße EC1	78
4.1.4.	Geoelektrische Messung mit dem Messsystem EM38	80
4.1.4.1.	Elektrische Leitfähigkeit (EM38)	80
4.1.4.2.	Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen EM38 und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt	82
4.1.4.3.	Schätzung der Korngröße anhand der $EC_{(hor)}$ -Werte.....	85
4.1.4.4.	Analyse der Einflussstärke der Korngrößen und organischen Kohlenstoffgehalt auf die Messgröße $EC_{(hor)}$	88
4.1.4.5.	Suszeptibilität.....	90
4.1.5.	Vergleich von Ertragsergebnissen mit Korngröße und organischem Kohlenstoffgehalt sowie elektrischer Leitfähigkeit des Bodens	91
4.1.5.1.	Statistische Kenngrößen der Ertragsdaten.....	91
4.1.5.2.	Vergleich der Feldkarten „Ertrag“ und „Korngrößen“ sowie sonstige Bodenkarten	92
4.1.5.3.	Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen Ertrag und Korngrößen sowie elektrischer Leitfähigkeit.....	93
4.1.5.4.	Multiple Regressionsanalyse zwischen Ertrag und geoelektrischen Messergebnissen.....	95
4.1.5.5.	Analyse Ertragsniveau und Tongehalt.....	95
4.2.	Untersuchungsfläche „Wellenkamp“	97
4.2.1.	Statistische Kenngrößen für die Fläche „Wellenkamp“	97

4.2.2.	Geoelektrische Messung mit dem BOs - 1EP	100
4.2.2.1.	Elektrische Leitfähigkeit (BOs - 1EP).....	100
4.2.2.1.1.	Vergleich der Messtermine im Hinblick auf die elektrische Leitfähigkeit	101
4.2.2.1.2.	Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen EC25 und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt	102
4.2.2.1.3.	Schätzung der Korngrößen anhand der EC25-Werte.....	106
4.2.2.2.	Elektrische Kapazität	110
4.2.2.2.1.	Vergleich der Messtermine im Hinblick auf die elektrische Kapazität.....	111
4.2.2.2.2.	Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen elektrischer Kapa- zität und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt.....	113
4.2.2.3.	Analyse der Einflussstärke der Korngröße und organischen Kohlenstoff- gehalt auf die Messgröße elektrische Leitfähigkeit und elektrische Kapazität...	116
4.2.2.4.	Elektrisches Rauschen für die Fläche „Wellenkamp“	118
4.2.2.5.	Bodentemperatur für die Fläche „Wellenkamp“	119
4.2.3.	Geoelektrische Messung mit dem Messsystem ARP03	120
4.2.3.1.	Elektrische Leitfähigkeit (ARP03)	120
4.2.3.2.	Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen EC1 und den Korn- größen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt.....	121
4.2.3.3.	Schätzung der Korngrößen anhand der EC1-Werte.....	122
4.2.3.4.	Analyse der Einflussstärke der Korngrößen und organischen Kohlenstoff- gehalt auf die Messgröße EC1	124
4.2.4.	Geoelektrische Messung mit dem Messsystem EM38	125
4.2.4.1.	Beschreibende Statistik der Messwerte (EM38).....	125
4.2.4.2.	Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen EM38 und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt	127
4.2.4.3.	Schätzen der Korngrößen anhand der EC _(hor) -Werte.....	130
4.2.4.4.	Analyse der Einflussstärke der Korngrößen und organischen Kohlenstoff- gehalt auf die Messgröße EC _(hor)	132
4.2.4.5.	Suszeptibilität.....	132
4.2.5.	Vergleich von Ertragsergebnissen mit Korngröße und organischem Kohlen- stoffgehalt sowie elektrischer Leitfähigkeit des Bodens	133
4.2.5.1.	Statistische Kenngrößen der Ertragsdaten.....	133
4.2.5.2.	Vergleich der Feldkarten „Ertrag“ und „Korngrößen“ sowie sonstige Bodenkarten	134
4.2.5.3.	Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen Ertrag und Korn- größen sowie der elektrischen Leitfähigkeit.....	135
4.2.5.4.	Multiple Regressionsanalyse zwischen dem Ertrag und den geoelektrischen Messergebnissen.....	137
4.2.5.5.	Analyse Ertragsniveau und Tongehalt.....	138

4.3.	Überprüfung des Einflusses der Bodenfeuchte auf die Mess- ergebnisse des BOs - 1EP	140
5.	Diskussion	144
5.1.	BOs - 1EP (Bodensensorsystem Fachhochschule Osnabrück).....	144
5.1.1.	Elektrische Leitfähigkeit und Korngröße sowie organischer Kohlenstoff- gehalt.....	144
5.1.2.	Elektrische Kapazität und Korngröße	147
5.1.3.	Elektrisches Rauschen, Suszeptibilität und Bodentemperatur	148
5.2.	ARP03 und EM38	149
5.2.1.	ARP03	149
5.2.2.	EM38	151
5.3.	Schätzung der Korngrößenverteilung anhand des Messergeb- nisses „elektrische Leitfähigkeit“	155
5.4.	Vergleich der drei geoelektrischen Messsysteme.....	156
5.5.	Korngrößenverteilung und Ertragsniveau	159
5.6.	Einfluss der Bodenfeuchte auf die Messergebnisse des BOs - 1EP	165
6.	Abschließende Betrachtung von Pflanzenstandort und geoelektrischer Messung	167
7.	Zusammenfassung.....	169
8.	Summary	171
9.	Literatur	173

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Ionenverteilung an der Tonmineraloberfläche und Ionenkonzentrationsverlauf nach dem Modell von GOUY und STERM (Quelle: SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2006, verändert)	7
Abb. 2: Schematische Darstellung des Stromflusses im Boden, 1 = Stromfluss durch die feste und flüssige Phase, 2 = Stromfluss durch die flüssige Phase, 3 = Stromfluss durch die feste Phase (Quelle: RHOADES et al. 1989, verändert)	11
Abb. 3: Permittivitätszahl der Bodenbestandteile (Quelle: SCHEUERMANN et al. 2002)	14
Abb. 4: Darstellung der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit mit ansteigender Bodentemperatur und die auf 25°C temperaturkorrigierte elektrische Leitfähigkeit, Korrekturformel nach den angegebenen Autoren	16
Abb. 5: Messaufbau einer geoelektrischen Vierleitermessung (Vier-Punkt-Anordnung) am Beispiel des Messsystems Veris3100, (Quelle: GEBBERS und LÜCK 2006, verändert).....	18
Abb. 6: Ermittlung des sekundären magnetischen Wechselfelds bei dem Messprinzip elektromagnetische Induktion (Quelle: GEBBERS und LÜCK 2006, verändert)	21
Abb. 7: Messprinzip des elektromagnetischen Messsystems EM38 der Firma Geonics	22
Abb. 8: Kumulativer Signalanteil ($R(z)$) der elektrischen Leitfähigkeit über die Messtiefe (z) bezogen auf den normierten Spulenabstand (EM38: 1 m) (Quelle: TN31).....	23
Abb. 9: Relativer Signalanteil bezogen auf die jeweilige Messtiefe (z) bezogen auf den normierten Spulenabstand (EM38: 1 m) im vertikalen Modus ($\Phi_V(z)$) und horizontalen Modus ($\Phi_H(z)$) (Quelle: TN31).....	24
Abb. 10: Relativer Signalanteil bezogen auf die jeweilige Messtiefe (z) bezogen auf den normierten Spulenabstand (EM38: 1 m) im vertikalen Modus ($S_V(z)$) und horizontalen Modus ($S_H(z)$) (Quelle: TN31)	26
Abb. 11: Kumulativer Signalanteil ($R(z)$) der Suszeptibilität über die Messtiefe (z) bezogen auf den normierten Spulenabstand (EM38: 1 m) im vertikalen Modus ($R_V(z)$) und horizontalen Modus ($R_H(z)$) (Quelle: TN31)	27
Abb. 12: Geologie der Fläche „Im Berge“ (Quelle: NDS. LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 1979, verändert)	33
Abb. 13: Bodenschätzung der Fläche „Im Berge“ (Quelle: KATASTERAMT OSNABRÜCK 2001a, verändert)	34
Abb. 14: Bodentypen der Fläche „Im Berge“ (Quelle: NDS. LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 1976, verändert)	34
Abb. 15: Kleinstäumige Bodentypen der Fläche „Im Berge“ (Quelle: SCHRÖTKE 2001, verändert)	34
Abb. 16: Probenentnahme- und Auswerteraster für die Fläche "Im Berge"	34

Abb. 17: Geologie der Fläche „Wellenkamp“ (Quelle: NDS. LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 1979, verändert)	35
Abb. 18: Bodenschätzung der Fläche „Wellenkamp“ (Quelle: KATASTERAMT OSNABRÜCK 2001b, verändert)	36
Abb. 19: Bodentyp der Fläche „Wellenkamp“ (Quelle: NDS. LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 1976, verändert)	36
Abb. 21: Bodentypen der Fläche „Wellenkamp“ (Quelle: SCHRÖTKE 2001, verändert und ergänzt)	37
Abb. 22: Probenentnahme- und Auswerterraster für die Fläche „Wellenkamp“	37
Abb. 23: Amplitudenverlauf von Strom und Spannung eines idealen Kondensators	39
Abb. 24: Amplitudenverlauf von Strom und Spannung bei Erhöhung der elektrischen Ladung der Plattenanordnung	40
Abb. 25: Amplitudenverlauf von Strom und Spannung in einem leitenden Material	41
Abb. 26: Amplitudenverlauf von Strom und Spannung nach Erhöhung der Ionenkonzentration in einem leitenden Material	42
Abb. 27: Amplitudenverlauf von Strom und Spannung während eines bestimmten Messzeitpunkts	42
Abb. 28: Verhalten des elektrischen Felds im Boden zwischen den beiden Elektroden, Messsystem BOs - 1EP (Quelle: EMEIS 2007c)	43
Abb. 29: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP, Messtermin: 15.03.2005	63
Abb. 30: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP, Messtermin: 14.03.2007	63
Abb. 31: Zeitliche Darstellung der Wasserbilanz in mm (nach HAUDE) der Fläche „Im Berge“ und die jeweiligen Minimum-, Maximum- und Mittelwerte der elektrischen Kapazität (pF) für 7 Messtermine in 2005	66
Abb. 32: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Im Berge“, Messsystem ARP03, Messtermin: Herbst 2004	78
Abb. 33: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Im Berge“, Messsystem EM38 (horizontaler Messmodus), Messtermin: 30.08.2005	87
Abb. 34: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Im Berge“, Messsystem EM38 (horizontaler Messmodus), Messtermin: 14.03.2007	88
Abb. 35: z-transformierter Ertrag 2007 auf der Fläche „Im Berge“, aufgetragen gegenüber dem aufsteigend sortierten Tongehalt	96
Abb. 36: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP, Messtermin: 17.03.2005	109
Abb. 37: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP, Messtermin: 31.08.2005	109

Abb. 38: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP, Messtermin: 19.09.2005.....	109
Abb. 39: Zeitliche Darstellung der Wasserbilanz in mm (nach HAUDE) der Fläche „Wellenkamp“ und die jeweiligen Minimum-, Maximum- und Mittelwerte der elektrischen Kapazität (pF) für 7 Messtermine in 2005	112
Abb. 40: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem ARP03, Messtermin: Herbst 2004.....	124
Abb. 41: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38 (horizontaler Messmodus), Messtermin: 31.08.2005	131
Abb. 42: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38 (horizontaler Messmodus), Messtermin: 23.03.2006	131
Abb. 43: z-transformierter Ertrag 2005 auf der Fläche „Wellenkamp“, aufgetragen gegenüber dem aufsteigend sortierten Tongehalt.....	139
Abb. 44: Einfluss der Bodenart auf den Ertragskurvenverlauf (REINER et al. 1992, verändert)	160
Abb. 45: z-transformierter Ertrag 2001 auf der Fläche „Im Berge“ aufgetragen gegenüber dem aufsteigend sortierten Tongehalt.....	161
Abb. 46: z-transformierter Ertrag 2001 auf der Fläche „Wellenkamp“ aufgetragen gegenüber dem aufsteigend sortierten Tongehalt.....	162
Abb. 47: z-transformierter Ertrag 2007 auf der Fläche „Im Berge“ aufgetragen gegenüber dem aufsteigend sortierten EC25.....	163
Abb. 48: z-transformierter Ertrag 2005 auf der Fläche „Wellenkamp“ aufgetragen gegenüber dem aufsteigend sortierten EC25.....	164

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Permittivitätszahl und durchschnittliche Leitfähigkeiten einiger Materialien bei einer Messfrequenz von 100 MHz (Quelle: verändert nach BLINDOW et al. 2005, FROHNE et al. 2002, GREINWALD und THIERBACH 1997).....	14
Tab. 2:	Übersicht verschiedener Sensortypen zur Detektierung von Bodeneigenschaften (Quelle: nach ADAMCHUCK et al. 2004 ergänzt um DENKER et al. 2007, CHRISTY et al. 2006, LUND et al. 2005, SCHUTTE 2005).....	17
Tab. 3:	Fruchtfolge und Erträge auf der Fläche "Im Berge" (Quelle: HEIMSOTH 2006, ergänzt)	35
Tab. 4:	Fruchtfolge und Erträge auf der Fläche "Wellenkamp" (Quelle: HEIMSOTH 2006, ergänzt)	37
Tab. 5:	Technische Daten des BOs - 1EP zur Erfassung des elektrischen komplexen Leitwerts	38
Tab. 6:	Technische Daten des GPS-Empfängers „AglQ“ (Quelle: SATLOC 2004).....	44
Tab. 7:	Beschreibende statistische Werte für die Korngrößen der Fläche „Im Berge“ für die Tiefe 0 bis 30 cm, Ergebnisse der Laboranalyse, Angaben in %	48
Tab. 8:	Beschreibende statistische Werte für die Korngrößen der Fläche „Im Berge“ für die Tiefe 30 bis 60 cm, Ergebnisse der Laboranalyse, Angaben in %	49
Tab. 9:	Beschreibende statistische Werte für die Nährstoffe der Fläche „Im Berge“ für die Tiefe 0 bis 30 cm, Ergebnisse der Laboranalyse, Angaben in mg/100g außer VK und (IQR:Median) in %	50
Tab. 10:	Spearmanische Korrelationskoeffizienten zwischen untersuchten Nährstoffgehalten und der Korngröße sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt in 0 bis 30 cm Tiefe der Fläche „Im Berge“	50
Tab. 11:	Messzeitpunkte des BOs - 1EP auf der Fläche „Im Berge“	51
Tab. 12:	Beschreibende statistische Werte für die elektrische Leitfähigkeit normiert auf 25°C für die Fläche „Im Berge“, Angaben in mS/m außer VK und (IQR:Median) in %	52
Tab. 13:	Spearmanische Korrelationskoeffizienten für die elektrische Leitfähigkeit zwischen den jeweiligen Messterminen.....	53
Tab. 14:	Spearmanische Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Korngröße sowie C _{org} , Probeentnahmetiefe: 0 - 30 cm, Fläche „Im Berge“	54
Tab. 15:	Spearmanische Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Korngröße sowie C _{org} , Probeentnahmetiefe: 30 - 60 cm, Fläche „Im Berge“	54
Tab. 16:	Regressionsmodelle für die Korngröße Sand und die elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B ²) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP	55
Tab. 17:	Regressionsmodelle für die Korngröße Schluff und die elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B ²) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP	56

Tab. 18: Regressionsmodelle für die Korngröße Ton und die elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messstermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP	56
Tab. 19: Regressionsmodelle für den organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) und die elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messstermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP	57
Tab. 20: Beste Schätzmethode für die Fläche "Im Berge", Messsystem BOs - 1EP.....	59
Tab. 21: Differenz zwischen wahrem und geschätztem Sandgehalt, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP.....	60
Tab. 22: Differenz zwischen wahrem und geschätztem Schluffgehalt, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP.....	61
Tab. 23: Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP.....	62
Tab. 24: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Kapazität der Plattenanordnung für die Fläche „Im Berge“, Angaben in Pikofarad (pF) außer VK und (IQR:Median) in %	65
Tab. 25: Spearmanische Korrelationskoeffizienten für die elektrische Kapazität der Plattenanordnung zwischen den jeweiligen Messsterminen, Fläche „Im Berge“	65
Tab. 26: Niederschlagsmengen (in mm) für verschiedene Zeitpunkte vor der geoelektrischen Messung auf der Fläche "Im Berge".....	66
Tab. 27: Spearmanische Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Kapazität der Plattenanordnung und Korngröße sowie C_{org} , Fläche „Im Berge“	68
Tab. 28: Regressionsmodelle für die Korngröße Sand und die elektrische Kapazität der Plattenanordnung (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messstermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP	68
Tab. 29: Regressionsmodelle für die Korngröße Schluff und die elektrische Kapazität der Plattenanordnung (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messstermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP	69
Tab. 30: Regressionsmodelle für die Korngröße Ton und die elektrische Kapazität der Plattenanordnung (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messstermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP	69
Tab. 31: Regressionsmodelle für den organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) und die elektrische Kapazität der Plattenanordnung (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messstermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP.....	69
Tab. 32: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu EC25 für drei ausgewählte Messstermine, Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem BOs - 1EP	70

Tab. 33: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu EC25 (Zahlenreihen logarithmiert) für drei ausgewählte Messtermine, Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem BOs - 1EP.....	71
Tab. 34: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} auf C_{ele} für drei ausgewählte Messtermine, Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem BOs - 1EP	72
Tab. 35: Spearmanische Korrelationskoeffizienten zwischen dem elektrischen Rauschen und den Korngrößen sowie C_{org} , Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP.....	73
Tab. 36: Spearmanische Korrelationskoeffizienten für das elektrische Rauschen zwischen den jeweiligen Messterminen, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP.....	73
Tab. 37: Spearmanische Korrelationskoeffizienten zwischen Bodentemperatur (Mess-tiefe ca. 5 - 8 cm) und den Korngrößen sowie C_{org} (Probeentnahmetiefe: 0 - 30 cm), Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP.....	74
Tab. 38: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Leitfähigkeit für die Fläche „Im Berge“, Angaben in mS/m außer VK, (IQR:Median) in % und Messtiefe in cm, Messsystem ARP03	75
Tab. 39: Spearmanische Korrelationskoeffizienten zwischen EC des Messsystems ARP03 und den Korngrößen sowie C_{org} , Messtermin: Herbst 2004, Fläche „Im Berge“.....	76
Tab. 40: Regressionsmodelle für die Korngröße sowie C_{org} und elektrische Leitfähigkeit (EC1) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2), Messtermin Herbst 2004, Messsystem ARP03	76
Tab. 41: Differenz zwischen wahren und geschätzten Korngrößen, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Schätzmethode Wertetabelle, Fläche „Im Berge“, Messsystem ARP03	77
Tab. 42: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu EC1 auf der Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} , welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem ARP03	79
Tab. 43: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu EC1 (Zahlenreihen logarithmiert) auf der Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem ARP03.....	79
Tab. 44: Messzeitpunkte mit dem EM38 auf der Fläche „Im Berge“	80
Tab. 45: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Leitfähigkeit (EM38) für die Fläche „Im Berge“, Angaben in mS/m außer VK und (IQR:Median) in % sowie BodTemp in °C.....	81

Tab. 46: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für die elektrische Leitfähigkeit im vertikalen und horizontalen Messmodus (EM38) zwischen den jeweiligen Messterminen, Fläche „Im Berge“	81
Tab. 47: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit ($EC_{(hor)}$ und $EC_{(ver)}$) und den Korngrößen sowie C_{org} , Bodenprobeentnahmetiefen: 0 - 30 cm, 30 - 60 cm und der Mittelwert aus 0 - 60 cm, Fläche „Im Berge“, Messsystem EM38.....	83
Tab. 48: Regressionsmodelle für die Korngröße Sand (Tiefe 0 - 30 cm) und die elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen und vertikalen Modus ($EC_{(ver,hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem EM38.....	83
Tab. 49: Regressionsmodelle für die Korngröße Schluff (Tiefe 0 - 30 cm) und die elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen und vertikalen Modus ($EC_{(ver,hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem EM38.....	84
Tab. 50: Regressionsmodelle für die Korngröße Ton (Tiefe 0 - 30 cm) und die elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen und vertikalen Modus ($EC_{(ver,hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem EM38.....	84
Tab. 51: Regressionsmodelle für C_{org} (Tiefe 0 - 30 cm) und die elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen und vertikalen Modus ($EC_{(ver,hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem EM38	85
Tab. 52: Differenz zwischen wahren und geschätzten Korngrößen, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Schätzmethode Feldkarte, Fläche „Im Berge“, Messsystem EM38	86
Tab. 53: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu $EC_{(hor)}$ für zwei ausgewählte Messtermine auf der Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem EM38	89
Tab. 54: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu $EC_{(hor)}$ (Zahlenreihen logarithmiert) für zwei ausgewählte Messterminen auf der Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem EM38	90
Tab. 55: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen der Suszeptibilität und den Korngrößen sowie C_{org}	90
Tab. 56: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für die Suszeptibilität zwischen den jeweiligen Messterminen	91
Tab. 57: Beschreibende statistische Werte für den Ertrag der Fläche „Im Berge“ in verschiedenen Erntejahren, Angaben in t/ha außer VK und (IQR:Median) in %	92

Tab. 58: Spearmansche Korrelationskoeffizienten der Erntejahre untereinander	92
Tab. 59: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen Ertrag der einzelnen Jahre und den Korngrößen sowie C_{org} , Bodenprobeentnahmetiefen: 0 - 30 cm (S1, U1, T1, $C1_{org}$), 30 - 60 cm (S2, U2, T2, $C2_{org}$) und der Mittelwert aus 0 - 60 cm (S12, U12, T12, $C12_{org}$)	94
Tab. 60: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} im Oberboden auf das Ertragsniveau des jeweiligen Jahres auf der Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte	94
Tab. 61: Analyse des Zusammenhangs zwischen den geoelektrischen Messwerten ARP03, EM38 und BOs - 1EP und dem Trockenmasse-Ertrag 2007 auf der Fläche „Im Berge“, aufgeführt sind die Messwerte, welche nach der multiplen Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable angegeben sind.....	95
Tab. 62: Beschreibende statistische Werte für die Korngröße der Fläche „Wellenkamp“ für die Tiefe 0 - 30 cm, Ergebnisse der Laboranalyse, Angaben in %	97
Tab. 63: Beschreibende statistische Werte für die Korngröße der Fläche „Wellenkamp“ für die Tiefe 30 - 60 cm, Ergebnisse der Laboranalyse, Angaben in %	98
Tab. 64: Beschreibende statistische Werte für die Nährstoffe der Fläche „Wellenkamp“ für die Tiefe 0 - 30 cm, Ergebnisse der Laboranalyse, Angaben in mg/100g außer VK und (IQR:Median) in %.....	99
Tab. 65: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen untersuchten Nährstoffgehalten und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt in 0 - 30 cm Tiefe der Fläche „Wellenkamp“	99
Tab. 66: Messzeitpunkte des Bodensensorssystems auf der Fläche „Wellenkamp“.....	100
Tab. 67: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Leitfähigkeit normiert auf 25°C für die Fläche „Wellenkamp“, Angaben in mS/m außer VK und (IQR:Median) in %	101
Tab. 68: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für die elektrische Leitfähigkeit zwischen den jeweiligen Messterminen.....	101
Tab. 69: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit und den Korngrößen sowie C_{org} (Probeentnahmetiefe: 0 - 30 cm).....	103
Tab. 70: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit und den Korngrößen sowie C_{org} (Probeentnahmetiefe: 30 - 60 cm).....	103
Tab. 71: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit und den Korngrößen sowie C_{org} (Probeentnahmetiefe: 0 - 60 cm).....	103
Tab. 72: Regressionsmodelle für die Korngröße Sand (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Messsystem BOs - 1EP, Fläche „Wellenkamp“.....	104
Tab. 73: Regressionsmodelle für die Korngröße Schluff (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Messsystem BOs - 1EP, Fläche „Wellenkamp“.....	104

Tab. 74: Regressionsmodelle für die Korngröße Ton (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Messsystem BOs - 1EP, Fläche „Wellenkamp“	105
Tab. 75: Regressionsmodelle für die organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Messsystem BOs - 1EP, Fläche „Wellenkamp“	105
Tab. 76: Beste Schätzmethode für die Fläche Wellenkamp.....	106
Tab. 77: Differenz zwischen wahren und geschätztem Sandgehalt, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP.....	107
Tab. 78: Differenz zwischen wahren und geschätztem Schluffgehalt, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP.....	107
Tab. 79: Differenz zwischen wahren und geschätztem Tongehalt, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP.....	108
Tab. 80: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Kapazität der Plattenanordnung für die Fläche „Wellenkamp“, Angaben in Pikofarad (pF) außer VK und (IQR:Median) in %	111
Tab. 81: Spearmanische Korrelationskoeffizienten für die elektrische Kapazität der Plattenanordnung zwischen den jeweiligen Messterminen	111
Tab. 82: Niederschlagsmengen (in mm) für verschiedene Zeitpunkte vor der geoelektrischen Messung auf der Fläche „Wellenkamp“	112
Tab. 83: Spearmanische Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Kapazität der Plattenanordnung und den Korngrößen sowie C_{org} , Fläche „Wellenkamp“	114
Tab. 84: Regressionsmodelle für die Korngröße Sand und elektrische Kapazität (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Messsystem BOs - 1EP, Fläche „Wellenkamp“.....	114
Tab. 85: Regressionsmodelle für die Korngröße Schluff und elektrische Kapazität (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Messsystem BOs - 1EP, Fläche „Wellenkamp“.....	115
Tab. 86: Regressionsmodelle für die Korngröße Ton und elektrische Kapazität (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Messsystem BOs - 1EP, Fläche „Wellenkamp“.....	115
Tab. 87: Regressionsmodelle für den organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) und elektrische Kapazität (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Messsystem BOs - 1EP, Fläche „Wellenkamp“	115
Tab. 88: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu EC25 für vier ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem BOs - 1EP	116

Tab. 89: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu EC25 (Zahlenreihen logarithmiert) für vier ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem BOs - 1EP.....	117
Tab. 90: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu C_{ele} für vier ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem BOs - 1EP	117
Tab. 91: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} (Zahlenreihen logarithmiert) zu C_{ele} für vier ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem BOs - 1EP.....	118
Tab. 92: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen dem elektrischen Rauschen und den Korngrößen sowie C_{org} , Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP.....	118
Tab. 93: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für das elektrische Rauschen zwischen den jeweiligen Messterminen, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP.....	119
Tab. 94: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen Bodentemperatur (Messtiefe ca. 5 - 8 cm) und Korngröße sowie C_{org} (Probeentnahmetiefe: 0 - 30 cm), Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP.....	120
Tab. 95: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Leitfähigkeit für die Fläche „Wellenkamp“ innerhalb des Auswerterasters, Angaben in mS/m außer VK, (IQR:Median) in % und Messtiefe in cm, Messsystem ARP03.....	121
Tab. 96: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen EC des Messsystems ARP03 und den Korngrößen sowie C_{org} , Messtermin: Herbst 2004, Fläche „Wellenkamp“	122
Tab. 97: Regressionsmodelle zwischen EC1 und den Korngrößen sowie C_{org} und das Bestimmtheitsmaß (B^2), Messtermin Herbst 2004, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem ARP03	122
Tab. 98: Differenz zwischen wahren und geschätzten Korngrößen, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Schätzmethode "Wertetabelle", Fläche „Wellenkamp“, Messsystem ARP03	123
Tab. 99: Analyse der Einflussstärke der Korngrößen und C_{org} zu EC1 auf der Fläche „Wellenkamp“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem ARP03.....	124
Tab. 100: Messzeitpunkte mit dem EM38 auf der Fläche „Wellenkamp“	125
Tab. 101: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Leitfähigkeit (EM38) für die Fläche „Wellenkamp“, Angaben in mS/m außer VK und (IQR:Median) in % sowie BodTemp in °C, Messsystem EM38	126

Tab. 102: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für die elektrische Leitfähigkeit im vertikalen und horizontalen Modus (EM38) zwischen den jeweiligen Messterminen, Fläche „Wellenkamp“	126
Tab. 103: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit ($EC_{(hor)}$ und $EC_{(ver)}$) und den Korngrößen sowie C_{org} , Bodenprobeentnahmetiefen: 0 - 30 cm, 30 - 60 cm und der Mittelwert aus 0 - 60 cm, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38	128
Tab. 104: Regressionsmodelle für die Korngröße Sand (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen Modus ($EC_{(hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38	128
Tab. 105: Regressionsmodelle für die Korngröße Schluff (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen Modus ($EC_{(hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38	129
Tab. 106: Regressionsmodelle für die Korngröße Ton (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen Modus ($EC_{(hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38	129
Tab. 107: Regressionsmodelle für C_{org} (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen Modus ($EC_{(hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38.....	129
Tab. 108: Differenz zwischen wahren und geschätzten Korngrößen, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Schätzmethode „Feldkarte“, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38	130
Tab. 109: Analyse der Einflussstärke der Korngrößen und C_{org} zu $EC_{(hor)}$ für zwei ausgewählte Messtermine auf der Fläche „Wellenkamp“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem EM38.....	132
Tab. 110: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen der Suszeptibilität und den Korngrößen sowie C_{org}	133
Tab. 111: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für die Suszeptibilität zwischen den jeweiligen Messterminen	133
Tab. 112: Beschreibende statistische Werte für den Ertrag für die Fläche „Wellenkamp“ in verschiedenen Erntejahren, Angaben in t/ha außer VK und (IQR:Median) in %.....	134
Tab. 113: Spearmansche Korrelationskoeffizienten der Erntejahre untereinander	135
Tab. 114: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen Ertrag der einzelnen Jahre und Korngröße sowie C_{org} , Bodenprobeentnahmetiefen: 0 - 30 cm, und 30 - 60 cm und der Mittelwert aus 0 - 60 cm	136

Tab. 115: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} auf das Ertragsniveau des jeweiligen Jahres auf der Fläche „Wellenkamp“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte	137
Tab. 116: Analyse des Zusammenhangs zwischen den geoelektrischen Messwerten ARP03, EM38 und BOs - 1EP und dem Trockenmasse-Ertrag 2005 auf der Fläche „Wellenkamp“, aufgeführt sind die Messwerte, welche nach der multiplen Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable angegeben sind	138
Tab. 117: Spearmanische Korrelationskoeffizienten zwischen Bodenwassergehalt (Probeentnahmetiefe: 20 - 25 cm) und Korngröße sowie C_{org} (Probeentnahmetiefe: 0 - 30 cm), Fläche „Im Berge“	141
Tab. 118: Spearmanische Korrelationskoeffizienten zwischen Bodenwassergehalt (Probeentnahmetiefe: 20 - 25 cm) und Korngröße sowie C_{org} (Probeentnahmetiefe: 0 - 30 cm), Fläche „Wellenkamp“	141
Tab. 119: Maßgebliche Einflussvariable(n) und deren Bestimmtheitsmaß(e) der Messgrößen elektrische Leitfähigkeit (EC25), elektrische Kapazität (C_{ele}) und elektrisches Rauschen ($_{ele}Rausch$) anhand einer multiplen Regressionsanalyse ermittelt, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP	142
Tab. 120: Maßgebliche Einflussvariable(n) und deren Bestimmtheitsmaß(e) der Messgrößen elektrische Leitfähigkeit (EC25), elektrische Kapazität (C_{ele}) und elektrisches Rauschen ($_{ele}Rausch$) anhand einer multiplen Regressionsanalyse ermittelt, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP	143
Tab. 121: Vergleich der Korrelationen und Güte der Bestimmtheitsmaße zwischen EC25 und den Korngrößen sowie C_{org} zwischen beiden Flächen, Messsystem BOs - 1EP	145
Tab. 122: Vergleich der Korrelationen zwischen EC25 und den Korngrößen Sand und Ton sowie C_{org} zwischen den Flächen für die beiden Tiefen, Messsystem BOs - 1EP	146
Tab. 123: Vergleich der Korrelationen und die Güte der Bestimmtheitsmaße zwischen C_{ele} und den Korngrößen sowie C_{org} für beide Flächen, Messsystem BOs - 1EP	147
Tab. 124: Vergleich der Korrelationen zwischen elektrischen Rauschen ($_{ele}Rausch$, Messsystem BOs - 1EP), Bodentemperatur (in 5 - 8 cm Bodentiefe, BodTemp, Messsystem BOs - 1EP) und Suszeptibilität (Suszept. / Messsystem EM 38) und den Korngrößen sowie C_{org} für beide Flächen	149
Tab. 125: Vergleich der Korrelationen und die Güte der Bestimmtheitsmaße zwischen EC1 und den Korngrößen sowie C_{org} für beide Flächen, Messsystem ARP03 ...	150
Tab. 126: Vergleich der Korrelationen zwischen elektrischer Leitfähigkeit und den Korngrößen sowie C_{org} zwischen den Flächen für die beiden Tiefen, Messsystem ARP03 (EC1)	151
Tab. 127: Vergleich der Korrelationen und die Güte der Bestimmtheitsmaße zwischen $EC_{(hor)}$ und den Korngrößen sowie C_{org} zwischen beiden Flächen, Messsystem EM38	152

Tab. 128: Vergleich der Korrelationen und die Güte der Bestimmtheitsmaße zwischen $EC_{(ver)}$ und den Korngrößen sowie C_{org} zwischen beiden Flächen, Messsystem EM38	152
Tab. 129: Vergleich der Korrelationen zwischen elektrischer Leitfähigkeit und den Korngrößen sowie C_{org} zwischen den Flächen für die beiden Tiefen, Messsysteme: EM38	154
Tab. 130: Vergleich der Güte der Bestimmtheitsmaße zwischen EC und den Korngrößen sowie C_{org} im Oberboden der drei Messsysteme.....	157
Tab. 131: Vergleich der Differenzen zwischen wahren und geschätztem Tongehalt im Oberboden, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung der drei Messsysteme, Fläche „Im Berge“	158
Tab. 132: Vergleich der Differenzen zwischen wahren und geschätztem Tongehalt im Oberboden, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung der drei Messsysteme, Fläche „Wellenkamp“	159
Tab. 133: Vergleich der Spearmanschen Korrelationskoeffizienten zwischen Ertrag der einzelnen Jahre und Korngröße sowie C_{org} für die Flächen „Im Berge“ und „Wellenkamp“, Bodenprobeentnahmetiefen: 0 - 30 cm, 30 - 60 cm und der Mittelwert aus 0 - 60 cm	161
Tab. 134: Vergleich der Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen Ertrag und geoelektrischen Messwerte für die Fläche „Im Berge“ und „Wellenkamp“	164

Formelverzeichnis

Gleichung 1: EC_a - Temperaturkorrektur (Quelle: LÜCK et al. 2005)	15
Gleichung 2: EC_a - Temperaturkorrektur (Quelle: DURELSSER 1999).....	15
Gleichung 3: EC_a - Temperaturkorrektur (Quelle: SHEETS und HENDRICKX 1995 nach SLAVICH and PETTERSON 1990)	15
Gleichung 4: Errechnung des scheinbaren elektrischen Widerstands in Ω/m , Messprinzip Gleichstromgeoelektrik mit Vierleitermessung (Quelle: LANGE 2005, KELLER und FRISCHKNECHT 1977)	19
Gleichung 5: Kehrwert zur Errechnung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit in S/m	19
Gleichung 6: Berechnung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit, Messprinzip elektromagnetische Induktion (EM38) (Quelle: McNEIL 1980).....	21
Gleichung 7: Berechnung der Suszeptibilität, Messgerät EM38 (Quelle: GENONICS 2005).....	26
Gleichung 8: Bestimmung des Stromes bei einer sinusförmigen Wechselfrequenz mit kapazitiven Widerstand (Quelle: FROHNE 2002).....	39
Gleichung 9: Bestimmung der Kapazität eines Kondensators bei einer sinusförmigen Wechselfrequenz	39
Gleichung 10: Bestimmung des Stromes bei einer sinusförmigen Wechselfrequenz mit realem Widerstand (Quelle:FROHNE 2002).....	41
Gleichung 11: Bestimmung des Leitwerts bei einer sinusförmigen Wechselfrequenz.....	41
Gleichung 12: Vertrauensbereichsbildung für intervallskalierte und normal verteilte Zahlenreihen (Quelle: KÖHLER et al. 1996)	45
Gleichung 13: Vertrauensbereichsbildung für intervallskalierte Zahlenreihen bei einer asymmetrischen Verteilung (Quelle: SACHS 2002)	46
Gleichung 14: Berechnung des Variationskoeffizienten anhand von Standardabweichung (Stabw) und Mittelwert (\bar{X}) (Quelle: KÖHLER et al. 1996).....	46
Gleichung 15: Berechnung der Schwankungsbreite der Streuung (IQR:Median) anhand vom Interquartillbereich (IQR) und Medianwert (Z) (eigene Berechnung)	46
Gleichung 16: Berechnung des z-Werts anhand von Mittelwert und Standardabweichung (Quelle: LOZÁN und KAUSCH 2007)	46
Gleichung 17: Rücktransformation des z-Werts in den ursprünglichen Wert (Quelle: GEBBERS 2004b).....	47

Abkürzungsverzeichnis:

B^2	=	Bestimmtheitsmaß
BodTemp	=	Bodentemperatur in C° (BOs - 1EP)
BOs - 1EP	=	Bodensensorsystem der Fachhochschule Osnabrück, Messprinzip „Erfassung des elektrischen komplexen Leitwerts“ mit einem Elektrodenpaar
C	=	Kapazität
C_{ele}	=	elektrische Kapazität der Plattenanordnung (pF / BOs - 1EP)
$C1_{org}$	=	organischer Kohlenstoffgehalt (%) für die Bodentiefe 0 - 30 cm
$C2_{org}$	=	organischer Kohlenstoffgehalt (%) für die Bodentiefe 30 - 60 cm
$C12_{org}$	=	durchschnittlicher organischer Kohlenstoffgehalt (%) für die Bodentiefe 0 - 60 cm
dm	=	Dezimeter
dt	=	Delta Zeit
$d[\hat{u} \sin(\omega t)]$	=	Delta sinusförmige Wechselspannung
EC	=	elektrische Leitfähigkeit (mS/m)
EC_a	=	elektrische Leitfähigkeit des Bodens (mS/m)
EC1	=	elektrische Leitfähigkeit für ARP03 (mS/m), Messtiefe 1 (0 - 50 cm Tiefe)
EC2	=	elektrische Leitfähigkeit für ARP03 (mS/m), Messtiefe 2 (0 - 100 cm Tiefe)
EC3	=	elektrische Leitfähigkeit für ARP03 (mS/m), Messtiefe 3 (0 - 200 cm Tiefe)
EC25	=	elektrische Leitfähigkeit (mS/m) auf eine Bodentemperatur von $25^\circ C$ normiert
$EC_{(hor)}$	=	elektrische Leitfähigkeit (mS/m) für EM38 im horizontalen Messmodus
$EC_{(ver)}$	=	elektrische Leitfähigkeit (mS/m) für EM38 im vertikalen Messmodus
$eleRausch$	=	elektrisches Rauschen (BOs - 1EP)
f	=	(Mess-) Frequenz
FH OS	=	Fachhochschule Osnabrück
G	=	Leitwert, Wirkleitwert (mS)
GIS	=	Geoinformationssystem
ha	=	Hektar
H	=	magnetische Feldstärke
H_p	=	magnetische Feldstärke des primären Felds
H_s	=	magnetische Feldstärke des sekundären Magnetfelds, um eine $\frac{1}{4}$ Periodenlänge verschobenes Wechselfeld
Hz	=	Hertz
$\Phi H(z)$	=	Messempfindlichkeit für die auf den Spulenabstand normierte Tiefe im horizontalen Modus
I	=	Strom
I_{AB}	=	Einspeisestrom zwischen den Stromzuführungselektroden (A,B)
IQR	=	Interquartillbereich
(IQR:Median)	=	Verhältnis vom Interquartillbereich zum Medianwert
KAK	=	Kationenaustauschkapazität
Kap.	=	Kapitel
K_2O	=	pflanzenverfügbares Kalium
K	=	Geometriefaktor
KS-Test	=	Kolmogorov-Smirnov Test nach Lilliefors-Modifikation
LNP	=	Ladungsnullpunkt
Mg	=	pflanzenverfügbares Magnesium
m	=	Meter

m^2	=	Quadratmeter
mS	=	Millisiemens, Einheit für den elektrischen Leitwert
mS/m	=	Millisiemens je Meter, Einheit für die elektrische Leitfähigkeit
n	=	Anzahl der Proben
N_{gesamt}	=	Gesamtstickstoffgehalt
P_2O_5	=	pflanzenverfügbare Phosphor
pF	=	Pikofarad, Einheit für die elektrische Kapazität
P_{gesamt}	=	Gesamtphosphorgehalt
$R(z)$	=	Aufsummierter Signalanteil für eine auf den Spulenabstand normierte Tiefe
$R_H(z)$	=	Aufsummierter Signalanteil für eine auf den Spulenabstand normierte Tiefe im horizontalem Modus
$R_V(z)$	=	Aufsummierter Signalanteil für eine auf den Spulenabstand normierte Tiefe im vertikalem Modus
s	=	Standardabweichung
s.	=	siehe
s_{ab}	=	Spulenabstand
S1	=	Sandgehalt (%) für die Bodentiefe 0 - 30 cm
S2	=	Sandgehalt (%) für die Bodentiefe 30 - 60 cm
S12	=	durchschnittlicher Sandgehalt (%) für die Bodentiefe 0 - 60 cm
Suszept.	=	Suszeptibilität
T	=	Temperatur (°C)
T1	=	Tongehalt (%) für die Bodentiefe 0 - 30 cm
T2	=	Tongehalt (%) für die Bodentiefe 30 - 60 cm
T12	=	durchschnittlicher Tongehalt (%) für die Bodentiefe 0 - 60 cm
vgl.	=	vergleiche
ΔV	=	Potentialdifferenz der Messelektroden (M,N)
$\Phi V(z)$	=	Messempfindlichkeit für die auf den Spulenabstand normierte Tiefe im vertikalen Messmodus
u.a.	=	unter anderem
U1	=	Schluffgehalt (%) für die Bodentiefe 0 - 30 cm
U2	=	Schluffgehalt (%) für die Bodentiefe 30 - 60 cm
U12	=	durchschnittlicher Schluffgehalt (%) für die Bodentiefe 0 - 60 cm
$\hat{U} \sin(\omega t)$	=	Sinusförmige Wechselspannung
VK	=	Variationskoeffizient
z	=	Messtiefe normiert auf den Spulenabstand
ϵ_r	=	Permittivitätszahl (Dielektrizitätszahl)
κ	=	Suszeptibilität
μ_0	=	Permeabilität im Vakuum
ρ	=	scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand in Ohm (Ω/m)
σ	=	scheinbarer spezifischer elektrischer Leitfähigkeit (S/m bzw. mS/m)
$\Delta\sigma_a$	=	Differenz scheinbare elektrische Leitfähigkeit zwischen Messgerät (EM38) auf dem Boden und Messgerät in 1.5 m Höhe
$\Phi(z)$	=	Messempfindlichkeit für die auf den Spulenabstand normierte Tiefe
ω	=	Kreisfrequenz, ($= 2 \pi f$)
z.B.	=	zum Beispiel
z.Z.	=	zur Zeit

1. Einleitung

Annähernd 60 % der deutschen Landesfläche dienen als Produktionsstandort für Nahrungsgüter, Futtermittel und nachwachsende Rohstoffe (KÜNKELE et al. 2001). Dieser bedeutende Flächenanteil macht sowohl die ökonomische als auch ökologische Bedeutung der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion deutlich. Dem Boden, als landwirtschaftliche Produktionsfläche, kommt hierbei eine zentrale Funktion zu.

In der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung (auch „Präziser Ackerbau“ genannt, engl. *precision farming*) werden seit Mitte der 1990er Jahre verstärkt die Erträge von Ackerschlägen erfasst. Anhand dieser Ertragskarten wird deutlich, dass die Erträge innerhalb eines Schlages sehr stark schwanken können (HERBST 2004). Eine Ursache dafür liegt in der heterogenen Bodenqualität, die sich (neben anderen Faktoren) positiv oder negativ auf die Wachstumsbedingungen auswirken kann. Insbesondere die Ton- und Humusgehalte haben Auswirkungen auf das Speicherungsvermögen von Wasser und Nährstoffen im Boden und somit einen entscheidenden Einfluss auf das Ertragspotenzial. (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)

Bereits ROEMER und SCHEFFER (1949) weisen in ihrem Lehrbuch des Ackerbaus auf die Schwierigkeit hin, den Pflanzenbau den unterschiedlichen Bodenqualitäten innerhalb des Ackers anzupassen. Liegen dem Landwirt nutzbare Informationen über eine räumliche Verteilung der Bodeneigenschaften vor, kann er pflanzenbauliche Maßnahmen teilflächenspezifisch anpassen und damit die Produktivität sowohl ökonomisch (KIELHORN und TRAUTZ 2007, KILIAN 2004, WAGNER 2004) als auch ökologisch (TRAUTZ et al. 2007, REICHE 2004) optimieren. Als Möglichkeiten für eine Anpassung werden in der Literatur u.a. ortsspezifische Grundbodenbearbeitung (VOßHENRICH 2003), teilflächenspezifische Aussaatstärken (WIESEHOFF 2005, ROTH 2004) und angepasste Düngungsstrategien (BROZIO 2004, GEBBERS 2004a) genannt.

1.1. Problemstellung

Die eben genannten Autoren führen als wichtige Voraussetzung für gezielte Maßnahmen oder Applikationen u.a. Informationen über die kleinräumige Verteilung der Bodeneigenschaften an. So bieten z.B. die Daten der Bodenschätzung (detailliert s. Kap. 2.2) eine Grundlage zur Abgrenzung von pedogenen Standortunterschieden. Deren Aussagequalität kann durch den Einsatz von Bodensensorik weiter verbessert werden. BOESS (2007) beschreibt diesbezüglich die Erstellung entsprechender Feldbodenkarten für die Nutzung in der teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung. In der Landwirtschaft werden bereits entsprechende geoelektrische Messsysteme für diese Zwecke eingesetzt. Zur Anwendung kommen häufig das Messprinzip Gleichstromgeoelektrik mit der Vier-Punkt-Anordnung (z.B. Veris3100, ARP03) oder das elektromagnetische Zweispulen-System-Messprinzip (z.B. EM38). Bei der Anwendung dieser Systeme sind allerdings Besonderheiten zu beachten. Einige Messsysteme sind nicht direkt an landwirtschaftlichen Geräten einsetzbar. Eine

weitere Unwägbarkeit bisheriger Bodensensorsysteme ist, dass unter Umständen nicht genau bestimmt werden kann, aus welcher Tiefe der bestimmende Anteil des Messsignals kommt. Auch gibt die räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit innerhalb einer Fläche lediglich Hinweise auf eine Variation der Korngrößenzusammensetzung (Bodenart). Um Kenntnisse über die räumliche Verteilung der Korngrößenwerte zu erlangen, ist eine Verrechnung der elektrischen Leitfähigkeit mit Kalibrier-Bodenproben notwendig.

1.2. Zielsetzung

Die Fachhochschule Osnabrück hat ein Bodensensorsystem mit dem Messprinzip „Erfassung des komplexen elektrischen Leitwerts“ mit einem Elektrodenpaar (BOs - 1EP) entwickelt (ISYS 2002). Dem Messergebnis kann eine bestimmte Tiefe und ein definiertes Messvolumen zugeordnet werden. Außerdem besitzt das Messsystem die Voraussetzung, es in Zukunft direkt an landwirtschaftlichen Geräten zu implementieren. Ein Oberziel dieser Arbeit ist es, die Anwendbarkeit dieses Systems im Feld zu überprüfen und die Messergebnisse mit zwei anerkannten Messsystemen zu vergleichen. Das zweite Oberziel ist eine beprobungsarme Ermittlung der Korngrößenverteilung innerhalb einer Fläche. Die Schätzung der Korngrößen geschieht dabei mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit und ausgewählten Kalibrier-Bodenproben. Eine Überprüfung der Schätzergebnisse erfolgt durch die vorliegende Korngrößenanalyse.

Ausgehend von den Oberzielen werden für diese Arbeit fünf Teilziele definiert:

1. Überprüfung des Messprinzips „Erfassung des komplexen elektrischen Leitwerts“ mit einem Elektrodenpaar für den praktischen Einsatz
2. Klärung des Einflusses der Bodentextur auf das Messergebnis
3. Nutzung der Messergebnisse für eine Schätzung der räumlichen Korngrößenverteilung
4. Verschneidung der Ergebnisse mit weiteren Informationen (z.B. Bodenschätzung)
5. Prüfung des Einflusses der Bodenfeuchte auf das Messergebnis.

2. Literaturteil

2.1. Pflanzenstandort „Boden“

Erträge können innerhalb einer Fläche erheblich variieren. Eine mögliche Ursache hierfür kann eine unterschiedliche Bodengüte sein. Die geoelektrische Messung bietet die Möglichkeit eine Bewertung bzw. Abgrenzung von Teilflächen vorzunehmen, um so pflanzenbauliche Maßnahmen an mögliche unterschiedliche Bodenqualitäten anzupassen. Dieses setzt einen Zusammenhang zwischen dem Funktionsprinzip der geoelektrischen Messung und den Ansprüchen der Pflanze an den Boden voraus. Im folgenden Literaturteil wird dieser Ansatz näher erläutert. Zuerst wird auf den Pflanzenstandort „Boden“ eingegangen, um anschließend die Prinzipien der geoelektrischen Messung zu beschreiben.

Bodenwasser

Der Boden ist Pflanzenstandort und Speichermedium für Wasser und Nährstoffe. So ist die effektive Nutzung dieses Wasser- und Nährstoffspeichers durch die Pflanze eine wichtige Voraussetzung für eine hohe Ertragsleistung. Weiterhin ist ein regulierter Luft-, Wasser-, und Wärmehaushalt des Bodens erforderlich. (DIEPENBROCK et al. 2005, HORN 2002)

Zwischen Bodenart und Bodeneigenschaften bestehen verschiedene Zusammenhänge, z.B. die Wasserspeichervermögen. Die Wasserspeichervermögen eines Bodens wird insbesondere von den Korngrößen Schluff und Ton sowie der organischen Substanz bestimmt (LENNARTZ 2004, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, KUNTZE et al. 1994). Je größer die spezifische Oberfläche eines Bodenpartikels ist, desto höher ist das potentielle Speichervermögen (HARTGE & HORN 1999, KUNTZE et al. 1994). Die spezifische Oberfläche eines Körpers beruht auf dem Verhältnis der Oberfläche zum Gewicht des Körpers, d.h. die Oberfläche nimmt gegenüber seinem Gewicht zu (HARTGE & HORN 1999). Huminstoffe weisen eine spezifische Oberfläche von $800 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ bis zu $1000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ auf (KUNTZE et al. 1994). Die Tonfraktion hat spezifische Oberflächen von $5 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ bis zu $1100 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, die Schlufffraktion von $0,1 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ bis $1 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ und die Sandfraktion weniger als $0,1 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, GÜNZEL 1997). Die spezifische Oberfläche der Oxide beträgt zwischen $50 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ bis zu $200 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (KUNTZE et al. 1994). Das im Boden gehaltene Wasser kann in Adsorptions- und Kapillarwasser eingeteilt werden, wobei die Unterteilung fließend ist (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Adhäsionswasser und Hydratwasser bilden in der Summe das Adsorptionswasser (HARTGE & HORN 1999). Adhäsionswasser beschreibt das Wasser, welches auf einer Oberfläche durch die Adhäsionskräfte festgehalten wird. Adhäsionskraft (Anhangskraft) beschreibt die gegenseitige Anziehungskraft zwischen den Molekülen zweier unterschiedlicher Materialien (KUCHLING 2001).

Auch werden Wassermoleküle aufgrund ihres Dipol-Charakters an elektrisch geladene mineralische und/oder organische Bodenbestandteile (z.B. Tonminerale, Ladungsgruppen, Ionen) gebunden bzw. umgeben sich Ionen mit einer Hydrathülle

(Hydratwasser) (LENNARTZ 2004, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Diese Bindungsform beruht auf elektrostatischen Kräften (LENNARTZ 2004, SPOSITO 1998). Die Stärke der Hydratation ist vom Ionendurchmesser und der Ladung abhängig. So sind z.B. kleine und hochgeladene Ionen stark hydratisiert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, KUNTZE et al. 1994). Auch Oxide und Hydroxide werden hydratisiert (SCHMITT 2002) und bilden somit einen Ladungsschwerpunkt aus.

Als eine weitere Wasserbindung wird die Wasserstoffbrückenbindung zwischen Wassermolekülen und dem Sauerstoffatom der Tonminerale genannt (LENNARTZ 2004). Die organischen Bodenbestandteile halten Wasser ebenfalls durch Wasserstoffbrückenbindungen fest, welches durch den Tausch der polaren und funktionellen Gruppen, wie die Carboxylgruppe (-COOH) und Hydroxylgruppe (-OH), geschieht. Des Weiteren wirken die van-der-Waals-Kräfte bei der Wasserbindung an die organische Bodensubstanz. (SPOSITO 1998)

Kapillarwasser steigt gegen die Schwerkraft durch das Zusammenwirken von Adhäsions- und Kohäsionskräften insbesondere in den Feinporen ($\varnothing < 0,2 \mu\text{m}$) und Mittelporen ($\varnothing 10 - 0,2 \mu\text{m}$) auf (HARTGE & HORN 1999, EHLERS 1996). Kohäsionskräfte sind zwischen den Molekülen eines Materials wirkende Anziehungskräfte (KUCHLING 2001). Je kleiner der Porendurchmesser und/oder je unregelmäßiger dieser ausgeformt ist, umso höher steigt das Kapillarwasser (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Die Adhäsionskräfte zwischen dem Bodenmaterial und den Wassermolekülen bewirken ein Aufsteigen des Wassers, und die Kohäsionskräfte verhindern ein Abreißen des Wasserfilms (EHLERS 1996). In den Grobporen ($\varnothing 10 - >50 \mu\text{m}$) steigt kein Wasser gegen die Schwerkraft nach oben. Insbesondere die weiten Grobporen ($\varnothing > 50 \mu\text{m}$) dränieren eintretendes Wasser schnell nach unten, vermeiden Staunässe und sind überwiegend mit Luft gefüllt. Gut dränierende und durchlüftete Böden erwärmen sich oberflächlich schneller. (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, HARTGE und HORN 1999, KUNTZE et al. 1994)

Einige Tonminerale (z.B. Montmorillonit) weiten sich bei Befeuchtung auf, wodurch sich deren Oberfläche vergrößert. Eine Anlagerung von Wassermolekülen in die Zwischenschichten ist möglich (LENNARTZ 2004). Eine große spezifische Oberfläche bedeutet einerseits ein hohes Potential an Oberflächenwasser (HARTGE & HORN 1999, KUNTZE et al. 1994). Andererseits bedeutet es, je kleiner und runder die Korngröße ist, umso geringer wird der Porendurchmesser (HARTGE & HORN 1999) und umso höher wird das kapillare Aufstiegs Potenzial (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, EHLERS 1996).

Zur Wasseraufnahme muss die Pflanze die Saugspannung der Bodenpartikel überwinden und den Bodenpartikeln das anhaftende Wasser „entnehmen“ (pflanzenverfügbares Wasser). Hierzu kann die Pflanze eine Saugspannung von bis zu 1,5 MPa (15 bar) aufbringen. Ab hier ist der permanente Welkepunkt mit einem pF-Wert 4,2 auf der Wasserspannungskurve erreicht. Insbesondere in den Feinporen ($\varnothing < 0,02 \mu\text{m}$) bzw. an die Korngröße Ton ist das Bodenwasser mit einer höheren Saugspannung gebunden und steht somit der Pflanze nicht zur Verfügung. Dieses Wasser wird auch als Totwasser bezeichnet. (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL

2002, KUNTZE et al. 1994)

Das pflanzenverfügbare Bodenwasser steigt in Sandböden mit steigendem Schluff- und Tonanteil an und nimmt dann in Böden mit hohem Tonanteil wieder ab (HORN 2004, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Zu beachten ist auch, dass ein Boden mit hoher Wasserspeicherfähigkeit geringere Luftgehalte aufweist. Die Pflanzenwurzel benötigt zum Wachstum Sauerstoff und gibt Kohlendioxid ab. Die Diffusionsrate beschreibt den Gasaustausch zwischen der Bodenluft und der Atmosphäre, und geschieht überwiegend in den (weiten) Grobporen. (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)

Nährstoffbindung im Boden

Ebenfalls besteht zwischen der Nährstoffbindung eines Bodens und der Bodenart ein enger Zusammenhang.

Drei wichtige Gruppen im Boden lagern den Großteil der Nährstoffe an:

1. Tonminerale
2. Organische Substanz und
3. Oxide / Hydroxide. (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, KUNTZE et al. 1994)

Ein geringer Nährstoffanteil wird vom Mittel- und Feinschluff und ein sehr geringer Nährstoffanteil wird vom Grobschluff und Sand absorbiert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, KUNTZE et al. 1994). Die Nährstoffspeicherfähigkeit eines Bodens ist somit besonders von dessen Ton- und Humusgehalt abhängig (BLUME 2004b).

Tonminerale

Tonminerale weisen bei isomorphem Ersatz eine permanente negative und pH-Wert unabhängige Ladung auf. Kationen werden durch elektrostatische Kräfte (Coulombsche Kräfte) an die Tonmineraloberfläche gebunden. Weiter entstehen am Tonmineral funktionelle Gruppen mit einer variablen Ladung. Hier erfolgt die Bindung von Ionen über die Wasserstoffbrückenbindung bzw. elektrostatische Bindung (z.B. Van-der-Waals-Kraft). (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, KUNTZE et al. 1994). Variable Ladung bedeutet, dass diese Ladung vom pH-Wert abhängig ist. Bei einem pH-Wert von über 3 weisen die funktionellen Gruppen der Tonminerale die Fähigkeit auf Kationen anzulagern. Bei einem pH-Werten unter 3 wechselt diese Fähigkeit vom Kationenaustausch zum Anionenaustausch (KUNTZE et al. 1994). ZIECHMANN und MÜLLER-WEGENER (1990) geben für kaolinitische Böden bereits einen pH-Wert von 6,7 an, ab dem eine Anionenadsorption feststellbar ist. Die pH-Wert Abhängigkeit des Adsorbentens (z.B. Tonmineral), um Anionen oder Kationen anzulagern, wird vom Ladungsnullpunkt (LNP) bestimmt. Wird der Ladungsnullpunkt unterschritten, wechselt die Fähigkeit des Adsorbentens überwiegend Kationen anzulagern hin zur Anlagerung von Anionen. Verursacht wird diese Fähigkeit durch die pH-Wert abhängige Bindung oder Abspaltung von Protonen (H^+) aus der Bodenlösung an die funktionellen Gruppen. Es ist auch möglich, dass Anionen aus der Bodenlösung gegen einzelne OH-Gruppen der funktionellen Gruppen eingetauscht werden. (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, LAGALY 1993)

Die Ladungsnullpunkte verschiedener Adsorbenten (z.B. Tonminerale, Huminstoffe,

Oxide) sind unterschiedlich (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, KUNTZE et al. 1994), wobei weiterhin noch eine Differenzierung der Kationen nach deren Wertigkeit und Größe erfolgt. Mit steigender Wertigkeit steigt die Eintauschstärke, d.h. Ca^{2+} wird dem K^+ bevorzugt aufgenommen bzw. wird Ca^{2+} gegen K^+ am Adsorbenten getauscht. Mit der Wertigkeit steigt ebenfalls die Bindungsstärke. Ist die Wertigkeit gleich, steigt die Eintauschstärke mit steigendem Radius. (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002)

Die Höhe der Kationenaustauschkapazität der permanenten Ladung des Tonminerales ist von dessen Qualität (z.B. Zwei- oder Dreischichttonminerale, Quellfähigkeit, spezifische Oberfläche) abhängig. Dreischichttonminerale, z.B. Vermiculite und Smectite adsorbieren Kationen an der Oberfläche der Zwischenschichten und an der Mineraloberfläche. Zweischichttonminerale können Kationen nur an der Mineraloberfläche adsorbieren. (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, KUNTZE et al. 1994)

Direkt an der Oberfläche des Tonminerals lagern sich ausschließlich Kationen an. Dieser Bereich wird Stern-Schicht genannt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, ZIECHMANN und MÜLLER-WEGENER 1990). Vermutlich werden die Kationen bei der Anlagerung zum Teil dehydratisiert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, KUNTZE et al. 1994). Anionen werden in der Stern-Schicht durch die Coulombkräfte abgestoßen. An die Stern-Schicht grenzt die diffuse Schicht. Im Bereich der diffusen Schicht verändern sich die Konzentrationen der Kationen und Anionen kontinuierlich. Mit zunehmendem Abstand vom Tonmineral sinkt die Konzentration der Kationen und die Anionen-Konzentration nimmt zu, bis letztendlich der Gleichgewichtszustand der Lösung erreicht ist (s. Abb. 1). Die Gleichgewichtslösung wird nicht mehr von negativ geladenen Adsorbenten beeinflusst. Die Ionen in der diffusen Schicht und in der Gleichgewichtslösung sind vollständig hydratisiert. (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, ZIECHMANN und MÜLLER-WEGENER 1990)

Den elektrostatischen Kräften des Adsorbentens (z.B. Tonmineral) wirken die Diffusionskräfte der Bodenlösung entgegen. Bei einer Veränderung des Bodenwassergehalts und einer damit einhergehenden Änderung der Bodenlösungskonzentration variiert entsprechend die Ausdehnung der diffusen Schicht. Bei einer Verdünnung der Salzkonzentration der Bodenlösung nimmt die Ausdehnung der diffusen Schicht im Vergleich zu einer höheren Konzentration zu (LAGALY 1993, ZIECHMANN und MÜLLER-WEGENER 1990).

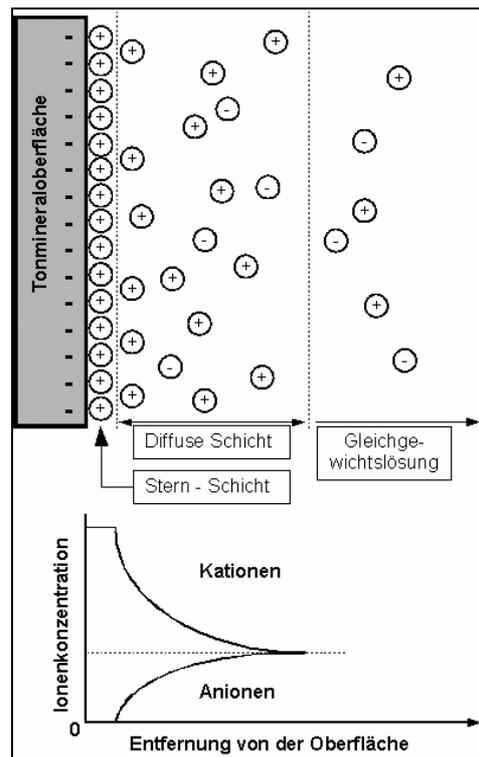


Abb. 1: Ionenverteilung an der Tonmineraloberfläche (oben) und Ionenkonzentrationsverlauf (unten) nach dem Modell von GOUY und STERN (Quelle: SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002, verändert)

Organische Substanz

Huminstoffe sind hochmolekulare, amorphe organische Verbindungen mit zahlreichen funktionellen Gruppen (KUNTZE et al. 1994). Ein Großteil der organischen Substanz ist elektrisch nicht geladen. Die Bindung von Ionen erfolgt an den funktionellen Seitengruppen in Form der Wasserstoffbrückenbindung bzw. Kationenbrückenbindung. Bei der Kationenbrückenbindung werden die abdissoziierten H^+ -Ionen der funktionellen Gruppen durch Kationen ersetzt. Weiter erfolgt eine Ionen- bzw. Molekülanlagerung an die organische Bodensubstanz mittels der van-der-Waals-Kraft. (SPOSITO 1998)

Die ionische Austauschkapazität der funktionellen Gruppen ist ebenfalls pH-Wert abhängig (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Der Ladungsnullpunkt liegt bei einem pH-Wert von 4,5. Wird dieser unterschritten, werden an den funktionellen Gruppen überwiegend Anionen adsorbiert (KUNTZE et al. 1994). Ebenfalls werden mehrwertige Ionen bevorzugt angelagert und stärker gebunden als einwertige Ionen. Mehrwertige Kationen (z.B. Al^{3+} oder Fe^{3+}) haben weiterhin die Fähigkeit mit der organischen Substanz metallorganische Komplexe zu bilden (Chelatbildung) (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, SPOSITO 1998)

Insgesamt weisen Huminstoffe in einem neutralen bis schwach sauren Bereich eine beträchtliche Kationenaustauschkapazität auf (300 bis $480 \text{ mmol}_c \text{ 100g}^{-1}$) (KUNTZE et al. 1994). Die Zwei- und Dreischichttonminerale weisen dazu im Vergleich eine Kationenaustauschkapazität von 10 bis $150 \text{ mmol}_c \text{ 100g}^{-1}$ auf (BLUME 2004a) und Oxide sowie Hydroxide 3 bis $25 \text{ mmol}_c \text{ 100g}^{-1}$ (KUNTZE et al. 1994).

Oxide / Hydroxide

Oxide bzw. Hydroxide weisen ebenfalls die Eigenschaft auf, Ionen anzulagern. Auch hier ist es vom Ladungsnullpunkt abhängig, ob Anionen oder Kationen gebunden werden. Der pH-Wert für den Ladungsnullpunkt ist für die verschiedenen Oxide unterschiedlich. So wechselt die Fähigkeit der Kationenanlagerung zu einer Anionenlagerung bei einem pH-Wert für:

Si-Oxide von 2 bis 3,5,

Mn-Oxide von 3 bis 5,

Al-Oxiden von 5 bis 9 und

Fe-Oxiden von 7 und 10. (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)

Der Ladungsnullpunkt variiert abhängig vom Humusgehalt des Bodens und von der Wertigkeit des gebundenen Kations (CORNELL & SCHWERTMANN 2003, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, ZIECHMANN und MÜLLER-WEGENER 1990).

Bei pH-Werten über dem Ladungsnullpunkt werden H^+ -Ionen von den OH_2 -Gruppen dissoziiert. Es entstehen negative Ladungen, die durch Kationen neutralisiert werden. Bei niedrigem pH-Wert unterhalb des Ladungsnullpunkts werden die Hydroxylgruppen (-OH) wieder mit zusätzlichen H^+ -Ionen belegt. Die Ladung der OH_2 -Gruppen ist positiv und es können Anionen angelagert werden. (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, ZIECHMANN und MÜLLER-WEGENER 1990)

Wurzelentwicklung

Um den Wasser- und Nährstoffspeicher des Bodens zu erschließen und nutzen zu können, muss die Pflanze den Boden durchwurzeln. Des Weiteren verankert sich die Pflanze mit ihrem Wurzeln im Boden und findet so Halt an der Bodenoberfläche.

Die Fähigkeit den Boden zu durchwurzeln, wird einerseits von der Eigenart der Pflanze bestimmt (KUHLMANN 1988, KUTSCHERA 1960), andererseits auch vom Ausgangsmaterial und der Bodenentwicklung sowie der anthropogenen Einflüsse auf diesem Boden. Des Weiteren wird die Durchwurzelbarkeit von der Korngröße beeinflusst. Je kleiner der Korndurchmesser, desto besser lässt sich der Boden durchwurzeln. Diese Aussage gilt eingeschränkt bei der Bodenartgruppe Lehmtone (Tt, Tu2, TI), da diese nicht so tief durchwurzelt werden wie die Lehmschluffe, Tonschluffe oder Schlufftone. (AG Boden 2005, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002)

Die unterschiedliche Durchwurzelungstiefe lässt sich mit der leichteren Verdrängbarkeit der kleineren Korngröße Ton gegenüber der Korngröße Sand erklären (HARTGE und HORN 1999). Die geringe Durchwurzelungstiefe der Lehmschluffe, Tonschluffe bzw. Schlufftone gegenüber der Bodenartgruppe Lehmtone kann durch eine Abnahme des Grobporenanteils und einer damit einhergehenden verminderten Durchlüftung des Bodens erklärt werden. Ist die Gasdiffusion nicht optimal, vermindert die Pflanze das Wurzelwachstum (HORN 1992).

Auch der Bodentyp gibt Hinweise auf die Durchwurzelbarkeit. Tiefgründige Tschernoseme ohne schroffen Horizontsprung weisen eine tiefere Durchwurzelbarkeit auf als Podsole mit klaren Horizontwechselln oder ein Gley mit hoch anstehendem Grundwasser (ROTH und WERNER 2000, HARRACH und VORDERBRÜGGE

1991). Auch REX und HARRACH (1984) beschreiben den Zusammenhang zwischen Durchwurzelungstiefe, Bodentyp und Ertragsbildung. Anstehendes Festgestein, Grundwassereinfluss oder Bodenverdichtungen mit der Folge von Vernässung und Sauerstoffmangel sowie zu hoher mechanischer Bodenwiderstand begrenzen die Durchwurzelbarkeit des Bodens in tiefere Horizonte (HORN 2004, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, HARRACH und VORDERBRÜGGE 1991, KUHLMANN 1988). Zwischen Wurzelentwicklung und Ertrag bzw. Sprossmasse besteht eine enge positive Korrelation (TENHOLTERN 2000, MÄHNER 1999, DOMSCH und PETELKAU 1997, DUMBECK 1986). Insbesondere eine hohe Durchwurzelung des Unterbodens bedeutet ein hohes Ertragspotential und eine entsprechende Ertrags-sicherheit (EHLERS 1996, HORN 1996b, KUHLMANN 1988). Eine intensive Durchwurzelung des Oberbodens fördert die Nährstoffaufnahme (CLAASSEN 1993, RENGER et al. 1993, KUHLMANN 1988).

2.2. Bodenschätzung

Für eine einheitliche und steuerlich gerechte Bewertung der Kulturböden im damaligen deutschen Reich wurde am 16.10.1934 das „Gesetz über die Schätzung des Kulturbodens“ erlassen (ROTHKEGEL 1950). Dieses Gesetz hat bis heute seine Gültigkeit (RÖTSCHER 2008). Die steuerliche Bewertung des Bodens erfolgte nach einem einheitlichen Bewertungssystem. Als Bewertungsgrundlage dient für Ackerland der Ackerschätzungsrahmen und für Grünland der Grünlandschätzungsrahmen.

Die Bewertungskriterien für Ackerland sind:

- 8 Bodenartgruppen (eingeteilt nach den abschwemmbar Teilchen $\leq 0,01 \text{ mm } \varnothing$) sowie Moor,
- Entstehung (geologischer Ursprung des Substrats) und
- Zustandsstufe (1 - 7, beschreibt den Entwicklungszustand des Bodens).

Aus der Kombination der Kriterien ergibt sich die Bodenzahl. Diese beschreibt die natürliche Ertragsfähigkeit des Bodens. Die Bodenzahl ist als eine Verhältniszahl zu verstehen und zeigt einen Reinertragsunterschied gegenüber den besten Böden an. Die Ackerzahl ergibt sich, indem der Bodenzahl Zu- und/oder Abschläge gegenüber Abweichungen von definierten Gelände-, Klima- und Wasserbedingungen zugeteilt werden. (ROTHKEGEL 1950, BodSchätzDB 1935, BodSchätzG 1934)

Ähnliches gilt für die Bewertung von Grünland. Die Kriterien sind:

- 4 Bodenartgruppen sowie Moor,
- Bodenstufe (1 - 3, ähnlich der Zustandsstufe im Ackerschätzungsrahmen),
- Klimastufe (beschreibt die mittlere Jahrestemperatur am Bewertungsstandort) und
- Wasserverhältnisse (beschreibt den Bewertungsstandort hinsichtlich der Wasserverhältnisse von nass bis gut versorgt nach trocken).

Auch hier ergibt sich aus der Kombination der Kriterien eine Wertzahl, die Grünlandgrundzahl. Ebenfalls werden Zu- und/oder Abschläge vorgenommen, aus denen sich die Grünlandzahl ergibt. (ROTHKEGEL 1950, BodSchätzDB 1935, BodSchätzG 1934)

Neben dem steuerlichen Aspekt der Bodenbewertung sollte die Erhebung so geschehen, dass die Ergebnisse auch praktischen und wissenschaftlichen Ansprüchen der Landbewirtschaftung gerecht werden (FINKE 1971). So wurde für die Bewertung des Ackerlandes im Klassenzeichen die Bodenart, Zustandsstufe, Entstehung, Bodenzahl und Ackerzahl vermerkt. Im Grünland-Klassenzeichen sind Bodenart, Bodenstufe, Klima, Wasserverhältnisse, Grünlandgrundzahl und Grünlandzahl notiert. (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, FINKE 1971)

Anhand des Klassenzeichens des Ackerschätzrahmens können Rückschlüsse auf die Wurzelungstiefe und -intensität gezogen werden. Neben der Bodenart gibt insbesondere die Zustandsstufe einen deutlichen Hinweis auf die Durchwurzelbarkeit (SAUER et al. 2003). Weiterhin besteht zwischen der Bodenart und der (nutzbaren) Feldkapazität eine enge Beziehung (s. Kap. 2.1) (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, EHLERS 1996). Durch das Verrechnen der Daten der Durchwurzelbarkeit und der nutzbaren Feldkapazität eines Bodens kann die nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum ermittelt werden (VORDERBRÜGGE et al. 2006, VORDERBRÜGGE et al. 2004). Mehrere Autoren geben eine mittlere bis hohe Korrelation zwischen Bodenzahl und nutzbarer Feldkapazität im durchwurzelbaren Wurzelraum an (HARRACH 2004, PREIS et al. 2001, PETER et al. 1999).

Aus den Informationen der Bodenschätzung und dem Ertrag kann ein Zusammenhang abgeleitet werden. So steigt der Ertrag mit steigender Bodenzahl (RÖTSCHER et al. 2008, DOBERS 2002) bzw. zunehmenden abschlämmbaren Bodenteilchen (DOBERS 2002) an. Wobei DOBERS (2002) die Bodenarten (anhand der abschlämmbaren Bodenteilchen) von Sand (S) bis sandiger Lehm (sL) angibt. Die beiden eben genannten Autoren geben eine Spannweite der Bodenzahl von 36 bis 91 (RÖTSCHER et al. 2008) bzw. 18 bis 24 (DOBERS 2002) an. Weiter zeigt DOBERS (2002) schwankende Ertragniveaus zwischen verschiedenen Jahren. REINER et al. (1994, 1992) beschreiben anhand umfangreicher Auswertungen, dass der Ertrag mit zunehmenden abschlämmbaren Bodenteilchen bis zur Bodenart sandiger Lehm (sL) ansteigt, dann stagniert und ab der Bodenart schwerer Lehm (LT) bzw. Ton (T) wieder abnimmt. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen SCHMERLER et al. (2001). Ebenfalls zeigen die Autoren mit steigenden Ackerzahlen einen Ertragsanstieg. Allerdings geben die Autoren auch an, dass auf Teilflächen mit verhältnismäßig hohen Ackerzahlen aufgrund eines hohen Tongehalts und der Neigung zur Staunässe, die Erträge wieder abnehmen. Teilweise kann anhand hoher Korrelationen eine gleich bleibende räumliche Verteilung der Erntemenge der einzelnen Jahre nachgewiesen werden. Die absolute Höhe der Erträge kann von Jahr zu Jahr variiert. (SCHMERLER et al. 2001)

2.3. Geoelektrische Messung

2.3.1. Stromfluss im Boden

Der Boden setzt sich aus der festen, flüssigen und gasförmigen Phase zusammen. Wird ein Strom durch den Boden geleitet, kann der Stromfluss hauptsächlich über zwei Leitungsprozesse stattfinden (s. Abb. 2). Insbesondere die feste und flüssige Phase sowie beide Phasen in Kombination sind an der Leitung des elektrischen Stroms beteiligt. Die gasförmige Phase kann beim Stromfluss im Boden vernachlässigt werden. (RHOADES et al. 1989)

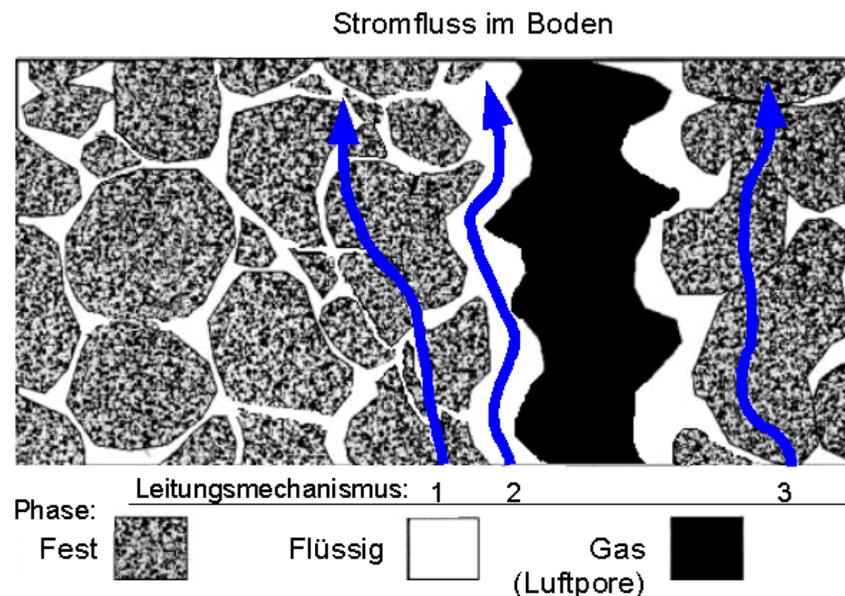


Abb. 2: Schematische Darstellung des Stromflusses im Boden, 1 = Stromfluss durch die feste und flüssige Phase, 2 = Stromfluss durch die flüssige Phase, 3 = Stromfluss durch die feste Phase (Quelle: RHOADES et al. 1989, verändert)

Die elektrische Leitfähigkeit (σ) über die feste bzw. flüssige Phase beruht auf verschiedenen Leitungsmechanismen. Diese werden in der Literatur in elektronische (metallische) Matrixleitfähigkeit, elektrolytische Leitfähigkeit und Grenzflächenleitfähigkeit unterteilt (GEBBERS und LÜCK 2006, WEIDELT 2005). GEBBERS und LÜCK (2006) fügen als weiteren Leitungsmechanismus die Verschiebungsströme hinzu und beschreiben hiermit Polarisationserscheinungen in einem elektrischen Feld.

Elektronische (metallische) Matrixleitfähigkeit

Die elektronische (metallische) Matrixleitfähigkeit beschreibt den Stromfluss durch die feste Phase. Weiter unterteilt werden kann dieser Leitungsmechanismus in den Stromfluss durch Metalle, Halbleiter, feste Elektrolyte und Gestein (KELLER und FRISCHKNECHT 1977). Der Stromfluss geschieht in den Metallen und Halbleitern durch die freie Beweglichkeit von Elektronen. Dieser Vorgang wird als Elektronenleitung bezeichnet. Im elektrischen Feld fließen die Elektronen mit der Stromrichtung, wobei die Leitfähigkeit im Metall mit steigender Temperatur ab und im Halbleiter mit steigender Temperatur zunimmt (FROHNE et al. 2002). Die Metalle

haben eine untergeordnete Rolle bei der elektrischen Leitung im Boden; Ausnahmen bilden hierzu Erzminerale und Graphite (GEBBERS und LÜCK 2006, WEIDELT 2005). Die Halbleiter (z.B. Sulfide, Pyrite, etc) und die Oxide (Ilmenite, etc)) haben ebenfalls überwiegend eine gute bis hohe Leitfähigkeit (KELLER und FRISCHKNECHT 1977).

Feste Elektrolyte (z.B. NaCl) leiten Ströme aufgrund der Beweglichkeit von Ionen in der Kristallgitterstruktur. Die Leitfähigkeit des festen Elektrolyts ist temperatur- und frequenzabhängig. Vorwiegend zu finden sind feste Elektrolyte im festen Gestein und tragen hier neben den Metallen bzw. den Halbleitern zur elektrischen Leitfähigkeit des Gesteins bei (KELLER und FRISCHKNECHT 1977).

Elektrolytische Leitfähigkeit

Die elektrolytische Leitfähigkeit beschreibt den Stromfluss in elektrisch leitenden Flüssigkeiten, den so genannten elektrolytischen Flüssigkeiten (Elektrolyte).

Reines Wasser ist ein sehr schlechter elektrischer Leiter. Aufgrund der hohen Dielektrizitätszahl (Permittivitätszahl) von 81 ist Wasser ein gutes Lösungsmittel. Das in Gesteinen und Boden vorkommende bzw. hinzukommende Wasser löst vorhandene Salze (GREINWALD und THIERBACH 1997). Die Salze dissoziieren in ihre Bestandteile, die Ionen. Diese dienen in der Lösung als Träger der elektrischen Ladung beim Anlegen eines elektrischen Felds. Anionen weisen einen Elektronenüberhang auf und wandern im elektrischen Feld zur positiv geladenen Elektrode (Anode). Entsprechend entgegengesetzt verhalten sich die Kationen. Diese wandern zur negativ geladenen Elektrode (Kathode). Die elektrische Ladung kann nur mit Hilfe der Ionen fließen, so dass dieser Ablauf als Ionenleitung oder Trägerleitung bezeichnet wird. (FROHNE et al. 2002)

Mit steigender Lösungskonzentration bzw. steigender Lösungstemperatur steigt die elektrische Leitfähigkeit der Lösung an (GEBBERS und LÜCK 2006, JÄGER 2005, FROHNE et al. 2002, KELLER und FRISCHKNECHT 1977). Mit steigender Lösungstemperatur nimmt die Mobilität der Ionen zu und somit die elektrische Leitfähigkeit. Die Bewegungsgeschwindigkeit des einzelnen Ions in Lösungen mit hoher Konzentration wird durch die Bewegung der anderen Ionen in der Regel vermindert (KELLER und FRISCHKNECHT 1977). Des Weiteren umgeben sich freie Ionen in der Lösung mit einer Hydrathülle, was zu einer Herabsetzung der Mobilität und somit auch der elektrischen Leitfähigkeit führt (BIKERMAN 1935). Trotzdem erhöht sich mit steigender Lösungskonzentration die elektrische Leitfähigkeit, da sich die Ionenanzahl erhöht und somit mehr Ladung pro Zeit transportiert werden kann (GREINWALD und THIERBACH 1997, KELLER und FRISCHKNECHT 1977). Die elektrische Leitfähigkeit eines porösen Gesteins kann bereits durch einen nur wenige Moleküllagen dünnen Feuchtigkeitsfilm deutlich erhöht werden (WEIDELT 2005, GREINWALD und THIERBACH 1997, KELLER und FRISCHKNECHT 1977).

Grenzflächenleitfähigkeit

Die Grenzflächenleitfähigkeit beschreibt einen (Teil-)Stromfluss, der weder durch die elektrolytische Lösung noch, bei Vorhandensein freibeweglicher Elektronen, durch die feste Phase fließt (SCHOPPER et al. 2005). An der Oberfläche von Bodenpartikeln, insbesondere bei elektrisch geladenen Bodenpartikeln (z.B.

Tonmineralen), lagern sich vermehrt Ionen an. So lagern sich an der Tonmineraloberfläche Kationen an (s. Kap. 2.1). Somit ist die Oberfläche der Tonminerale kationenreicher als das elektrolytische Porenwasser, wodurch diese Oberflächen eine höhere Leitfähigkeit aufweisen (BIKERMANN 1935). Die Ionen müssen aber beweglich sein, damit ein Strom transportiert wird (KLITZSCH 2004, BIKERMANN 1935). Ferner beeinflusst die Geometrie bzw. die Größe der Oberfläche des Tonminerals die Grenzflächenleitfähigkeit (KLITZSCH 2004).

Bei den bis hier aufgeführten Leitungsprozessen fließt ein realer Strom (Realteil) zwischen den Elektroden. Die Höhe des Stromflusses wird durch die Leitfähigkeit des Bodens bestimmt. Bei dem Messprinzip „komplexer elektrischer Leitwert“ setzt sich die Messgröße neben dem Realteil auch aus der weiteren Größe, dem Imaginärteil zusammen. Der Imaginärteil wird z.B. stark von der elektrischen Polarisierung beeinflusst.

Elektrische Polarisierung

Zwischen den beiden Elektroden baut sich ein elektrisches Feld auf. Darin enthaltene Dipole richten sich entsprechend dieses Feldes aus. Dieser Vorgang wird als Polarisierung bezeichnet. Die Stärke dieser Polarisierung wird durch die materialabhängige Permittivitätszahl (Dielektrizitätszahl) ϵ_r beschrieben (s. Tab. 1). In elektrischen Wechselfeldern führt die ständige Neuausrichtung der Dipole zu einem messbaren Stromfluss (Ladungserhöhung auf den Elektroden), ohne dass sich die Dipole tatsächlich örtlich bewegen. Dieser polarisationsbedingte Strom kann mathematisch als imaginärer Strom bezeichnet werden, während die in den vorherigen Absätzen beschriebenen Teilchenströme reale Ströme sind. Zusammen ergeben diese realen und imaginären Ströme einen komplexen Strom. Dem Material, das diesen komplexen Strom leitet, wird dabei eine komplexe elektrische Leitfähigkeit zugewiesen. Die Permittivitätszahl ist frequenz- und temperaturabhängig. (FROHNE et al. 2002)

Im Unterschied zur elektrischen Leitfähigkeit, für die als Voraussetzung für einen Stromfluss eine Elektronen- oder Ionenleitung vorliegen muss, kann die Polarisierung auch in Stoffen stattfinden, die keine leitenden Eigenschaften aufweisen (KELLER und FRISCHKNECHT 1977). Aus diesem Grund wird der Imaginäranteil oft zur Grenzflächenleitfähigkeit gerechnet (WEIDELT 2005, SCHOPPER et al. 2005, KELLER und FRISCHKNECHT 1977). So führen die Bodenbestandteile ebenfalls zu einer Polarisierung im elektrischen Feld (s. Tab. 1) bzw. richten sich Moleküle mit Dipolcharakter (z.B. Wasser) entsprechend ihrer Polung im elektrischen Feld aus. Die Beweglichkeit der Moleküle hat ebenfalls einen Einfluss auf die Polarisierung. In Flüssigkeiten rotieren die Moleküle schnell und in festen Stoffen langsam (KELLER und FRISCHKNECHT 1977). So vermindert sich die Permittivitätszahl von gebundenem Wasser im Gegensatz zum freien Wasser (SCHEUERMANN et al. 2002) (s. Abb. 3). SPOSITO (1998) gibt für gebundenes Wasser eine Permittivitätszahl von 2 bis 50 an; erklärt wird dieses mit einer eingeschränkten Orientierungsmöglichkeit im elektrischen Feld der gebundenen Wassermoleküle. In Tab. 1 sind für ausgewählte Bodenbestandteile die Permittivitätszahl und durchschnittliche Leitwerte bei einer Messfrequenz von 100 MHz angegeben.

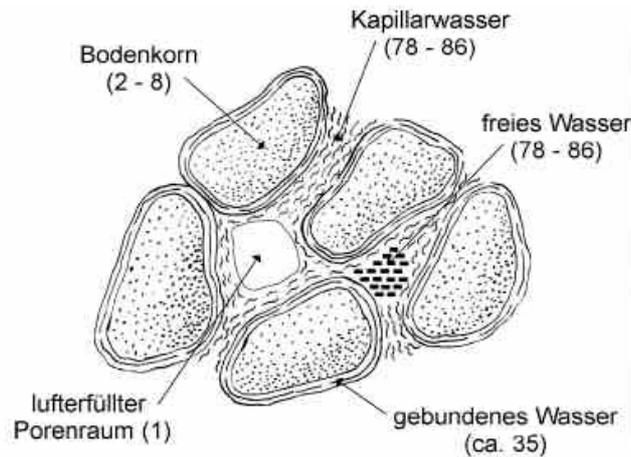


Abb. 3: Permittivitätszahl der Bodenbestandteile (Quelle: SCHEUERMANN et al. 2002)

Tab. 1: Permittivitätszahl und durchschnittliche Leitfähigkeiten einiger Materialien bei einer Messfrequenz von 100 MHz (Quelle: verändert nach BLINDOW et al. 2005, FROHNE et al. 2002, GREINWALD und THIERBACH 1997)

Material	Permittivitätszahl (ϵ_r)	Leitfähigkeit (σ) in mS m^{-1}	Autor
Luft	1	0	FROHNE et al. 2002
Aqua dest.	80	0.01	BLINDOW et al. 2005
Süßwasser	80	0.5	BLINDOW et al. 2005
Meerwasser	80	3000	BLINDOW et al. 2005
trockener Sand	3 - 5	0.01	BLINDOW et al. 2005, GREINWALD und THIERBACH 1997
gesättigter Sand	20 - 30	0.1 - 1	BLINDOW et al. 2005, GREINWALD und THIERBACH 1997
sandiger Boden	2.6 - 25	0.14 - 6.7	GREINWALD und THIERBACH 1997
lehmiger Boden	2.5 - 19	0.11 - 20	GREINWALD und THIERBACH 1997
toniger Boden	2.4 - 15	0.25 - 50	GREINWALD und THIERBACH 1997
Schluff	5 - 30	5 - 30	BLINDOW et al. 2005
Ton	5 - 40	2 - 1000	BLINDOW et al. 2005
Tonschiefer	5 - 15	1 - 100	GREINWALD und THIERBACH 1997
Kalkstein	4 - 8	0.5 - 2	BLINDOW et al. 2005
Kalkstein	8 - 12	0.14 - 10	GREINWALD und THIERBACH 1997
Granit	4 - 8	0.03 - 3.33	GREINWALD und THIERBACH 1997
Granit	6	0.01 - 1	BLINDOW et al. 2005
trockenes Salz	6	0.001 - 0.1	BLINDOW et al. 2005
Eis	3 - 3.5	0.01 - 1	GREINWALD und THIERBACH 1997
Öl, Asphalt	2 - 3	0.01	BLINDOW et al. 2005

2.3.2. Einfluss der Bodentemperatur auf die elektrische Leitfähigkeit des Bodens

Mit steigender Bodentemperatur nimmt die elektrische Leitfähigkeit des Bodens bei einem festen Wassergehalt zu (DURLESSER 1999, KELLER und FRISCHKNECHT 1977). Da dieser Zusammenhang bekannt ist, kann mit Hilfe einer Gleichung die gemessene Leitfähigkeit (EC_a) um den Temperatureinfluss (T) korrigiert werden; die elektrische Leitfähigkeit wird auf eine normierte Temperatur von 25°C (EC_{25}) angegeben. Der Vorteil ist, dass zeitlich versetzte Messungen (z.B. Frühjahr und Sommer) um den jahreszeitlichen Temperatureinfluss bereinigt werden und so besser vergleichbar sind.

Folgende Gleichungen wurden der Literatur entnommen:

Korrekturformel nach LÜCK et al. (2005):

$$EC_{25} = EC_a * (0,36 + e^{\frac{T-12,5}{28,5}})$$

EC_{25} = elektrische Leitfähigkeit auf 25°C normiert EC_a = gemessene elektrische Leitfähigkeit
T = gemessene Bodentemperatur

Gleichung 1: EC_a - Temperaturkorrektur (Quelle: LÜCK et al. 2005)

Der Temperatur - Gültigkeitsbereich für Gleichung 1 liegt zwischen 5°C und 40°C (LÜCK 2006).

Korrekturformel nach DURLESSER (1999)

$$EC_{25} = EC_a * (0,477 + 1,69 * e^{\frac{T}{21,0}})$$

EC_{25} = elektrische Leitfähigkeit auf 25°C normiert EC_a = gemessene elektrische Leitfähigkeit
T = gemessene Bodentemperatur

Gleichung 2: EC_a - Temperaturkorrektur (Quelle: DURELSSER 1999)

DURLESSER (2006) gibt einen Temperatur - Gültigkeitsbereich für Gleichung 2 von 1°C bis 25°C an.

Korrekturformel nach SHEETS und HENDRICKX (1995)

$$EC_{25} = EC_a * (0,4470 + 1,4034 * e^{\frac{T}{26,815}})$$

EC_{25} = elektrische Leitfähigkeit auf 25°C normiert EC_a = gemessene elektrische Leitfähigkeit
T = gemessene Bodentemperatur

Gleichung 3: EC_a - Temperaturkorrektur (Quelle: SHEETS und HENDRICKX 1995 nach SLAVICH and PETERSON 1990)

Gleichung 3 beruht auf Daten aus der Tabelle 15 im U.S.D.A Agricultural Handbook 60 (1954) und umfasst einen Temperaturbereich von 3°C bis 47°C.

Abbildung 4 zeigt den Verlauf der (eigenen) gemessenen elektrischen Leitfähigkeit (ECa) und den Verlauf der temperaturkorrigierten elektrischen Leitfähigkeit (EC25). Korrigiert ist nach den drei Gleichungen der angegebenen Autoren. Die Korrektur nach DURLESSER weist im niedrigen Temperaturbereich eine etwas höhere korrigierte elektrische Leitfähigkeit auf als nach LÜCK bzw. SHEETS und HENDRICKX.

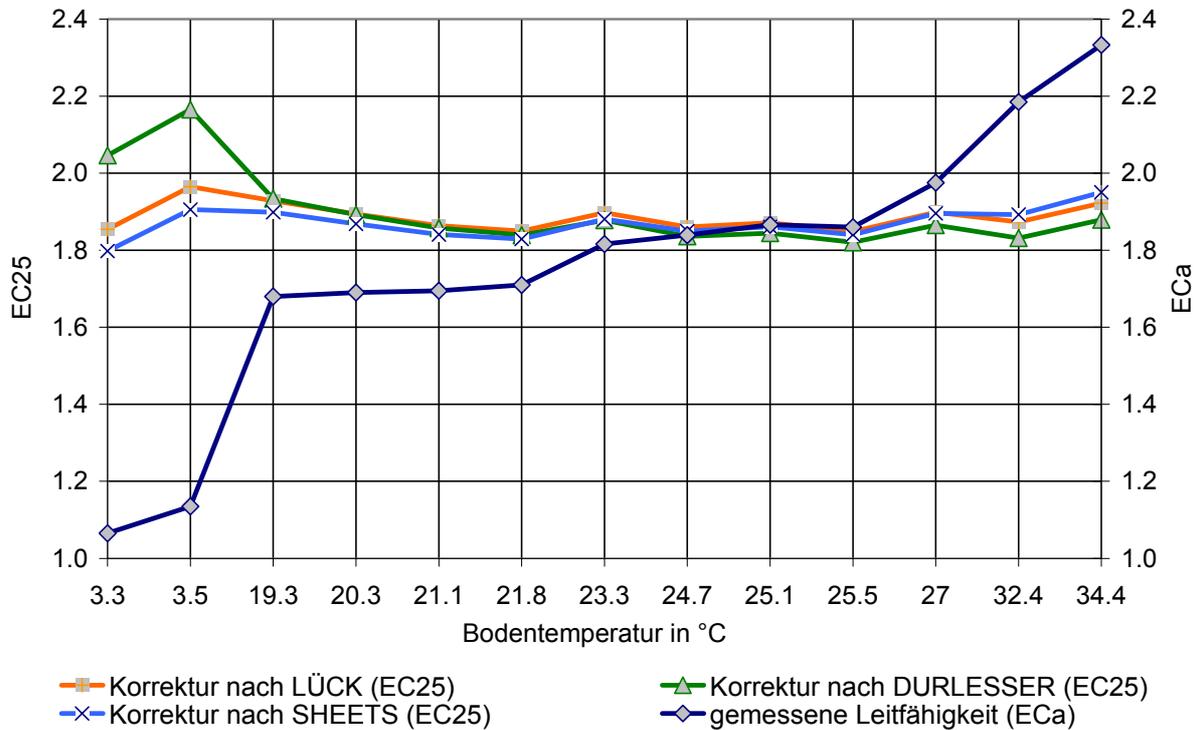


Abb. 4: Darstellung der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit (rechte y-Achse, ECa) mit ansteigender Bodentemperatur und die auf 25°C temperaturkorrigierte elektrische Leitfähigkeit (linke y-Achse, EC25), Korrekturformel nach den angegebenen Autoren

2.4. Beschreibung gängiger geoelektrischer Bodensensorsysteme

Durch den Einsatz von mobilen Bodensensorsystemen können räumliche Variabilitäten des Bodens innerhalb eines Felds schnell erfasst werden. Je nach Sensortyp besteht die Möglichkeit unterschiedliche Bodeneigenschaften zu erfassen. Tabelle 2 gibt einen Überblick, welche unterschiedliche Sensorsysteme bereits auf landwirtschaftlichen Flächen eingesetzt werden.

Tab. 2: Übersicht verschiedener Sensortypen zur Detektierung von Bodeneigenschaften (Quelle: nach ADAMCHUCK et al. 2004 ergänzt um DENKER et al. 2007, CHRISTY et al. 2006, LUND et al. 2005, SCHUTTE 2005)

Sensortypen	Suchgröße	Bemerkung
Elektrische und elektromagnetische	a, b, c, d, f, h, k	Kommerzielle Geräte verfügbar, weitere Geräte in der Testphase (ADAMCHUCK et al. 2004)
Optische und radiometrische	a, b, c, g, h, k	Kommerzielle Geräte verfügbar, weitere Geräte in der Testphase (ADAMCHUCK et al. 2004); Erfassung von Humusgehalt, Bodenfeuchte, Phosphor, pH-Wert (CHRISTY et al. 2006)
Mechanische	e, f	Überwiegende Gerätezahl in der Testphase (ADAMCHUCK et al. 2004); mobile Detektierung der Lagerungsdichte in 3 Tiefen in der Testphase (DENKER et al. 2007), Nutzung der Schlepperregelhydraulik möglich (SCHUTTE 2005, ADAMCHUCK et al. 2004)
Akkutische und pneumatische	a, e, f	Geräte in der Testphase (ADAMCHUCK et al. 2004)
Elektrochemische	d, g, h, i	Geräte in der Testphase (ADAMCHUCK et al. 2004); mobile Online-Boden-pH-Wert Messung (LUND et al. 2005)

a = Korngröße

b = organischer Kohlenstoffgehalt bzw. Humusgehalt

c = Bodenfeuchte

d = Salinität

e = Lagerungsdichte bzw. Durchdringungswiderstand des Bodens

f = Detektieren von Schichtungen

g = Boden pH-Wert

h = Stickstoffgehaltbestimmung im Boden

i = Hauptnährstoffe

k = Kationenaustauschkapazität und andere Pufferindikatoren

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt bei den elektrischen und elektromagnetischen Bodensensorsystemen. Entsprechend werden in diesem Kapitel ausgewählte mobile Bodensensorsysteme zur Messung der geoelektrischen Leitfähigkeit behandelt.

2.4.1. Gleichstrom-Geoelektrische Bodensensorsysteme

Häufig werden auf landwirtschaftlichen Flächen zur Erfassung der geoelektrischen Leitfähigkeit des Bodens mobile Gleichstrom-Bodensensorsysteme eingesetzt, wie z.B. VERIS3100 (von Veris Technologie/ USA) oder ARP03 (von Geocarta/ Paris). Beide Systeme arbeiten mit direktem Bodenkontakt (galvanische Ankopplung) und

dem Messprinzip der Vier-Punkt-Anordnung (oder auch Vierleitermessung genannt). Allgemein werden die beiden Systeme der Gleichstromgeoelektrik zugeordnet, wobei aber niedrige Frequenzen von 150 Hz (Veris3100) bzw. beim ARP03 von 225 Hz genutzt werden (GEBBERS und LÜCK 2006). Weitere technische Daten der Geräte sind im Anhang Tabelle 1 zu entnehmen.

Die Vierleitermessung wird genutzt, um Kontaktwiderstände der Elektroden zu eliminieren (MUNDRY 1985, KELLER und FRISCHKNECHT 1977). Kontaktwiderstände treten auf, wenn eine elektrische Ladung durch den Berührungspunkt von zwei unterschiedlichen Leiter transportiert wird (FROHNE et al. 2002), in diesem Fall zwischen den metallischen Elektroden und dem Boden. Dieses Problem wird durch die Verwendung von zwei Elektrodenpaaren (Vierleitermessung) vermieden (MILITZER et al. 1985, KELLER und FRISCHKNECHT 1977). Ein Elektrodenpaar dient als Stromzuführungselektroden (A,B) und das zweite Paar oder mehrere Paare als Messelektroden (M,N) (s. Abb. 5). Ein konstanter Strom (I) wird über das Stromzuführungselektrodenpaar in das Erdreich eingespeist. Mit dem Messelektrodenpaar wird die Spannung (ΔV), die im Boden herrscht, gemessen (s. Abb. 5). (GEBBERS und LÜCK 2006, BERKTOLD 1997, MILITZER et al. 1985, MUNDRY 1985, KELLER und FRISCHKNECHT 1977)

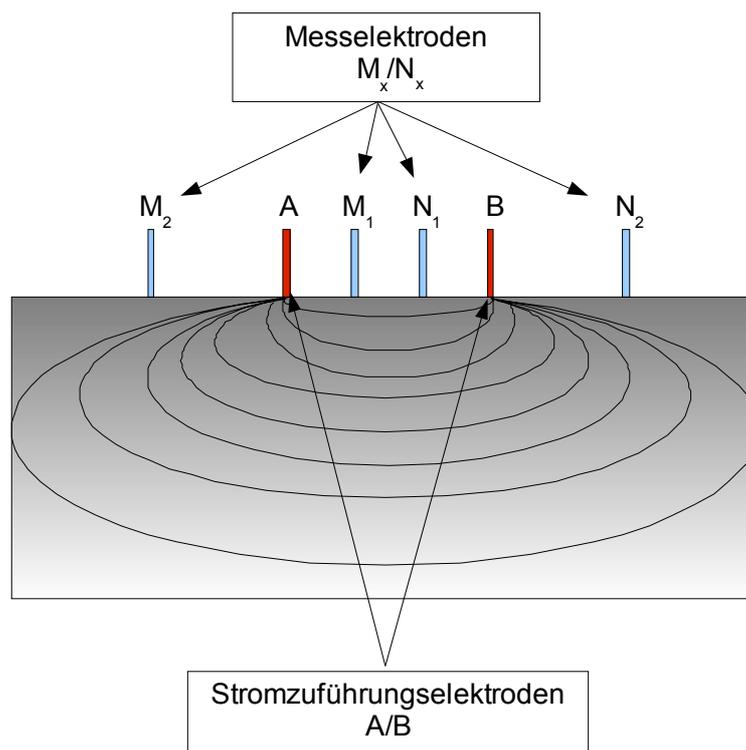


Abb. 5: Messaufbau einer geoelektrischen Vierleitermessung (Vier-Punkt-Anordnung) am Beispiel des Messsystems Veris3100, Anordnung der Elektroden: Stromzuführungselektroden (A, B) und Messelektroden M_1, N_1 (kleiner Elektrodenabstand) für eine Messung in der Tiefe 0 bis 30 cm und M_2, N_2 (großer Elektrodenabstand) für die Messtiefe 0 bis 90 cm (Quelle: GEBBERS und LÜCK 2006, verändert)

Unter Berücksichtigung des Konfigurationsfaktors (K), dieser ergibt sich aus der Anordnung der Stromzuführungs- und Messelektroden, kann der scheinbare spezifische elektrische Widerstand (ρ) im Boden nach Gleichung 4 berechnet werden.

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I_{AB}}$$

- ρ = scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand in Ohm-Meter (Ω/m)
 K = Geometriefaktor
 ΔV = Potentialdifferenz der Messelektroden (M,N)
 I_{AB} = Einspeisestrom zwischen den Stromzuführungselektroden (A,B)

Gleichung 4: Errechnung des scheinbaren elektrischen Widerstands in Ω/m , Messprinzip Gleichstrom-geoelektrik mit Vierleitermessung (Quelle: LANGE 2005, KELLER und FRISCHKNECHT 1977)

Der Kehrwert des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstands (ρ) ist die scheinbare spezifische elektrische Leitfähigkeit (σ) (s. Gleichung 5)

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

- σ = scheinbare spezifische elektrische Leitfähigkeit in S/m
 ρ = scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand in Ohm-Meter (Ω/m)

Gleichung 5: Kehrwert zur Errechnung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit in S/m

Bei der Bestimmung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstands bzw. der scheinbaren spezifischen elektrischen Leitfähigkeit liegt die Annahme zugrunde, dass das Messvolumen unterhalb der Elektroden ein homogener Halbraum ist. Als Halbraum wird generell all das verstanden, was unterhalb einer teilenden Ebene liegt. Die teilende Ebene sind in diesem Fall die Elektroden, so ist der darunter liegende Halbraum der Bodenraum unterhalb der Elektroden (GEBBERS und LÜCK 2006, LANGE 2005). Da diese Annahme bei Feldmessungen aufgrund eines inhomogenen Bodenkörpers mit teilweise horizontalen und/oder vertikalen Schichtungen nicht zu erwarten ist und somit der Stromfluss auch nicht ideal und modellhaft sein muss, wird vom scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstand bzw. scheinbarer spezifischer elektrischer Leitfähigkeit gesprochen (GEBBERS und LÜCK 2006). Der Begriff „spezifischer elektrischer Widerstand“ bzw. „spezifischer elektrischer Leitfähigkeit“ bezieht sich auf einen homogenen Halbraum (GEBBERS und LÜCK 2005, BERKTOLD 1997).

Eine Tiefenauflösung wird durch eine Veränderung der Elektrodenanordnung erreicht, da sich die Messtiefe mit zunehmendem Elektrodenabstand vergrößert (s. Abb. 5) (LANGE 2005, BERKTOLD 1997, MUNDY 1985).

Liegt ein homogener Halbraum vor, ergibt sich der spezifische elektrische Widerstand aus dem Unterboden unabhängig vom Elektrodenabstand (BERKTOLD 1997). Sind jedoch Schichtungen im Boden vorhanden, stimmt die genannte Gegebenheit nicht mehr (s.o.). Liegt z.B. eine elektrisch gut leitfähige Deckschicht über einem homogenen Halbraum, so muss der Elektrodenabstand größer sein als die Mächtigkeit der Deckschicht. Ansonsten würde der Strom zum größten Teil über die Deckschicht fließen und nicht durch den Unterboden (LÜCK et al. 2005,

BERKTOLD 1997, MUNDRY 1985). Ist der Elektrodenabstand entsprechend groß im Vergleich zur Mächtigkeit der genannten Deckschicht, fließt der Strom auch durch den tiefer liegenden Unterboden (BERKTOLD 1997).

Weiterhin werden die einzelnen Messwerte miteinander verrechnet, z.B. mit dem Inversionsverfahren. So ist es unter bestimmten Annahmen möglich, die entsprechenden scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände für die jeweilige Tiefe genauer darzustellen (BERKTOLD 1997). Weiterhin führt BERKTOLD (1997) an, dass bereits kleine (elektrisch gut leitfähige) Störkörper das Messergebnis beeinflussen. Neben der Größe des Störkörpers hat die räumliche Lage des Störkörpers zu den Elektroden ebenfalls einen bedeutenden Einfluss auf das Messergebnis.

2.4.2. Elektromagnetisches Bodensensorsystem EM38

Elektrische Leitfähigkeit

Ein weiteres sehr häufig eingesetztes Messsystem in der Landwirtschaft ist das EM38 der Firma Geonics Limited (Kanada). Es können die scheinbare spezifische elektrische Leitfähigkeit und die magnetische Suszeptibilität bestimmt werden. Das Messgerät arbeitet nach dem Messprinzip der elektromagnetischen Induktion und benötigt deshalb keinen direkten Bodenkontakt; es besteht eine induktive Ankopplung.

Durch Veränderung der Gerätelage ist die Messtiefe beeinflussbar. Eine vertikale Spulenachsenausrichtung führt zu einer größeren Messtiefe als eine horizontale Spulenachsenausrichtung. Der Messmodus „Vertikal“ beschreibt eine vertikale Ausrichtung der Spulen, d.h. das EM38 wird in aufrechter Gerätelage geführt. Im horizontalen Modus, hierzu wird das Gerät um 90° Grad im Uhrzeigersinn gekippt, ist die Messtiefe geringer (s. Abb 8). (DURLESSER 1999, McNeill 1980). Technische Daten des Geräts sind im Anhang Tab. 1 zu entnehmen.

Das Messprinzip beruht auf der elektromagnetischen Induktion. Eine Sendespule erzeugt ein (primäres) magnetisches Wechselfeld (H_p). Dadurch werden elektrische Wirbelströme im Boden induziert. Diese wiederum rufen ein sekundäres (schwächeres) magnetisches Wechselfeld (H_s) hervor. Eine Empfangsspule erfasst beide magnetischen Wechselfelder. Beide Felder werden anhand der Phasenverschiebung unterschieden. Der Anteil des empfangenen Gesamtfelds, der die gleiche Phasenlage wie das Primärfeld aufweist, wird als Realteil oder Inphase bezeichnet. Das sekundäre Feld ist im Vergleich zum primären Feld um eine Viertel Periodenlänge „verschoben“ (phasenversetzt), es wird als Imaginärteil, Outphase oder Quadrature bezeichnet. Die Verschiebung um eine Viertel Periodenlänge wird auch als eine Verschiebung um 90° bezeichnet. Diese Ausdrucksweise ergibt sich aus der in der Elektrotechnik üblichen Darstellung sinusförmiger Wechselgrößen als Zeiger. Somit kann im Empfängerteil das primäre vom sekundären elektromagnetischen Feld unterschieden werden. Durch Verrechnung wird das sekundäre elektromagnetische Feld des Bodens bestimmt. (s. Abb. 6) (SEIDEL 2005, McNEILL 1980, TN31, FRITSCH 1949)

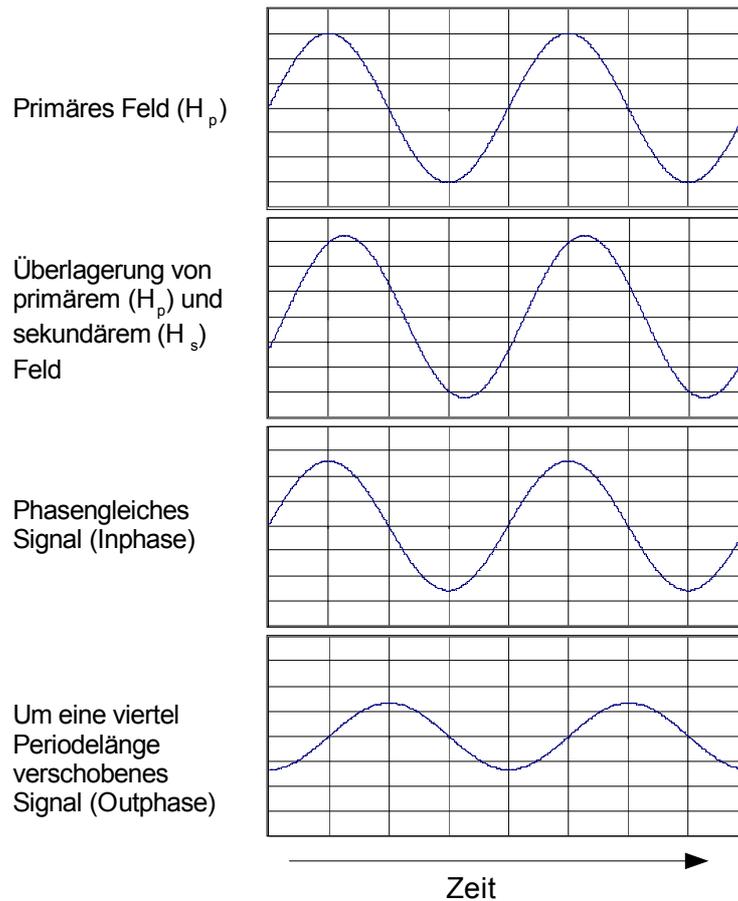


Abb. 6: Ermittlung des sekundären magnetischen Wechselfelds bei dem Messprinzip elektromagnetische Induktion (Quelle: GEBBERS und LÜCK 2006, verändert)

Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit wird nach Gleichung 6 berechnet:

$$\sigma = \frac{4}{\omega * \mu_0 * s_{ab}^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right)$$

σ = scheinbare elektrische Leitfähigkeit

ω = Kreisfrequenz, (= $2\pi f$)

μ_0 = Permeabilität im Vakuum

s_{ab} = Spulenabstand

H_p = magnetische Feldstärke des primären Magnetfeldes

H_s = magnetische Feldstärke des sekundären Magnetfeldes, um eine $\frac{1}{4}$ Periodenlänge verschobenes Wechselfeld

f = Messfrequenz

Gleichung 6: Berechnung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit, Messprinzip elektromagnetische Induktion (EM38) (Quelle: McNEIL 1980)

Das induzierte elektrische Wirbelstromfeld breitet sich radial um die Sendespule aus. Mit zunehmendem Abstand von der Spule vergrößert sich die Ausdehnung der Feldlinien, gleichzeitig nimmt die Feldstärke ab. (s. Abb. 7) (SEIDEL 2005, DZIEIA 2001, McNEILL 1980, TN31)

Sehr gut ist in Abb. 7 zu erkennen, dass das sekundäre Feld eine Funktion aus dem gesamten Messvolumen des Bodens unterhalb der Sendespule ist.

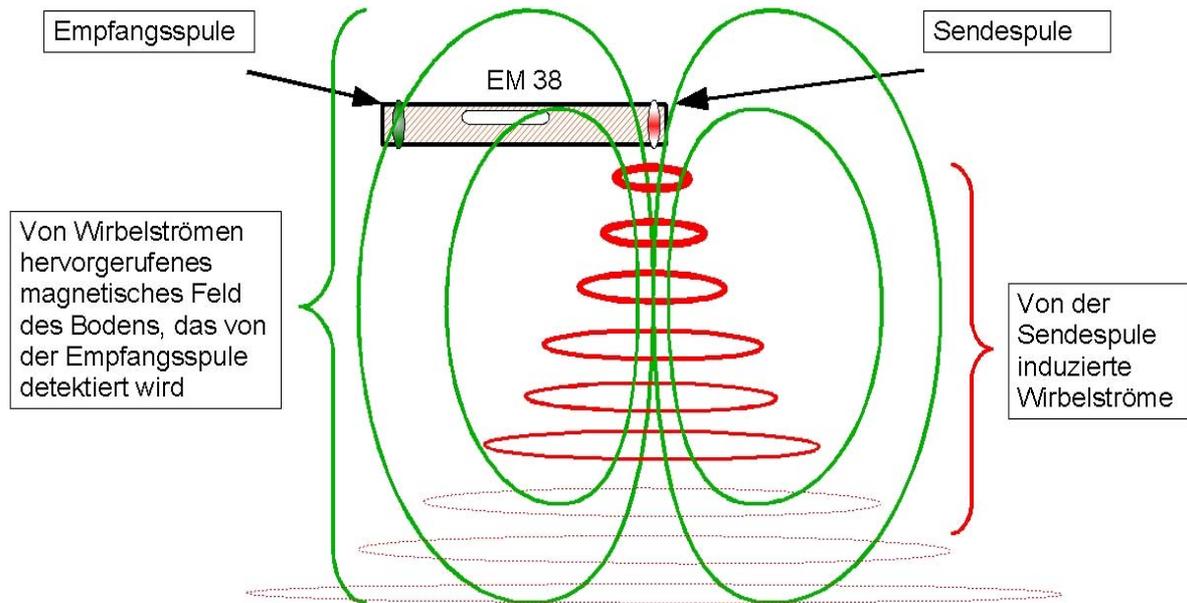


Abb. 7: Messprinzip des elektromagnetischen Messsystems EM38 der Firma Geonics

Abbildung 8 beschreibt den Kurvenverlauf der aufsummierten Messsignalanteile in Bezug auf die Messtiefe, normiert auf den Spulenabstand für den jeweiligen Messmodus. Auf der Y-Achse ist der kumulative Signalanteil ($R(z)$) aufgetragen und auf der X-Achse die Tiefe (z). Unter der Annahme eines homogenen Halbraumes beschreiben im horizontalen Modus 63% des Signalanteils eine Tiefe von 0 cm bis 60 cm, der verbleibende Rest zu 100% stammt aus einer Tiefe von mehr als 60 cm. Im vertikalen Modus stammen 36% des Signalanteils bis aus dieser Tiefe und 67% aus mehr als 60 cm Tiefe bzw. beschreiben 63% des Signalanteils eine Tiefe von bis zu 130 cm. Entsprechend sind es für diese Tiefe im horizontalen Modus 80% des Signalanteils. (McNEILL 1980)

Werden 95% des Signalanteils berücksichtigt, so werden im vertikalen Modus eine Tiefe bis zu 10 m und im horizontalen Modus eine Tiefe zu 5 m erfasst (GEBBERS und LÜCK 2006).

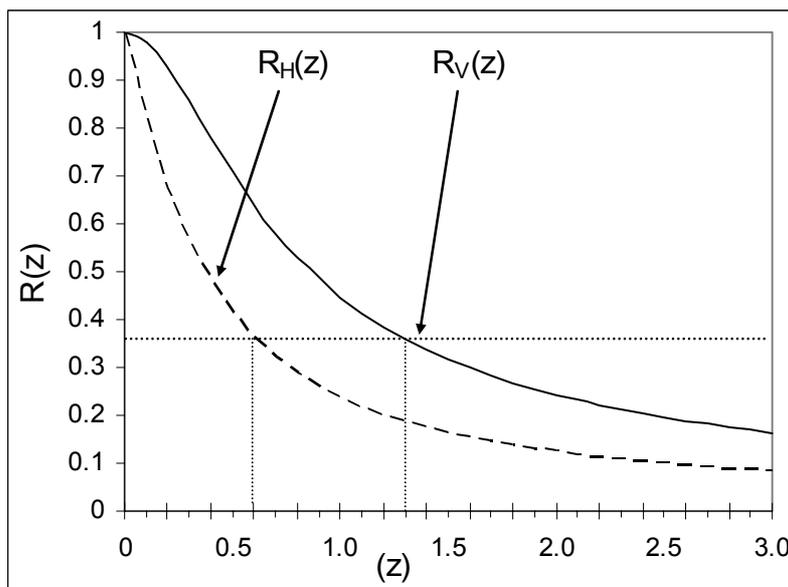


Abb. 8: Kumulativer Signalanteil ($R(z)$) der elektrischen Leitfähigkeit über die Messtiefe (z) bezogen auf den normierten Spulenabstand (EM38: 1 m) im vertikalen Modus ($R_V(z)$) und horizontalen Modus ($R_H(z)$), die eingezeichneten gestrichelten Linien kennzeichnen die entsprechende Tiefe bei einem Signalanteil von 63% für den jeweiligen Messmodus (Quelle: TN31)

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist die Messempfindlichkeitskurve zu beachten. Abbildung 9 zeigt den Verlauf der Messsensibilität im vertikalen und horizontalen Modus. Auf der Y-Achse ist die Messempfindlichkeit ($\Phi(z)$) und auf der X-Achse ist die Messtiefe, normiert auf den Spulenabstand, aufgetragen (z). Es zeigt sich, dass im vertikalen Modus ($\Phi_V(z)$) die Messempfindlichkeit in direkter Nähe der Spulen sehr gering ist, d.h. der Bereich direkt unter dem Gerät trägt nicht zum Messergebnis bei (TN31). Dies ergibt sich aus der Ausrichtung des sekundären magnetischen Feldes, das von den Wirbelströmen in der obersten Bodenschicht hervorgerufen wird. An der Empfangsspule des EM38 heben sich die vertikalen Komponenten des sekundären Magnetfeldes, das nahe der Sendespule erzeugt wird und des sekundären Magnetfeldes, das fern der Sendespule erzeugt wird, in der obersten Bodenschicht gegenseitig auf (EMEIS 2007a, TN31). Die höchste Messempfindlichkeit liegt bei ca. 40 cm bis 50 cm unterhalb der Spule. Ab dieser Tiefe nimmt die Empfindlichkeit kontinuierlich ab. Im horizontalen Modus ($\Phi_H(z)$) ist dagegen die Messempfindlichkeit direkt unter dem Gerät am höchsten und nimmt mit zunehmender Messtiefe überproportional ab.

Ebenfalls führen bereits kleine (elektrisch gut leitfähige) Störkörper (z.B. metallische Gegenstände) zu einer Störung der Messung. Neben der Größe des Störkörpers, haben die Geräteposition und die örtliche Lage des Störkörpers zum Gerät einen Einfluss auf das Messergebnis. Als weitere Störgrößen sind elektrische Versorgungsleitungen, industrielle Anlagen (z.B. Sendeanlagen) oder atmosphärische Störungen angeführt (GEONICS 2005). Wird das EM38 per Fahrzeug bewegt, ist auf einen Mindestabstand zwischen EM38 und Fahrzeug zu achten. GEBBERS und LÜCK (2006) geben hierzu 4 Meter an.

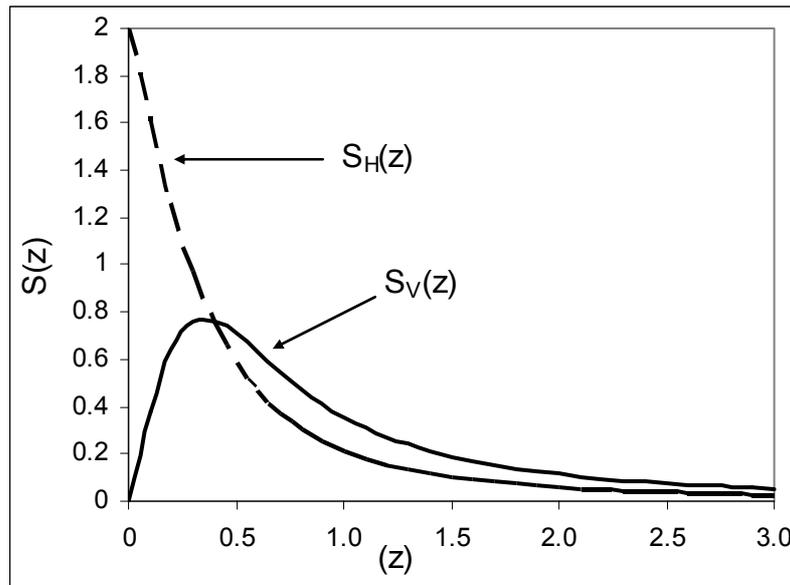


Abb. 9: Relativer Signalanteil bezogen auf die jeweilige Messtiefe (z) bezogen auf den normierten Spulenabstand (EM38: 1 m) im vertikalen Modus ($\Phi_V(z)$) und horizontalen Modus ($\Phi_H(z)$) (Quelle: TN31)

Magnetische Suszeptibilität

Die magnetische Suszeptibilität beschreibt die Änderung der magnetischen Feldstärke durch das Einbringen eines Materials mit besonderen magnetischen Eigenschaften in ein (elektro-)magnetisches Feld. Je nach Materialeigenschaft wird das magnetische Feld abgeschwächt oder verstärkt. (DZIEIA 2001)

Elektrische und magnetische Felder haben unterschiedliche Auswirkungen auf Materialien. Wird ein elektrisches Feld an ein Material mit polaren und unpolaren Molekülen angelegt, richten sich die als elektrische Dipole auffassbaren Moleküle entsprechend dem elektrischen Feld aus. Die unpolaren Moleküle erfahren durch die Verschiebungspolarisation einen induzierten Dipol und richten sich ebenfalls aus. Polare Moleküle (Dipole) richten sich anhand ihrer Ladungsverteilung entsprechend der elektrischen Feldlinien aus, dieser Vorgang wird Orientierungspolarisation genannt. (TIPLER 2000)

In einem magnetischen Feld ist die Ausrichtung der magnetischen Dipole entsprechend zum magnetischen Feld (TIPLER 2000). Erklären lässt sich dieses dadurch, dass Atome magnetische Dipolmomente besitzen. Hervorgerufen werden diese magnetischen Dipolmomente durch die sich um den Kern bewegenden Elektronen und außerdem durch die Eigenrotation der Elektronen, den so genannten Spin (die um sich selbst drehenden Elektronen). (TIPLER 2000, PREGLA 1998)

Jedes Material kann einer Kategorie zugeordnet werden. Die Zuordnung zur Kategorie erfolgt anhand des Verhaltens der Moleküle des Materials im magnetischen Feld. So lassen sich Materialien in:

- diamagnetische (z.B. Bismut, Zinnoxid),
- paramagnetische (z.B. Aluminium, Uran),
- ferromagnetische (z.B. Eisen, Kobalt, Nickel) und
- ferrimagnetische sowie antiferromagnetische einteilen. (TIPLER 2000)

Der Einfluss von Diamagnetismus, Paramagnetismus und Antiferromagnetismus ist gering auf die Feldstärke des Magnetfelds des EM38. Um im Feld mit dem Messgerät EM38 diese Effekte zu erfassen, müssten die entsprechenden Materialien in großer Menge vorliegen (PREGLA 1998, SCHÖN 1983). Dies ist auf den meisten landwirtschaftlich genutzten Flächen unwahrscheinlich. Anders ist das Messverhalten der ferromagnetischen Stoffe, diese lassen sich auch im Feld mit dem EM38 erfassen. Ferrimagnetische Materialien verhalten sich im Wesentlichen wie ferromagnetische Stoffe, aber deren Wirkung ist auf ein magnetisches Feld geringer (SCHÖN 1983).

Ferromagnetismus

Zu den ferromagnetischen Materialien zählen z.B. Eisen, Kobalt, Nickel. Diese Materialien weisen bereits ohne ein von Außen einwirkendes magnetisches Feld magnetische Momente auf. Allerdings ist diese Ausrichtung auf kleine Bereiche, die so genannten „Weißsche Bezirke“ begrenzt. Innerhalb der „Weißsche Bezirke“ sind die magnetischen Momente parallel ausgerichtet. Die „Weißschen Bezirke“ zueinander sind nicht ausgerichtet. Aus diesem Grund ist das magnetische Moment insgesamt sehr gering oder neutral. Wirkt ein äußeres Magnetfeld auf ein ferromagnetisches Material, werden zum einem die Grenzen der Bezirke verändert und zum anderen richten sich die magnetischen Momente entsprechend der magnetischen Feldlinien aus. Mit steigender magnetischer Feldstärke steigt der Grad der Ausrichtung, bis letztendlich alle Momente ausgerichtet sind (Sättigungswert). Ist der Sättigungswert des Materials erreicht, steigt die Magnetisierbarkeit nicht mehr an. Der Verlauf ergibt den charakteristischen Hysterese-Kurvenverlauf. Sind die magnetischen Momente der „Weißschen Bezirke“ entsprechend einem äußeren Magnetfeld orientiert, so behalten diese nach dem Abschalten des äußeren Magnetfelds die Ausrichtung teilweise bei. Dieser Effekt wird Hysterese genannt. (TIPLER 2000, PREGLA 1998)

Ferromagnetismus unterscheidet sich gegenüber Paramagnetismus dadurch, dass:

- die Suszeptibilität einige Zehnerpotenzen höher ist,
- die Suszeptibilität einen charakteristischen Hysterese-Kurvenverlauf aufweist,
- ein Hysterese-Effekt nach Abschalten des Magnetfelds vorliegt und
- die Magnetisierung einem Maximalwert zustrebt.

(TIPLER 2000, PREGLA 1998, SCHÖN 1983)

Messung der magnetischen Suszeptibilität

Die Suszeptibilität (κ) des Bodens kann mit dem Messgerät EM38 erfasst werden. Im Handbuch wird im vertikalen Messmodus eine Messtiefe von einem halben Meter angegeben. (GENONICS 2005)

Die Berechnung der Suszeptibilität (κ) erfolgt nach Gleichung 7:

$$\kappa = 58 * 10^{-6} * \Delta\sigma_a$$

κ = Suszeptibilität

$\Delta\sigma_a$ = Differenz scheinbare elektrische Leitfähigkeit zwischen Messgerät (EM38) auf dem Boden und Messgerät in 1,5m Höhe

Gleichung 7: Berechnung der Suszeptibilität, Messgerät EM38 (Quelle: GENONICS 2005)

Messtiefe und Messempfindlich sind ebenfalls spulenlageabhängig. Im horizontalen und vertikalen Messmodus ist die Messempfindlichkeit direkt unter dem Gerät nahe Null. Im horizontalen Modus nimmt die Empfindlichkeit bis zu einer Messtiefe von 70 cm zu und nimmt dann wieder ab. Im vertikalen Modus ist der Verlauf der Empfindlichkeitskurve eher entgegengesetzt; bis zu einer Tiefe von ca. 40 cm nimmt die Empfindlichkeit ab und steigt dann wieder an. (s. Abb. 10)

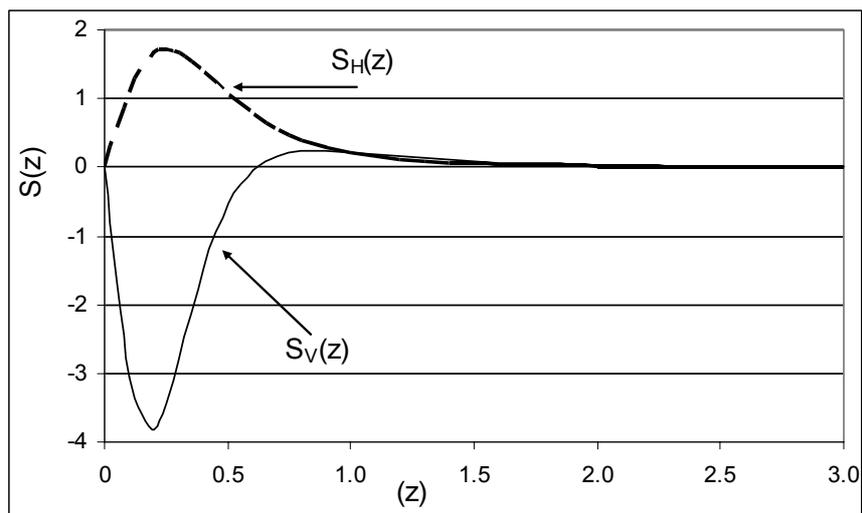


Abb. 10: Relativer Signalanteil bezogen auf die jeweilige Messtiefe (z) bezogen auf den normierten Spulenabstand (EM38: 1 m) im vertikalen Modus ($S_V(z)$) und horizontalen Modus ($S_H(z)$) (Quelle: TN31)

Im horizontalen Messmodus beschreiben 63% des Signalanteils eine Tiefe von 0 cm bis 40 cm und im vertikalen Modus beschreiben ca. 80% des Signalanteils eine Tiefe von ca. 60 cm. (s. Abb. 11)

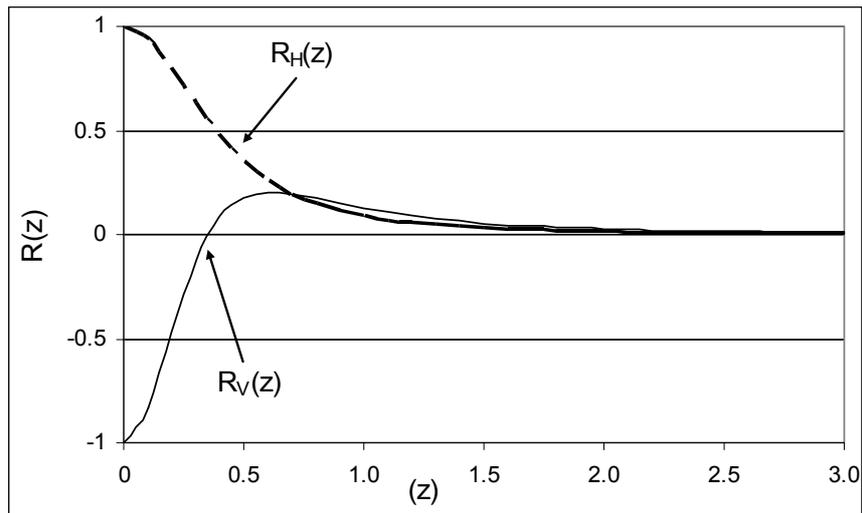


Abb. 11: Kumulativer Signalanteil ($R(z)$) der Suszeptibilität über die Messtiefe (z) bezogen auf den normierten Spulenabstand (EM38: 1 m) im vertikalen Modus ($R_V(z)$) und horizontalen Modus ($R_H(z)$) (Quelle: TN31)

2.5. Bodenaufnahme

2.5.1. Bodenkundliche Kartierung

Eine bodenkundliche Kartierung hat zur Aufgabe, eine Bewertung zur Eignung eines (natürlichen) Standorts hinsichtlich seiner zukünftigen Nutzung abzugeben (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Dies kann z.B. die Nutzung für die Primärproduktion (Ackerbau, Grünlandnutzung, Sonderkulturen, Forstwirtschaft und sonstige Nutzung) oder die Nutzung als Baugrundstück etc. umfassen.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der bodenkundlichen Kartierung von landwirtschaftlichen Flächen, insbesondere von Ackerflächen. Flächendeckend liegen in der Bundesrepublik Deutschland die Daten der Bodenschätzung (s. Kap. 2.2) vor. Eine weitere verbindliche Norm ist die „Bodenkundliche Kartieranleitung“ (KA5) (AG Boden 2005). Beide Normen unterscheiden sich voneinander, als Beispiel seien die Beschreibung der Bodenarten oder die Ausweisung von Bodentypen der KA5 angeführt.

2.5.2. Geoelektrische Kartierung

Die Nutzung der geoelektrischen Kartierung als Vorbereitung einer bodenkundlichen Kartierung von landwirtschaftlichen Nutzflächen ist erst seit wenigen Jahren in der Anwendung. Die Nutzung einer Feldkarte, die auf Grundlage einer oder mehrerer geoelektrischen Kartierungen beruht, hat für den Landwirt oder Bodenkundler den Vorteil, dass er sich anhand dieser Informationen orientieren kann. Die Fläche kann z.B. anhand der elektrischen Leitfähigkeit in Teilflächen eingeteilt werden. Diese können gezielt beprobt und kartiert werden. Somit entfällt die ansonsten übliche Rasterkartierung, wodurch sich der Aufwand zur Erstellung einer hoch aufgelösten

Bodenkarte reduziert. (HINCK et al. 2008, BOESS 2007)

Auch ROBERT (1993) erwähnt die Möglichkeit durch den Einsatz von Sensortechnik, Ertragskarten und/oder Luftbildern Informationen über die unterschiedlichen Bodeneigenschaften eines Ackers zu sammeln und so Teilflächen abzugrenzen. Voraussetzung ist, dass reproduzierbare Zusammenhänge zwischen dem Messwert und der Suchgröße bestehen. Eine entscheidende Suchgröße für die Bodenkartierung ist die Korngröße. Tabelle 2 im Anhang zeigt die Messergebnisse verschiedener Autoren. Es sind die Zusammenhänge der elektrischen Leitfähigkeit zu den drei Korngrößen Ton, Schluff und Sand sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt der untersuchten Böden aufgeführt.

Es zeigt sich ein positiver Zusammenhang zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und der Korngröße Ton, allerdings ist die Stärke der Korrelation unterschiedlich stark ausgeprägt. Insgesamt kommen mehrere der ausgewählten Autoren (s. Anhang Tab. 2) zu der Feststellung, dass der Tongehalt die entscheidende Einflussgröße für die elektrische Leitfähigkeit ist (z.B. HEINIGER et al. 2003, MUELLER et al. 2003, SUDDUTH et al. 2003, DURLESSER 1999).

Zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und der Korngröße Schluff besteht überwiegend ein negativer Zusammenhang (s. Anhang Tab. 2, z.B. JUNG et al. 2005, MUELLER et al. 2003, SUDDUTH et al. 2003, JOHNSON et al. 2001), doch zeigen einige Autoren auch einen positiven Zusammenhang auf (s. Anhang Tab. 2, z.B. HEINIGER et al. 2003, PERRON et al. 2002, BANTON et al. 1997). Auch schwankt die Stärke der Korrelation von sehr gering bis hoch.

Zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und der Korngröße Sand geben die im Anhang in Tabelle 2 aufgeführten Autoren einen negativen Zusammenhang an. Wobei MUELLER et al. (2003) allerdings neben einer negativen Korrelation auch eine positive Korrelation angeben. (s. Anhang Tab. 2)

PERRON et al. (2002) geben zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und dem organischen Kohlenstoffgehalt einen sehr geringen Zusammenhang, JUNG et al. (2005) eine geringe bis mittlere positive Korrelation und BANTON et al. (1997) einen mittleren und positiven Zusammenhang an. JOHNSON et al. (2001) weisen dagegen eine mittlere und negative Korrelation aus. (s. Anhang Tab. 2)

DOMSCH und GIEBEL (2004) verbessern die Korrelation zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Tongehalt dadurch, dass sie den Schluffgehalt in die Regression mit einbeziehen. MUELLER et al. (2003) erklären die teilweise schwachen Korrelationen zwischen elektrischer Leitfähigkeit und der Korngröße Ton, die speziell für eine untersuchte Fläche ermittelt wurden, mit der geringen Variation der Korngröße Ton auf dieser Fläche. SUDDUTH et al. (2003) geben ebenfalls an, dass bei höherem Tongehalt mit hoher Variation die Korrelation ausgeprägter ist als bei niedrigen Tongehalten mit geringer Variation. Weiterhin verweisen MUELLER et al. (2003) auf den Umstand, dass die Entnahmetiefe der Bodenproben der geoelektrischen Untersuchungstiefe entsprechen soll. Dieses zeigen auch die Untersuchungen von JUNG et al. (2005); Ergebnisse der Bodenuntersuchung aus den Tiefen 0 cm bis 7,5 cm und 7,5 cm bis 15 cm weisen teilweise deutlich schwächere Zusammenhänge auf als die Ergebnisse aus der Tiefe 15 cm bis 30 cm. DOOLITTLE et al. (2002) geben als zusätzlichen Hinweis an, dass die Entnahmetiefe

der Bodenprobe der Messempfindlichkeitskurve der jeweiligen Messtechnik angepasst sein soll. Ebenso zeigen die Ergebnisse von SUDDUTH et al. (2003) einen stärkeren Zusammenhang zwischen der Korngröße Ton und elektrischer Leitfähigkeit bei Berücksichtigung der Messempfindlichkeitskurve des EM38. Bei der Berechnung der Korrelation zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Tongehalt, wird der Tongehalt entsprechend der Messempfindlichkeitskurve für die jeweilige Tiefe gemittelt. Damit ergibt sich ein stärkerer Zusammenhang als bei Berechnung der Korrelation mit dem durchschnittlichem Tongehalt über die gesamte Bodenprobeentnahmetiefe von 0 cm bis 120 cm. Die Abhängigkeit zwischen Messempfindlichkeitskurve und Tiefe der Bodenprobeentnahme wird auch beim Bodensensorsystem Veris3100 deutlich. So ist die Korrelation zwischen dem Tongehalt im Oberboden und der elektrischen Leitfähigkeit, für die Elektrodenanordnung der flachen Messung stärker ausgeprägt als für die tiefe Messung. (SUDDUTH et al. 2003).

DURLESSER (1999) weist anhand seiner umfangreichen Untersuchungen hohe Korrelationen zwischen dem Tongehalt und der elektrischen Leitfähigkeit (EM38) eines Bodens nach. So kann DURELESSER 51% der Variation des elektrischen Leitwerts anhand des Tongehalts bei Feldmessungen erklären.

MUELLER et al. (2003) berichten bei wiederholten Messungen auf derselben Fläche mit dem Messgerät Veris3100 überwiegend von mittleren bis hohen Korrelationen für die einzelnen Messtermine untereinander. SUDDUTH et al. (2001) verweisen bei wiederholter Messung auf derselben Fläche mit dem EM38 auf hohe bis sehr hohe Korrelationen für die einzelnen Messtermine. SUDDUTH et al. (2002) haben die Messergebnisse Veris flach und Veris tief sowie die Messergebnisse EM38 im vertikalen Modus miteinander verglichen. Die Messergebnisse Veris flach zu Veris tief weisen hohe bis sehr hohe Korrelationen auf. Ähnlich hohe bis sehr hohe Zusammenhänge konnten sie auch für Veris tief und EM38 im vertikalen Modus aufweisen, dagegen weisen die Korrelationen für Veris flach und EM38 im vertikalen Modus überwiegend mittlere bis hohe Korrelationen auf (SUDDUTH et al. 2002).

Neben der Bodenart sind vor allem die Bodenfeuchte, Nährstoffgehalte und die Bodentemperatur weitere Einflussfaktoren auf die elektrische Leitfähigkeit des Bodens. Die elektrolytische Leitfähigkeit ist eine Funktion, die größtenteils von den gelösten Nährsalzen in der Bodenlösung bestimmt wird (s. Kap. 2.3.1.). So untersuchten verschiedene Autoren den Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte bzw. Kationenaustauschkapazität (KAK) und elektrischer Leitfähigkeit. MUELLER et al. (2003) ermitteln sehr differenzierte Zusammenhänge zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Bodenfeuchte; sie weisen sowohl negative als auch positive Korrelationen mit unterschiedlicher Stärke aus. Die Beziehung zwischen KAK und elektrischer Leitfähigkeit wird von gering bis hoch und positiv beschrieben (MUELLER et al. 2003). HEINIGER et al. (2003) präsentieren in ihrer Arbeit Zusammenhänge zwischen KAK und elektrischer Leitfähigkeit von sehr geringen und negativen bis hin zu mittleren und positiven Korrelationen. SUDDUTH et al. (2003) wiederum geben mittlere bis hohe und positive Korrelationen zwischen KAK und elektrischer Leitfähigkeit an.

CORWIN et al. (2003) zeigen eine hohe positive Korrelation zwischen Bodenfeuchte und elektrischer Leitfähigkeit. Dagegen geben JOHNSON et al. (2001) einen

negativen und geringen Korrelationskoeffizienten zwischen Bodenfeuchte und elektrischer Leitfähigkeit an. Beide Autoren nutzten das Messsystem Veris3100. DURLESSER (1999) setzt das EM38 ein und weist auf einen hohen Zusammenhang zwischen Messwert und Bodenfeuchte hin. Ebenfalls zeigen MAIER et al. (2006) durch den Einsatz EM38 eine Beziehung zwischen Bodenfeuchte und elektrischer Leitfähigkeit. Weiterhin kommen MAIER et al. (2006) zu dem Ergebnis, dass der Bodenwassergehalt im Feld nicht mit der Messung der magnetischen Suszeptibilität abgeschätzt werden kann. BANTON et al. (1997) vergleichen zwei Messungen einer Fläche in einem „trocken“ und „nassen“ Bodenzustand, ohne die Bodenfeuchte explizit zu ermitteln und kommen zu dem Ergebnis, dass sich zwar die absolute Höhe der Messwerte ändern kann aber deren räumliche Verteilung annähernd gleich bleibt.

Wird die Bodentemperatur mit der elektrischen Leitfähigkeit eines Bodens verglichen, sind in der Literatur verschiedene Angaben zu finden. MUELLER et al. (2003) weisen geringe negative bis geringe positive Zusammenhänge aus. DURLESSER (1999) zeigt sehr deutlich den direkten Zusammenhang zwischen Bodentemperatur und elektrischer Leitfähigkeit, welcher mit Hilfe von Bodenproben im Labor gemessen wurde. BREVIK et al. (2004) kommen zu dem Ergebnis, dass der tägliche Temperaturgang des Bodens nicht die elektrische Leitfähigkeitsmessung des EM38 für den Messtag beeinflusst. SUDDUTH et al. (2001) geben an, dass die Lufttemperatur bzw. die Erwärmung des Messgeräts EM38 den Messvorgang deutlich beeinflussen. Diese Gegebenheit konnten ebenfalls RONBINSON et al. (2004) im Labor simulieren und ebenso bei Feldmessungen nachweisen. Zur Minimierung dieses Umgebungstemperatureinflusses wird auf eine korrekte Vorgehensweise bei der Gerätekalibrierung mit betriebswarmen Messgerät verwiesen, weiterhin sollte sich das EM38 bei der Feldmessung nicht auf über 40°C erwärmen (ROBINSON et al. 2004). SUDDUTH et al. (2002) vermerken, dass für das Messsystem Veris3100 keine Temperaturdriftkorrektur notwendig sei. Auch MUELLER et al. (2003) stellen keine signifikanten Messwertschwankungen bei einer stationären Messung mit dem Messsystem Veris3100 fest. Ebenso wird bei der dynamischen Feldmessung im weichen und feuchten Boden bei Schwankungen der Eindringtiefe der Rollschare nur ein geringer Messfehler verursachen, insbesondere für die große Messtiefe (MUELLER et al. 2003).

Weiter haben mehrere Autoren die Zusammenhänge zwischen Ertrag und der elektrischen Leitfähigkeit bzw. zwischen Ertrag und Tongehalt untersucht. DABAS et al. (2002) können einen positiven Zusammenhang zwischen der Höhe des elektrischen Leitwerts und der Ertragshöhe aufweisen, dagegen kommen PERRON et al. (2002) zu negativen Zusammenhängen. JUNG et al. (2005) zeigen, dass die Zusammenhänge für Ertrag und elektrischer Leitfähigkeit sich Jahr für Jahr ändern. Es schwankt neben der Stärke des Zusammenhangs auch das Vorzeichen. JUNG et al. (2005) erklären das wechselnde Vorzeichen mit dem Witterungsverlauf zwischen Saat und Ernte. Ebenfalls unterschiedlich stark ausgeprägte Zusammenhänge zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Ertrag haben RAUPENSTRAUCH et al. (2002) in ihrer Arbeit aufgeführt. KITCHEN et al. (2003) zeigen, dass mit Hilfe einer aufwändigen Analyse ein hoher Zusammenhang zwischen elektrischer

Leitfähigkeit und Ertrag hergestellt werden kann.

Bei einem Vergleich von Tongehalt und Ertrag zeigt sich ein ebenso indifferenter Zusammenhang wie zuvor bei elektrischer Leitfähigkeit und Ertrag beschrieben. CORWIN et al. (2003) zeigen einen mittleren positiven Zusammenhang zwischen Tongehalt und Ertrag; PERRON et al. (2002) dagegen einen mittleren negativen Zusammenhang. MAIDL et al. (1999) geben in ihrer Arbeit Hinweise, dass der Ertrag mit sinkenden Sandgehalt steigt aber bei sehr niedrigem Sandgehalt wieder abnimmt. JUNG et al. (2005) kommen (ähnlich wie beim Zusammenhang der elektrischen Leitfähigkeit und Ertrag) zu dem Ergebnis, dass der Witterungsverlauf für die Ertragsbildung ein wichtiger Faktor sei. Weiter kommen JUNG et al. (2005) zu der Feststellung, dass die elektrische Leitfähigkeit mit den Bodeneigenschaften korreliert, einschließlich derer die den Ertrag bestimmen. Das jährliche Ertragsniveau hängt allerdings sehr vom Witterungsverlauf ab. Es wird der Hinweis gegeben, dass die Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens genutzt werden kann, um Bodeneigenschaften der untersuchten Fläche abzuschätzen (JUNG et al. 2005). Ebenso empfehlen HEINIGER et al. (2003) die Messwerte der elektrischen Leitfähigkeit zu nutzen, um Managementzonen innerhalb einer Fläche abzugrenzen und so den Düngemiteleinsatz zu optimieren. SCHWARK und RECKLEBEN (2006) haben anhand der elektrischen Leitfähigkeit (EM38 Einsatz) und dem Ertrag Teilflächen abgegrenzt und Maßnahmen sowie Applikationsmengen entsprechend variiert. CORWIN et al. (2003) und JOHNSON et al. (2001) nutzen die EC_a - Feldkarte, um gezielt Bodenproben auf abgegrenzten Teilflächen zu entnehmen. RAUPENSTRAUCH et al. (2002) haben die elektrischen Leitfähigkeitswerte des EM38 mit der Bodenzahl der Bodenschätzung verglichen; die Zusammenhänge sind (mit keinem bis hohem Zusammenhang) sehr indifferenter. SCHWARK und RECKLEBEN (2006) kommen auf eine mittlere Korrelation bei einem Vergleich von Ackerzahl und elektrischer Leitfähigkeit.

Mehrere Autoren präsentieren in ihren Arbeiten weitere Anwendungsmöglichkeiten der geoelektrischen Messungen. HEZARJARIBI und SOURELL (2007) optimierten mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit den Einsatz von Beregnungsanlagen; KRAVCHENKO et al. (2002) optimierten den Lageplan für die Drainage. Mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit können Teilflächen mit einer unterschiedlichen Leitfähigkeit innerhalb einer Fläche abgegrenzt, gezielt zur Bodenprobeentnahme aufgesucht und beprobt werden (HINCK et al. 2008, HINCK et al. 2006, DOMSCH 2004, CORWIN et al. 2003, JOHNSON et al. 2001). ANDERSON-COOK et al. (2002) bestimmen in ihrer Arbeit in einem sehr hohen Maße den Bodentyp durch kombinierte Verrechnung von elektrischer Leitfähigkeit und Ertrag. SUDDUTH et al. (2003) und MUELLER et al. (2003) führen Ergebnisse zur Ermittlung der Tiefe eines tonreichen Horizonts bzw. die Tiefe des Ausgangsgesteins an.

3. Material und Methode

3.1. Charakterisierung des Untersuchungsgebiets

Die geoelektrischen Messsysteme kamen auf zwei sehr heterogenen Ackerflächen der Versuchsbetriebe der Fachhochschule Osnabrück zum Einsatz. Die beiden Ackerflächen befinden sich im Osnabrücker Bergland.

Das Osnabrücker Bergland gehört zu den südniedersächsischen Mittelgebirgslandschaften, dessen westlicher Ausläufer spornartig in die norddeutsche Tiefebene ragt (MUELLER 2000). Begrenzt wird das Osnabrücker Bergland im Süden durch den Teutoburger Wald und im Norden durch das Wiehengebirge. Die westliche Ausdehnung bildet der Schafsberg und im Osten grenzt es an die Meller Berge (KLASSEN 1984). Das Ausgangsmaterial baut sich mehrheitlich aus Sedimentgesteinen aus dem Mesozoikum (Trias, Jura und Kreide) auf, vereinzelt treten ältere Schichtungen aus dem Paläozoikum (z.B. der Piesberg) zutage. Nach der Entstehung des Variskischen Gebirges, das sich vor ca. 245 Mio. Jahren auffaltete, senkte sich das Gebiet wieder und war im Mesozoikum überflutet. So hat sich während dieses Erdzeitalters eine 3000 Meter mächtige Sedimentschicht der Perioden Trias, Jura und Kreide abgesetzt. Vor ca. 65 Mio. Jahren hob sich das Gebiet erneut durch tektonische Bewegungen. Die Sedimente wurden dadurch auf engstem Raum aufgestellt; im südlichen Osnabrücker Bergland (Teutoburger Wald) sind die Sedimente steiler aufgestellt als im nördlichen Teil (Wiehengebirge), wo diese flacher verlaufen. (MUELLER 2000, KLASSEN 1984)

Das heutige Landschaftsbild ist also ein Ergebnis einer komplizierten Folge von tektonischen Vorgängen: Brüche, Verbiegungen, Heraushebungen und Überschiebungen bildeten und formten die Landschaftselemente, die später während des Drenthe-Stadiums der Saale-Kaltzeit teilweise vom Eis überdeckt wurden. Dadurch wurden geringmächtige Geschiebedeckschichten abgesetzt, die anschließend in die oberen Gesteinsverwitterungsdecken eingearbeitet wurden. Periglaziale Abläufe, insbesondere der Weichsel-Kaltzeit, führten zu Lössanwehungen und anschließend zu abluale sowie solifluidalen Ab- und Auftragsprozessen. (MUELLER 2000)

Die beiden Untersuchungsflächen sind im Vorfeld des Forschungsschwerpunktes PIROL kleinräumig bodenkundlich kartiert worden (SCHRÖTKE 2001). Die Fläche „Im Berge“ ist dem landwirtschaftlichen Versuchsbetrieb „Waldhof“ und die Fläche „Wellenkamp“ ist dem Betrieb „Nettehof“ zu zuordnen. Das Untersuchungsgebiet weist ein gemäßigttes und maritim beeinflusstes Klima auf (s. Anhang Abb. 57).

3.2. Geologie der Untersuchungsflächen

3.2.1. Im Berge

Die Fläche „Im Berge“ (Flächengröße: 2,4 ha) besteht zum Hauptteil aus Grundmoränenmaterial (Geschiebelehm über Geschiebedecksand, aus dem Drenthe-Stadium der Saale-Kaltzeit). Im Norden der Fläche sind drei schmale kalkhaltige Schichten aus der Periode des Trias und eine Schichtung aus dem Keuper zu finden. Die

Schichtung im äußersten Nordosten setzt sich aus Kalk- und Mergelstein zusammen. Nach Südwesten folgt eine Schichtung aus Kalkstein und zum Teil aus Schillkalk. Beide Schichten stammen aus dem oberen Muschelkalk. Die Schichtung aus der Mitte der Fläche nach Nordwesten verlaufend, stammt aus dem mittleren Muschelkalk und besteht aus Mergel- und Schluffstein. Weiter ist Ton- und Sandstein aus dem oberen Keuper in der äußerten nordwestlichen Feldecke zu finden. (s. Abb.12) (NDS. LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 1979)

Nach der Bodenschätzung (s. Abb. 13) ergibt sich für die vorwiegende Fläche eine Bodenwertzahl von 51 / 51 mit dem Klassenzeichen L5V und für den südlichen Teil eine Bodenwertzahl von 46 / 47 mit dem Klassenzeichen SL4D (KATASTERAMT OSNABRÜCK 2001a).

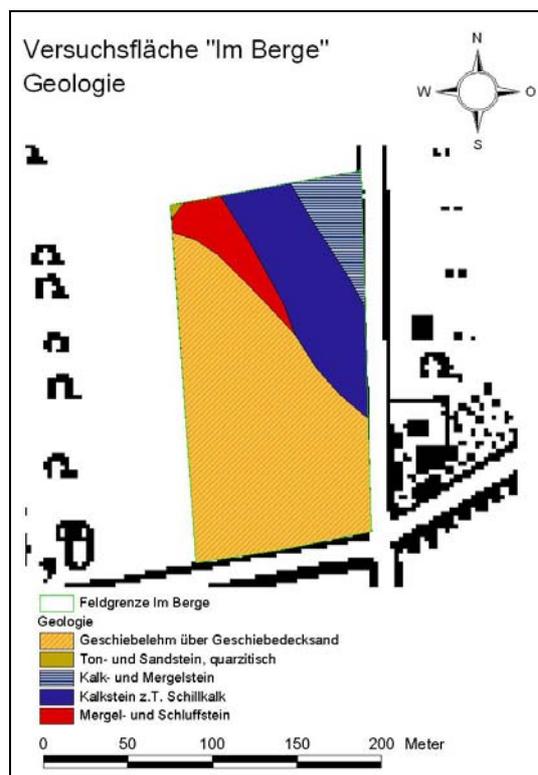


Abb. 12: Geologie der Fläche „Im Berge“ (Quelle: NDS. LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 1979, verändert)

In der Bodentypkarte (s. Abb. 14) sind die beiden Bodentypen Braunerde-Pseudogley sowie Pelosol ausgewiesen (NDS. LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 1976).

Die Fläche ist komplett mit 1% bis 5% Gefälle nach Süden geneigt. Die Höhe beträgt im Norden der Fläche 110 Höhenmeter und fällt zum Süden auf 105 Höhenmeter ab.

Die Fläche ist anhand eines festgelegten Rasters in 100 m² große und quadratische Teilflächen (Rasterzellen / 10 m x 10 m) unterteilt. Innerhalb einer jeder Rasterzelle sind gleichmäßig verteilt Bodenproben mit dem Bohrstock entnommen. In der Abb. 15 sind die kleinräumigen Bodentypen anhand der Bohrstockkartierung aufgeführt. (SCHRÖTKE 2001)

Das Auswerterraster, das als Grundlage zur Bodenprobenentnahme und zur weiteren Datenanalyse dient, ist in Abb. 16 als Skizze dargestellt; die Fläche „Im Berge“ wird

vollständig abgedeckt. Für gezielte und wiederholte Messungen sind zwei Messbahnen angelegt worden. Diese umfassen die Rasterzellennummern 1 bis 21 (Messbahn Ost) und 149 bis 169 (Messbahn West). Weiter sind von bestimmten Rasterzellen wiederholt Bodenproben entnommen worden. Es wurde der gravimetrische Bodenwassergehalt bestimmt, um diesen mit den Messwerten zu vergleichen. Für die Messbahn Ost sind es die ungraden Rasterzellennummern (1, 3, ... 19, 21) und für die Messbahn West die Rasterzellennummer 149 und folgend die geraden Rasterzellennummern (149, 150, ... 166, 168). (s. Abb.16)

Nutzung

Die Fläche „Im Berge“ wird ackerbaulich genutzt und seit 1993 ökologisch bewirtschaftet. Vor der Einsaat erfolgt die Grundbodenbearbeitung mit Pflug und Packer; vor der Drillmaschine arbeitet eine Kreiselegge. Nach der Ernte wird der Stoppel üblicherweise zwei- bis dreimal mit einer Kurzscheibenege bzw. mit einem Flügelschargrubber bearbeitet. Aus der Tab. 3 ist die Fruchtfolge mit den entsprechenden Erträgen zu entnehmen.

Tab. 3: Fruchtfolge und Erträge auf der Fläche "Im Berge" (Quelle: HEIMSOTH 2006, ergänzt)

Jahr	Frucht	Ertrag (t/ha)
2007	Hafer	4.2
2006	Dinkel	3.2
2005	Sommerweizen	4.1
2004	Klee gras	k.A.
2003	Klee gras	k.A.
2002	Klee gras	k.A.
2001	Einkorn und Emmer	0.8
2000	Dinkel	1.9

3.2.2. Wellenkamp

Das Ausgangsgestein der Fläche „Wellenkamp“ (Flächengröße: 1,6 ha) stammt überwiegend aus dem Keuper. Die Fläche wird in der Mitte durch eine Schichtung aus Tonstein aus dem bunten Unterkeuper geteilt. Der südliche Teil der Fläche setzt sich aus grauem Tonstein und Dolomitbänken aus dem grauen Unterkeuper zusammen. Nördlich vom Tonstein erstreckt sich eine Teilfläche aus Feinsand sowie Ton- und Schluffstein aus dem Unterkeuper-Sandstein und der äußerste Nordteil setzt sich aus sandigen, schluffigen und tonigen Abschlamm-massen zusammen (s. Abb. 17). (NDS. LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 1979)

Die Bodenschätzung bewertet den Südteil der Fläche mit der Bodenwertzahl 34 / 35 und dem Klassenzeichen SL 4 Vg und den Nordteil mit der Bodenwertzahl 52 / 53 und dem Klassenzeichen SL 3 D. Ganz im Norden der Fläche befindet sich eine Teilfläche mit einer Bewertung für Grünland IS I a 3 46 (s. Abb. 18) (KATASTERAMT OSNABRÜCK 2001b).

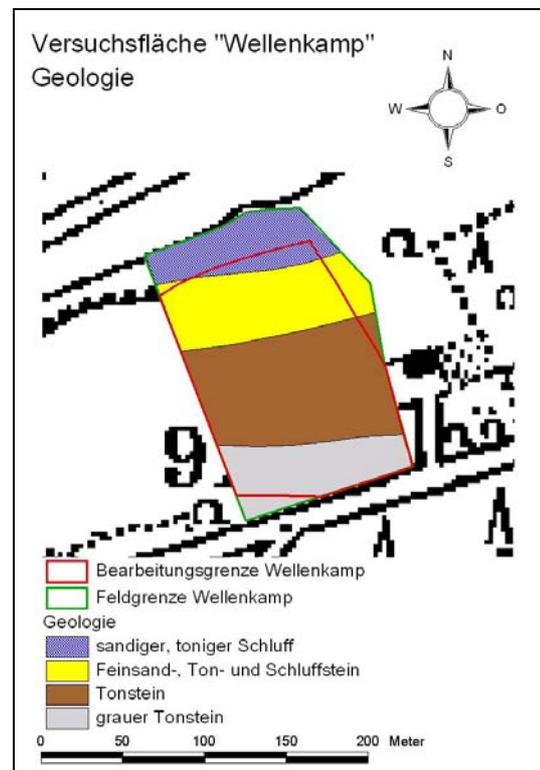


Abb. 17: Geologie der Fläche „Wellenkamp“ (Quelle: NDS. LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 1979, verändert)

Die Bodentypkarte (s. Abb. 19) weist fünf Bodentypen aus. Der nördlichste Teil der Fläche ist ein Gley und schließt an einem Bach ab. Dieser Bereich wird zum Großteil nicht mehr bewirtschaftet. Hier schließt sich im Südosten der Fläche eine Braunerde verbreitet mit Plaggeneschauflagen an. Durch die Mitte der Fläche von Südosten nach Nordwesten erstreckt sich eine Pseudogley-Braunerde mit verbreitet Pseudogley-Plaggenesch. Im nördlichen Teil erstreckt sich ein Ranker. Die südwestlichste Ecke ist als Braunerde ausgewiesen und wird z.Z. als Weg genutzt. (NDS. LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 1979)

Der südliche Teil der Fläche ist nach Norden geneigt und läuft eben aus. Die Höhe im Norden der Fläche beträgt 80 Höhenmeter und steigt zum Süden auf 91 Meter an.

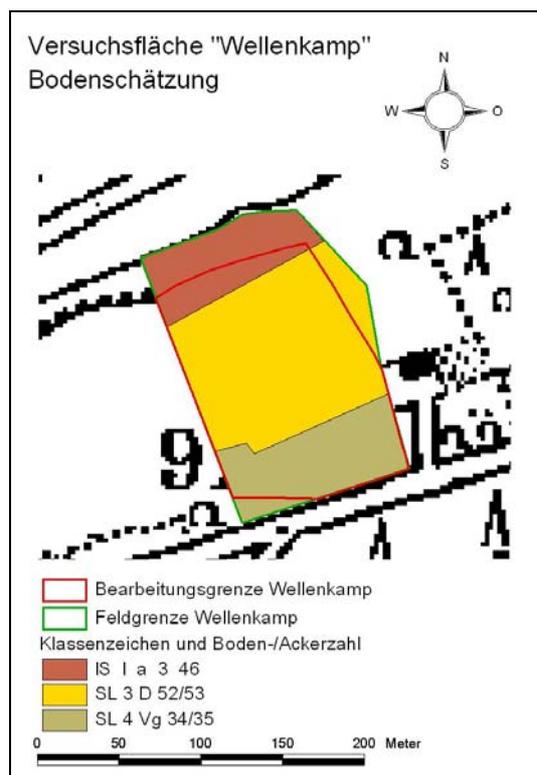


Abb. 18: Bodenschätzung der Fläche „Wellenkamp“ (Quelle: KATASTERAMT OSNABRÜCK 2001b, verändert)

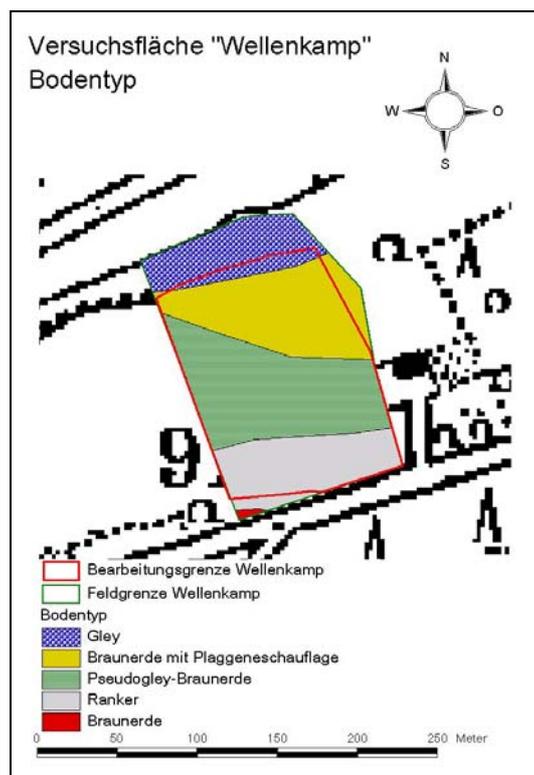


Abb. 19: Bodentyp der Fläche „Wellenkamp“ (Quelle: NDS. LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 1976, verändert)

Die Bodentypkarte von SCHRÖTKE (2001) ergibt teilweise eine abweichende Beschreibung der Bodentypen (s. Abb. 21). Der Bohrstockkartierung zur Ansprache des Bodentyps liegt ein 20 x 20 Meter Raster zugrunde. Bei der Bodenprobenentnahme für die Laboruntersuchungen dient ein festgelegtes Auswerteraster mit 100 Quadratmetern großen und quadratischen Teilflächen (Rasterzellen / 10 m x 10 m) und auf der Osthälfte mit einer zusätzlichen Messbahn (Ost) mit einer Rasterzellengröße von 30 m² (3 m x 10 m) (Abb. 22). Aus der Flächenmitte einer jeden Rasterzelle sind gleichmäßig verteilt Bodenproben mit dem Bohrstock entnommen worden. Das Auswerteraster dient als Grundlage zur weiteren Datenanalyse. Die Fläche „Wellenkamp“ wird nicht vollständig abgedeckt. Ebenfalls sind auf der Fläche „Wellenkamp“ für gezielte und wiederholte Messungen zwei Messbahnen (West und Ost) angelegt worden. Die Messbahn West umfasst die

Rasterzellennummern 14 bis 26 und Messbahn Ost 105 bis 117. Bodenproben zur Bodenwassergehaltsbestimmung sind auf der Messbahn West von den Rasterzellennummern 14, 15, 17, 19, 21, 23, 25 und 26 sowie auf der Messbahn Ost von den ungeraden Rasterzellennummern (105, 107, ... 115, 117) entnommen.

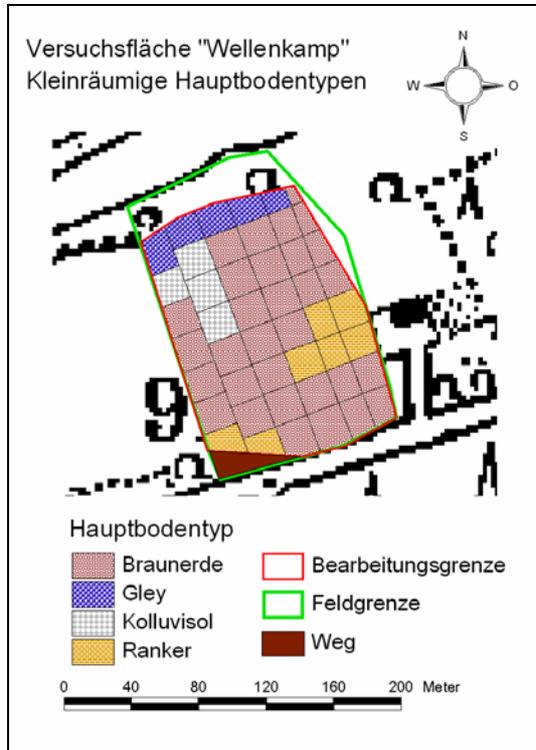


Abb. 21: Bodentypen der Fläche „Wellenkamp“ (Quelle: SCHRÖTKE 2001, verändert und ergänzt)

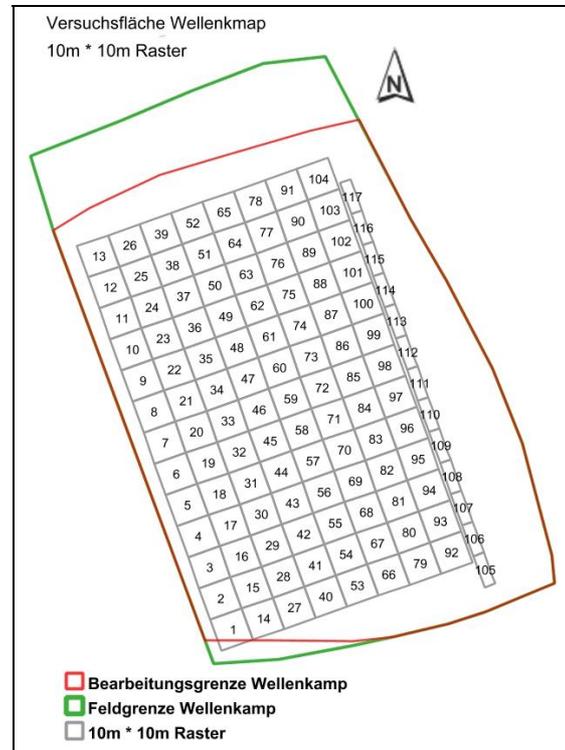


Abb. 22: Probenentnahme- und Auswertegeraster für die Fläche „Wellenkamp“

Nutzung

Die Fläche „Wellenkamp“ wird konventionell ackerbaulich genutzt. Auch hier erfolgt die Grundbodenbearbeitung mit Pflug und Packer. Die Einsaat geschieht mit einer Drillmaschinenkombination (Drillmaschine plus Kreiselegge). Nach der Ernte wird der Stoppel üblicherweise zweimal mit einer Kurzscheibenegge bzw. mit einem Flügelscharrgrubber bearbeitet. Aus Tab. 4 ist die Fruchtfolge mit den entsprechenden Erträgen zu entnehmen.

Tab. 4: Fruchtfolge und Erträge auf der Fläche "Wellenkamp" (Quelle: HEIMSOTH 2006, ergänzt)

Jahr	Frucht	Ertrag (t/ha)
2006	Wintergerste	5.9
2005	Sommerhafer	4.8
2004	Triticale	6.6
2003	Winterweizen	5.1
2002	Winterhafer	4.9
2001	Winterweizen	6.0
2000	Körnermais	14.0 (nass 35%)

3.3. Messprinzip „Komplexer elektrischer Leitwert“

Das Messprinzip des Bodensensorsystems der Fachhochschule Osnabrück (Kurzform: BOs - 1EP) beruht auf der Erfassung des komplexen elektrischen Leitwerts. An der Messtechnik stehen drei analoge Ausgänge zur Verfügung. Die Messgrößen sind der Betrag, die Phasenverschiebung und das Rauschen des elektrischen Signals. Anhand des Betrags und der Phasenverschiebung werden der elektrische Leitwert und die elektrische Kapazität der Plattenanordnung errechnet. Zur exakten Verrechnung der Messwerte werden die Messdaten mittels zweier geeichter Kalibrierwiderstände und eines geeichten Kalibrierkondensators normiert. Das elektrische Rauschen beschreibt die Kontaktqualität zwischen Messplatten und Boden.

Zwei Metallplatten mit einer Größe von jeweils 180 cm^2 dienen als Elektroden und werden durch den Boden (galvanische Ankopplung) gezogen. Die technischen Daten zur Erfassung des elektrischen komplexen Leitwerts sind in Tab. 5 aufgeführt; weitere technische Angaben zum Gerät sind im Anhang der Tab. 1 zu entnehmen.

Tab. 5: Technische Daten des BOs - 1EP zur Erfassung des elektrischen komplexen Leitwerts

Frequenz	125 kHz (sinusförmig)
Leerlaufspannung	1 - 2 Volt
Analoge Ausgangsspannung	10 Volt / Analoge Signalverstärkung
Datenaufzeichnung	Analog/Digital Wandler und handelsüblichem Notebook

Der Boden zwischen den Metallplatten ist der physikalische Messort und hat folglich die Funktion des Dielektrikums. Allerdings stellt der Boden einen relativ schlechten Isolator dar, mit wechselnden elektrischen Eigenschaften, d.h. ein sehr trockener Boden ist ein besserer Isolator als ein nasser. Zwei unterschiedliche Zustände sollen hier als Beispiel zur Beschreibung des Messprinzips dienen. Das Messprinzip wird an einem guten Isolator und zum anderen an einem schlechten Isolator beschrieben. Befinden sich die beiden Elektroden in einem isolierenden Material (z.B. in einem sehr trockenen Boden), so kann kein Strom zwischen den beiden Elektroden fließen. Strom (I) und Spannung (U) sind nicht phasengleich. Die Phase ist im Idealfall um -90° verschoben, d.h. der Strom eilt der Spannung voraus (s. Abb. 23). Diese Eigenschaft entspricht dem eines idealen Kondensators in einem Wechselstromfeld. Hier wird ein Kondensator durch die wechselnde Stromrichtung fortlaufend aufgeladen und entladen. Bei der Aufladung fließen elektrische Ladungen (Elektronen) von der Spannungsquelle zu den Platten. Wird der Kondensator entladen, fließt die Ladung von den Platten zurück zur Spannungsquelle. Der Kondensator stellt demnach einen kapazitiven Blindwiderstand dar. (FROHNE et al. 2002, DZIEIA et al. 2001)

Die elektrische Kapazität (C) der Plattenanordnung entspricht Gleichung 9, welche sich aus Gleichung 8 ergibt.

$$I = C \frac{d[\hat{u} \sin(\omega t)]}{dt}$$

I = Strom
 C = Kapazität
 $d[\hat{u} \sin(\omega t)]$ = Delta sinusförmige Wechselspannung
 dt = Delta Zeit

Gleichung 8: Bestimmung des Stromes bei einer sinusförmigen Wechselfrequenz mit kapazitiven Widerstand (Quelle: FROHNE 2002)

$$C = \frac{I * dt}{d[\hat{u} \sin(\omega t)]}$$

I = Strom
 C = Kapazität
 $d[\hat{u} \sin(\omega t)]$ = Delta sinusförmige Wechselspannung
 dt = Delta Zeit

Gleichung 9: Bestimmung der Kapazität eines Kondensators bei einer sinusförmigen Wechselfrequenz

Bekannt ist der Nullgang des Stroms am Ausgang des Sinusgenerators; gemessen wird der Nullgang des Eingangs-Messstroms. Durch Verrechnung beider Signale wird die Phasenverschiebung ermittelt.

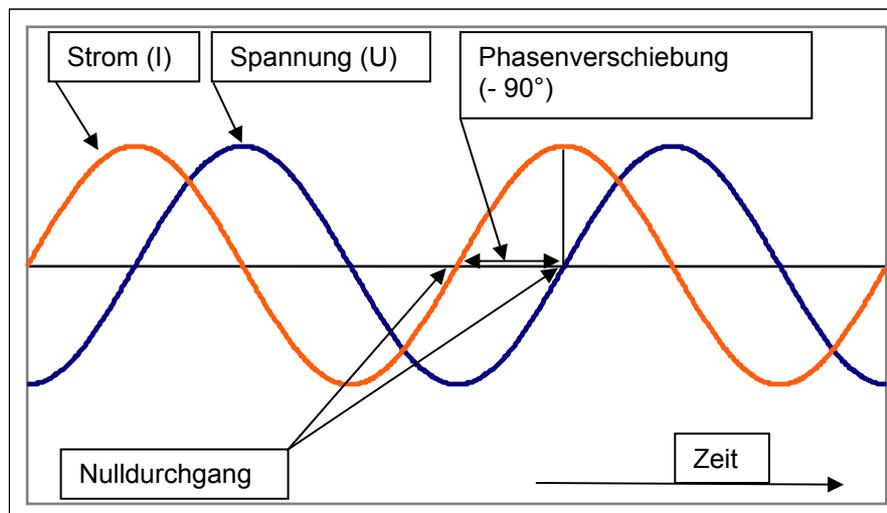


Abb. 23: Amplitudenverlauf von Strom und Spannung eines idealen Kondensators

Die elektrische Kapazität der Plattenanordnung beschreibt die elektrische Ladungsmenge (Q) auf den Platten. Diese steht im direkten Zusammenhang mit der Anzahl der angelagerten Elektronen und beschreibt somit indirekt den fließenden Strom. Unter anderem wird die elektrische Ladung der Plattenanordnung von den elektrischen Eigenschaften des Dielektrikums (hier der Boden zwischen den Elektroden) beeinflusst. Ändert sich die Permittivitätszahl des Dielektrikums (z.B. freies Bodenwasser wird an die Bodenpartikel gebunden (s. Abb. 3) oder der Bodenwassergehalt steigt) so verändert sich auch die elektrische Ladung der Plattenanordnung. Ein weiterer Effekt ist die Influenz, diese beschreibt eine

räumliche Trennung der Ladung auf der Oberfläche von verschiedenen Körpern bei gleicher Polarität der Körper. (FROHNE et al. 2002, DZIEIA et al. 2001)
 Erhöht sich nun z.B. die Anzahl von polarisierbaren Molekülen im Dielektrikum, so fließt auch eine höhere elektrische Ladung auf die Plattenanordnung. Dieses bedeutet, es fließt ein höherer Strom nach Gleichung 9. Die Amplitude des Stroms erhöht sich und die Phasenverschiebung bleibt -90° . (s. Abb. 24)

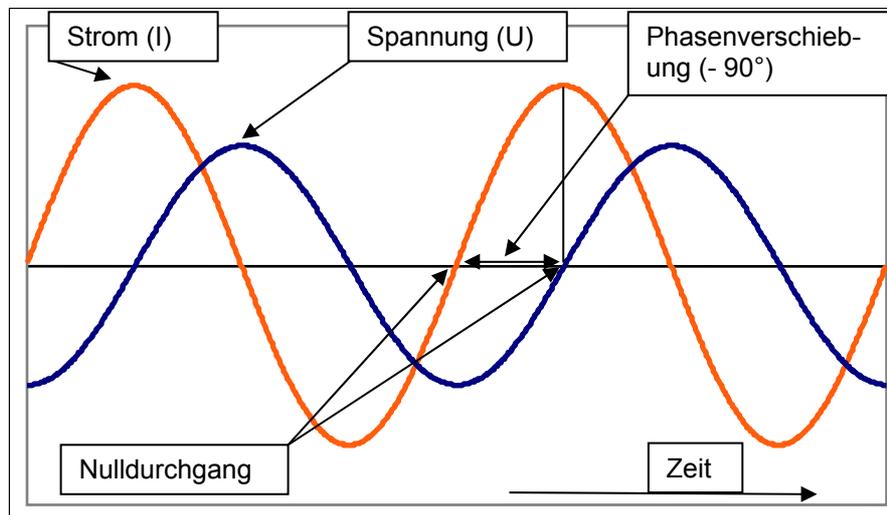


Abb. 24: Amplitudenverlauf von Strom und Spannung bei Erhöhung der elektrischen Ladung der Plattenanordnung

Befinden sich die beiden Elektroden in einem leitenden Material (z.B. feuchter Boden mit gelösten Nährsalzen), so fließt ein Strom zwischen den beiden Elektroden. Die gelösten Nährsalze liegen in der Bodenlösung als Anionen und Kationen vor (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002), also als elektrisch geladene Ionen. Der Strom fließt zwischen den beiden Elektroden mittels dieser Ionen durch die Bodenlösung bzw. die Ionen wandern zu der entsprechenden Elektrode. Dieser Stromfluss wird als Trägerleitung bezeichnet. Die Ionen stellen dabei die Träger der elektrischen Ladung dar. (FROHNE et al. 2002)

Für den Strom gilt Gleichung 10, somit ergibt sich der Leitwert (G) aus der Gleichung 11. Die Phase ist hierbei nicht verschoben und beträgt somit 0° (s. Abb. 25). Diese Eigenschaft entspricht einem idealen ohmschen Widerstand im Wechselstromfeld (FROHNE et al. 2002, DZIEIA et al. 2001). Befindet sich ein sehr gut leitfähiges Material zwischen den beiden Elektroden, entspricht dieses einem elektrisch kurzgeschlossenen Kondensator (EMEIS 2007b). Das elektrische Verhalten entspricht nun nicht mehr dem eines Kondensators sondern dem einer Spule. Die Phasenverschiebung wird positiv, d.h. der Strom eilt der Spannung nach: es entsteht eine Induktivität. (EMEIS 2007b, FROHNE et al. 2002)

Bei der Berechnung der elektrischen Kapazität der Plattenanordnung ergibt sich unter dieser Situation ein negatives Messergebnis (EMEIS 2007b).

$$I = \hat{U} \sin(\omega t) * G$$

I = Strom
 $\hat{U} \sin(\omega t)$ = Sinusförmige Wechselspannung
 G = Leitwert, Wirkleitwert

Gleichung 10: Bestimmung des Stromes bei einer sinusförmigen Wechselfrequenz mit realem Widerstand (Quelle: FROHNE 2002)

$$G = \frac{I}{\hat{U} \sin(\omega t)}$$

I = Strom
 $\hat{U} \sin(\omega t)$ = Sinusförmige Wechselspannung
 G = Leitwert, Wirkleitwert

Gleichung 11: Bestimmung des Leitwerts bei einer sinusförmigen Wechselfrequenz

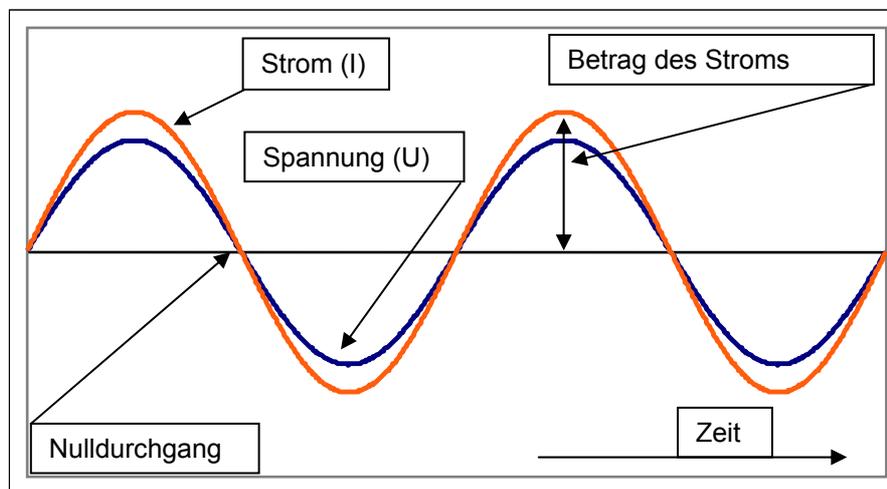


Abb. 25: Amplitudenverlauf von Strom und Spannung in einem leitenden Material

Erhöht sich die Ionenkonzentration im Boden, so wird eine höhere elektrische Ladung transportiert und der Stromfluss erhöht sich (FROHNE et al. 2002, KELLER und FRISCHKNECHT 1977), ebenso wie die Amplitude des Stroms (s. Abb. 26).

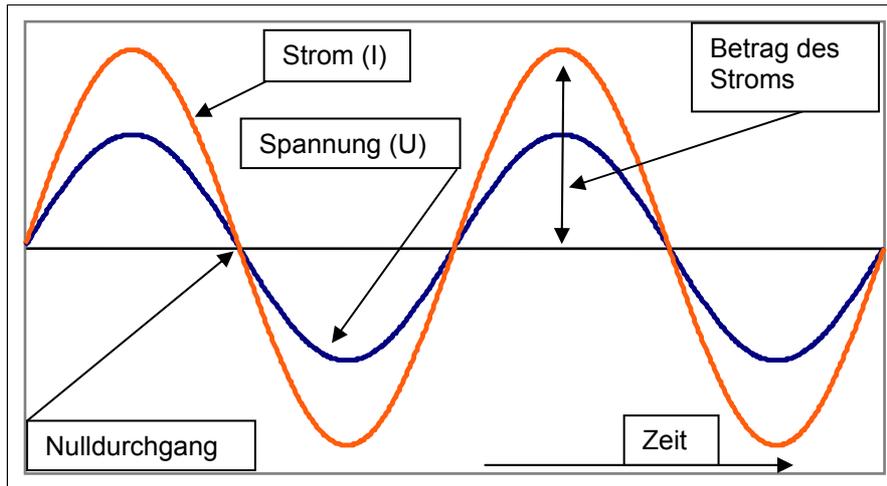


Abb. 26: Amplitudenverlauf von Strom und Spannung nach Erhöhung der Ionenkonzentration in einem leitenden Material

Es wird angenommen, dass im Boden während der geoelektrischen Messung eine Kombination beider Zustände vorliegt. Dieses wäre mit einer parallelen elektrischen Schaltung von Widerstand und Kondensator zu vergleichen, d.h. die zuvor beschriebenen Situationen laufen zeitgleich nebeneinander (parallel) ab. Es würde sich zum einen eine elektrische Ladung auf der Plattenanordnung sammeln. Zum anderen fließt ein Strom zwischen den beiden Platten. Dies wiederum bestimmt die elektrische Leitfähigkeit des Bodens. Es ergibt sich eine Kombination von Stromfluss (Änderung der Amplitudenhöhe) und Phasenverschiebung; beides wird erkannt. (s. Abb. 27)

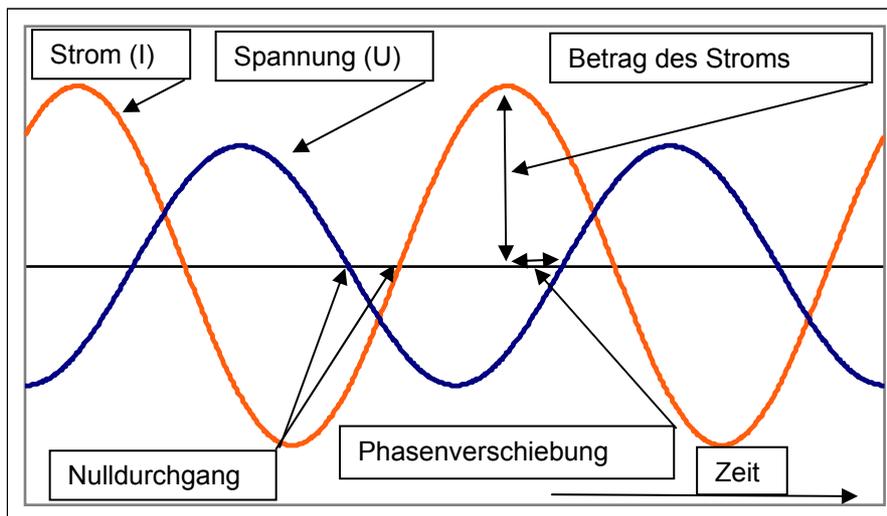


Abb. 27: Amplitudenverlauf von Strom und Spannung während eines bestimmten Messzeitpunkts

Mit dem Messaufbau sind dynamische Messungen möglich. Hierzu wird das Bodensensorsystem in der Heckhydraulik eines Schleppers durch den Boden gezogen. Zurzeit kann eine Messtiefe von bis zu 25 cm realisiert werden. Der Elektrodenabstand ist variierbar von 8 cm bis 80 cm. Messtiefe und Messvolumen

definieren sich durch den Messaufbau und die Tiefenführung des BOs - 1EP. Die Abb. 28 zeigt skizzenhaft die beiden Schare im Boden mit dem elektrischen Feld. Sehr gut ist zu erkennen, dass sich das elektrische Feld zum größten Teil zwischen den beiden Elektroden befindet. Somit ist genau bekannt aus welcher Tiefe und aus welchem Messvolumen das Messergebnis stammt. Die hier beschriebenen Messungen wurden mit einem Elektrodenabstand von 26 cm und einer Messtiefe von 25 cm durchgeführt.

Es werden 2 x 5 Einzelmessungen in der Sekunde durchgeführt, wobei die fünf Einzelwerte in einem Zeitraum von ca. 50 Millisekunden erfasst werden. Aus den fünf Einzelwerten wird der arithmetische Mittelwert gebildet, so dass also zwei Messwerte pro Sekunde vorliegen. Die Messdaten werden mit einem Analog/Digitalwandler digitalisiert und mit einem handelsüblichen Notebook aufgezeichnet. Der Analog/Digitalwandler kann bis zu 300 Einzelwerte für jeden Kanal pro Sekunde erfassen (LABJACK 2002). Dieser Wert entspricht der maximalen Messwerterfassung.

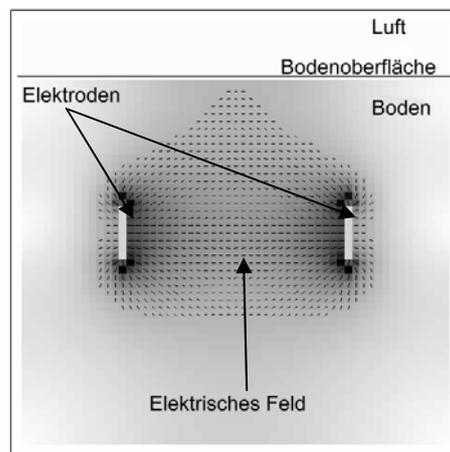


Abb. 28: Verhalten des elektrischen Felds im Boden zwischen den beiden Elektroden, Messsystem BOs - 1EP (Quelle: EMEIS 2007c)

3.4. Bodentemperaturerfassung

Die Bodentemperatur wird berührungslos mit einem Pyrometer der Firma „Optris“ gemessen. Es wird das Modell „optris[®] CT“ genutzt. Der Spektralbereich liegt zwischen 8 bis 14 μm . Der Temperaturmessbereich wurde auf 0° bis 40° Celsius eingestellt um die Messwertauflösung zu erhöhen. Die Messgenauigkeit liegt bei $\pm 1\%$ bzw. $\pm 1^\circ$ Celsius: es gilt der größere Wert. Neben der Bodentemperatur wird auch die Umgebungstemperatur erfasst. Die Daten werden mit einem Analog/Digitalwandler digitalisiert und mit Hilfe eines handelsüblichen Notebook aufgezeichnet.

Die Bodentemperaturmessung kann sowohl an der Bodenoberfläche als auch durch „Abschaben“ der obersten Schicht in einigen Zentimeter Tiefe erfolgen. Zum Öffnen des Bodens wird ein modifiziertes Flügelschar benutzt.

3.5. GPS-Signalerfassung

Zur Erfassung des Positionssignals wird das „Global Positioning System“ (GPS) genutzt. Es wird als GPS-Empfänger das Modell „AgIQ“ der Firma Satloc verwendet. Technische Daten sind der Tab. 6 zu entnehmen. Der Empfänger ist in zwei Meter Höhe direkt über den beiden Messscharen montiert, eine Positionskorrektur für Messdaten und GPS-Daten ist somit nicht notwendig.

Tab. 6: Technische Daten des GPS-Empfängers „AgIQ“ (Quelle: SATLOC 2004)

Kanalanzahl	12 Kanäle
Taktungsfrequenz	Bis 5 Hz (wählbar)
Genauigkeit (horizontal)	< 1 m (95% aller Werte)
Korrektursignal	EGNOS-Signal
Datenaufzeichnung	NMEA Datensatz / Aufzeichnung mit einem handelsüblichem Notebook

3.6. Proben- und Messdatenaufbereitung

Bodenprobenentnahme

Auf der Fläche „Im Berge“ sind die Bodenproben mit dem Bohrstock aus zwei Tiefen (0 - 30 cm und 30 - 60 cm) gleichmäßig über die Flächeninhalte der Rasterzellen verteilt entnommen worden. Weiterhin erfolgte eine Ansprache des Bodentyps bei der Bohrstockkartierung. Die Bodenproben wurden auf zwei Millimeter abgesiebt und luftgetrocknet zur Laboranalyse bereitgestellt. (SCHRÖTKE 2001)

Auf der Fläche „Wellenkamp“ erfolgte die Bodenprobeentnahme anhand des Rasters mit den 100 m² Zellen aus der Mitte der Rasterzelle. Die Bodenproben wurden ebenfalls aus zwei Tiefen (0 - 30 cm und 30 - 60 cm) entnommen und anschließend auf zwei Millimeter abgesiebt und luftgetrocknet zur Laboranalyse bereitgestellt. (KIELHORN 2004)

Die Bodenprobenentnahme aus den zwei Tiefen auf der Messbahn Ost erfolgte gleichmäßig verteilt über die Flächeninhalte der Rasterzellen (à 30 m²). Die Bodentypansprache erfolgte anhand einer Bohrstockkartierung, allerdings anhand des 20 m x 20 m Rasters (SCHRÖTKE 2001) (s. Abb. 21).

Laboranalyse (Bodenproben)

Die Korngrößenanalyse wurde nach der Sieb- und Schlämmanalyse nach Methode VDLUFA C.2.2.1 durchgeführt. Die Vorgehensweise erfolgte wie vorgeschrieben. Die Kornfraktion Sand (S) wurde abgesiebt. Die beiden Korngrößen Schluff (U) und Ton (T) wurden pipettiert und ermittelt. Die Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehalts (C_{org}) geschah nach DIN ISO 10694 mit dem Analysegerät ELTRA CS500.

Folgende Nährstoffe und Bodenwassergehalt sind im Labor nach der genannten Methode bestimmt:

Nährstoff / Bodenwasser	Methode
Stickstoff (gesamt)	DIN ISO 13878, Analysegerät: Leco FP 428
Phosphor (gesamt)	Nach BLECK (1965), Glühaufschluss
Phosphor (pflanzenverfügbar)	VDLUFA A.6.2.1.2, Bestimmung mit Doppellactat
Kalium (pflanzenverfügbar)	VDLUFA A.6.2.1.2, Bestimmung mit Doppellactat
Magnesium (pflanzenverfügbar)	VDLUFA A.6.2.4.1, Bestimmung mit Calciumchlorid
Bodenwassergehaltsbestimmung	DIN ISO 11465, Bodenwasserbestimmung (Massebasis).

Messdatenaufbereitung

Interpolation der geoelektrischen Messdaten

Die Bodenprobandaten stellen einen Mittelwert einer Rasterzelle dar (s. Kap. 3.6). Die Messdaten der jeweiligen geoelektrischen Messung (BOs - 1EP, EM38 und ARP03) liegen als „linienhafte“ Punktdaten vor. Um bei einer Analyse und Auswertung der geoelektrischen Messdaten mit den Bodendaten, den Effekt der „ungleichmäßigen“ räumlichen Verteilung der geoelektrischen Messdaten gegenüber den Bodendaten zu bereinigen, erfolgt eine Interpolation der geoelektrischen Messdaten. Die gewählte Interpolationsmethode ist „Kriging“. Das Interpolationsverfahren „Kriging“ berücksichtigt bei der Schätzung eine ungleichmäßige räumliche Verteilung der Ausgangsdaten. Schätzfehler aufgrund einer Punkthäufung werden vermieden bzw. minimiert. Die Interpolation der Daten ist mit dem Geoinformationssystem (GIS) Programm OpenJUMP „PIROL-Edition“ durchgeführt worden. (OSTERMANN 2005) Die interpolierten geoelektrischen Daten sind für jede Rasterzellen gemittelt. Somit liegen die Bodendaten und die geoelektrischen Messdaten als Mittelwert für jede Rasterzelle vor. Zur weiteren Datenanalyse dienen diese Mittelwerte der Rasterzellen als Rechengröße.

Statistische Größen

Die beschreibenden statistischen Werte sind dem Ergebnisprotokoll „Explorative Datenanalyse“ des Statistikprogramms SPSS 15 entnommen worden. Der Vertrauensbereich wird bei intervallskalierten und normal verteilten Zahlenreihen nach Gleichung 12 berechnet.

$$\text{Vertrauensbereich} = \left[\bar{X} - t_{Tab}(FG; \alpha) * s_X ; \bar{X} + t_{Tab}(FG; \alpha) * s_X \right]$$

\bar{X} = Mittelwert
n = Anzahl der Proben

t_{Tab} = Wert aus t-Tabelle
 α = Signifikanzniveau

FG = Freiheitsgrade
 s_X = Mittlerer Fehler

Gleichung 12: Vertrauensbereichsbildung für intervallskalierte und normal verteilte Zahlenreihen (Quelle: KÖHLER et al. 1996)

Bei intervallskalierten Zahlenreihen mit einer asymmetrischen Verteilung wird der Vertrauensbereich nach Gleichung 13 berechnet.

$$\text{Vertrauensbereich} = \left[\frac{Z - 1.58 \cdot (IQR)}{\sqrt{n}} ; \frac{Z + 1.58 \cdot (IQR)}{\sqrt{n}} \right]$$

Z = Medianwert 1,57 = Faktor (IQR) = Interquartillbereich n = Anzahl der Proben

Gleichung 13: Vertrauensbereichsbildung für intervallskalierte Zahlenreihen bei einer asymmetrischen Verteilung (Quelle: SACHS 2002)

Der Variationskoeffizient anhand der Standardabweichung und Mittelwert ist nach Gleichung 14 berechnet.

$$\text{Variationskoeffizient (VK)} = \frac{s \cdot 100}{\bar{X}}$$

\bar{X} = Mittelwert s = Standardabweichung

Gleichung 14: Berechnung des Variationskoeffizientens anhand von Standardabweichung (s) und Mittelwert (\bar{X}) (Quelle: KÖHLER et al. 1996)

Mit Gleichung 15 ist die Schwankungsbreite der Streuung für den Interquartillbereich und Medianwert berechnet.

$$(\text{IQR:Median}) = \frac{\text{IQR} \cdot 100}{Z}$$

IQR = Interquartillbereich Z = Medianwert

Gleichung 15: Berechnung der Schwankungsbreite der Streuung (IQR:Median) anhand vom Interquartillbereich (IQR) und Medianwert (Z) (eigene Berechnung)

Ein Vergleich von z.B. der räumlichen Verteilung der Erträge innerhalb einer Fläche zweier verschiedenen Kulturarten, welche natürlich bedingt ein unterschiedliches Ertragsniveau haben (z.B. Raps und Weizen), kann mit Hilfe einer Standardisierung, der so genannten z-Transformation, durchgeführt werden (GEBBERS 2004b). Bei der z-Transformation wird bei der Berechnung nach Gleichung 16 für jeden Datensatz der Mittelwert gleich 0 und die Varianz gleich 1 gesetzt (LOZÁN und KAUSCH 2007). Der Mittelwert eines Datensatzes hat demnach den z-Wert von 0; unterdurchschnittliche Werte haben einen negativen z-Wert und überdurchschnittliche Werte einen positiven z-Wert.

$$\text{z-Wert} = \frac{x - \bar{X}}{s}$$

x = Einzelwert (z.B. Ertragswert) \bar{X} = Mittelwert s = Standardabweichung

Gleichung 16: Berechnung des z-Werts anhand von Mittelwert und Standardabweichung (Quelle: LOZÁN und KAUSCH 2007)

Eine Rücktransformation des z-Werts in den ursprünglichen Wert ist mit Gleichung 17 möglich.

$$x = z - \text{Wert} * s + \bar{X}$$

x = Einzelwert (z.B. Ertragswert) \bar{X} = Mittelwert s = Standardabweichung

Gleichung 17: Rücktransformation des z-Werts in den ursprünglichen Wert (Quelle: GEBBERS 2004b)

Korrelationsanalyse

Für die Korrelationsanalyse wird der SPEARMANSCHER - Rangkorrelationskoeffizient gewählt. Dieser ist anwendbar für nicht-normal verteilte und nicht-lineare Zahlenreihen. Sollte eine oder beide Bedingungen bestehen ist der SPEARMANSCHER-Rangkorrelationskoeffizient dennoch anwendbar. (SACHS 2002) Die Korrelationsanalyse sind mit dem Statistikprogramm SPSS15 und dem Geoinformationssystem (GIS-) Programm OpenJUMP „PIROL-Edition“ durchgeführt worden.

Regressionsanalyse

Zur Ermittlung der funktionalen Beziehung zwischen dem geoelektrischen Messwert und der jeweiligen Korngröße bzw. C_{org} sind einerseits einfache Regressionsanalyse mit der Option der Kurvenanpassung mit dem Statistikprogramm SPSS15 durchgeführt worden. Wobei die Auswahl der Kurvenanpassung beschränkt ist auf die linearen, potentiellen, exponentiellen und logarithmischen Modelle. Andererseits sind lineare, multiple Regressionsanalysen zur Ermittlung der funktionalen Beziehung der Messwerte und Bodendaten durchgeführt worden. Bei den multiplen Regressionsanalysen wurde als Einschluss-Methode „Schrittweise“ gewählt.

3.7. Verwendete Software

Die Rohdaten, insbesondere die der geoelektrischen Messung sind mit dem GIS-Programm OpenJUMP „PIROL Edition“ bearbeitet. Weiterhin sind die Erstellung von Auswerte-Raster, Interpolationen, einfache Korrelationsanalysen etc. mit diesem Programm durchgeführt worden. Das verwendete GIS-Programm OpenJUMP ist speziell für diese Ansprüche erweitert worden (BRÜNING 2007, KIELHORN et al. 2007, KIELHORN und RAHN 2006).

Für aufwändige statistische Auswertungen dient das Statistik-Programm SPSS15. Die Vorbereitung, Auswahl und Verrechnung der Daten für die unterschiedlichen Schätzmethoden erfolgte mit Tabellenkalkulationsprogramm „EXCEL“.

4. Ergebnisse

4.1. Untersuchungsfläche „Im Berge“

4.1.1. Statistische Kenngrößen für die Fläche „Im Berge“

Die interpolierte räumliche Verteilung der Korngrößen und des organischen Kohlenstoffgehalts der Fläche „Im Berge“ sind im Anhang in den Abb. 1 bis 4 dargestellt.

In Tabelle 7 sind für die Fläche „Im Berge“ beschreibende statistische Werte für die Korngrößen und den organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) in der Tiefe 0 bis 30 cm (Oberboden) angegeben. Die Korngröße Sand zeigt die größte Spannweite der entsprechenden Korngrößen und die Korngröße Schluff weist die geringste Spannweite auf. Obwohl der Mittelwert und der Medianwert sehr nahe beieinander liegen, weist der Kolmogorov-Smirnov Test nach Lilliefors-Modifikation (KS-Test) keine Normalverteilung auf. Aus diesem Grund wird der Vertrauensbereich zum Mittelwertsvergleich auf Grundlage des Medians gebildet.

Tab. 7: Beschreibende statistische Werte für die Korngrößen der Fläche „Im Berge“ für die Tiefe 0 bis 30 cm, Ergebnisse der Laboranalyse, Angaben in %

Attribut	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
Minimum	24.0	21.0	9.0	0.73
Maximum	69.0	40.0	40.0	2.16
Spannweite	45.0	19.0	31.0	1.43
Mittelwert	43.4	31.9	24.8	1.33
s	10.0	4.1	6.3	0.21
VK	23.0	12.9	25.4	16.0
Median	44.0	32.0	24.5	1.32
IQR	16.0	6.0	9.0	0.26
(IQR:Median)	36.4	18.8	36.7	19.7
Normalverteilung	nein	nein	nein	nein
Vertrauensbereich (Median)				
Oberer Bereich	45.7	32.6	25.4	1.35
Unterer Bereich	42.3	31.4	23.6	1.29

s = Standardabweichung

VK = Variationskoeffizient

IQR = Interquartillbereich

Die Analyse der Bodenproben für die Bodentiefe 30 bis 60 cm (krumennaher Unterboden) zeigt für die Korngrößen eine größere Spannweite im Vergleich zu den Ergebnissen aus der Tiefe 0 bis 30 cm. Der Sandgehalt im Unterboden ist geringer als im Oberboden und die Schluff- und Tongehalte steigen vom Oberboden zum Unterboden an. Aufgrund der höheren Spannweite steigt die Variation der Korngrößenverteilung im Unterboden innerhalb der Fläche deutlich an. Der organische Kohlenstoffgehalt (C_{org}) im krumennahen Unterboden weist einen

niedrigeren Mittel-/ Medianwert als im Oberboden auf. Auch für den Unterboden sind die Korngrößen und C_{org} nicht normalverteilt. (s. Tab. 8)

Tab. 8: Beschreibende statistische Werte für die Korngrößen der Fläche „Im Berge“ für die Tiefe 30 bis 60 cm, Ergebnisse der Laboranalyse, Angaben in %

Attribut	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
Minimum	8.0	19.0	7.0	0.15
Maximum	74.0	51.0	54.0	1.58
Spannweite	66.0	32.0	47.0	1.43
Mittelwert	37.1	33.7	29.1	0.70
s	17.6	6.9	11.6	0.35
VK	47.4	20.5	39.9	50.0
Median	36.0	34.5	29.5	0.64
IQR	30.0	11.0	18.0	0.53
(IQR:Median)	83.3	31.9	61.0	82.8
Normalverteilung	nein	nein	nein	nein
Vertrauensbereich (Median)				
Oberer Bereich	39.2	35.7	31.4	0.70
Unterer Bereich	32.8	33.3	27.6	0.58

s = Standardabweichung

VK = Variationskoeffizient

IQR = Interquartillbereich

Für die Korngrößen Sand, Schluff bzw. Ton betragen die Korrelationskoeffizienten zwischen der Tiefe 0 - 30 cm und der Tiefe 30 - 60 cm 0.75, 0.66 bzw. 0.74. Für C_{org} zeigt sich eine deutliche geringere Beziehung zwischen den beiden Tiefen, der Korrelationskoeffizient beträgt 0.36. Minimum-, Maximum- und Mittel-/ Medianwert unterscheiden sich deutlich. Ebenso weist die geringe Korrelation zwischen den beiden Tiefen darauf hin, dass sich die C_{org} -Gehalte im Oberboden und krumennahen Unterboden nicht gleich verteilen.

Für die in der Tab. 9 dargestellten Nährstoffwerte weist der KS-Test ebenfalls keine Normalverteilung auf. Der Variationskoeffizient bzw. das Verhältnis von (IQR:Median) für das pflanzenverfügbare Phosphor (P_2O_5) weist im Vergleich zu den anderen Nährstoffen eine deutlich höhere Variation auf.

Die Spearman'schen Korrelationskoeffizienten für die untersuchten Nährstoffe und die Korngrößen sowie den organischen Kohlenstoffgehalt sind in Tab. 10 angegeben. Die Korngröße Sand korreliert negativ mit den untersuchten Nährstoffen. Die Korngrößen Schluff und Ton sowie C_{org} weisen eine positive Korrelation gegenüber den untersuchten Nährstoffen auf. Die Stärke der Korrelation ist unterschiedlich. Der Gesamtphosphor- und Gesamtstickstoffgehalt des Oberbodens weisen gegenüber den Korngrößen und C_{org} eine hohe Korrelation auf. Für den Magnesiumgehalt und die Korngrößen wurde ein mittlerer Korrelationskoeffizient bzw. für den Magnesiumgehalt und C_{org} ein geringer Korrelationskoeffizient ermittelt.

Auffallend sind die sehr geringen Korrelationen zwischen dem pflanzenverfügbaren Phosphor (P_2O_5) und den Korngrößen, aber es zeigt sich eine mittlere Korrelation zwischen P_2O_5 und C_{org} . Geringe Korrelationen zeigen sich für den Kaliumgehalt und die Korngrößen sowie C_{org} . (s. Tab. 10)

Tab. 9: Beschreibende statistische Werte für die Nährstoffe der Fläche „Im Berge“ für die Tiefe 0 bis 30 cm, Ergebnisse der Laboranalyse, Angaben in mg/100g außer VK und (IQR:Median) in %

Attribut	P_{gesamt}	N_{gesamt}	MgO	P_2O_5	K_2O
Minimum	53.0	60.0	3.0	5.0	13.0
Maximum	107.0	180.0	12.0	48.0	70.0
Spannweite	54.0	120.0	9.0	43.0	57.0
Mittelwert	75.9	126.6	7.2	17.8	28.7
s	11.0	24.2	1.6	8.0	7.6
VK	14.5	19.1	22.2	44.9	26.5
Median	75.0	130	7.0	16.0	28.0
IQR	15.0	30.0	2.0	7.0	8.0
(IQR:Median)	20.0	23.1	28.6	43.75	28.6

s = Standardabweichung VK = Variationskoeffizient
 IQR = Interquartillbereich P_{gesamt} = Gesamtphosphorgehalt
 N_{gesamt} = Gesamtstickstoffgehalt Mg = pflanzenverfügbares Magnesium
 P_2O_5 = pflanzenverfügbares Phosphor
 K_2O = pflanzenverfügbares Kalium

Tab. 10: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen untersuchten Nährstoffgehalten und der Korngröße sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt in 0 bis 30 cm Tiefe der Fläche „Im Berge“

Attribut	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
P_{gesamt}	-0.81 **	0.80 **	0.76 **	0.85 **
N_{gesamt}	-0.75 **	0.76 **	0.69 **	0.87 **
MgO	-0.62 **	0.57 **	0.60 **	0.29 **
P_2O_5	-0.03 **	0.13 **	-0.04 **	0.57 **
K_2O	-0.45 **	0.42 **	0.44 **	0.36 **

Somit gibt die räumliche Verteilung der Korngrößen und des organischen C_{org} in einem hohen Maß Hinweise auf die räumliche Verteilung des Gesamtphosphor- bzw. Gesamtstickstoffgehalts innerhalb der Fläche „Im Berge“. Für die Nährstoffe Magnesium und Kalium trifft diese Aussage nur sehr bedingt zu. Die räumliche Verteilung des pflanzenverfügbaren Phosphors wird innerhalb der Fläche „Im Berge“ vorwiegend durch C_{org} bestimmt.

4.1.2. Geoelektrische Messung mit dem BOs - 1EP

4.1.2.1. Elektrische Leitfähigkeit (BOs- 1EP)

Mit dem Bodensensorsystem der Fachhochschule Osnabrück (BOs - 1EP) sind in den Jahren 2005 und 2007 mehrere geoelektrische Messungen auf der gesamten Fläche „Im Berge“ durchgeführt worden. In Tab. 11 sind die Messzeitpunkte aufgeführt. Im Jahr 2006 konnten keine Messungen durchgeführt werden, da die Fläche im Frühjahr aufgrund einer ausgebrachten Winterung (Dinkel) nicht zugänglich war. Nach der Ernte waren aufgrund der trockenen Witterung keine geoelektrische Messungen möglich. Bei der Auswertung der Daten des Jahres 2005 ist zu berücksichtigen, dass sich die Einsatzbedingungen der geoelektrischen Messung am 14.09.2005 zu denen der anderen Messtermine unterscheiden. Aufgrund der trockenen und warmen Witterung im September 2005 schoben sich beim Durchzug der Messelektroden durch den Boden Aggregate auf, die die geoelektrische Messung beeinflussten. Dieses trat insbesondere auf den tonreichen Teilflächen auf. Aus diesem Grund fand die geoelektrische Messung am 14.09.2005 in den Messspuren vom 30.08.2005 und 02.09.2005 statt. Die Messspuren waren bereits „vorgelockert“ und repräsentieren somit nicht die Bedingungen zu den anderen Messterminen, an denen der Boden einen gleichmäßigen Bodenbearbeitungszustand aufwies.

Tab. 11: Messzeitpunkte des BOs - 1EP auf der Fläche „Im Berge“

Messsystem	Messzeitpunkt	Bemerkung
BOs - 1EP	15.03.2005	Kultur auf der Fläche: Klee gras im 4. Jahr
BOs - 1EP	22.03.2005	Messdaten für die gepflügte Teilfläche
BOs - 1EP	19.08.2005	Messung erfolgte direkt nach dem Mähdrusch
BOs - 1EP	30.08.2005	Messung im flach gegrubberten Boden
BOs - 1EP	02.09.2005	Messung im flach gegrubberten Boden
BOs - 1EP	14.09.2005	Nutzung der Mess-/Fahrspuren vom 30.08.2005 und 02.09.2005
BOs - 1EP	06.10.2005	Messung im gepflügten und saarfertigen Boden
BOs - 1EP	14.03.2007	Messung im unbearbeiteten Boden, Kultur: abgefrorene Zwischenfrucht

In Tabelle 12 sind beschreibende statistische Werte für die elektrische Leitfähigkeit der Fläche „Im Berge“ aufgeführt. Die elektrischen Leitwerte sind auf 25°C (EC25) normiert (s. Gleichung 1). Dieses hat den Vorteil, dass die Messergebnisse um den Einfluss der Bodentemperatur korrigiert sind und die einzelnen Messtermine somit besser vergleichbar sind.

Die Zahlenreihen der geoelektrischen Messung sind nur teilweise normalverteilt. Die Messwerte vom 15.03.2005, 30.08.2005 und 14.03.2007 zeigen eine ähnliche Spannweite auf, weisen aber bei weiteren statistischen Werten, z.B. Mittelwert oder Standardabweichung, Differenzen untereinander auf. Die Messergebnisse vom 22.03.2005 und 14.09.2005 weisen die geringsten Spannweiten und geringsten Mittelwerte bzw. Medianwerte auf. Die Messung am 22.03.2005 weist hingegen

einen höheren Variationskoeffizienten bzw. ein höheres Verhältnis von (IQR:Median) im Vergleich zu den anderen Messterminen auf, d.h. die Messwerte streuen weiter. Dagegen ist die Streuung der Werte vom 14.09.2005 im Vergleich zu den anderen Messterminen geringer (mit Ausnahme vom 06.10.2005), da hier der Variationskoeffizient bzw. das Verhältnis von (IQR:Median) ebenfalls geringer ist. Als Grund für diese geringe Spannweite wird das erneute Messen in den Bahnen der beiden vorhergehenden Termine vermutet (s.o.).

Die Messwerte vom 15.03.2005 unterscheiden sich zu den am 22.03.2005 erhobenen Werten deutlich. Als Ursache hierfür wird die zuvor durchgeführte Bodenbearbeitung vermutet. Ebenso wird vermutet, dass die geringe Streuung der Messwerte vom 06.10.2005 ebenfalls eine Folge der Bodenbearbeitung ist, da das Land zu diesem Messtermin gepflügt und rückverfestigt war. (s. Tab. 12)

Tab. 12: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Leitfähigkeit normiert auf 25°C für die Fläche „Im Berge“, Angaben in mS/m außer VK und (IQR:Median) in %

Attribut	15.03.05	22.03.05	19.08.05	30.08.05	02.09.05	14.09.05	06.10.05	14.03.07
Minimum	1.6785	1.0763	1.3038	1.6218	1.0923	0.5487	0.8601	1.9175
Maximum	10.2230	6.1156	8.2790	10.1735	7.3630	4.6093	8.4399	10.3395
Spannweite	8.5445	5.0394	6.9752	8.5517	6.2707	4.0607	7.5798	8.4220
Mittelwert	7.2601	3.3254	5.9046	6.1980	5.0119	3.2066	6.2870	6.4710
s	1.7121	1.0834	1.3339	1.6433	1.1185	0.5744	0.9299	1.9330
VK	23.6	32.6	22.6	26.5	22.3	17.9	14.8	29.9
Median	7.4442	3.1047	6.0794	5.9781	5.0475	3.1783	6.4190	6.6615
IQR	2.4897	1.5215	1.9646	2.4147	1.6540	0.7867	1.4007	3.0792
(IQR:Median)	33.5	49.0	32.3	40.4	32.8	24.8	21.8	46.2
n	224	177	224	224	224	224	224	224
Normalvert.	ja	nein	nein	ja	ja	ja	nein	ja

s = Standardabweichung VK = Variationskoeffizient IQR = Interquartillbereich
n = Anzahl der Beprobungsorte
Normalvert.= Normalverteilung (nach Kolmogorov-Smirnov Test mit Lilliefors-Modifikation)

4.1.2.1.1. Vergleich der Messtermine im Hinblick auf die elektrische Leitfähigkeit

Hohe Korrelationen bei den Messergebnissen an den verschiedenen Messterminen weisen auf eine Reproduzierbarkeit des Messprinzips hin. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen auf der Fläche „Im Berge“ sind die Korrelationen der Messtermine untereinander überwiegend als hoch bis sehr hoch zu beurteilen (s.Tab. 13). Dieses ist ein Hinweis auf eine gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse mit dem Messprinzip „Erfassung des komplexen elektrischen Leitwerts“ auf.

Tab. 13: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für die elektrische Leitfähigkeit zwischen den jeweiligen Messterminen

Messtermin	15.03.05	22.03.05	19.08.05	30.08.05	02.09.05	14.09.05	06.10.05	14.03.07
15.03.2005	1							
22.03.2005	0.79 **	1						
19.08.2005	0.79 **	0.58 **	1					
30.08.2005	0.84 **	0.71 **	0.71 **	1				
02.09.2005	0.90 **	0.78 **	0.80 **	0.84 **	1			
14.09.2005	0.79 **	0.70 **	0.68 **	0.74 **	0.84 **	1		
06.10.2005	0.80 **	0.68 **	0.81 **	0.74 **	0.81 **	0.72 **	1	
14.03.2007	0.90 **	0.73 **	0.74 **	0.78 **	0.81 **	0.64 **	0.72 **	1

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

Vergleich der Feldkarten „elektrischer Leitwert“ und „Korngrößenverteilung“

Im Anhang sind fünf ausgewählte Messtermine als Feldkarte mit den interpolierten elektrischen Leitwerten dargestellt (s. Anhang Abb. 5 - 9). Die Interpolation erfolgt mit der Methode „Kriging“. Die räumliche Verteilung der elektrischen Leitwerte (s. Anhang Abb. 5 - 9) bildet die räumliche Verteilung der Korngröße (s. Anhang Abb. 1 - 3) mit einer hohen Ähnlichkeit ab. Die südliche Teilfläche mit hohen Sandgehalten bzw. niedrigen Tongehalten weist niedrige elektrische Leitwerte auf. Die nördliche und die mittlere Teilfläche mit niedrigen Sandgehalten bzw. hohen Tongehalten weisen hohe elektrische Leitwerte auf. Eine weitere Teilfläche ist an der westlichen Feldgrenze erkennbar. Für diesen Bereich sind mittlere Sandgehalte bzw. mittlere Tongehalte ausgewiesen und die elektrischen Leitwerte zeigen ebenfalls mittlere Werte auf. Aber auch kleinräumige Variationen der Korngrößenzusammensetzung sind anhand des elektrischen Leitwerts erkennbar, wie z.B. am nordöstlichen Feldrand. Allerdings fällt am nordwestlichen Feldrand auf, dass der elektrische Leitwert hier für den ermittelten Tongehalt im Vergleich zu anderen Bereichen zu niedrig ist.

4.1.2.1.2. Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen EC25 und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt

Korrelationsanalyse

Tabelle 14 weist die Spearmanschen Korrelationskoeffizienten des jeweiligen Messtermins zwischen EC25 und der Korngröße sowie organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) in 0 - 30 cm Tiefe aus. Der Zusammenhang zwischen der Korngröße Sand und EC25 ist negativ, d.h. mit steigendem Sandgehalt sinkt die elektrische Leitfähigkeit. Für die Korngrößen Schluff und Ton sowie C_{org} ist der Zusammenhang zur elektrischen Leitfähigkeit positiv, d.h. die elektrische Leitfähigkeit steigt bei diesen Korngrößen sowie bei C_{org} an. Die Korrelationen sind für EC25 und Sand sowie Ton überwiegend als hoch zu beurteilen. Der Messtermin am 14.09.2005 weist eine mittlere Korrelation auf. Für die Korngröße Schluff und EC25 ist die

Korrelation als mittel bis hoch zu beschreiben. Eine geringe bis mittlere Korrelation zeigt sich zwischen der EC25 und C_{org} .

Tab. 14: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Korngröße sowie C_{org} , Probeentnahmetiefe: 0 - 30 cm, Fläche „Im Berge“

Messsystem	Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
BOs - 1EP	15.03.2005	-0.82**	0.77**	0.80**	0.65**
BOs - 1EP	22.03.2005	-0.74**	0.74**	0.68**	0.54**
BOs - 1EP	19.08.2005	-0.67**	0.53**	0.71**	0.36**
BOs - 1EP	30.08.2005	-0.77**	0.72**	0.74**	0.56**
BOs - 1EP	02.09.2005	-0.74**	0.65**	0.74**	0.48**
BOs - 1EP	14.09.2005	-0.58**	0.57**	0.54**	0.53**
BOs - 1EP	06.10.2005	-0.77**	0.68**	0.77**	0.42**
BOs - 1EP	14.03.2007	-0.81**	0.74**	0.79**	0.51**

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

Zum Vergleich sind in Tab. 15 die Spearmanschen Korrelationskoeffizienten des jeweiligen Messtermins für EC25 und der Korngröße sowie C_{org} in 30 - 60 cm Tiefe angegeben. Es zeigt sich, dass der Zusammenhang deutlich geringer ist als bei den Korrelationen in 0 - 30 cm Tiefe. Dieses wird als wichtiger Hinweis darauf gewertet, dass die geoelektrische Messung maßgeblich von den Bodeneigenschaften (z.B. Korngrößenverteilung) in der Messtiefe der Messelektroden bestimmt wird. Dies bedeutet, dass der Messwert einem bestimmten Messvolumen in einer bestimmbareren Messtiefe zugeordnet werden kann. Aus diesem Grund werden in der weiteren Auswertung der geoelektrischen Messdaten nur die Analyseergebnisse der Bodenproben aus der Tiefe 0 - 30 cm berücksichtigt.

Tab. 15: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Korngröße sowie C_{org} , Probeentnahmetiefe: 30 - 60 cm, Fläche „Im Berge“

Messsystem	Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
BOs - 1EP	15.03.2005	-0.61**	0.54**	0.62**	0.40**
BOs - 1EP	22.03.2005	-0.56**	0.52**	0.55**	0.22**
BOs - 1EP	19.08.2005	-0.52**	0.41**	0.55**	0.36**
BOs - 1EP	30.08.2005	-0.59**	0.53**	0.59**	0.31**
BOs - 1EP	02.09.2005	-0.56**	0.49**	0.57**	0.33**
BOs - 1EP	14.09.2005	-0.47**	0.43**	0.47**	0.16*
BOs - 1EP	06.10.2005	-0.54**	0.46**	0.55**	0.32**
BOs - 1EP	14.03.2007	-0.62**	0.53**	0.63**	0.34**

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

* Die Korrelation ist auf dem 0.05 Niveau signifikant (zweiseitig)

Regressionsanalyse

In Tabelle 16 - 19 sind Angaben zur Aufbereitung der Messdaten und Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen EC25 und der entsprechenden Korngröße sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt im Oberboden aufgeführt. Um bei der Erstellung der Regression zwischen EC25 und der Korngröße Sand ein hohes Bestimmtheitsmaß zu erreichen, wird überwiegend ein logarithmisches Regressionsmodell gewählt. Die Messdaten EC25 und Korngröße Sand werden nicht aufbereitet (s. Tab. 16). Anders ist die Vorgehensweise bei der Erstellung der Regression für EC25 und der Korngröße Ton. Hier sind die Zahlenreihen (EC25 und Korngröße Ton) logarithmiert und es wird ein potenzielles Regressionsmodell gewählt, um ein hohes Bestimmtheitsmaß zu erreichen (s. Tab. 18). Überwiegend wird ein potenzielles Regressionsmodell für die Erstellung der Regression für EC25 und der Korngröße Schluff genutzt, um ein hohes Bestimmtheitsmaß zu erreichen; teilweise sind die Zahlenreihen (EC25 und Korngröße Schluff) logarithmiert (s. Tab. 17). Bei der Erstellung der Regression für EC25 und organischem Kohlenstoffgehalt zeigt sich keine Tendenz für ein bestimmtes Regressionsmodell (s. Tab. 20).

Tab. 16: Regressionsmodelle für die Korngröße Sand und die elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

Korngröße Sand (y = Sandgehalt, x = EC25)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
15.03.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = (-5.0520)x + 80.2409$	0.73
22.03.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-23.615)\ln(x) + 71.2051$	0.62
19.08.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-30.144)\ln(x) + 96.2382$	0.55
30.08.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-28.159)\ln(x) + 93.8428$	0.65
02.09.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-32.404)\ln(x) + 94.936$	0.59
14.09.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-35.969)\ln(x) + 84.9529$	0.39
06.10.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-55.795)\ln(x) + 145.699$	0.61
14.03.2007	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-25.123)\ln(x) + 89.1611$	0.71

Tab. 17: Regressionsmodelle für die Korngröße Schluff und die elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

Korngröße Schluff ($y = \text{Schluffgehalt}$, $x = \text{EC25}$)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
15.03.2005	keine Aufbereitung	Potenziell	$y = 14.4765 x^{0.3994}$	0.62
22.03.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.5977 x^{0.0921}$	0.62
19.08.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.5699 x^{0.1640}$	0.40
30.08.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.5675 x^{0.1689}$	0.58
02.09.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.5986 x^{0.1690}$	0.47
14.09.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.6712 x^{0.1553}$	0.38
06.10.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = 20.0848 \ln(x) - 4.9365$	0.47
14.03.2007	keine Aufbereitung	Potenziell	$y = 18.0358 x^{0.3081}$	0.59

Tab. 18: Regressionsmodelle für die Korngröße Ton und die elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

Korngröße Ton ($y = \text{Tongehalt}$, $x = \text{EC25}$)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
15.03.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.5113 x^{0.5586}$	0.78
22.03.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.6230 x^{0.2275}$	0.67
19.08.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.5873 x^{0.5128}$	0.66
30.08.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.5433 x^{0.4444}$	0.67
02.09.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.6478 x^{0.4786}$	0.64
14.09.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.7961 x^{0.3849}$	0.39
06.10.2005	logarithmiert	Logarithmisch	$y = 1.2684 \ln(x) + 1.6703$	0.61
14.03.2007	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.5198 x^{0.4039}$	0.78

Tab. 19: Regressionsmodelle für den organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) und die elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

Messzeitpunkt	C_{org} ($y = C_{org}$, $x = EC25$)			
	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
15.03.2005	keine Aufbereitung	Potenziell	$y = 0.6272 x^{0.3793}$	0.40
22.03.2005	logarithmiert	Logarithmisch	$y = 0.1059 \ln(x) + 0.1794$	0.40
19.08.2005	logarithmiert	Logarithmisch	$y = 0.1892 \ln(x) + 0.1733$	0.18
30.08.2005	keine Aufbereitung	Potenziell	$y = 0.7598 x^{0.3071}$	0.31
02.09.2005	keine Aufbereitung	Potenziell	$y = 0.8017 x^{0.3121}$	0.22
14.09.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = 0.2131x + 0.6472$	0.30
06.10.2005	logarithmiert	Logarithmisch	$y = 0.3907 \ln(x) + 0.2097$	0.19
14.03.2007	logarithmiert	Logarithmisch	$y = 0.1753 \ln(x) + 0.1641$	0.29

Ein hohes Bestimmtheitsmaß weisen die Regressionen für EC25 und Sand bzw. Ton für den Messtermin im Frühjahr bei einem unbearbeiteten Bodenzustand auf. So zeigt z.B. ein Bestimmtheitsmaß mit einem Wert von 0.78, dass 78% der Varianz der ermittelten Y-Werte (hier die Korngröße Ton) anhand des X-Wertes (hier die elektrische Leitfähigkeit) mit Hilfe der dazugehörigen Regressionsgleichung erklärt werden können. Dies bedeutet, dass sich bei einem hohen Bestimmtheitsmaß ein hoher Anteil der jeweiligen Korngröße des Bodens mit der Regressionsgleichung und den elektrischen Leitwerten korrekt Schätzen lässt.

Ein etwas geringeres Bestimmtheitsmaß weisen die Regressionen für EC25 und die Korngröße Ton für die Messung auf der gepflügten Ackerfläche im März 2005, direkt nach dem Mähdrusch (19.08.2005) und auf dem flach gegrubbten Acker (30.08.2005), sowie die Regression für EC25 und die Korngröße Sand, ebenfalls auf dem flach gegrubbten Acker, im August 2005 auf. Insgesamt kann das Bestimmtheitsmaß für die Regressionen EC25 und die Korngrößen Sand und Ton als mittel bis hoch beschrieben werden, mit Ausnahme des Messtermins 14.09.2005. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionen für EC und die Korngröße Schluff kann als gering bis mittel beschrieben werden. Es ist im Vergleich zu den Korngrößen Sand und Ton etwas schwächer ausgeprägt. Für die Regression EC und den organischen Kohlenstoff ist das Bestimmtheitsmaß überwiegend als gering zu beurteilen.

4.1.2.1.3. Schätzung der Korngröße anhand der EC25-Werte

Für eine beprobungsarme Kartierung der Korngrößen innerhalb der Fläche „Im Berge“ wird eine Schätzung der Korngrößen im Oberboden durchgeführt. Als Grundlage werden die EC25-Werte des Oberbodens genutzt. Der EC25-Wert wird mit Hilfe von z.B. sieben Proben mit der gewünschten Korngröße kalibriert, d.h. es wird eine Regressionsgleichung gebildet. Mit Hilfe der vorliegenden Analysewerte werden für Sand, Schluff und Ton die besten Regressionsgleichungen ermittelt. Somit kann anhand des EC25-Werts (X-Wert) die entsprechende Korngröße (Y-Wert) Sand, Schluff oder Ton separat abgeschätzt werden.

Die Auswahl der Proben erfolgte anhand der Messwertetabelle oder mittels der Feldkarte mit den EC25-Werten. Drei unten näher beschriebene Vorgehensweisen werden angewendet:

1. Methode: „Wertetabelle“
2. Methode: „Feldkarte“
3. Methode: „Willkürliche Auswahl“

Bei der Schätzmethode „Wertetabelle“ werden anhand der Wertetabelle mit dem EC25-Werten die höchsten und niedrigsten EC25-Werte ermittelt und die Rasterzellen ausgewählt, die diese Werte aufweisen. In der Regel liegen sowohl zwei Rasterzellen für den niedrigsten als auch für den höchsten Leitwert vor. Sollte sich z.B. für den höchsten Leitwert nur eine zusammenhängende Teilfläche abzeichnen, ist nur ein Leitwert für die betreffende Kategorie ausgewählt. Entsprechend ist eine Rasterzelle mehr in der Kategorie mittlerer Leitwert aufgenommen. Die mittleren Leitwerte sind anhand der Feldkarte mit den EC25-Werten ausgewählt. Die Analysewerte der Rasterzellen werden für die Regressionsgleichungen genutzt.

Bei der Schätzmethode „Feldkarte“ ist die Feldkarte mit den EC25-Werten Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der Rasterzellen. Auch hier findet die Auswahl der Rasterzellen entsprechend der Kategorie hoher, mittlerer und niedriger EC25 statt. Es werden jeweils zwei Teilflächen innerhalb der Fläche gewählt, die einen zusammenhängenden hohen bzw. niedrigen EC25 abbilden. Sollte sich entsprechend nur eine Teilfläche für die jeweilige Kategorie abzeichnen, wird die zweite Rasterzelle der Kategorie mittlerer Leitwert zugeordnet. Die Rasterzellen für die Kategorie mittlerer Leitwert werden ebenfalls anhand der Feldkarte mit den EC25-Werten ausgewählt. Genauso wie bei der Schätzmethode „Wertetabelle“ werden die Analysewerte der ermittelten Rasterzellen in die Regressionsgleichungen eingesetzt.

Bei der Schätzmethode „Willkürliche Auswahl“ werden sieben Rasterzellen nach dem Zufallsprinzip ausgesucht. Das bedeutet, dass jegliche Information über räumliche Zusammenhänge, EC25 usw., unberücksichtigt bleiben. Die Regressionsgleichung werden durch Einsetzen der jeweiligen Analysewerte der Rasterzelle gebildet. Die einmal zufällig ausgewählten Rasterzellen werden für jeden Messtermin genutzt, somit sind die einzelnen Messtermine besser miteinander vergleichbar.

Die unterschiedlichen Schätzmethoden werden anhand verschiedener Kriterien

evaluiert, um das beste Schätzmodell zu klassifizieren. Entscheidungskriterien für das beste Schätzmodell sind:

- die geschätzten Werte sollen die wahre Spannweite möglichst ähnlich abbilden
- ein annähernd gleicher Medianwert für die wahren und geschätzten Werte
- der Vertrauensbereich der geschätzten Medianwerte ist nicht signifikant unterschiedlich gegenüber dem Vertrauensbereich der wahren Medianwerte
- eine möglichst kleine Standardabweichung zwischen geschätztem und wahren Wert (Methode nach KÖSTER (1979))
- die Summe der geschätzten Korngrößen Sand, Schluff und Ton ist 100 bzw. annähernd 100.

Die beste Schätzmethode in Tab. 20 steht für die Methode, die die Entscheidungskriterien am besten erfüllen. Die alternative Schätzmethode erfüllte die angegebenen Entscheidungskriterien in einem ähnlich hohen Maß wie die beste Schätzmethode.

Als beste Schätzmethoden erweist sich mit je drei Nennungen die Methode „Wertetabelle“ und die Methode „Feldkarte“. Wird die alternative Schätzmethode mit berücksichtigt, zeigt sich die Schätzmethode „Feldkarte“ ebenso häufig. Die Methode „Willkürliche Auswahl“ wird mit insgesamt vier Nennungen genannt. Dies ist beachtlich, da bei dieser Methode die Auswahl der Werte ohne jeglichen räumlichen Zusammenhang erfolgte.

Tab. 20: Beste Schätzmethode für die Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

Messtermin	Beste Schätzmethode	Alternative Schätzmethode
15.03.2005	Wertetabelle	Willkürliche Auswahl
19.08.2005	Wertetabelle	Willkürliche Auswahl
30.08.2005	Feldkarte	Wertetabelle
02.09.2005	Feldkarte	Willkürliche Auswahl
14.09.2005	Feldkarte	Wertetabelle
06.10.2005	Wertetabelle	Feldkarte
14.03.2007	Willkürliche Auswahl	Feldkarte

Die Summe der geschätzten Korngrößen Sand, Schluff und Ton ergibt für jeden Messtermin einen Mittelwert von 100 bzw. einmal 101; der niedrigste Summenwert ist 98 und der höchste Summenwert ist 103.

In den Tabellen 21 - 23 sind die Differenzen zwischen dem wahren und geschätzten Korngrößenwert der besten Schätzmethode aufgeführt. Weiterhin sind der maximale Wert für eine Über- und Unterschätzung und der Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung für die fünf ausgewählten Messtermine angegeben.

Es zeigt sich, dass die Schätzung des Schluff- bzw. Tongehalts besser ist als die Schätzung des Sandgehalts. Zu berücksichtigen ist, dass der Maximalwert und die Wertspanne für die Korngröße Sand deutlich größer sind als die Wertespannen für Ton oder Schluff. Aufgrund dessen ergibt sich eine größere Streuung bei der Schätzung für den Sandgehalt.

Insgesamt zeigen ca. zwei Drittel (54 - 71%) der geschätzten Sandwerte eine Abweichung von ± 5 Prozentpunkten vom wahren Sandwert auf. Ca. drei Viertel (65 - 77%) der geschätzten Sandwerte sind mit einer Toleranz von ± 6 Prozentpunkten treffend geschätzt. (s. Tab. 21)

Tab. 21: Differenz zwischen wahren und geschätztem Sandgehalt, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

	Messtermin				
	15.03.2005	19.08.2005	30.08.2005	06.10.2005	14.03.2007
Schätzmethode	Wertetabelle	Wertetabelle	Feldkarte	Wertetabelle	Willkürliche Auswahl
Differenz in Prozentpunkte	Anzahl der Nennung von den gesamten Rasterzellen (n= 224)				
0	19	9	18	15	13
± 1	46	30	39	42	42
± 2	84	54	74	70	82
± 3	117	81	94	91	107
± 4	135	97	120	116	130
± 5	158	122	140	133	153
± 6	173	146	159	145	174
Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung (Prozentpunkte)	0.9	0.7	-1.2	-0.3	-0.6
Standardabweichung (nach KÖSTER 1979)	5.3	6.7	6.7	6.6	5.7
Maximale Überschätzung (Prozentpunkte)	20	17	15	18	18
Maximale Unterschätzung (Prozentpunkte)	-12	-18	-16	-21	-13

Bei der Schätzung Schluff sind 69 - 80% der Schätzwerte mit einer Abweichung von ± 3 Prozentpunkten korrekt angegeben. Werden ± 6 Prozentpunkte als Toleranz akzeptiert, sind mehr als 95% der Schluffwerte korrekt geschätzt. (s. Tab. 22)

Ein ebenso gutes Ergebnis zeigen die geschätzten Tongehalte: ca. 2/3 (58 - 72%) der geschätzten Werte sind mit einer Abweichung von ± 3 Prozentpunkten korrekt angegeben. Wird eine Genauigkeit von ± 4 Prozentpunkten bzw. ± 6 Prozentpunkten als korrekt zu Grunde gelegt, sind 71 - 79% bzw. 84 - 96% der Werte treffend geschätzt. (s. Tab. 23)

Anhand der Mittelwerte der durchschnittlichen Abweichung ist kein Zusammenhang zur Schätzgenauigkeit erkennbar.

Wird die alternative bzw. die ausgeschlossene Schätzmethode für den jeweiligen Messtermin betrachtet, zeigt sich eine geringfügige Abnahme der Schätzgenauigkeit. Erwähnenswert ist auch die Schätzmethode „Willkürliche Auswahl“, hier zeigt sich

eine gute Schätzgenauigkeit im Vergleich zu den beiden Methoden mit gezielt ausgesuchten Rasterzellen.

Tab. 22: Differenz zwischen wahren und geschätztem Schluffgehalt, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

Schätzmethode	Messtermin				
	15.03.2005	19.08.2005	30.08.2005	06.10.2005	14.03.2007
	Wertetabelle	Wertetabelle	Feldkarte	Wertetabelle	Willkürliche Auswahl
Differenz in Prozentpunkte	Anzahl der Nennung von den gesamten Rasterzellen (n= 224)				
0	23	29	28	28	30
± 1	82	74	88	83	91
± 2	125	118	136	132	147
± 3	161	154	178	160	178
± 4	195	185	204	192	201
± 5	211	205	215	206	214
± 6	222	215	220	215	219
Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung (Prozentpunkte)	1.2	-0.6	-0.3	0.8	0.3
Standardabweichung (nach KÖSTER 1979)	2.9	3.3	2.8	3.2	2.7
Maximale Überschätzung (Prozentpunkte)	6	9	5	10	7
Maximale Unterschätzung (Prozentpunkte)	-9	-8	-9	-6	-9

Tab. 23: Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

	Messtermin				
	15.03.2005	19.08.2005	30.08.2005	06.10.2005	14.03.2007
Schätzmethode	Wertetabelle	Wertetabelle	Feldkarte	Wertetabelle	Willkürliche Auswahl
Differenz in Prozentpunkte	Anzahl der Nennung von den gesamten Rasterzellen (n= 224)				
0	22	18	25	31	20
± 1	75	64	61	74	69
± 2	122	100	108	103	114
± 3	156	137	143	129	161
± 4	184	162	165	158	183
± 5	193	178	186	173	201
± 6	214	195	199	188	211
Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung (Prozentpunkte)	0.4	-0.7	0.5	0.2	0
Standardabweichung (nach KÖSTER 1979)	3.5	4.8	4.1	4.3	3.6
Maximale Überschätzung (Prozentpunkte)	9	8	13	14	6
Maximale Unterschätzung (Prozentpunkte)	-14	-11	-12	-12	-14

Wird die räumliche Verteilung der Über- und Unterschätzung des Tongehalts betrachtet, fällt auf, dass in der südlichen Hälfte der untersuchten Fläche der Tongehalt überschätzt und in der nördlichen Hälfte unterschätzt wird. Weiterhin fällt auf, dass einige Rasterzellen bei jedem Messtermin eine deutliche Unterschätzung aufweisen (s. Abb. 29 und 30, durchgängige Kreise). Beispielhaft sind die Messtermine 15.03.2005 und 14.03.2007 dargestellt, die anderen Messtermine weisen einen ähnlichen räumlichen Bezug auf. Es wurde erwartet, dass sich die Verteilung zufällig über die gesamte Fläche erstreckt (s. Abb. 29 und 30, gestrichelte Kreise). Dennoch weist die äußerste nordwestliche Ecke der Fläche „Im Berge“ zu allen Messterminen eine deutliche Unterschätzung auf, wobei die räumliche Ausdehnung je nach Messtermin variiert. Für diesen Bereich weist die geologische Karte als Ausgangsgestein Ton- und Sandstein aus dem oberen Keuper aus (s. Abb. 12), evtl. kann ein unterschiedliches Ausgangsgestein für diesen Bereich Ursache sein.

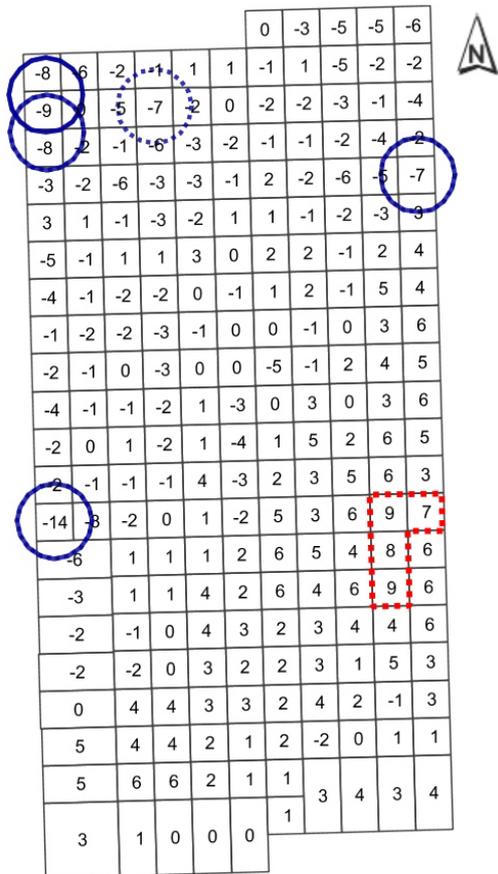


Abb. 29: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP, eine negative Zahl bezeichnet eine Unterschätzung des Tongehalts, eine positive Zahl bezeichnet eine Überschätzung, Kreise markieren Teilflächen mit einer Unterschätzung von mehr als 6 Prozentpunkten, ein quadratisches Polygon markiert Teilflächen mit einer Überschätzung von mehr als 6 Prozentpunkten, Messtermin: 15.03.2005

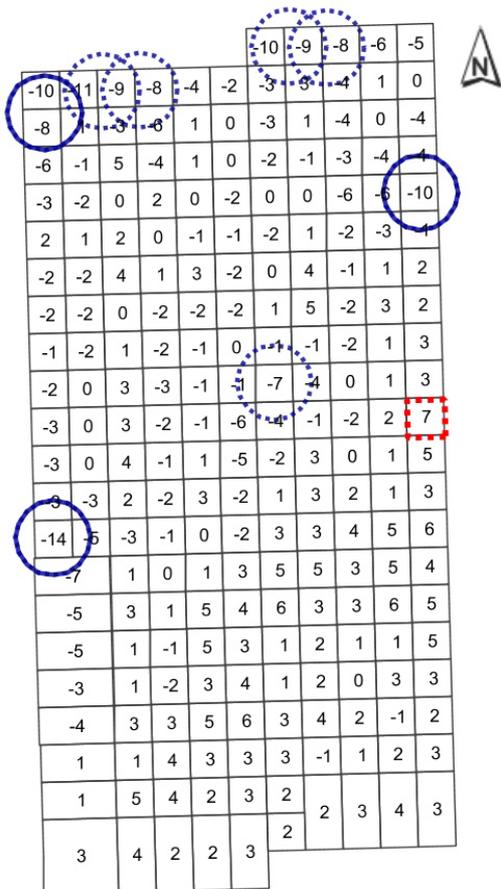


Abb. 30: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP, eine negative Zahl bezeichnet eine Unterschätzung des Tongehalts, eine positive Zahl bezeichnet eine Überschätzung, Kreise markieren Teilflächen mit einer Unterschätzung von mehr als 6 Prozentpunkten, ein quadratisches Polygon markiert Teilflächen mit einer Überschätzung von mehr als 6 Prozentpunkten, Messtermin: 14.03.2007

Vergleich Feldkarte „EC25“ mit bodenkundlichen Karten

Ein Vergleich der bodenkundlichen Karten (Bodenschätzung und Bodentyp, s. Abb. 13 und 14) mit den Feldkarten EC25 zeigen ebenfalls gute Zusammenhänge. Die südliche Teilfläche, die in der Bodenschätzung mit der Bewertung 46 / 47 SL4D beurteilt (s. Abb. 13) und als Braunerde - Pseudogley (s. Abb. 14) angegeben ist, weist geringere elektrische Leitfähigkeiten (s. Anhang Abb. 5 - 9) auf als der nördliche Teil der Fläche. Der nördliche Teil weist nach der Bodenschätzung mit 51 / 51 L5V eine höhere Bewertung auf (s. Abb. 12). Dieser Bereich wird nach der Bodenschätzung nicht weiter differenziert. Dagegen kann anhand der Ergebnisse der geoelektrischen Messungen die nördliche Teilfläche weiter in drei Bereiche differenziert werden. Dieses wird durch die Analysewerte der Korngrößenzusammensetzung bestätigt (s. Anhang Abb. 1 - 3 und 5 - 9 und Kap. 4.1.2.1.1).

4.1.2.2. Elektrische Kapazität (BOs - 1EP)

Tabelle 24 listet beschreibende statistische Werte für die elektrische Kapazität (C_{ele}) des BOs - 1EP für die Fläche „Im Berge“ auf. Eine Normierung des Messwertes auf eine Basisgröße (z.B. Bodentemperatur) erfolgte nicht. Die Messwerte sind in der Regel nicht normalverteilt. Für die Messtermine 15.03.2005, 19.08.2005 und 30.08.2005 zeigen sich negative Messwerte. Für diese drei Messungen und für die Messung am 22.03.2005 zeigen sich zwischen EC25 und C_{ele} hohe bis sehr hohe Korrelationen. Geringe und mittlere Korrelationen sind an den anderen Terminen feststellbar.

Negative Kapazitäten ergeben sich am 15.03.2005 ab einer Leitfähigkeit von ca. 4 mS/m und am 19.08.2005 sowie am 30.08.2005 ab einer Leitfähigkeit von ca. 5.7 - 6.3 mS/m. An den anderen Terminen sind durchaus Leitfähigkeiten über 7 mS/m und mehr feststellbar, allerdings ergeben sich als Rastermittelwerte keine negativen Kapazitäten. Eine eindeutige Leitfähigkeit, ab der sich negative Kapazitätswerte ergeben, kann anhand dieser Daten nicht ermittelt werden.

Ergeben sich negative Messwerte, sind die Spannweite und die Streuung der Messwerte deutlich größer als an Messterminen mit nur positiven Messwerten. Auffällig ist der deutliche Unterschied der Messwerte vom 15.03.2005 und 22.03.2007. Als Ursache hierfür wird wieder das Pflügen der Fläche vermutet. Auch die geringe Streuung der Messwerte am 06.10.2007 ist vermutlich auf den Einfluss der Bodenbearbeitung zurückzuführen. Die Fläche ist zu diesem Messtermin gepflügt und saarfertig. Ebenfalls eine geringe Spannweite und Streuung ist für die beiden Messtermine 02.09.2005 und 14.09.2005 feststellbar. Als Grund wird hierfür der trockene Boden aufgrund der regenarmen Witterung und für den 14.09.2005 außerdem das erneute Messen in den Bahnen der beiden vorhergehenden Messungen vermutet (s. Tab. 11).

Tab. 24: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Kapazität der Plattenanordnung für die Fläche „Im Berge“, Angaben in Pikofarad (pF) außer VK und (IQR:Median) in %

Attribut	15.03.05	22.03.05	19.08.05	30.08.05	02.09.05	14.09.05	06.10.05	14.03.07
Minimum	-548	177	-335	-179	225	355	305	364
Maximum	597	380	271	316	353	442	386	714
Spannweite	1145	203	606	495	128	87	81	350
Mittelwert	160	311	53	191	299	367	350	589
s	281.6	36.9	135.6	93.8	21.4	21.2	16.7	68.7
VK	176	11.9	255.8	49.1	7.2	5.8	4.8	11.7
Median	185	316	65	216	299	394	351	601
IQR	454	47	207	123	24	36	23	90
(IQR:Median)	246.7	14.9	318.5	56.9	8.0	9.1	6.6	15.0
n	224	177	224	224	224	224	224	224
Normalvert.	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein

s = Standardabweichung VK = Variationskoeffizient IQR = Interquartillbereich
n = Anzahl der Beprobungsorte
Normalvert.= Normalverteilung (nach Kolmogorov-Smirnov Test mit Lilliefors-Modifikation)

4.1.2.2.1. Vergleich der Messtermine im Hinblick auf die elektrische Kapazität

Die Messtermine weisen hinsichtlich der elektrischen Kapazität unterschiedlich stark ausgeprägte Korrelationskoeffizienten auf. Der Zusammenhang kann von gering bis hoch beschrieben werden. Im Gegensatz zum Messterminvergleich hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit weisen die Korrelationskoeffizienten der elektrischen Kapazität eine deutlich höhere Schwankung auf. Weiterhin fällt auf, dass auch negative Korrelationen bestehen. Dies bedeutet, dass die Werte zweier Messtermine entgegengesetzt verlaufen. (s. Tab. 25)

Tab. 25: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für die elektrische Kapazität der Plattenanordnung zwischen den jeweiligen Messterminen, Fläche „Im Berge“

Messtermin	15.03.05	22.03.05	19.08.05	30.08.05	02.09.05	14.09.05	06.10.05	14.03.07
15.03.2005	1							
22.03.2005	0.44 **	1						
19.08.2005	0.78 **	0.50 **	1					
30.08.2005	0.84 **	0.37 **	0.75 **	1				
02.09.2005	0.49 **	0.31 **	0.43 **	0.46 **	1			
14.09.2005	-0.76 **	-0.46 **	-0.61 **	-0.68 **	-0.31 **	1		
06.10.2005	0.52 **	0.60 **	0.63 **	0.52 **	0.15 *	-0.42 **	1	
14.03.2007	-0.74 **	-0.23 **	-0.75 **	-0.80 **	-0.33 **	0.68 **	-0.52 **	1

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

* Die Korrelation ist auf dem 0.05 Niveau signifikant (zweiseitig)

Negative Messergebnisse zeigen sich an Zeitpunkten, an denen einige Tage zuvor Niederschläge stattfanden (s. Tab. 26). Weiter zeigt sich in Abb. 31, dass mit kleiner werdender Wasserbilanzsumme die Messwerte der elektrischen Kapazität steigen und die Spannweiten geringer werden. Auch ist in Abb. 31 ein deutlicher Unterschied zwischen den am 15.03.2005 (1) und den am 22.03.2005 (2) ermittelten Messwerten erkennbar. Die Wasserbilanz hat sich zwischen diesen zwei Terminen nur geringfügig geändert. Allerdings hat es in dem Zeitraum vor dem 22.03.2005 deutlich weniger geregnet als vor dem 15.03.2005 (s. Tab. 26). Auch wird vermutet, dass die Bodenbearbeitung einen Einfluss auf die Höhe des Messergebnisses „elektrische Kapazität“ hat.

Tab. 26: Niederschlagsmengen (in mm) für verschiedene Zeitpunkte vor der geoelektrischen Messung auf der Fläche „Im Berge“

Messzeitpunkt	Niederschläge in mm x Tage vor der Messung		
	3 Tage	5 Tage	10 Tage
15.03.2005	1.8	18.5	22.8
22.03.2005	0.0	2.9	9.2
19.08.2005	0.0	7.4	19.2
30.08.2005	0.0	3.0	4.7
02.09.2005	0.0	0.0	4.4
14.09.2005	0.0	0.0	1.4
06.10.2005	0.0	0.1	21.9
14.03.2007	0.0	0.0	15.1

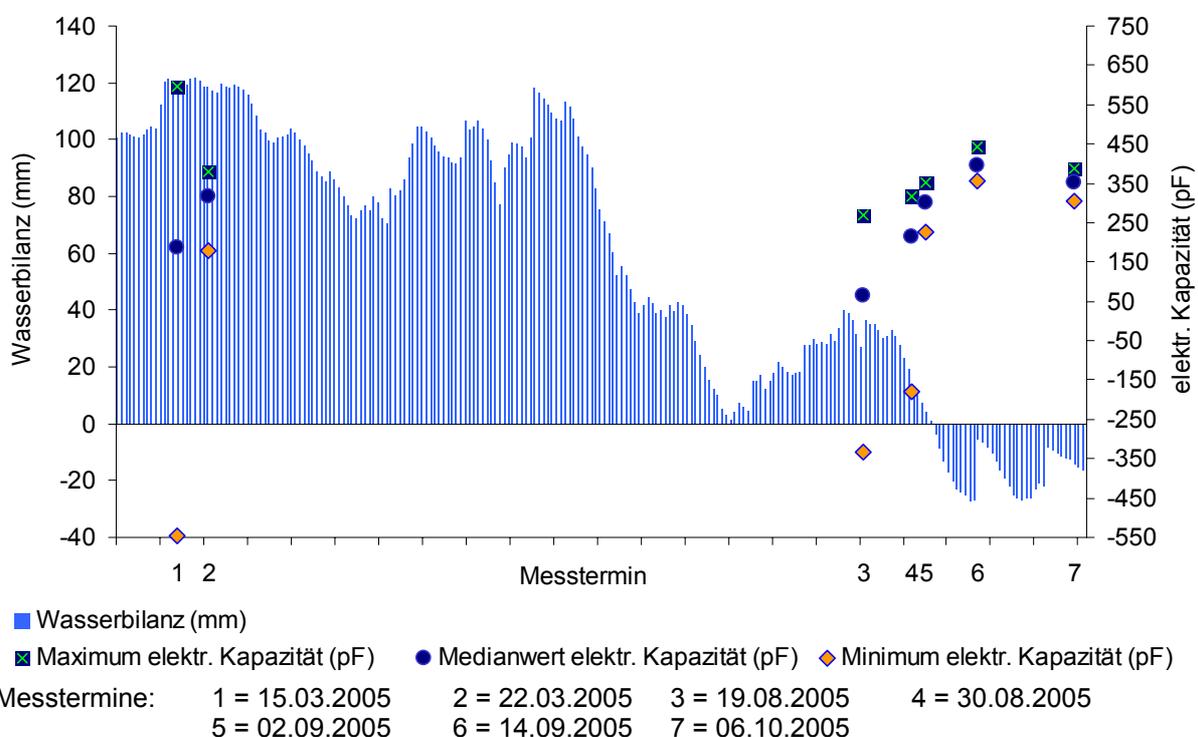


Abb. 31: Zeitliche Darstellung der Wasserbilanz in mm (nach HAUDE) der Fläche „Im Berge“ und die jeweiligen Minimum-, Maximum- und Mittelwerte der elektrischen Kapazität (pF) für 7 Messtermine in 2005

Vergleich der Feldkarten „elektrische Kapazität“ und „Korngrößenverteilung“

Im Anhang sind drei ausgewählte Messtermine als Feldkarte mit der interpolierten räumlichen Verteilung der elektrischen Kapazität der Plattenanordnung dargestellt (s. Anhang Abb. 10 - 12). Die Interpolation erfolgt mit der Methode „Kriging“.

Die interpolierten Messwerte, die an den drei ausgewählten Messterminen erfasst wurden, bilden die räumliche Verteilung der Korngrößen im Oberboden (s. Anhang Abb. 1 - 3) mit einer guten Ähnlichkeit ab. Für die beiden Messtermine 15.03.2005 und 30.08.2005 weisen die südliche, sandige Teilfläche und die mittlere westliche, lehmige Teilfläche hohe elektrische Kapazitäten auf. Die nördliche und die mittlere Teilfläche verfügen über höhere Tongehalte und weisen niedrige bzw. negative elektrische Kapazitäten auf. Die Auswertung der Messerergebnisse vom 15.03.2005 ergibt auch kleinräumige Variationen, diese sind bereits bei der elektrischen Leitfähigkeit beschrieben. Anhand der Feldkarten für die Messtermine 30.08.2005 und 14.03.2007 können diese kleinräumigen Variationen nicht erkannt werden. Die Messung vom 14.03.2007 weist keine negativen elektrischen Kapazitäten auf. Weiterhin unterscheiden sich die Daten dieses Messtermins zu den beiden anderen Messterminen dadurch, dass die räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität gegenläufig ist. Teilflächen, welche am 15.03.2005 und 30.08.2005 hohe elektrische Kapazitäten aufwiesen, verfügten am 14.03.2007 über niedrige elektrische Kapazitäten. Weiterhin zeigen auch die Auswertungen weiterer Messtermine nur eine grobe Ähnlichkeit zwischen der räumlichen Verteilung der elektrischen Kapazität und den Korngrößen im Oberboden und verfügen somit über eine geringe Korrelation zwischen elektrischer Kapazität und Korngröße.

4.1.2.2.2. Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen elektrischer Kapazität und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt

Korrelationsanalyse

Tabelle 27 weist die Spearmanschen Korrelationskoeffizienten des jeweiligen Messtermins für die C_{ele} und der Korngrößen sowie den organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) in 0 bis 30 cm Tiefe aus. In der Tendenz sind die Korrelationen für C_{ele} und Sand positiv und für C_{ele} und Schluff, Ton sowie C_{org} negativ. Dieses gilt aber nicht für jeden Messtag. Der Zusammenhang zwischen C_{ele} und den Korngrößen sowie C_{org} ist an den jeweiligen Messterminen unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Zusammenhänge sind für C_{ele} und Sand bzw. Ton deutlicher ausgeprägt als für C_{ele} und Schluff bzw. C_{org} .

Werden die Zusammenhänge EC25 und Korngröße sowie C_{org} mit den Zusammenhängen C_{ele} und den Korngrößen sowie C_{org} für den jeweiligen Messtermin verglichen, wird deutlich, dass ein schwacher Zusammenhang zwischen C_{ele} und den Korngrößen sowie C_{org} nicht gleichbedeutend ist mit einem schwachen Zusammenhang zwischen EC25 und den Korngrößen sowie C_{org} .

Tab. 27: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Kapazität der Plattenanordnung und Korngröße sowie C_{org} , Fläche „Im Berge“

Messsystem	Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
BOs - 1EP	15.03.2005	0.71 **	-0.67 **	-0.68 **	-0.61 **
BOs - 1EP	22.03.2005	0.26 **	-0.20 **	-0.28 **	-0.05
BOs - 1EP	19.08.2005	0.67 **	-0.54 **	-0.71 **	-0.38 **
BOs - 1EP	30.08.2005	0.78 **	-0.69 **	-0.76 **	-0.62 **
BOs - 1EP	02.09.2005	0.22 **	-0.18 **	-0.23 **	-0.33 **
BOs - 1EP	14.09.2005	-0.60 **	0.61 **	0.55 **	0.58 **
BOs - 1EP	06.10.2005	0.53 **	-0.42 **	-0.57 **	-0.08
BOs - 1EP	14.03.2007	-0.82 **	0.77 **	0.79 **	0.55 **

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

Regressionsanalyse

In Tabelle 28 - 31 sind Angaben zur Aufbereitung der Messdaten und Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen C_{ele} und den Korngrößen sowie C_{org} aufgeführt. Ausgewählt sind jene drei Messtermine, die insgesamt das höchste Bestimmtheitsmaß zwischen C_{ele} und den Korngrößen sowie C_{org} aufweisen. Die Regressionsanalysen für Schluff und Ton sowie C_{org} weisen überwiegend lineare Modelle auf; für Sand zeigt sich ein exponentielles Regressionsmodell. Die nicht aufgeführten Messtermine weisen sehr schwache bis mittlere (< 0.1 bis 0.4) Bestimmtheitsmaße auf.

Tab. 28: Regressionsmodelle für die Korngröße Sand und die elektrische Kapazität der Plattenanordnung (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

Messzeitpunkt	Messwerte	Korngröße Sand ($y = \text{Sandgehalt}, x = C_{ele}$)		
		Regressionsmodell	Regression	B^2
15.03.2005	keine Aufbereitung	Exponentiell	$y = 38.6169 x^{*0.0006}$	0.47
30.08.2005	keine Aufbereitung	Exponentiell	$y = 30.0785 x^{*0.0018}$	0.52
14.03.2007	keine Aufbereitung	Linear	$y = (-0.1238)x + 116.333$	0.72

Tab. 29: Regressionsmodelle für die Korngröße Schluff und die elektrische Kapazität der Plattenanordnung (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

Korngröße Schluff ($y = \text{Schluffgehalt}, x = C_{ele}$)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
15.03.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = (-0.0093)x + 33.3621$	0.40
30.08.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = (-0.0284)x + 37.2997$	0.42
14.03.2007	logarithmiert	Linear	$y = 0.0007x + 1.0958$	0.64

Tab. 30: Regressionsmodelle für die Korngröße Ton und die elektrische Kapazität der Plattenanordnung (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

Korngröße Ton ($y = \text{Tongehalt}, x = C_{ele}$)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
15.03.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = (-0.0145)x + 27.1171$	0.42
30.08.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = (-0.0460)x + 33.5823$	0.47
14.03.2007	logarithmiert	Potenziell	$y = 0.4660 x^{0.0015}$	0.74

Tab. 31: Regressionsmodelle für den organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) und die elektrische Kapazität der Plattenanordnung (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

C_{org} ($y = C_{org}, x = C_{ele}$)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
15.03.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = (-0.0004)x + 1.4021$	0.32
30.08.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = (-0.0013)x + 1.5788$	0.31
14.03.2007	keine Aufbereitung	Potenziell	$y = 0.3720 x^{0.0016}$	0.32

Werden die Korngrößen anhand der C_{ele} -Werte abgeschätzt, wie in Kap. 4.1.2.1.3 beschrieben, ergeben sich keine besseren Schätzwerte im Vergleich zu den Ergebnissen der Schätzung anhand der EC25-Werte. Auch die Aufstellung einer multiplen Regressionsgleichung mit EC25 und C_{ele} -Werten verbessert nicht die Schätzung im Vergleich zur Schätzung mit den EC25-Werten.

4.1.2.3. Analyse der Einflussstärke der Korngrößen und des organischen Kohlenstoffgehalts auf die Messgrößen elektrische Leitfähigkeit und elektrische Kapazität

Anhand einer multiplen Regressionsanalyse wird überprüft, von welchen Einflussvariablen die Messgrößen EC25 und C_{ele} überwiegend bestimmt werden.

Die Analyse der maßgeblichen Einflussvariablen auf EC25 erfolgt direkt mit den Zahlenreihen EC25 und Korngrößen sowie $C1_{org}$ bzw. die Zahlenreihen werden logarithmiert. Bei der Analyse von C_{ele} und den Korngrößen sowie $C1_{org}$ werden die Zahlenreihen direkt ausgewertet bzw. werden nur die Zahlenreihen der Korngröße und C_{org} logarithmiert. In den Tab. 32 - 34 sind für den jeweiligen Messtag und die jeweilige Messgröße die Korngrößen (S1, U1 und T1) bzw. $C1_{org}$ aufgeführt, welche nach der multiplen Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable angegeben sind. Weiter sind das Bestimmtheitsmaß und die Regressionsgleichung angegeben. Werden die Zahlenreihen direkt ausgewertet, zeigt sich für die ausgewählten Messtermine, dass die Korngröße Sand als Einflussvariable das Messergebnis EC25 maßgeblich beeinflusst. Wird $C1_{org}$ bzw. T1 mit hinzugefügt, so verbessert sich das Bestimmtheitsmaß nur geringfügig. (s. Tab. 32)

Tab. 32: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu EC25 für drei ausgewählte Messtermine, Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem BOs - 1EP

Modell	B ²	Korrigiertes B ²	Änderung B ²	Einflussvariablen
Messtermin: 15.03.2005				
1	0.725	0.723	0.725	S1
2	0.760	0.758	0.035	S1, $C1_{org}$
3	0.767	0.763	0.007	S1, $C1_{org}$, T1
1	Regression: EC25 = (-0.143) * S1 + 13.516			
2	Regression: EC25 = (-0.124) * S1 + 1.731 * $C1_{org}$ + 10.367			
3	Regression: EC25 = (-0.067) * S1 + 1.961 * $C1_{org}$ + 0.088 * T1 + 5.411			
Messtermin: 30.08.2005				
1	0.617	0.615	0.615	S1
2	0.636	0.633	0.019	S1, $C1_{org}$
1	Regression: EC25 = (-0.128) * S1 + 11.774			
2	Regression: EC25 = (-0.114) * S1 + 1.237 * $C1_{org}$ + 9.524			
Messtermin: 14.03.2007				
1	0.684	0.682	0.684	S1
1	Regression: EC25 = (-0.159) * S1 + 13.406			

Werden die Zahlenreihen (S1, U1, T1 und C1_{org}) logarithmiert (log(S1), log(U1), log(T1) und log(C1_{org})), so zeigt sich log(T1) als bestimmende Einflussvariable für die drei ausgewählten Messtermine. Teilweise wird das Bestimmtheitsmaß der Regression durch Hinzufügen einer oder mehrerer Einflussvariablen (z.B. log(C1_{org}) oder log(U1)) verbessert. Dieses gilt insbesondere für die Messtermine 15.03.2005 und 30.08.2005. (s. Tab. 33)

Tab. 33: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu EC25 (Zahlenreihen logarithmiert) für drei ausgewählte Messtermine, Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem BOs - 1EP

Modell	B ²	Korrigiertes B ²	Änderung B ²	Einflussvariablen
Messtermin: 15.03.2005				
1	0.754	0.753	0.754	log(T1)
2	0.806	0.804	0.052	log(T1), log(C1 _{org})
3	0.900	0.807	0.004	log(T1), log(C1 _{org}), log(U1)
4	0.906	0.818	0.012	log(T1), log(C1 _{org}), log(U1), log(S1)
1	Regression: $\log(\text{EC25}) = 0.793 * \log(\text{T1}) - 0.243$			
2	Regression: $\log(\text{EC25}) = 0.673 * \log(\text{T1}) + 0.436 * \log(\text{C1}_{\text{org}}) - 0.131$			
3	Regression: $\log(\text{EC25}) = 0.606 * \log(\text{T1}) + 0.385 * \log(\text{C1}_{\text{org}}) + 0.219 * \log(\text{U1}) - 0.36$			
4	Regression: $\log(\text{EC25}) = 0.821 * \log(\text{T1}) + 0.362 * \log(\text{C1}_{\text{org}}) + 0.607 * \log(\text{U1}) + 0.476 * \log(\text{S1}) - 2.010$			
Messtermin: 30.08.2005				
1	0.638	0.637	0.637	log(T1)
2	0.679	0.676	0.041	log(T1), log(U1)
3	0.690	0.685	0.011	log(T1), log(U1), log(C _{org}),
1	Regression: $\log(\text{EC25}) = 0.789 * \log(\text{T1}) - 0.309$			
2	Regression: $\log(\text{EC25}) = 0.521 * \log(\text{T1}) + 0.719 * \log(\text{U1}) - 1.018$			
3	Regression: $\log(\text{EC25}) = 0.517 * \log(\text{T1}) + 0.555 * \log(\text{U1}) + 0.237 * \log(\text{C}_{\text{org}}) - 0.795$			
Messtermin: 14.03.2007				
1	0.739	0.738	0.739	log(T1)
2	0.756	0.754	0.017	log(T1), log(U1)
3	0.767	0.764	0.011	log(T1), log(U1), log(S1),
1	Regression: $\log(\text{EC25}) = 0.996 * \log(\text{T1}) - 0.582$			
2	Regression: $\log(\text{EC25}) = 0.793 * \log(\text{T1}) + 0.546 * \log(\text{U1}) - 1.120$			
3	Regression: $\log(\text{EC25}) = 1.051 * \log(\text{T1}) + 0.991 * \log(\text{U1}) + 0.570 * \log(\text{S1}) - 3.070$			

Für die Messgröße C_{ele} zeigt sich ebenfalls die Korngröße S1 als maßgebliche Einflussvariable. Durch Hinzufügen von einer oder mehrerer Einflussvariablen kann das Bestimmtheitsmaß verbessert werden, diese gilt insbesondere, wenn $C1_{org}$ hinzugefügt wird. Das Bestimmtheitsmaß des Messtermins 14.03.2007 ist im Vergleich mit den beiden ausgewählten Messterminen von 2005 deutlich höher. (s. Tab. 34)

Tab. 34: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} auf C_{ele} für drei ausgewählte Messtermine, Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem BOs - 1EP

Modell	B^2	Korrigiertes B^2	Änderung B^2	Einflussvariablen
Messtermin: 15.03.2005				
1	0.471	0.468	0.471	S1
2	0.532	0.527	0.061	S1, $C1_{org}$
1	Regression: $C_{ele} = 19.396 * S1 - 682.096$			
2	Regression: $C_{ele} = 15.113 * S1 + (-382.639) * C1_{org} + 13.999$			
Messtermin: 30.08.2005				
1	0.510	0.508	0.510	S1
2	0.561	0.557	0.051	S1, $C1_{org}$
3	0.569	0.563	0.008	S1, $C1_{org}$, U1
1	Regression: $C_{ele} = 6.726 * S1 - 100.970$			
2	Regression: $C_{ele} = 5.416 * S1 + (-117.048) * C1_{org} + 111.963$			
3	Regression: $C_{ele} = 7.416 * S1 + (-130.598) * C1_{org} + 5.670 * U1 - 137.583$			
Messtermin: 14.03.2007				
1	0.731	0.729	0.731	S1
2	0.739	0.737	0.008	S1, $C1_{org}$
1	Regression: $C_{ele} = (-5.890) * S1 + 844.698$			
2	Regression: $C_{ele} = (-5.113) * S1 + 34.965 * C1_{org} + 781.089$			

Werden die Zahlenreihen Korngröße und C_{org} logarithmiert, ändern sich für die Messtermine 15.03.2005 und 30.08.2005 die maßgeblichen Einflussvariablen nicht. Das Bestimmtheitsmaß für C_{ele} und die Korngrößen bzw. $C1_{org}$ verbessert sich geringfügig. Für den Messtermin 14.03.2007 wird dann als bestimmende Einflussvariable $\log(T1)$ angegeben; das Bestimmtheitsmaß verbessert sind geringfügig.

Weiter zeigt sich, dass das Bestimmtheitsmaß für die beiden Messtermine im Frühjahr höher ist als für den Messtermin im Sommer. (s. Tab. 32 - 34)

4.1.2.4. Elektrisches Rauschen für die Fläche „Im Berge“

Der Zusammenhang zwischen dem elektrischen Rauschen und der Korngröße sowie C_{org} im Oberboden ist gering. Beispielhaft sind drei Messtermine in Tab. 35 aufgeführt.

Tab. 35: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen dem elektrischen Rauschen und den Korngrößen sowie C_{org} , Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

Messsystem	Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
BOs - 1EP	15.03.2005	0.32 **	-0.20 **	-0.36 **	0.23 **
BOs - 1EP	30.08.2005	0.24 **	-0.12	-0.29 **	0.26 **
BOs - 1EP	14.03.2007	0.20 **	-0.11	-0.23 **	0.32 **

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

Die Messtermine untereinander weisen für das elektrische Rauschen eine mittlere Korrelation auf (s. Tab. 36). Bei einem Vergleich der Feldkarten mit den interpolierten Messwerten für jeden dieser Termine (s. Anhang Abb. 13 - 15) fällt auf, dass sich zwei Teilflächen an der östlichen Feldgrenze abzeichnen. Die Größe der Teilflächen variiert zwischen den Terminen, aber die Position für diese beiden Teilflächen ist als konstant zu beschreiben. Innerhalb dieser Bereiche sind Einzelfunde von Bauschutt, Ofenkacheln und Porzellanreste gemacht worden. Das elektrische Rauschen zeigt keinen Zusammenhang zur EC25. Die beiden Teilflächen mit dem hohen elektrischen Rauschwert weisen für den jeweiligen Messtag mittlere bis hohe elektrische Leitwerte auf (vgl. im Anhang Abb. 5 - 9 und Abb. 13 - 15).

Des Weiteren zeigen sich über die gesamte Fläche verteilt kleinere Bereiche, die von Termin zu Termin unterschiedliche Positionen aufweisen. Ursache hierfür sind Störungen während der Messung (z.B. abruptes Hochdrücken der beiden Messelektroden infolge eines Aufpralls auf einen großen Stein). Diese Messereignisse bestehen nur aus ein paar Messwerten, sind eher als zufällig zu beschreiben und räumlich nicht an eine bestimmte Position gebunden.

Tab. 36: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für das elektrische Rauschen zwischen den jeweiligen Messterminen, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

Messtermin	15.03.05	30.08.05	14.03.07
15.03.2005	1		
30.08.2005	0.67 **	1	
14.03.2007	0.67 **	0.70 **	1

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

4.1.2.5. Bodentemperatur für die Fläche „Im Berge“

Zwischen der Bodentemperatur und der Korngröße besteht eine sehr geringe bzw. geringe Korrelation. Der Zusammenhang zwischen Bodentemperatur und C_{org} ist sehr gering bis gering (s. Tab. 37). Die Messtermine weisen untereinander sehr geringe bis geringe Korrelationen auf.

Tab. 37: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen Bodentemperatur (Messtiefe ca. 5 - 8 cm) und den Korngrößen sowie C_{org} (Probeentnahmetiefe: 0 - 30 cm), für den Messtermin 22.03.2005 liegen keine flächenhaften Bodentemperaturmessungen vor, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

Messsystem	Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
BOs - 1EP	15.03.2005	0.19 **	-0.28 **	-0.11 **	-0.26 **
BOs - 1EP	19.08.2005	-0.19 **	0.23 **	0.17 *	0.41 **
BOs - 1EP	30.08.2005	0.01	-0.04	0.01	0.05
BOs - 1EP	02.09.2005	-0.06	0.13	0.01	0.27 **
BOs - 1EP	14.09.2005	0.35 **	-0.40 **	-0.30 **	-0.48 **
BOs - 1EP	06.10.2005	0.00	0.16 *	-0.11	0.27 **
BOs - 1EP	14.03.2007	-0.16 **	0.22 **	0.11	0.25 **

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

* Die Korrelation ist auf dem 0.05 Niveau signifikant (zweiseitig)

4.1.3. Geoelektrische Messung mit dem Messsystem ARP03

4.1.3.1. Elektrische Leitfähigkeit (ARP03)

Die geoelektrische Messung mit dem System ARP03 fand im Herbst 2004 statt. Zu diesem Zeitpunkt war die Fläche mit Klee gras bewachsen. Der Bewuchs war niedrig und beeinträchtigte die Messung nicht. In Tab. 38 sind die beschreibenden statistischen Werte für die drei Messtiefen angegeben. Die Messwerte sind nicht mit der Bodentemperatur normiert. Es zeigen sich im Vergleich zu den beschreibenden statistischen Werten des BOs - 1EP deutlich höhere Messergebnisse für die elektrische Leitfähigkeit in den drei Messtiefen (EC1 = 0 - 50 cm, EC2 = 0 - 100 cm, EC3 = 0 - 200 cm). Mit zunehmender Tiefe steigt die elektrische Leitfähigkeit an und die Streuung nimmt ab. Die Messwerte für EC1 und EC2 sind nicht normalverteilt.

Tab. 38: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Leitfähigkeit für die Fläche „Im Berge“, Angaben in mS/m außer VK, (IQR:Median) in % und Messtiefe in cm, Messsystem ARP03

Attribut	EC1	EC2	EC3
Minimum	4.8248	5.4259	6.2414
Maximum	16.3456	16.7071	16.9584
Spannweite	11.5207	11.2812	10.7170
Mittelwert	11.6462	11.9646	10.9760
s	2.4370	1.9926	1.9602
VK	20.9	16.7	17.9
Median	11.850	12.0923	11.0624
IQR	3.6492	2.4903	2.5444
(IQR:Median)	30.8	24.7	23.0
n	224	224	224
Normalvert.	nein	nein	ja
Messtiefe	0 - 50	0 - 100	0 - 200

s = Standardabweichung

VK = Variationskoeffizient

IQR = Interquartillbereich

n = Anzahl der Beprobungsorte

Normalvert. = Normalverteilung (nach Kolmogorov-Smirnov Test mit Lilliefors-Modifikation)

Vergleich der Feldkarte „elektrische Leitfähigkeit“ und „Korngrößenverteilung“

Im Anhang (s. Anhang Abb. 16) ist die interpolierte räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC1) beispielhaft für die Messtiefe 0 - 50 cm dargestellt. Die Interpolation erfolgt mit der Methode „Kriging“. Die räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit bildet die räumliche Verteilung der Korngröße (s. Anhang Abb. 1, 2 und 3) mit einer hohen Ähnlichkeit ab. Die sandige südliche Teilfläche zeichnet sich durch niedrige EC1-Werte ab. Die westliche mittlere Teilfläche mit mittleren Tongehalten weist mittlere EC1-Werte und die mittlere sowie nördliche Teilfläche mit hohen Tongehalten weist hohe EC1-Werte auf.

4.1.3.2. Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen EC1 und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt

Korrelationsanalyse

Für die Messwerte EC1 und die Korngrößen sowie C_{org} in 0 bis 30 cm Tiefe besteht eine mittlere Korrelation. Für die Messergebnisse EC2 und EC3 nimmt der Zusammenhang zur Korngröße bzw. C_{org} ab. Werden die Analysewerte für die Bodenproben aus einer Entnahmetiefe von 30 bis 60 cm oder der Durchschnitt aus 0 bis 60 cm eingesetzt, verringert sich ebenfalls die Korrelation (s. Tab. 39). Aus diesem Grund werden für die weitere Betrachtung der Messergebnisse des Systems ARP03 die Werte EC1 und die Analyseergebnisse für die Korngröße aus der Tiefe 0 bis 30 cm genutzt.

Tab. 39: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen EC des Messsystems ARP03 und den Korngrößen sowie C_{org}, Messtermin: Herbst 2004, Fläche „Im Berge“

Messsystem	Bodenprobe- entnahme	Sand	Schluff	Ton	C _{org}
ARP03 EC1	0 - 30 cm	-0.70 **	0.70 **	0.67 **	0.57 **
ARP03 EC2	0 - 30 cm	-0.40 **	0.47 **	0.34 **	0.42 **
ARP03 EC3	0 - 30 cm	0.18 **	0.07	-0.22 **	0.05
ARP03 EC1	30 - 60 cm	-0.55 **	0.50 **	0.56 **	0.27 **
ARP03 EC2	30 - 60 cm	-0.37 **	0.36 **	-0.37 **	0.04
ARP03 EC3	30 - 60 cm	0.07	-0.03	-0.08	-0.22 **
ARP03 EC1	0 - 60 cm	-0.64 **	0.62 **	0.63 **	0.45 **
ARP03 EC2	0 - 60 cm	-0.41 **	0.43 **	0.38 **	0.22 **
ARP03 EC3	0 - 60 cm	0.12 **	-0.05	-0.15 **	-0.13

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

Regressionsanalyse

In Tab. 40 sind Angaben zur Aufbereitung der Messdaten und zur Regressionsanalyse für EC1 und der entsprechenden Korngröße sowie C_{org} im Oberboden aufgeführt. Die Regressionsmodelle für die jeweilige Korngröße und EC1 weisen ein ähnlich hohes Bestimmtheitsmaß auf wie für das BOs -1EP.

Tab. 40: Regressionsmodelle für die Korngröße sowie C_{org} und elektrische Leitfähigkeit (EC1) sowie das Bestimmtheitsmaß (B²), Messtermin Herbst 2004, Messsystem ARP03

Korngröße / C _{org}	(y = Korngröße, x = EC1)			
	Messwerte	Regres- sionsmodell	Regression	B ²
Sand	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-33.126) \ln(x) + 123.928$	0.61
Schluff	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.4776 * x^{0.2885}$	0.58
Ton	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.3217 * x^{0.7538}$	0.66
C _{org}	logarithmiert	Linear	$y = 0.3970 x - 0.2995$	0.35

4.1.3.3. Schätzung der Korngröße anhand der EC1-Werte

Die Vorgehensweise zur Schätzung der Korngrößen anhand der EC1-Werte erfolgt wie in Kap. 4.1.2.1.3 beschrieben. Als beste Schätzmethode erweist sich die Methode „Wertetabelle“. In Tab. 41 sind die Differenzen zwischen dem wahren und geschätzten Korngrößenwert sowie der maximale Wert für eine Über- und Unterschätzung, die Standardabweichung und der Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung angegeben. Die beiden nicht aufgeführten Schätzmethoden weisen eine geringfügige Abnahme der Schätzgenauigkeit auf.

Die Hälfte (50%) der Rasterzellen weisen eine Schätzgenauigkeit von ± 4 Prozentpunkten für den Sandgehalt auf bzw. 2/3 (ca. 75%) der Rasterzellen weisen eine Abweichung von ± 6 Prozentpunkten für den Sandwerte auf. Der Schluffgehalt ist mit einem hohen Maß korrekt abgeschätzt; 76% der geschätzten Schluffwerte weisen eine Abweichung von ± 3 Prozentpunkten bzw. 98% von ± 6 Prozentpunkten auf. Wird eine Genauigkeit von ± 4 Prozentpunkten bzw. ± 6 Prozentpunkten für den Tongehalt als korrekt zugrunde gelegt, sind 71% bzw. 87% der Werte treffend geschätzt. (s. Tab. 41) Es zeigt sich, dass die Schätzung der Korngrößen anhand des EC1-Werts ähnlich gut ist wie die Schätzung mit dem EC25-Werten des BOs - 1EP. (vgl. Tab. 21 - 23 und 41).

Tab. 41: Differenz zwischen wahren und geschätzten Korngrößen, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Schätzmethode Wertetabelle, Fläche „Im Berge“, Messsystem ARP03

Differenz in Prozentpunkte	Korngröße		
	Sand	Schluff	Ton
	Anzahl der Nennung von den gesamten Rasterzellen (n= 224)		
0	16	32	20
± 1	39	95	67
± 2	69	134	106
± 3	95	171	135
± 4	112	202	160
± 5	130	213	177
± 6	148	219	194
Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung (Prozentpunkte)	0	0	0
Standardabweichung (nach KÖSTER 1979)	6.4	2.9	4.3
Maximale Überschätzung (Prozentpunkte)	19	7	13
Maximale Unterschätzung (Prozentpunkte)	-14	-8	-14

Die Summe der geschätzten Korngrößen Sand, Schluff und Ton ergibt einen Mittelwert von 100; der niedrigste Summenwert beträgt 99 und der höchste 102.

Wird hierzu die räumliche Verteilung der Über- und Unterschätzung des Tongehalts betrachtet, fällt auf, dass unter anderem jene Bereiche unterschätzt werden (s. Abb. 32, durchgängige Kreise), die bei der Schätzung der Korngrößen mit Hilfe der Messwerte des BOs - 1EP ebenfalls unterschätzt werden. Ferner sind unsystematische Unterschätzungen erkennbar (s. Abb. 32, gestrichelte Kreise). Diese Verteilung wird als zufällig gewertet. Ebenfalls fällt auf, dass eine Überschätzung der Tongehalte ebenfalls überwiegend im südlichen Teil der Fläche zu finden ist. Auch hier besteht eine hohe Ähnlichkeit mit den Bereichen, welche anhand der Messergebnisse des BOs - 1EP überschätzt werden. (vgl. Abb. 29, 30 und 32, gestricheltes Polygon)

Tab. 42: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu EC1 auf der Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem ARP03

Modell	B ²	Korrigiertes B ²	Änderung B ²	Einflussvariablen
Messtermin: Herbst 2004				
1	0.585	0.584	0.585	S1
2	0.617	0.613	0.032	S1, C1 _{org}
1	Regression: EC1 = (-0.187) * S1 + 19.778			
2	Regression: EC1 = (-0.161) * S1 + 2.381 * C1 _{org} + 15.447			

Tab. 43: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu EC1 (Zahlenreihen logarithmiert) auf der Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} , welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem ARP03

Modell	B ²	Korrigiertes B ²	Änderung B ²	Einflussvariablen
Messtermin: Herbst 2004				
1	0.626	0.624	0.626	log(T1)
2	0.676	0.673	0.050	log(T1), log(C1 _{org})
3	0.692	0.688	0.016	log(T1), log(C1 _{org}), log(U1)
4	0.726	0.721	0.034	log(T1), log(C1 _{org}), log(U1), log(S1)
1	Regression: $\log(EC1) = 0.645 * \log(T1) + 0.167$			
2	Regression: $\log(EC1) = 0.540 * \log(T1) + 0.383 * \log(C1_{org}) + 0.266$			
3	Regression: $\log(EC1) = 0.415 * \log(T1) + 0.289 * \log(C1_{org}) + 0.405 \log(U1) - 0.157$			
4	Regression: $\log(EC1) = 0.737 * \log(T1) + 0.254 * \log(C1_{org}) + 0.984 \log(U1) + 0.710 * \log(S1) - 2.620$			

Die Analyse für die maßgeblichen Einflussvariablen weist für das ARP03 und das BOs - 1EP die gleichen Einflussvariablen auf. Werden die Zahlenreihen direkt analysiert, so wird bei beiden Systemen als erste Einflussvariable die Korngröße Sand und als zweite Einflussvariable der organische Kohlenstoffgehalt aufgeführt. Bei logarithmierten Zahlenreihen zeigt sich die Korngröße Ton als die maßgebliche Einflussvariable. Die Bestimmtheitsmaße sind bei beiden Messsystemen hoch, allerdings beim BOs - 1EP in der Tendenz etwas höher.

Vergleich der Feldkarte „EC1“ mit bodenkundlichen Karten

Anhand der Feldkarte mit den Messergebnissen EC1 des ARP03 (s. Anhang Abb. 16) kann die südliche Teilfläche entsprechend der Bodenkarte (s. Abb. 14) und der Bodenschätzungskarte (s. Abb. 13) abgegrenzt werden. Der nördliche Bereich der Fläche kann anhand der Messergebnisse EC1 des ARP03 weiter differenziert werden, was mit Hilfe der Korngrößenanalyse und den Messergebnissen des BOs - 1EP bestätigt wird.

4.1.4. Geoelektrische Messung mit dem Messsystem EM38

4.1.4.1. Elektrische Leitfähigkeit (EM38)

Drei Messtermine mit dem EM38 sind in Tab. 44 aufgeführt. Am 15.03.2006 war innerhalb der Fläche der Boden teilweise noch oberflächlich gefroren. Diese Messung fand zu Fuß statt. Die Messungen an den beiden anderen Terminen fanden mit einem Schlepper statt, an den das EM38 in einem Holzschlitten angehängt war. Der Abstand zwischen Schlepper und EM38 beträgt 4,5 m. Am 14.03.2007 war der Boden nach einem milden Winter komplett aufgetaut.

Tab. 44: Messzeitpunkte mit dem EM38 auf der Fläche „Im Berge“

Messsystem	Messzeitpunkt	Bemerkung
EM38	30.08.2005	flach gegrubberter Boden
EM38	15.03.2006	Kultur: Dinkel, Boden teilweise oberflächennahe gefroren
EM38	14.03.2007	unbearbeiteter Boden, Kultur: abgefrorene Zwischenfrucht

Tabelle 45 weist beschreibende statistische Werte für die elektrische Leitfähigkeit mit dem EM38 auf der Fläche „Im Berge“ aus. Die Messwerte sind nicht mit der Bodentemperatur normiert. Im südöstlichen Bereich der Fläche wird die Messung im vertikalen Modus durch ein Erdstromkabel gestört. Diese Messwerte sind in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Es fällt auf, dass die Median- bzw. Mittelwerte der elektrischen Leitfähigkeit im vertikalen Messmodus für die drei Messtermine zwar signifikant unterschiedlich sind, jedoch ähnlich hohe Werte aufweisen. Da die elektrische Leitfähigkeit von der Temperatur des Messmediums beeinflusst wird (s. Kap. 2.3.2), ist dieses bei den gegebenen Temperaturunterschieden erstaunlich. Es wird vermutet, dass aufgrund der großen Messtiefe im vertikalen Messmodus (s. Kap. 2.4.2) für die hier aufgeführten Messtermine der Temperaturgang in den obersten Dezimetern des Bodens einen geringen Einfluss auf den Messvorgang mit dem EM38 hat. Weiter fällt auf, dass die Median- bzw. Mittelwerte der elektrischen Leitfähigkeit für die Messtermine 30.08.2005 und 14.03.2007 im vertikalen Modus geringer sind als im horizontalen Modus. Für den Messtermin am 15.03.2006 zeigt sich ein deutlich geringerer Median- bzw. Mittelwert für die elektrische Leitfähigkeit im horizontalem Modus als die Messtermine 30.08.2005 und 14.03.2007 (s. Tab. 45), evtl. eine Folge des noch teilweise gefrorenen Bodens.

Im Vergleich mit den Messergebnissen der elektrischen Leitfähigkeit des BOs - 1EP und ARP03 weisen die Ergebnisse des EM38 in der Tendenz eine geringe Streuung auf. (vgl. Tab. 12, 38 und 45)

Tab. 45: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Leitfähigkeit (EM38) für die Fläche „Im Berge“, Angaben in mS/m außer VK und (IQR:Median) in % sowie BodTemp in °C

Attribut	30.08.05	30.08.05	15.03.06	15.03.06	14.03.07	14.03.07
Messmodus	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
Minimum	10.5318	7.3379	0.8859	7.5152	12.2310	7.4139
Maximum	15.9134	15.9258	5.9312	15.1708	19.0543	15.8447
Spannweite	5.3816	8.5879	1.2004	7.6556	6.8233	8.4309
Mittelwert	14.3487	12.1706	3.7582	12.8633	16.6154	13.0611
s	1.04	1.67	0.88	1.37	1.34	1.60
VK	7.2	13.7	23.4	10.7	8.1	12.3
Median	14.5409	12.2900	3.9231	13.0475	16.8019	13.3490
IQR	1.24	2.05	1.20	1.65	1.78	2.06
(IQR:Median)	8.5	16.7	30.6	12.6	10.6	15.4
n	224	177	224	224	224	224
BodTemp in 10 cm Tiefe	18.7	18.7	k.A.	k.A.	3.6	3.6
Normalvert.	nein	nein	nein	nein	nein	nein

s = Standardabweichung

n = Anzahl der Beprobungsorte

k.A. = keine Angabe

Lilliefors-Modifikation)

VK = Variationskoeffizient

BodTemp = Bodentemperatur in 10 cm Bodentiefe

Normalvert. = Normalverteilung (nach Kolmogorov-Smirnov Test mit

IQR = Interquartillbereich

Tabelle 46 zeigt die Korrelationskoeffizienten der drei Messtermine für beide Messmodi untereinander. Für den horizontalen bzw. vertikalen Modus zeigen sich mittlere bis hohe Korrelationen. Wird der horizontale mit dem vertikalen Modus verglichen, zeigen sich die höchsten Korrelationskoeffizienten für den gleichen Messtermin. Bei einem Vergleich der Messtermin-Korrelationskoeffizienten EM38 und BOs - 1EP, weisen die Messtermin-Korrelationskoeffizienten des BOs - 1EP eine deutlich bessere Reproduzierbarkeit der Messungen auf (vgl. Tab. 13 und 46).

Tab. 46: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für die elektrische Leitfähigkeit im vertikalen und horizontalen Messmodus (EM38) zwischen den jeweiligen Messterminen, Fläche „Im Berge“

Messtermin		30.08.05	15.03.06	14.03.07	30.08.05	15.03.06	14.03.07
		Horizontaler Messmodus			Vertikaler Messmodus		
30.08.05	Horizontaler Messmodus	1					
15.03.06		0.61**	1				
14.03.07		0.76**	0.60**	1			
30.08.05	Vertikaler Messmodus	0.66			1		
15.03.06		0.58	0.77		0.76	1	
14.03.07		0.56	0.57	0.63	0.59	0.54	1

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

Vergleich der Feldkarten „elektrische Leitfähigkeit“ und „Korngröße“

Im Anhang sind beispielhaft die Feldkarten mit der elektrischen Leitfähigkeit für den horizontalen und vertikalen Messmodus für den 14.03.2007 dargestellt (s. Anhang Abb. 17 und 18). Die Interpolation erfolgte mit der Methode „Kriging“.

Für die drei Messtermine zeigt sich, dass sich die sandige südliche Teilfläche in beiden Modi teilweise abbildet. Die äußeren Grenzen dieser Teilfläche werden nicht für jeden Messtermin korrekt dargestellt, dieses gilt insbesondere für die Messungen im vertikalen Modus. Die Teilflächen mit mittleren und hohen Tongehalten im Oberboden werden nur im horizontalen Modus ansatzweise abgebildet. (s. Anhang Abb. 17 und 18)

4.1.4.2. Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen EM38 und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt

Korrelationsanalyse

Tabelle 47 weist die Spearmanschen Korrelationskoeffizienten des jeweiligen Messtermins im horizontalen ($EC_{(hor)}$) und vertikalen ($EC_{(ver)}$) Messmodus zwischen EC und Korngrößen sowie C_{org} für die Bodentiefen 0 bis 30 cm und 30 bis 60 cm sowie den Durchschnitt von 0 bis 60 cm auf.

Ein negativer Zusammenhang ist zwischen $EC_{(hor,ver)}$ und der Korngröße Sand feststellbar. Für die Korngrößen Schluff und Ton sowie C_{org} zeigen sich positive Zusammenhänge zu $EC_{(hor,ver)}$. Die Ausprägung des Zusammenhangs ist für $EC_{(hor)}$ und der Korngröße sowie C_{org} im horizontalen Messmodus stärker als im vertikalen Messmodus. Der stärkste Zusammenhang zeigt sich für $EC_{(hor)}$ und Korngrößen sowie C_{org} für die Entnahmetiefe 0 bis 30 cm. Wird vergleichsweise die Probeentnahmetiefe 30 bis 60 cm bzw. der Durchschnitt von 0 bis 60 cm zur Auswertung herangezogen, verbessert sich der Zusammenhang nicht. Auch eine differenzierte Betrachtung der Auswertung im vertikalen Modus konnte den Zusammenhang zwischen $EC_{(ver)}$ und der Korngröße sowie C_{org} in den jeweiligen Tiefen nicht verbessern. Der Zusammenhang ist zwischen $EC_{(hor)}$ und Korngröße sowie C_{org} für die Bodentiefe 0 bis 30 cm deutlicher ausgeprägt im Vergleich mit dem vertikalen Messmodus. Weiterhin zeigt sich für die Messung vom 15.03.2006 eine sehr geringe bis geringe Korrelation zwischen $EC_{(hor,ver)}$ und den Korngrößen. Als Ursache wird hier der noch teilweise gefrorene Oberboden vermutet. Für die beiden anderen Termine zeigen sich im Vergleich stärkere Zusammenhänge.

Regressionsanalyse

In Tabelle 48 - 51 sind Angaben zur Aufbereitung der Messdaten und zur Regressionsanalyse für $EC_{(hor,ver)}$ und der entsprechenden Korngröße sowie C_{org} aufgeführt.

Die aufgeführten Bestimmtheitsmaße sind in ihrer Höhe sehr unterschiedlich. Im horizontalen Messmodus sind die Bestimmtheitsmaße höher ausgeprägt als im vertikalen Messmodus. Die Bestimmtheitsmaße der Messung am 15.03.2006 sind geringer als an den beiden anderen Messterminen (insbesondere im horizontalen

Messmodus). Im Vergleich mit den Bestimmtheitsmaßen des BOs - 1EP und ARP03 sind die Bestimmtheitsmaße des EM38 deutlich geringer ausgeprägt.

Tab. 47: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit ($EC_{(hor)}$ und $EC_{(ver)}$) und den Korngrößen sowie C_{org} , Bodenprobeentnahmetiefen: 0 - 30 cm, 30 - 60 cm und der Mittelwert aus 0 - 60 cm, Fläche „Im Berge“, Messsystem EM38

Messtermin	30.08.05	30.08.05	15.03.06	15.03.06	14.03.07	14.03.07
Korngröße / C_{org}	$EC_{(hor)}$	$EC_{(ver)}$	$EC_{(hor)}$	$EC_{(ver)}$	$EC_{(hor)}$	$EC_{(ver)}$
S1	-0.56 **	-0.24 **	-0.18 **	-0.15 *	-0.64 **	-0.33 **
U1	0.56 **	0.35 **	0.27 **	0.22 **	0.69 **	0.39 **
T1	0.52 **	0.16 *	0.12	0.10	0.56 **	0.28 **
$C1_{org}$	0.47 **	0.38 **	0.37 **	0.30 **	0.62 **	0.31 **
S2	-0.44 **	-0.22 **	-0.15 *	-0.16 *	-0.52 **	-0.28 **
U2	0.42 **	0.25 **	0.18 **	0.18 **	0.49 **	0.25 **
T2	0.43 **	0.18 **	0.14 *	0.14 *	0.51 **	0.28 **
$C2_{org}$	0.24 *	-0.09	0.06	-0.08	0.17 *	0.02
S12	-0.51 **	-0.24 **	-0.17 **	-0.16 *	-0.59 **	-0.31 **
U12	0.51 **	0.31 **	0.23 **	0.21 **	0.61 **	0.39 **
T12	0.48 **	0.18 **	0.13 *	0.13	0.56 **	0.29 **
$C12_{org}$	0.37 **	0.10	0.21 **	0.06	0.40 **	0.15 *

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

* Die Korrelation ist auf dem 0.05 Niveau signifikant (zweiseitig)

Tab. 48: Regressionsmodelle für die Korngröße Sand (Tiefe 0 - 30 cm) und die elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen und vertikalen Modus ($EC_{(ver,hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem EM38

Korngröße Sand (y = Sandgehalt, x = EC)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
Messmodus: horizontale Ausrichtung ($EC_{(hor)}$)				
30.08.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-87.544)\ln(x) + 276.379$	0.45
15.03.2006	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-15.233)\ln(x) + 63.0767$	0.19
14.03.2007	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-85.546)\ln(x) + 283.554$	0.53
Messmodus: vertikale Ausrichtung ($EC_{(ver)}$)				
30.08.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-24.737)\ln(x) + 105.004$	0.13
15.03.2006	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-31.606)\ln(x) + 123.974$	0.13
14.03.2007	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-35.373)\ln(x) + 134.042$	0.22

Tab. 49: Regressionsmodelle für die Korngröße Schluff (Tiefe 0 - 30 cm) und die elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen und vertikalen Modus ($EC_{(ver,hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem EM38

Korngröße Schluff (y = Schluffgehalt, x = EC)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
Messmodus: horizontale Ausrichtung ($EC_{(hor)}$)				
30.08.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.3147 x^{0.9076}$	0.46
15.03.2006	keine Aufbereitung	Potenziell	$y = 23.4154 x^{0.2325}$	0.25
14.03.2007	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.2327 x^{0.9883}$	0.60
Messmodus: vertikale Ausrichtung ($EC_{(ver)}$)				
30.08.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.4641 x^{0.3064}$	0.23
15.03.2006	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.4422 x^{0.3821}$	0.21
14.03.2007	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.4383 x^{0.3900}$	0.29

Tab. 50: Regressionsmodelle für die Korngröße Ton (Tiefe 0 - 30 cm) und die elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen und vertikalen Modus ($EC_{(ver,hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem EM38

Korngröße Ton (y = Tongehalt, x = EC)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
Messmodus: horizontale Ausrichtung ($EC_{(hor)}$)				
30.08.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 0.9824 x^{2.3124}$	0.46
15.03.2006	logarithmiert	Expotenziell	$y = 1.1066 (x^{* 0.3828})$	0.24
14.03.2007	logarithmiert	Potenziell	$y = 0.8819 x^{2.2336}$	0.51
Messmodus: vertikale Ausrichtung ($EC_{(ver)}$)				
30.08.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.3203 x^{0.4968}$	0.10
15.03.2006	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.2594 x^{0.8477}$	0.17
14.03.2007	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.2477 x^{0.8971}$	0.25

Tab. 51: Regressionsmodelle für C_{org} (Tiefe 0 - 30 cm) und die elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen und vertikalen Modus ($EC_{(ver,hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Im Berge“, Messsystem EM38

Organischer Kohlenstoffgehalt ($y = C_{org}$, $x = EC$)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
Messmodus: horizontale Ausrichtung (EC_{hor})				
30.08.2005	keine Aufbereitung	Potenziell	$y = 0.0692 x^{1.1068}$	0.29
15.03.2006	keine Aufbereitung	Potenziell	$y = 0.9273 x^{0.2718}$	0.24
14.03.2007	logarithmiert	Lineare	$y = 1.1999 x - 1.3432$	0.41
Messmodus: vertikale Ausrichtung (EC_{ver})				
30.08.2005	logarithmiert	Logarithmisch	$y = 0.0811 \ln(x) + 0.5046$	0.20
15.03.2006	logarithmiert	Logarithmisch	$y = 0.0577 \ln(x) + 0.6156$	0.18
14.03.2007	logarithmiert	Logarithmisch	$y = 0.5124 \ln(x) + 0.0656$	0.16

4.1.4.3. Schätzung der Korngröße anhand der $EC_{(hor)}$ -Werte

Die Vorgehensweise zur Schätzung der Korngrößen im Oberboden erfolgt anhand der $EC_{(hor)}$ -Werte wie in Kap. 4.1.2.1.3 beschrieben. Die $EC_{(ver)}$ -Werte werden aufgrund des geringen Bestimmtheitsmaßes nicht für die Schätzung angewandt. In Tabelle 52 sind die Differenzen zwischen dem wahren und geschätzten Korngrößenwert für die beiden Messtermine 30.08.2005 und 14.03.2007 angegeben. Weiterhin sind der maximale Wert für eine Über- und Unterschätzung, die Standardabweichung und der Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung angeführt. Als beste Schätzmethode erweist sich die Methode „Feldkarte“.

Insgesamt zeigen ca. die Hälfte (46 - 59%) der Rasterzellen eine Abweichung von ± 5 Prozentpunkten und ca. 55 - 68% der Rasterzellen eine Abweichung von ± 6 Prozentpunkten für den geschätzten Sandgehalt auf. Ungefähr 75% der Rasterzellen sind mit einer Toleranz von ± 3 Prozentpunkten bzw. ca. 96% der Rasterzellen sind mit einer Toleranz von ± 6 Prozentpunkten für den Schluffgehalt korrekt abgeschätzt. Wird eine Abweichung von ± 3 Prozentpunkten akzeptiert, ist ca. die Hälfte der Rasterzellen für den Tongehalt treffend abgeschätzt; werden Abweichungen von ± 6 Prozentpunkten akzeptiert sind es ca. 79 - 84% der Rasterzellen. (s. Tab. 52)

Tab. 52: Differenz zwischen wahren und geschätzten Korngrößen, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Schätzmethode Feldkarte, Fläche „Im Berge“, Messsystem EM38

Korngröße	Messtermin					
	30.08.2005			14.03.2007		
	S1	U1	T1	S1	U1	T1
Differenz in Prozentpunkte	Anzahl der Nennung von den gesamten Rasterzellen (n= 224)					
0	10	29	11	9	28	12
± 1	32	73	47	32	89	57
± 2	44	120	83	57	144	98
± 3	72	167	116	78	174	126
± 4	83	180	139	107	199	145
± 5	104	204	165	132	212	161
± 6	124	214	189	152	222	178
Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung (Prozentpunkte)	-1	0	1	0	-1	0
Standardabweichung (nach KÖSTER 1979)	7.5	3.2	4.9	6.9	2.9	5.0
Maximale Überschätzung (Prozentpunkte)	17	8	14	16	6	16
Maximale Unterschätzung (Prozentpunkte)	-19	-8	-13	-17	-8	-12

Die Summe der geschätzten Korngrößen Sand, Schluff und Ton ergibt einen Mittelwert von 100 bzw. 99; der niedrigste Summenwert beträgt 98 und der höchste 103. Bei einer falschen Vorgehensweise zur Auswahl der Rasterzellen für die Kalibrierung zur Schätzung der Korngrößen im Oberboden, kann sich die Schätzgenauigkeit anhand der EM38-Messwerte gravierend verschlechtern, der Summenwert der drei Korngrößen ergibt dann deutlich mehr als 100. Dieses trifft insbesondere auf die Schätzmethode „Willkürliche Auswahl“ zu. Es ist auf eine sorgsame Auswahl der entsprechenden Rasterzellen für die Kalibrierung zu achten.

Bei einem Vergleich der Schätzergebnisse des EM38, des BOs - 1EP und des ARP03, ist die Schätzung der beiden letztgenannten Messsysteme als zuverlässiger zu beurteilen. Die Schätzgenauigkeit ist bei den beiden galvanisch angekoppelten Messsystemen höher als beim EM38. Dieses zeigt sich an der geringeren Standardabweichung und der höheren Trefferquote unter Berücksichtigung einer bestimmten Abweichung. Weiterhin ist bei der Vorgehensweise zur Auswahl der korrekten Rasterzellen die Fehlerwahrscheinlichkeit beim BOs - 1EP und ARP03 geringer als beim EM38.

Wird die räumliche Verteilung der Über- und Unterschätzung des Tongehalts betrachtet, so fällt auf, dass ebenfalls die Bereiche unterschätzt werden, welche mit den Messergebnissen des BOs - 1EP und ARP03 unterschätzt werden (s. Abb. 33 und 34, durchgängige Kreise). Die gestrichelten Kreise in Abb. 33 und 34 markieren

Tab. 53: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu $EC_{(hor)}$ für zwei ausgewählte Messtermine auf der Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem EM38

Modell	B^2	Korrigiertes B^2	Änderung B^2	Einflussvariablen
Messtermin: 30.08.2005				
1	0.449	0.449	0.449	S1
2	0.473	0.468	0.024	S1, $C1_{org}$
1	Regression: $EC_{(hor)} = (-0.07) * S1 + 17.399$			
2	Regression: $EC_{(hor)} = (-0.06) * S1 + 0.884 * C_{org} + 15.790$			
Messtermin: 14.03.2007				
1	0.552	0.550	0.552	U1
2	0.598	0.595	0.046	U1, $C1_{org}$
3	0.607	0.602	0.009	U1, $C1_{org}$, S1
1	Regression: $EC_{(hor)} = 0.244 * U1 + 8.842$			
2	Regression: $EC_{(hor)} = 0.194 * U1 + 1.657 * C1_{org} + 8.211$			
3	Regression: $EC_{(hor)} = 0.119 * U1 + 1.674 * C1_{org} + (-0.033) * S1 + 12.036$			

Werden die Zahlenreihen logarithmiert, so zeigt sich bei der Messung am 30.08.2005 die Korngröße Ton als maßgebliche Einflussvariable. Bei der Messung am 14.03.2007 ist die Korngröße Schluff die maßgebliche Einflussvariable. Durch Hinzufügen der Einflussvariablen $C1_{org}$, Schluff bzw. Ton und Sand verbessert sich das Bestimmtheitsmaß für den Messtermin 30.08.2005 von 0.474 auf 0.591 und für den Messtermin von 0.585 auf 0.687. (s. Tab. 54)

Als maßgebliche Einflussvariablen für den Messtermin 30.08.2005 zeigen sich für den Messwert $EC_{(hor)}$ S1 und $C1_{org}$, dieses steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Regressionsanalyse der beiden Messsysteme BOs - 1EP und ARP03. Für die Messung am 14.03.2007 weist die Regressionsanalyse für den Messwert $EC_{(hor)}$ allerdings als maßgebliche Einflussvariable die Korngröße Schluff aus. Dieses ist abweichend von den bisherigen Feststellungen. Die Bestimmtheitsmaße erreichen für beide Messtermine nicht die gleiche Stärke im Vergleich zu den Bestimmtheitsmaßen für die Messsysteme BOs - 1EP oder ARP03. (vgl. Tab. 32, 33, 42, 43, 53 und 54).

Tab. 54: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu $EC_{(hor)}$ (Zahlenreihen logarithmiert) für zwei ausgewählte Messtermine auf der Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche nach der multiplen Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable angegeben sind

Modell	B ²	Korrigiertes B ²	Änderung B ²	Einflussvariablen
Messtermin: 30.08.2005				
1	0.476	0.474	0.476	log(T1)
2	0.525	0.521	0.049	log(T1), log(C1 _{org})
3	0.540	0.534	0.015	log(T1), log(C1 _{org}), log(U1)
4	0.598	0.591	0.058	log(T1), log(C1 _{org}), log(U1), log(S1)
1	Regression: $EC_{(hor)} = 0.184 * \log(T1) + 0.902$			
2	Regression: $EC_{(hor)} = 0.150 * \log(T1) + 0.124 * \log(C1_{org}) + 0.934$			
3	Regression: $EC_{(hor)} = 0.110 * \log(T1) + 0.094 * \log(C1_{org}) + 0.129 * \log(U1) + 0.799$			
4	Regression: $EC_{(hor)} = 0.247 * \log(T1) + 0.079 * \log(C1_{org}) + 0.376 * \log(U1) + 0.303 * \log(S1) - 0.252$			
Messtermin: 14.03.2007				
1	0.587	0.585	0.587	log(U1)
2	0.636	0.632	0.094	log(U1), log(C1 _{org})
3	0.653	0.649	0.017	log(U1), log(C1 _{org}), log(T1)
4	0.693	0.687	0.040	log(U1), log(C1 _{org}), log(T1), log(S1)
1	Regression: $EC_{(hor)} = 0.485 * \log(U1) + 0.492$			
2	Regression: $EC_{(hor)} = 0.378 * \log(U1) + 0.149 * \log(C1_{org}) + 0.635$			
3	Regression: $EC_{(hor)} = 0.265 * \log(U1) + 0.147 * \log(C1_{org}) + 0.066 * \log(T1) + 0.713$			
4	Regression: $EC_{(hor)} = 0.490 * \log(U1) + 0.134 * \log(C1_{org}) + 0.191 * \log(T1) + 0.276 * \log(S1) - 0.244$			

4.1.4.5. Suszeptibilität

Der Zusammenhang zwischen der Suszeptibilität und der Korngröße sowie C_{org} im Oberboden ist gering. Die drei ausgewählten Messtermine sind in Tab. 55 aufgeführt.

Tab. 55: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen der Suszeptibilität und den Korngrößen sowie C_{org}

Messsystem	Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
EM38, vertikaler Messmodus	30.08.2005	0.23 **	-0.20 **	-0.23 **	0.20 **
EM38, vertikaler Messmodus	15.03.2006	0.01	0.10	-0.07	0.28 **
EM38, vertikaler Messmodus	14.03.2007	0.16 *	-0.09	-0.19 **	0.26 **

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

* Die Korrelation ist auf dem 0.05 Niveau signifikant (zweiseitig)

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, welche zu den drei Messterminen erfasst wurden, ist gering ausgeprägt (s. Tab. 56). Werden aber die Feldkarten im Anhang betrachtet (s. Anhang Abb. 19 - 21), so fällt auf, dass sich insbesondere zwei Teilflächen am östlichen Feldrand abzeichnen, die eine erhöhte Suszeptibilität aufweisen. Die Größe der Teilflächen variiert zu den Messterminen, aber die räumliche Lage dieser zwei Teilflächen ist konstant. Bei einem Vergleich der Feldkarten „elektrisches Rauschen“ (s. Anhang Abb. 13 - 15) mit den Feldkarten „Suszeptibilität“ (s. Anhang Abb. 19 - 21) zeigt sich eine sehr große Ähnlichkeit der räumlichen Lage dieser Teilflächen. Für die erhöhten Messwerte wird eine gemeinsame aber bislang unbekannte Ursache vermutet.

Tab. 56: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für die Suszeptibilität zwischen den jeweiligen Messterminen

Messtermin	30.08.05	15.03.06	14.03.07
30.08.05	1		
15.03.06	0.18 **	1	
14.03.07	0.37 **	0.53 **	1

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

4.1.5. Vergleich von Ertragsergebnissen mit Korngröße und organischem Kohlenstoffgehalt sowie elektrischer Leitfähigkeit des Bodens

4.1.5.1. Statistische Kenngrößen der Ertragsdaten

Für die Untersuchungsfläche „Im Berge“ liegen aus drei Jahren Ertragsdaten vor. Es ist zu beachten, dass bei der Ernte 2001 die westliche Teilfläche von einem Hagelschlag betroffen war. Die Ertragsdaten der hagelschlagbetroffenen westlichen Teilfläche in 2001 wurden abgegrenzt. Die Ertragsdaten von der westlichen und östlichen Teilfläche werden separat mit Hilfe der z-Transformation standardisiert. Für die nicht vom Hagelschlag betroffene östliche Teilfläche sind Mittelwert und Standardabweichung errechnet. Anhand dieser Werte ist der Ertrag für die gesamte Fläche mit Hilfe der z-Werte rücktransformiert. Somit ist der Einfluss des Hagelschadens auf die Ertragsdaten auf der westlichen Teilfläche relativiert. Für die Dinkelerträge 2006 kann keine korrekte Kalibrierung des Mähdreschers vorgenommen werden, es liegen keine entsprechenden Kalibrierwerte für Dinkel vor. Für 2007 liegen korrekt kalibrierte Ertragsdaten vor.

Die drei Jahre weisen untereinander starke Schwankungen für Mittelwerte und Standardabweichung bzw. die Mediane auf. Insbesondere für den Mittelwert bzw. Median ist dieses stark fruchtartbedingt. Wird der Variationskoeffizient bzw. das Verhältnis (IQR:Median) verglichen, so fällt der Dinkel 2006 mit einer geringeren Streuung auf. (s. Tab. 57)

Tab. 57: Beschreibende statistische Werte für den Ertrag der Fläche „Im Berge“ in verschiedenen Erntejahren, Angaben in t/ha außer VK und (IQR:Median) in %

Attribut	2001	2006	2007
Frucht	Einkorn	Dinkel	Hafer
Minimum	0.44	2.07	2.67
Maximum	1.17	3.85	5.57
Spannweite	0.73	1.78	2.90
Mittelwert	0.84	3.15	4.22
s	0.13	0.27	0.61
VK	15.5	8.6	14.5
Median	0.85	3.17	4.21
IQR	0.10	0.29	0.83
(IQR:Median)	11.8	9.1	19.7
n	224	224	224
Normalvert.	nein	nein	ja

s = Standardabweichung VK = Variationskoeffizient
 IQR = Interquartillbereich n = Anzahl der Beprobungsorte
 Normalvert. = Normalverteilung (nach Kolmogorov-Smirnov Test mit Lilliefors-Modifikation)

4.1.5.2. Vergleich der Feldkarten „Ertrag“ und „Korngrößen“ sowie sonstige Bodenkarten

Im Anhang sind die drei Erntejahre jeweils als Feldkarten mit den interpolierten Erträgen dargestellt (s. Anhang Abb. 22 - 24). Die Interpolation erfolgt mit der Methode „Kriging“.

Die räumliche Verteilung der Erträge auf der Fläche „Im Berge“ variiert sehr stark. Die einzelnen Erntejahre korrelieren sehr gering bis gering untereinander (s. Tab. 58). Allerdings zeigt sich für alle drei Erntejahre ein unterdurchschnittlicher Ertrag auf der südlichen sandigen Teilfläche. Im Erntejahr 2007 zeigt sich für die westliche mittlere Teilfläche mit mittleren Tongehalten ein überdurchschnittlicher Ertrag, in 2001 dagegen in leicht unterdurchschnittlicher Ertrag. Für das Erntejahr 2001 weist die räumliche Verteilung des Ertrags eine mäßige Ähnlichkeit mit der räumlichen Verteilung des Ton- bzw. Sandgehalts auf (s. Anhang Abb. 1, 3 und 22).

Tab. 58: Spearmansche Korrelationskoeffizienten der Erntejahre untereinander

Erntejahr	2001	2006	2007
2001	1		
2006	0.06	1	
2007	-0.10	0.27 **	1

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

4.1.5.3. Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen Ertrag und Korngrößen sowie elektrischer Leitfähigkeit

Der Korrelationskoeffizient zwischen dem Ertrag und der Korngröße sowie C_{org} schwankt entsprechend der unterschiedlichen räumlichen Verteilung des Ertrags für das jeweilige Jahr. Für das Jahr 2001 ist der Zusammenhang zwischen Ertrag und den Korngrößen sowie C_{org} im Oberboden wesentlich stärker ausgeprägt als für die Tiefe 30 bis 60 cm bzw. die Tiefe 0 bis 60 cm. Der Zusammenhang zwischen Ertrag und S1 ist im Jahr 2001 negativ sowie für U1 und T1 positiv und mittel stark ausgeprägt. Für $C1_{org}$ zeigt sich ebenfalls eine positive, aber geringe Korrelation. Für das Jahr 2007 ist dieser Zusammenhang im Oberboden ebenfalls stärker ausgeprägt als in den tieferen Probenschichten. Im Vergleich zu 2001 sind die Zusammenhänge insgesamt etwas geringer ausgeprägt. Des Weiteren sind die Vorzeichen umgekehrt, d.h. Ertrag und S1 korrelieren positiv sowie U1, T1 und Ertrag negativ miteinander. Für das Jahr 2006 sind die Zusammenhänge zwischen Ertrag und Korngröße bzw. C_{org} insgesamt sehr gering. Hier zeigt der Durchschnitt für die Tiefe 0 bis 60 cm einen etwas besseren, aber immer noch sehr geringen Zusammenhang für den Ertrag und den Korngrößen sowie C_{org} . (s. Tab. 59)

Entsprechend schwach sind die Bestimmtheitsmaße der Regressionsanalyse für Ertrag und Korngröße sowie C_{org} für 2006 und 2007. 2001 ist das Bestimmtheitsmaß mit 0.5 vergleichsweise gut ausgeprägt (s. Tab. 60). Aufgrund der sehr geringen bis geringen Korrelationskoeffizienten bzw. schwachen Bestimmtheitsmaße zwischen Ertrag und Korngröße, ergeben sich entsprechend schwache Bestimmtheitsmaße für die elektrische Leitfähigkeit und den Ertrag. In Bezug auf die Ernte 2006 und die Messergebnisse $EC_{(hor,ver)}$ mit dem EM38 im März 2006 ergibt sich bei der Regressionsanalyse ein schwaches Bestimmtheitsmaß von ≤ 0.20 .

Werden die Erträge 2007 mit geoelektrischen Messergebnissen von 2007 in Beziehung gesetzt, so weist das BOs - 1EP schwache Bestimmtheitsmaße von 0.10 bis 0.16 und das EM38 sehr schwache Bestimmtheitsmaße von ≤ 0.02 auf.

Tab. 59: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen Ertrag der einzelnen Jahre und den Korngrößen sowie C_{org}, Bodenprobeentnahmetiefen: 0 - 30 cm (S1, U1, T1, C1_{org}), 30 - 60 cm (S2, U2, T2, C2_{org}) und der Mittelwert aus 0 - 60 cm (S12, U12, T12, C12_{org})

Erntejahr	2001	2006	2007
Korngröße / C _{org}			
S1	-0.64 **	0.13	0.44 **
U1	0.69 **	0.01	-0.36 **
T1	0.58 **	-0.02	-0.46 **
C1 _{org}	0.57 **	-0.05	-0.01
S2	-0.47 **	-0.03	0.28 **
U2	0.48 **	0.04	-0.18 **
T2	0.44 **	0.04	-0.31 **
C2 _{org}	0.18 **	0.12	-0.16 *
S12	-0.30 **	-0.13 *	0.34 **
U12	0.63 **	-0.08	-0.15 *
T12	0.66 **	-0.11	-0.21 **
C12 _{org}	0.38 **	0.06	-0.10

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

* Die Korrelation ist auf dem 0.05 Niveau signifikant (zweiseitig)

Tab. 60: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} im Oberboden auf das Ertragsniveau des jeweiligen Jahres auf der Fläche „Im Berge“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte

Modell	B ²	Korrigiertes B ²	Änderung B ²	Einflussvariablen
Erntejahr 2001				
1	0.533	0.531	0.533	U1
2	0.559	0.555	0.026	U1, C1 _{org}
3	0.575	0.570	0.017	U1, C1 _{org} , T1
1	Regression: Ertrag 2001 = 0.038 * U1 + 0.038			
2	Regression: Ertrag 2001 = 0.02 * U1 + 0.121 * C1 _{org} - 0.008			
3	Regression: Ertrag 2001 = 0.014 * U1 + 0.124 * C1 _{org} + 0.004 * T1 + 0.056			
Erntejahr 2006				
1	0.057	0.053	0.057	U1
1	Regression: Ertrag 2006 = 0.016 * U1 + 2.646			
Erntejahr 2007				
1	0.157	0.153	0.157	T1
2	0.219	0.212	0.062	T1, C1 _{org}
1	Regression: Ertrag 2007 = (-0.031) * T1 + 4.987			
2	Regression: Ertrag 2007 = (-0.041) * T1 + 0.641 * C1 _{org} + 4.369			

4.1.5.4. Multiple Regressionsanalyse zwischen Ertrag und geoelektrischen Messergebnissen

Tabelle 61 weist den Zusammenhang zwischen Ertrag 2007 und den geoelektrischen Messergebnissen aus. Bei der multiplen Regressionsanalyse sind schrittweise die Messergebnisse ARP03 (drei Messtiefen: EC1, EC2, EC3 / Messtermin Herbst 2004), EM38 ($EC_{\text{ver,hor}}$ / Messtermin 14.03.2007) und Bodensensorsystem (EC25, C_{ele} , elektrisches Rauschen ($_{\text{ele}}\text{Rausch}$) und Bodentemperatur (BodTemp)/ Messtermin 14.03.2007) gegenüber dem Ertrag 2007 verrechnet.

Als erste maßgebliche Einflussvariable ist EC3 aufgeführt, wobei das Bestimmtheitsmaß mit 0.2 als mäßig bewertet wird. Durch das Hinzufügen von weiteren Einflussvariablen verbessert sich das Bestimmtheitsmaß bis auf 0.6. Bemerkenswert ist, dass diese auch das elektrische Rauschen einschließen und hierdurch das Bestimmtheitsmaß deutlich verbessert wird.

Tab. 61: Analyse des Zusammenhangs zwischen den geoelektrischen Messwerten ARP03, EM38 und Bodensensorsystem FH und dem Trockenmasse-Ertrag 2007 auf der Fläche „Im Berge“, aufgeführt sind die Messwerte, welche nach der multiplen Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable angegeben sind

Modell	B ²	Korrigiertes B ²	Änderung B ²	Einflussvariablen
Erntejahr 2007				
1	0.238	0.234	0.238	EC3
2	0.372	0.366	0.134	EC3, EC1
3	0.568	0.563	0.197	EC3, EC1, $_{\text{ele}}\text{Rausch}$
4	0.587	0.579	0.018	EC3, EC1, $_{\text{ele}}\text{Rausch}$, BodTemp.
5	0.601	0.591	0.014	EC3, EC1, $_{\text{ele}}\text{Rausch}$, BodTemp., $EC_{(\text{ver})}$
1	Regression: Ertrag 2007 = 0.091 * EC3 + 2.515			
2	Regression: Ertrag 2007 = 0.102 * EC3 + (-0.056) * EC1 + 3.038			
3	Regression: Ertrag 2007 = 0.092 * EC3 + (-0.065) * EC1 + 1.004 * $_{\text{ele}}\text{Rausch}$ + 3.039			
4	Regression: Ertrag 2007 = 0.093 * EC3 + (-0.070) * EC1 + 0.989 * $_{\text{ele}}\text{Rausch}$ + (-0.115) * BodTemp + 3.402			
5	Regression: Ertrag 2007 = 0.075 * EC3 + (-0.076) * EC1 + 1.074 * $_{\text{ele}}\text{Rausch}$ + (-0.118) * BodTemp + 0.039 * $EC_{(\text{ver})}$ + 3.202			

4.1.5.5. Analyse Ertragsniveau und Tongehalt

Wird der Ertrag des jeweiligen Jahres als z-Wert transformiert und gegenüber dem aufsteigend sortierten Tongehalt als eine polynomische Funktion aufgetragen, zeigt sich, dass der Ertrag auf den sandigen Bereichen unterdurchschnittlich ist (z-Wert kleiner als 0). Beispielhaft ist in Abb. 35 der Verlauf der Ertragskurve 2007 dargestellt.

Es zeigt sich für alle drei Jahre auf der Fläche „Im Berge“, dass der Ertrag mit zunehmendem Tongehalt bis ca. 21 - 22% ansteigt. Dieses wird mit einer steigenden

Wasser- und Nährstoffspeicherkapazität des Bodens erklärt (s. Kap. 2.1). Je nach Witterungsverlauf in der Vegetationsperiode weisen Teilflächen mit einem Tongehalt über 21 - 22% weiter steigende Erträge für 2001 (s. Abb. 45) oder wieder zurückgehende Erträge (2006 und 2007) auf. Die zurückgehenden Erträge insbesondere in 2007, werden durch die ergiebigen Niederschläge ab Mai 2007 erklärt. Es wird vermutet, dass die Teilflächen mit einem hohen Tongehalt einen höheren Wassergehalt aufweisen, was wiederum einen verminderten Lufthaushalt und eine geringere Bodentemperatur in der Krume zur Folge hat. Dieses wiederum kann die Ertragsfähigkeit negativ beeinflussen. (s. Kap. 2.1)

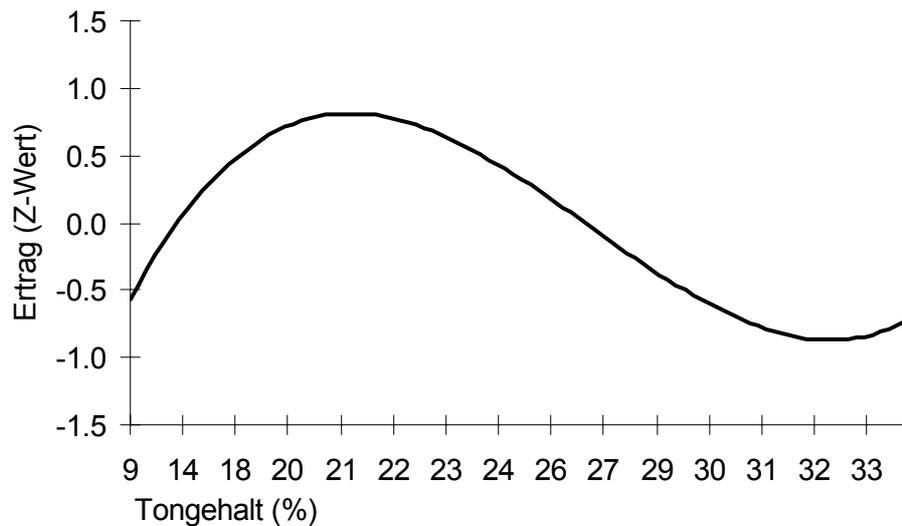


Abb. 35: z-transformierter Ertrag 2007 auf der Fläche „Im Berge“ aufgetragen gegenüber dem aufsteigend sortierten Tongehalt

4.2. Untersuchungsfläche „Wellenkamp“

4.2.1. Statistische Kenngrößen für die Fläche „Wellenkamp“

Die interpolierte räumliche Verteilung der Korngrößen und des organischen Kohlenstoffgehalts (C_{org}) im Oberboden der Fläche „Wellenkamp“ sind im Anhang (s. Anhang Abb. 25 - 28) dargestellt. Entsprechende beschreibende statistische Werte der Fläche „Wellenkamp“ sind in Tab. 62 aufgeführt. Die Korngrößen und C_{org} sind nicht normalverteilt. Die Korngröße Sand hat die größte Spannweite. (s. Tab. 62)

Tab. 62: Beschreibende statistische Werte für die Korngröße der Fläche „Wellenkamp“ für die Tiefe 0 - 30 cm, Ergebnisse der Laboranalyse, Angaben in %

Attribut	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
Minimum	40.0	16.0	11.0	1.160
Maximum	73.0	36.0	26.0	1.950
Spannweite	33.0	20.0	15.0	0.790
Mittelwert	59.5	25.1	15.5	1.438
s	7.7	4.4	3.7	0.157
VK	12.9	17.5	23.9	10.9
Median	59.8	24.1	13.8	1.410
IQR	11.0	6.0	5.1	0.190
(IQR:Median)	18.4	24.9	37.0	13.5
Normalverteilung	nein	nein	nein	nein
Vertrauensbereich (Median)				
Oberer Bereich	61.4	25.0	14.5	1.438
Unterer Bereich	58.2	23.2	13.1	1.382
s	= Standardabweichung			
VK	= Variationskoeffizient			
IQR	= Interquartillbereich			

Auch für die Fläche „Wellenkamp“ weisen die Analysewerte, wie bereits für die Fläche „Im Berge“ beschrieben, für die Tiefe 30 - 60 cm eine größere Spannweite auf als für die obere Tiefe. Der Sandgehalt im Unterboden ist signifikant höher als im Oberboden. Der Schluff- und Tongehalt sowie der C_{org} -Gehalt nehmen im Unterboden ab. Aufgrund der größeren Spannweiten nimmt die Variation der Korngrößenverteilung für die Korngrößen Schluff und Ton im Unterboden zu. (s. Tab. 63)

Tab. 63: Beschreibende statistische Werte für die Korngröße der Fläche „Wellenkamp“ für die Tiefe 30 - 60 cm, Ergebnisse der Laboranalyse, Angaben in %

Attribut	Sand	Schluff	Ton	C _{org}
Minimum	27.0	13.0	5.0	0.03
Maximum	82.0	43.0	30.0	1.069
Spannweite	55.0	30.0	25.0	1.036
Mittelwert	64.7	22.8	12.5	0.531
s	10.8	6.1	5.2	0.180
VK	16.7	26.8	41.6	33.9
Median	68.4	21.9	11.4	0.510
IQR	11.0	7.4	6.1	0.246
(IQR:Median)	16.1	33.8	53.5	48.2
Normalverteilung	nein	nein	nein	nein
Vertrauensbereich (Median)				
Oberer Bereich	70.0	23.0	12.3	0.546
Unterer Bereich	66.8	20.8	10.5	0.474
s	= Standardabweichung			
VK	= Variationskoeffizient			
IQR	= Interquartillbereich			

Für die Korngrößen Sand, Schluff bzw. Ton betragen die Korrelationskoeffizienten zwischen der Tiefe 0 - 30 cm und der Tiefe 30 - 60 cm 0.79, 0.66 bzw. 0.80. Für C_{org} zeigt sich eine deutliche geringere Beziehung zwischen den beiden Tiefen, der Korrelationskoeffizient beträgt 0.28. Die deutlichen Unterschiede von Minimum-, Maximum- und Mittel/ Medianwert sowie der geringen Korrelation zwischen den beiden Tiefen deuten daraufhin, dass sich die C_{org}-Gehalte im Oberboden und krumennahen Unterboden heterogen verteilen.

Die Ergebnisse der Nährstoffanalyse für die obersten 30 cm Tiefe sind in Tab. 64 angegeben. Die Verteilung der einzelnen Zahlenreihen weist keine Normalverteilung auf. Auffällig ist die hohe Variation des pflanzenverfügbaren Phosphors, insbesondere das Verhältnis (IQR:Median) ist deutlich höher im Vergleich zu den anderen Nährstoffen.

Tab. 64: Beschreibende statistische Werte für die Nährstoffe der Fläche „Wellenkamp“ für die Tiefe 0 - 30 cm, Ergebnisse der Laboranalyse, Angaben in mg/100g außer VK und (IQR:Median) in %

Attribut	P _{gesamt}	N _{gesamt}	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O
Minimum	53.0	100.0	4.0	5.0	14.0
Maximum	91.0	160.0	13.0	20.0	42.0
Spannweite	38.0	60.0	9.0	15.0	28.0
Mittelwert	70.3	124.0	4.9	11.5	21.8
s	9.3	14.2	1.1	3.1	4.7
VK	13.2	11.5	22.4	27.0	21.6
Median	68.0	120.0	4.6	11.2	21.6
IQR	15.0	20.0	1.2	4.9	5.2
(IQR:Median)	22.1	16.7	26.1	43.8	24.1

s = Standardabweichung

VK = Variationskoeffizient

IQR = Interquartillbereich

In Tab. 65 sind die Spearmanschen Korrelationskoeffizienten für die untersuchten Nährstoffe und der Korngröße sowie C_{org} in der Tiefe von 0 bis 30 cm aufgeführt. Die Korngröße Sand korreliert negativ mit den Nährstoffgehalten und die Korngrößen Schluff und Ton sowie C_{org} korrelieren positiv mit den Nährstoffen. Es zeigt sich ebenfalls, wie bereits auf der Fläche „Im Berge“ beschrieben, ein hoher Zusammenhang für den Gesamtphosphor- bzw. Gesamtstickstoffgehalt und den Korngrößen sowie C_{org}. Im Vergleich zur Fläche „Im Berge“ zeigt sich für die Fläche „Wellenkamp“ ein stärkerer Zusammenhang für die Nährstoffe MgO bzw. K₂O und den Korngrößen sowie C_{org}. Ein deutlich stärkerer Zusammenhang zeigt sich für den pflanzenverfügbaren Phosphor und den Korngrößen im Vergleich zur Fläche „Im Berge“.

Tab. 65: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen untersuchten Nährstoffgehalten und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt in 0 - 30 cm Tiefe der Fläche „Wellenkamp“

Attribut	Sand	Schluff	Ton	C _{org}
P _{gesamt}	-0.75**	0.66**	0.80**	0.66**
N _{gesamt}	-0.73**	0.68**	0.67**	0.81**
MgO	-0.73**	0.67**	0.73**	0.69**
P ₂ O ₅	-0.41**	0.37**	0.51**	0.46**
K ₂ O	-0.63**	0.56**	0.64**	0.46**

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

Auch auf der Fläche „Wellenkamp“ gibt die räumliche Verteilung der Korngrößen und C_{org} im Oberboden in einem hohen Maß Hinweise auf die räumliche Verteilung des Gesamtphosphor- bzw. Gesamtstickstoffgehalts. Weiterhin kann anhand der räumlichen Verteilung der Korngrößen und C_{org} auch auf die räumliche Verteilung der Nährstoffe Magnesium und Kalium geschlossen werden. Für den

pflanzenverfügbaren Phosphor trifft diese Aussage bedingt zu. Im Vergleich zur Fläche „Im Berge“ sind insbesondere die Zusammenhänge für das pflanzenverfügbare Phosphor und den Korngrößen deutlich besser.

4.2.2. Geoelektrische Messung mit dem BOs - 1EP

4.2.2.1. Elektrische Leitfähigkeit (BOs - 1EP)

Auf der Fläche „Wellenkamp“ sind 2005 mehrere geoelektrische Messungen durchgeführt worden. Messzeitpunkte sind in Tab. 66 aufgeführt. Es liegen für die Fläche „Wellenkamp“ somit 7 Messungen über die gesamte Fläche vor.

Tab. 66: Messzeitpunkte des Bodensensorssystems auf der Fläche „Wellenkamp“

Messsystem	Messzeitpunkt	Bemerkung
BOs - 1EP	16.03.2005	Kultur: abgefrorene Zwischenfrucht
BOs - 1EP	17.03.2005	Messung im gegrubberten Boden
BOs - 1EP	21.03.2005	Messung im gepflügten Boden, sehr grobschollig
BOs - 1EP	19.08.2005	Messung erfolgte 1 Tag nach dem Mähdrusch
BOs - 1EP	31.08.2005	Messung im flach gegrubberten Boden
BOs - 1EP	13.09.2005	Messung im tief gegrubberten Boden
BOs - 1EP	19.09.2005	Messung im gepflügten und saarfertigen Boden

Tabelle 67 weist die beschreibenden statistischen Werte der elektrischen Leitfähigkeit (normiert auf 25°C) auf. Die Zahlenreihen sind in der Tendenz nicht normal verteilt.

Für die drei Messungen im März fällt auf, dass die Mittel- bzw. Medianwerte mit der Intensität der Bodenbearbeitung abnehmen. Der Variationskoeffizient bzw. das Verhältnis von (IQR:Median) bleibt dabei annähernd gleich. Direkt nach dem Mähdrusch (19.08.2005) sind ähnlich hohe Werte gemessen worden, wie für die ersten beiden Messungen im März. Die Messungen am 31.08.2005 und 13.09.2005 weisen geringere Mittel- bzw. Medianwerte auf im Vergleich zur Messung am 19.08.2005. Dieses kann wieder mit der Bodenbearbeitung und mit den geringen Niederschlägen (s. Tab. 82) zwischen den Messterminen erklärt werden. Für die Messung am 19.09.2005, welche auf gepflügten und gepackten Ackerland statt fand, fällt der höhere Mittelwert bzw. Medianwert gegenüber dem 13.09.2005 auf. Dieses kann mit einem Niederschlagsereignis einige Tage vor der Messung (s. Tab. 82) erklärt werden. Der Einfluss der Bodenbearbeitung (Pflügen) wird durch die gestiegene Bodenfeuchte überdeckt. (s. Tab. 67)

Tab. 67: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Leitfähigkeit normiert auf 25°C für die Fläche „Wellenkamp“, Angaben in mS/m außer VK und (IQR:Median) in %

Attribut	16.03.05	17.03.05	21.03.05	19.08.05	31.08.05	13.09.05	19.09.05
Minimum	3.7059	3.6171	2.7017	3.2266	2.6149	2.4709	3.4962
Maximum	8.7887	7.3909	5.6122	7.5411	7.5227	5.8844	6.5291
Spannweite	5.0828	3.7737	2.9105	4.3145	4.9078	3.4135	3.0329
Mittelwert	5.6303	5.0847	3.8014	5.1353	4.6514	4.0154	4.5295
s	1.2453	0.9436	0.7058	0.9748	0.9696	0.5083	0.6657
VK	22.1	18.6	18.6	17.0	20.8	12.7	14.7
Median	5.2086	4.7905	3.6282	4.9683	4.6206	4.0393	4.4911
IQR	1.6721	1.3956	1.0969	1.3708	1.3136	0.7129	0.8861
(IQR:Median)	32.1	29.1	30.2	27.6	28.4	17.6	19.7
n	117	117	117	117	117	117	117
Normalvert.	nein	nein	nein	nein	ja	ja	nein

s = Standardabweichung

VK = Variationskoeffizient

IQR = Interquartillbereich

n = Anzahl der Beprobungsorte

Normalvert.= Normalverteilung (nach Kolmogorov-Smirnov Test mit Lilliefors-Modifikation)

4.2.2.1.1. Vergleich der Messtermine im Hinblick auf die elektrische Leitfähigkeit

Die Ergebnisse der einzelnen Messtermine weisen untereinander sehr unterschiedliche Korrelationskoeffizienten auf. Der Zusammenhang kann von sehr gering bis hoch beschrieben werden. Es fällt die Messung am 19.08.2005 mit sehr geringen Korrelationskoeffizienten auf. Vermutlich ist die elektrische Leitfähigkeit des überwiegenden sandigen Bereichs auf der nördlichen Teilfläche durch Hangabzugswasser und/oder durch Grundwasseranstieg im Bereich des Gleys beeinflusst (s. Kap. 3.2.2). (s. Tab. 68)

Tab. 68: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für die elektrische Leitfähigkeit zwischen den jeweiligen Messterminen

Messtermin	16.03.05	17.03.05	21.03.05	19.08.05	31.08.05	13.09.05	19.09.05
16.03.2005	1						
17.03.2005	0.89 **	1					
21.03.2005	0.78 **	0.79 **	1				
19.08.2005	0.14	0.15	0.13	1			
31.08.2005	0.57 **	0.66 **	0.67 **	0.28 **	1		
13.09.2005	0.54 **	0.54 **	0.57 **	0.34 **	0.54 **	1	
19.09.2005	0.80 **	0.81 **	0.72 **	0.22 **	0.81 **	0.72 **	1

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

Vergleich der Feldkarten „elektrischer Leitwert“ und „Korngrößen“

Im Anhang sind fünf Feldkarten mit den interpolierten elektrischen Leitfähigkeiten dargestellt (s. Anhang Abb. 29 - 33). Die räumliche Verteilung der Korngrößen (s. Anhang Abb. 25 - 27) wird anhand der räumlichen Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (s. Anhang Abb. 29 - 33) mit einer guten Ähnlichkeit abgebildet. Dieses gilt allerdings nicht für die Messung am 19.08.2005 (s. Anhang Abb. 31). Für die übrigen Messtermine weist die südliche Teilfläche mit niedrigen Sandgehalten bzw. hohen Tongehalten höhere elektrische Leitwerte auf als die nördliche Teilfläche mit hohen Sandgehalten bzw. niedrigeren Tongehalten. Innerhalb der nördlichen Teilfläche ist in der östlichen Hälfte ein Bereich mit höheren Sandgehalten erkennbar als die übrige nördliche Teilfläche. Dieses kann ebenfalls anhand an der Variation der elektrischen Leitfähigkeit erkannt werden. Weiter sind kleinräumige Variationen erkennbar, wie z.B. in der südwestlichen Ecke der Fläche. Hier ist ein niedriger Leitwert erkennbar, obwohl der Tongehalt nicht geringer ist, aber es wird für diesen Bereich als Bodentyp kleinräumig ein Ranker auskartiert (s. Abb. 21).

Für die Messung am 19.08.2005 sind hohe elektrische Leitwerte auf der südlichen und auf der nördlichen Teilfläche erkennbar. Die östliche Teilfläche mit den höheren Sandgehalten ist auch für diesen Messtermin weiterhin anhand geringerer Leitwerte erkennbar.

4.2.2.1.2. Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen EC25 und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt

Korrelationsanalyse

Tabelle 69 weist die Spearmanschen Korrelationskoeffizienten des jeweiligen Messtermins für EC25 und den Korngrößen sowie C_{org} in 0 - 30 cm Tiefe aus. Der Zusammenhang zwischen der Korngröße Sand und EC25 ist hier ebenfalls negativ. Ebenso zeigen sich für die Korngrößen Schluff und Ton sowie C_{org} positive Zusammenhänge. Die Korrelationen zwischen EC25 und der Korngröße sowie C_{org} sind überwiegend als mittel zu beurteilen. Auffällig ist auch hier wieder der Messtermin am 19.08.2005 mit sehr geringen Korrelationskoeffizienten. (s. Tab. 69)

Werden die Korrelationskoeffizienten zwischen EC25 und den Korngrößen in 30 bis 60 cm Tiefe (s. Tab. 70) bzw. die Korrelationskoeffizienten EC25 und den Korngrößen in 0 bis 60 cm Tiefe (s. Tab. 71) betrachtet, fällt auf, dass diese gegenüber den Korrelationskoeffizienten zwischen EC25 und den Korngrößen für die Tiefe 0 bis 30 cm (s. Tab. 69) annähernd gleich bleibend oder auch teilweise höher sind. Für die Korrelationskoeffizienten zwischen EC25 und C_{1org} kann dieses nicht beobachtet werden. Hier wird der stärkste Zusammenhang in der Tiefe 0 bis 30 cm festgestellt. Im Vergleich zur Fläche „Im Berge“ sind die Korrelationskoeffizienten zwischen EC25 und den Korngrößen schwächer ausgeprägt. Des Weiteren nimmt der Zusammenhang auf der Fläche „Im Berge“ für die Bodentiefe 30 bis 60 cm ab. Für beide Flächen zeigt sich der beste Zusammenhang zwischen EC25 und C_{org} in der Bodentiefe 0 bis 30 cm.

Tab. 69: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit und den Korngrößen sowie C_{org} (Probeentnahmetiefe: 0 - 30 cm)

Messsystem	Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
BOs - 1EP	16.03.2005	-0.69**	0.65**	0.59**	0.59**
BOs - 1EP	17.03.2005	-0.67**	0.59**	0.64**	0.56**
BOs - 1EP	21.03.2005	-0.67**	0.65**	0.58**	0.58**
BOs - 1EP	19.08.2005	-0.14	0.18	0.10	0.01
BOs - 1EP	31.08.2005	-0.54**	0.47**	0.61**	0.38**
BOs - 1EP	13.09.2005	-0.46**	0.44**	0.40**	0.58**
BOs - 1EP	19.09.2005	-0.61**	0.56**	0.58**	0.42**

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

Tab. 70: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit und den Korngrößen sowie C_{org} (Probeentnahmetiefe: 30 - 60 cm)

Messsystem	Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
BOs - 1EP	16.03.2005	-0.66**	0.59**	0.62**	0.14
BOs - 1EP	17.03.2005	-0.69**	0.64**	0.62**	0.12
BOs - 1EP	21.03.2005	-0.62**	0.55**	0.61**	0.13
BOs - 1EP	19.08.2005	-0.33**	0.42**	0.12	0.24*
BOs - 1EP	31.08.2005	-0.51**	0.44**	0.52**	0.04
BOs - 1EP	13.09.2005	-0.51**	0.45**	0.49**	0.26**
BOs - 1EP	19.09.2005	-0.64**	0.59**	0.62**	0.16

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

* Die Korrelation ist auf dem 0.05 Niveau signifikant (zweiseitig)

Tab. 71: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit und den Korngrößen sowie C_{org} (Probeentnahmetiefe: 0 - 60 cm)

Messsystem	Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
BOs - 1EP	16.03.2005	-0.71**	0.68**	0.62**	0.42**
BOs - 1EP	17.03.2005	-0.73**	0.69**	0.65**	0.40**
BOs - 1EP	21.03.2005	-0.67**	0.65**	0.61**	0.41**
BOs - 1EP	19.08.2005	-0.25*	0.33**	0.09	0.18
BOs - 1EP	31.08.2005	-0.53**	0.46**	0.56**	0.24**
BOs - 1EP	13.09.2005	-0.52**	0.50**	0.46**	0.53**
BOs - 1EP	19.09.2005	-0.67**	0.63**	0.62**	0.35**

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

* Die Korrelation ist auf dem 0.05 Niveau signifikant (zweiseitig)

Regressionsanalyse

Ein bestimmtes Regressionsmodell ist zwischen EC25 und der jeweiligen Korngröße oder C_{org} im Oberboden nicht erkennbar. Weiterhin sind die ermittelten Bestimmtheitsmaße sehr gering bis mittel (s. Tab. 72 - 75). Dieses steht im Gegensatz zur Regressionsanalyse der Fläche „Im Berge“. Allerdings zeigen sich für die Fläche „Wellenkamp“ die besten Bestimmtheitsmaße ebenfalls im Frühjahr.

Tab. 72: Regressionsmodelle für die Korngröße Sand (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

Korngröße Sand (y = Sandgehalt, x = EC25)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
16.03.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = 99.0376 \ln(x) - 23.197$	0.41
17.03.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = 103.488 \ln(x) - 27.341$	0.41
21.03.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = (-7.4970) x + 87.9758$	0.47
19.08.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.7262 x^{(-0.0686)}$	0.06
31.08.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = (-4.7152) x + 81.4092$	0.35
13.09.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = (-5.6431) x + 82.1362$	0.14
19.09.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-33.796) x + 110.185$	0.39

Tab. 73: Regressionsmodelle für die Korngröße Schluff (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

Korngröße Schluff (y = Schluffgehalt, x = EC25)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
16.03.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.5179 x^{0.2850}$	0.41
17.03.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = 14.5320 \ln(x) + 1.6747$	0.36
21.03.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = 4.1724 x + 9.2060$	0.45
19.08.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = 5.0201 \ln(x) + 16.9430$	0.05
31.08.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = 2.3640 x + 14.0709$	0.27
13.09.2005	keine Aufbereitung	Expotenziell	$y = 14.5437 e^{0.1318x}$	0.15
19.09.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = 17.9288 \ln(x) - 1.8339$	0.34

Tab. 74: Regressionsmodelle für die Korngröße Ton (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

Korngröße Ton ($y = \text{Tongehalt}$, $x = \text{EC25}$)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
16.03.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.3260 x^{0.3948}$	0.37
17.03.2005	logarithmiert	Expotenziell	$y = 0.7434e^{0.2275x}$	0.42
21.03.2005	keine Aufbereitung	Expotenziell	$y = 6.9631e^{0.2031x}$	0.42
19.08.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = 0.7187 x + 11.7638$	0.04
31.08.2005	keine Aufbereitung	Expotenziell	$y = 7.7646e^{0.1425x}$	0.39
13.09.2005	keine Aufbereitung	Expotenziell	$y = 8.1475e^{0.1531x}$	0.12
19.09.2005	keine Aufbereitung	Potenziell	$y = 3.5818x^{0.9575}$	0.38

Tab. 75: Regressionsmodelle für den organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit (EC25) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

C_{org} ($y = C_{\text{org}}$, $x = \text{EC25}$)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
16.03.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 0.2224 x^{1.3064}$	0.29
17.03.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 0.2516 x^{1.4427}$	0.30
21.03.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 0.3061 x^{1.2740}$	0.34
19.08.2005			$B^2 < 0,01$	
31.08.2005	logarithmiert	Expotenziell	$y = 0.0712e^{1.1189x}$	0.12
13.09.2005	keine Aufbereitung	Expotenziell	$y = 0.9080e^{0.1131x}$	0.30
19.09.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 0.2570 x^{1.2636}$	0.16

4.2.2.1.3. Schätzung der Korngrößen anhand der EC25-Werte

Für drei Messtermine sind die Korngrößen auf der Fläche „Wellenkamp“ anhand der Vorgehensweise wie im Kapitel 4.1.2.1.3 beschrieben, abgeschätzt worden. Tabelle 76 weist die beste und die alternative Schätzmethode auf. Es empfiehlt sich zur Schätzung der Korngrößen auf der Fläche „Wellenkamp“ die Schätzmethode „Feldkarte“ bzw. „Wertetabelle“ anzuwenden. Die Schätzmethode „Willkürliche Auswahl“ weist eine geringere Genauigkeit auf und findet darum keine Berücksichtigung.

Tab. 76: Beste Schätzmethode für die Fläche Wellenkamp

Messtermin	Beste Schätzmethode	Alternative Schätzmethode
17.03.2005	Wertetabelle	Feldkarte
31.08.2005	Feldkarte	Wertetabelle
19.09.2005	Feldkarte	Wertetabelle

Die Summe der Korngrößen Sand, Schluff und Ton ergibt für jeden Messtermin einen Mittelwert von 100 bzw. ein Mal 99; der niedrigste Summenwert beträgt 99 und der höchste 101.

Die Tabellen 77 - 79 weisen die Differenzen zwischen dem wahren und dem geschätzten Korngrößenwert auf. Weiterhin sind der maximale Wert für eine Über- und Unterschätzung und der Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung für die fünf ausgewählten Messtermine angegeben.

Auch hier zeigt sich, dass die Schätzung des Schluff- bzw. Tongehalts besser ist als die Schätzung des Sandgehalts. So weisen etwa zwei Drittel (57 - 68%) der geschätzten Sandwerte eine Abweichung von ± 5 Prozentpunkten vom wahren Sandwert auf. Werden ± 6 Prozentpunkte als Abweichung toleriert, so sind ca. drei Viertel (64 - 74%) der Sandwerte korrekt abgeschätzt. Bei der Schätzung des Schluffgehalts weisen 67 - 71% der geschätzten Schluffwerte eine Abweichung von ± 3 Prozentpunkten auf. Bei einer Tolerierung einer Abweichung von ± 6 Prozentpunkten beträgt die Schätzquote 91 - 93%. Die Schätzergebnisse des Tongehalts weisen ebenfalls ein gutes Ergebnis auf. So sind drei Viertel (74 - 78%) der geschätzten Tonwerte mit einer Abweichung von ± 3 Prozentpunkten bzw. über 95% mit einer Abweichung von ± 6 Prozentpunkten geschätzt worden. (s. Tab. 77 - 79)

Tab. 77: Differenz zwischen wahrem und geschätztem Sandgehalt, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

Schätzmethode	Messtermin		
	17.03.2005	31.08.2005	19.09.2005
	Wertetabelle	Feldkarte	Feldkarte
Differenz in Prozentpunkte	Anzahl der Nennung von Rasterzellen gesamt (n= 117)		
0	7	6	9
± 1	30	16	24
± 2	55	33	41
± 3	65	46	57
± 4	71	58	63
± 5	80	67	74
± 6	85	75	80
Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung (Prozentpunkte)	1.6	0	-0.2
Standardabweichung (nach KÖSTER 1979)	4.4	4.6	4.4
Maximale Überschätzung (Prozentpunkte)	20	16	16
Maximale Unterschätzung (Prozentpunkte)	-12	-13	-13

Tab. 78: Differenz zwischen wahrem und geschätztem Schluffgehalt, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

Schätzmethode	Messtermin		
	17.03.2005	31.08.2005	19.09.2005
	Wertetabelle	Feldkarte	Feldkarte
Differenz in Prozentpunkte	Anzahl der Nennung von Rasterzellen gesamt (n= 117)		
0	9	14	16
± 1	30	38	37
± 2	54	55	60
± 3	78	70	78
± 4	92	83	94
± 5	98	99	102
± 6	104	109	107
Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung (Prozentpunkte)	-1.7	-0.5	-0.6
Standardabweichung (nach KÖSTER 1979)	2.8	2.8	2.6
Maximale Überschätzung (Prozentpunkte)	7	9	9
Maximale Unterschätzung (Prozentpunkte)	-12	-9	-10

Tab. 79: Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

Schätzmethode	Messtermin		
	17.03.2005	31.08.2005	19.09.2005
	Wertetabelle	Feldkarte	Feldkarte
Differenz in Prozentpunkte	Anzahl der Nennung von Rasterzellen gesamt (n= 117)		
0	18	9	12
± 1	48	40	35
± 2	69	66	58
± 3	91	89	87
± 4	106	99	104
± 5	112	108	109
± 6	113	111	115
Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung (Prozentpunkte)	0	-0.1	0.5
Standardabweichung (nach KÖSTER 1979)	2.1	2.3	2.2
Maximale Überschätzung (Prozentpunkte)	5	5	6
Maximale Unterschätzung (Prozentpunkte)	-8	-9	-8

Es fällt auf, dass auch auf der Fläche „Wellenkamp“ die Tongehalte auf der nördlichen und vergleichsmäßigen sandigen Teilfläche überschätzt werden. Auf der südlichen Teilfläche dagegen mit verhältnismäßig hohen Tongehalten wird der Tongehalt unterschätzt. Auch zeigen sich einige Rasterzellen, welche zu den drei Terminen eine deutliche Unterschätzung aufweisen (s. Abb. 36 - 38, Kreise) und zwar an der äußersten südwestlichen Ecke der Fläche, wobei die Höhe der Unterschätzung von Termin zu Termin variiert. Für diesen Bereich zeigt die Bodenkarte mit den kleinräumigen Bodentypen einen Ranker auf (s. Abb. 19).

Vergleich Feldkarte „EC25“ mit bodenkundlichen Karten

Die Fläche „Wellenkamp“ ist laut Bodenschätzung mit der Bodenart stark lehmiger Sand kartiert (s. Abb. 18). Wird die Karte der Bodenschätzung mit den Feldkarten der interpolierten Korngrößen verglichen, fällt auf, dass die Bodenschätzung in Bezug auf die Feststellung der Bodenart eine deutliche Schwäche aufweist. Anhand der Feldkarten mit den Korngrößen ist erkennbar, dass sich die Fläche in eine nördliche und südliche Teilfläche unterteilen lässt. Die nördliche Teilfläche mit Sandgehalten zwischen 40 - 55% entspricht ungefähr der räumlichen Ausdehnung der ausgewiesenen Teilfläche mit dem Klassenzeichen SL Vg 34/35. Auch kann die nördliche Teilfläche anhand der geoelektrischen Messung gut von der südlichen Teilfläche abgegrenzt werden. Die südliche Teilfläche mit einem Sandgehalt von 55 - 70% wird ebenfalls als stark lehmiger Sand angegeben. Die geoelektrischen Messungen (mit Ausnahme des Messtermins vom 19.08.2005) weisen für diese Teilfläche niedrigere Messwerte auf als auf der zuvor beschriebenen nördlichen Teilfläche. Dies wird durch die Laboranalyse bestätigt.

4.2.2.2. Elektrische Kapazität

Die Messwerte der elektrischen Kapazität (C_{ele}) in Tab. 80 sind nicht temperaturnormiert. Überwiegend liegt keine Normalverteilung der Zahlenreihen vor. Für die Messung im Frühjahr und nach dem Mähdrusch am 19.08.2005 zeigen sich auch negative Messwerte. Die elektrische Leitfähigkeit und die elektrische Kapazität weisen für fünf Messtermine eine hohe oder sehr hohe Korrelation auf. Für die Messtermine 31.08.2005 und 13.09.2005 ist die Korrelation sehr gering bzw. gering. Ab welcher Leitwertshöhe die elektrische Kapazität negative Messwerte aufweist kann nicht eindeutig bestimmt werden. Am 16.03.2005 und 21.03.2005 weist die elektrische Kapazität ab einer Leitfähigkeit von ca. 4.6 mS/m negative Messwerte auf. Am 17.03.2005 sind alle C_{ele} Messwerte im Auswerteraster negativ. Für den Messtermin am 19.08.2005 dagegen lassen sich negative Messwerte ab einer Leitfähigkeit von ca. 5.8 mS/m feststellen.

Die Variation der Messwerte anhand des (IQR:Median) Werts nimmt vom 16.03.2005 zum 21.03.2005 ab, als eine mögliche Ursache wird die Bodenbearbeitung vermutet. Wird der 17.03.2005 zum Vergleich mit herangezogen, so fällt auf, dass der Medianwert negativ ist. Für die drei weiteren Messungen im Sommer 2005 fällt die geringere Variation der Messwerte auf, als mögliche Ursache hierfür werden die erneute Bodenbearbeitung und die trockene Witterung vermutet.

Tab. 80: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Kapazität der Plattenanordnung für die Fläche „Wellenkamp“, Angaben in Pikofarad (pF) außer VK und (IQR:Median) in %

Attribut	16.03.05	17.03.05	21.03.05	19.08.05	31.08.05	13.09.05	19.09.05
Minimum	-1040	-818	-378	-116	343	242	438
Maximum	296	-43	157	167	438	318	567
Spannweite	1336	775	535	284	95	77	129
Mittelwert	-10	-283	72	74	397	289	482
s	290	211	73	60	19	13	24
VK	(-2900)	(-75)	101	81	5	4	5
Median	102	-218	95	86	396	287	482
IQR	297	288	81	76	28	16	31
(IQR:Median)	291	(-132)	85	88	7	6	6
N	117	117	117	117	117	117	117
Normalvert.	nein	nein	nein	nein	ja	ja	nein

s = Standardabweichung

VK = Variationskoeffizient

IQR = Interquartillbereich

n = Anzahl der Beprobungsorte

Normalvert.= Normalverteilung (nach Kolmogorov-Smirnov Test mit Lilliefors-Modifikation)

4.2.2.2.1. Vergleich der Messtermine im Hinblick auf die elektrische Kapazität

Der Zusammenhang der Messtermine untereinander kann als sehr gering bis hoch beschrieben werden. Weiterhin bestehen auch negative Korrelationen. (s. Tab. 81)

Tab. 81: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für die elektrische Kapazität der Plattenanordnung zwischen den jeweiligen Messterminen

Messtermin	16.03.05	17.03.05	21.03.05	19.08.05	31.08.05	13.09.05	19.09.05
16.03.2005	1						
17.03.2005	0.88 **	1					
21.03.2005	0.73 **	0.77 **	1				
19.08.2005	0.19 *	0.20 *	0.23 *	1			
31.08.2005	0.32 **	0.10	0.12	0.12	1		
13.09.2005	-0.41 **	-0.46 **	-0.32 **	0.04	0.07	1	
19.09.2005	-0.72 **	-0.65 **	-0.59 **	0.08	-0.16	0.33 **	1

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

* Die Korrelation ist auf dem 0.05 Niveau signifikant (zweiseitig)

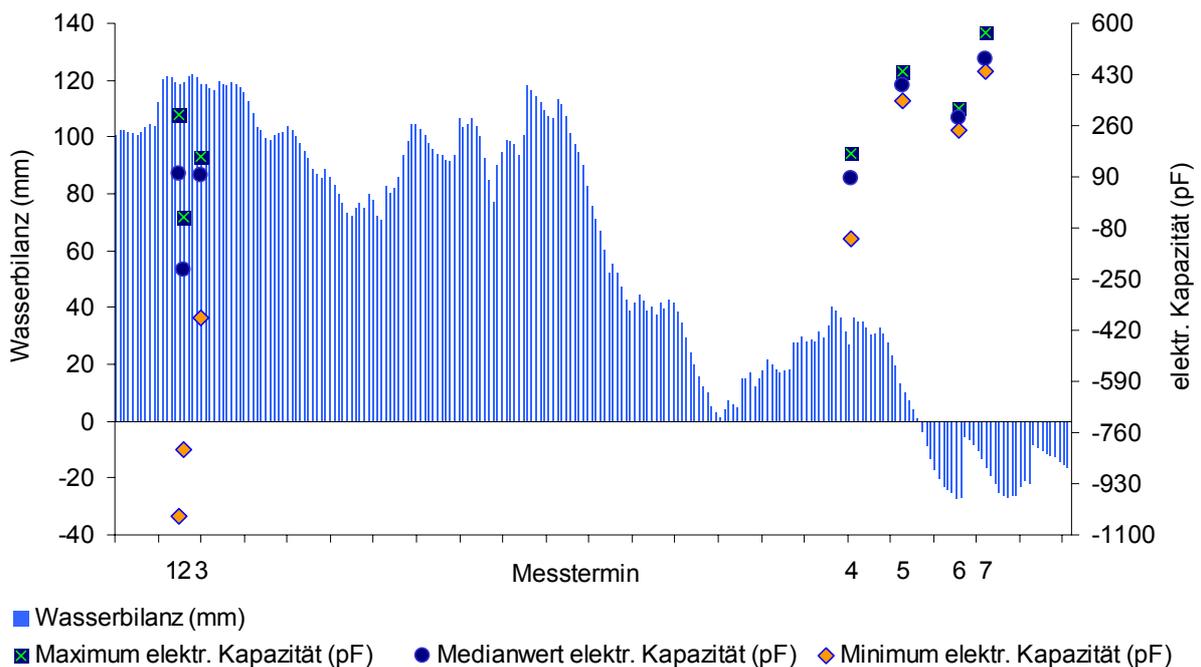
Negative Messergebnisse zeigen sich in der Regel zu den Terminen, an denen einige Tage zuvor Niederschläge stattfanden. In Abb. 39 ist erkennbar, dass mit kleiner werdender Wasserbilanz, die Spannweite sinkt und der Medianwert steigt. Auffällig ist der deutliche Unterschied im Medianwert zwischen 16.03.2005 (1) und 17.03.2005 (2). Die Wasserbilanz ändert für diese beiden Zeitpunkte nur geringfügig, aber es fielen zur Messung am 17.03.2005 über Nacht 2.3 mm Regen. Dieser relativ

geringe Niederschlag wird als mögliche Ursache angeführt. Weiter fällt auf, dass am 16.03.2005 (1) und 21.03.2005 (2) die Medianwerte nahezu gleich sind, aber die Variation deutlich geringer ist. (s. Abb. 39)

Auch hier wird wieder vermutet, dass der Bearbeitungszustand des Bodens das Messergebnis „elektrische Kapazität“ beeinflusst.

Tab. 82: Niederschlagsmengen (in mm) für verschiedene Zeitpunkte vor der geoelektrischen Messung auf der Fläche „Wellenkamp“

Messzeitpunkt	Niederschläge in mm x Tage vor der Messung		
	3 Tage	5 Tage	10 Tage
16.03.2005	0.9	11.0	23.7
17.03.2005	2.3	4.1	23.9
21.03.2005	0.8	4.3	15.3
19.08.2005	0.0	7.4	19.2
31.08.2005	0.0	0.0	4.7
13.09.2005	0.0	0.0	0.6
19.09.2005	0.0	22.8	23.6



Messtermine: 1 = 16.03.2005 2 = 17.03.2005 3 = 21.03.2005 4 = 19.08.2005
 5 = 31.08.2005 6 = 13.09.2005 7 = 19.09.2005

Abb. 39: Zeitliche Darstellung der Wasserbilanz in mm (nach HAUDE) der Fläche „Wellenkamp“ und die jeweiligen Minimum-, Maximum- und Mittelwerte der elektrischen Kapazität (pF) für 7 Messtermine in 2005

Vergleich der Feldkarten „elektrische Kapazität“ und „Korngröße“

Vier ausgewählte Termine sind im Anhang beispielhaft für die räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität dargestellt (s. Anhang Abb. 34 - 37). Die Interpolation erfolgte mit der Methode „Kriging“. Werden die Minimum- und Maximumwerte aus Tab. 80 mit den Angaben der Legende der Abbildungen verglichen, zeigt sich eine Abweichung. Diese ergibt sich dadurch, dass das Auswerteraster nicht die komplette Fläche erfasst.

Die drei Messungen im März 2005 zeigen eine sehr hohe Ähnlichkeit der räumlichen Verteilung der elektrischen Kapazität untereinander. Die sandige nördliche Teilfläche weist höhere elektrische Kapazitäten auf als die tonreichere südliche Teilfläche, beispielhaft ist die Messung vom 17.03.2005 im Anhang dargestellt (s. Anhang Abb. 34). Es zeigen sich kleinräumige Variationen, wie bereits bei der elektrischen Leitfähigkeit beschrieben. Die südwestliche Ecke mit dem auskartierten Bodentyp „Ranker“ weist am 17.03.2005 im Vergleich zur näheren Umgebung höhere elektrische Kapazitäten auf (s. Anhang Abb. 34). Am 13.09.2005 dagegen sind für diesen Bereich niedrigere elektrische Kapazitäten feststellbar als die nähere Umgebung (s. Anhang Abb. 36).

Anhand der beiden Messungen im August 2005 kann kein Zusammenhang zwischen der räumlichen Verteilung der elektrischen Kapazität und der räumlichen Verteilung der Korngrößen erkannt werden, beispielhaft ist im Anhang die Messung vom 31.08.2005 dargestellt (s. Anhang Abb. 35). Für die beiden Messungen im September sind auf der sandigen nördlichen Teilfläche niedrigere elektrische Kapazitäten erkennbar als auf der tonreicheren südlichen Teilfläche (s. Anhang Abb. 36 und 37). Es zeigt sich eine grobe Ähnlichkeit zwischen der räumlichen Verteilung der elektrischen Kapazität und der Korngrößen für den 13.09.2005.

4.2.2.2. Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen elektrischer Kapazität und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt

Korrelationsanalyse

Für die drei Messtermine im Frühjahr sind die Korrelationskoeffizienten zwischen der elektrischen Kapazität (C_{ele}) und Sand im Oberboden positiv und mittel bis hoch; für Schluff, Ton und C_{org} im Oberboden sind diese negativ und mittel bis hoch. Werden die Messungen im August betrachtet, so zeigen sich sehr geringe bis geringe Zusammenhänge. Die Messungen im September weisen zwischen C_{ele} und Sand einen negativen und mittleren Korrelationskoeffizienten aus; für Schluff, Ton und C_{org} sind diese nun positiv und mittel. In der Tendenz ist der Zusammenhang für C_{ele} und Sand etwas stärker ausgeprägt als für die beiden kleineren Korngrößen und C_{org} . (s. Tab. 83) Ein schwacher Zusammenhang für C_{ele} und der Korngröße bzw. C_{org} ist nicht gleichbedeutend mit einem schwachen Zusammenhang zwischen EC25 und der Korngröße bzw. C_{org} .

Tab. 83: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Kapazität der Plattenanordnung und den Korngrößen sowie C_{org} , Fläche „Wellenkamp“

Messsystem	Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
BOs - 1EP	16.03.2005	0.68 **	-0.63 **	-0.61 **	-0.57 **
BOs - 1EP	17.03.2005	0.73 **	-0.66 **	-0.67 **	-0.63 **
BOs - 1EP	21.03.2005	0.75 **	-0.73 **	-0.67 **	-0.67 **
BOs - 1EP	19.08.2005	0.14	-0.17	-0.07	-0.03
BOs - 1EP	31.08.2005	0.13	-0.17	-0.03	0.09
BOs - 1EP	13.09.2005	-0.44 **	0.39 **	0.47 **	0.56 **
BOs - 1EP	19.09.2005	-0.52 **	0.49 **	0.47 **	0.43 **

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

Regressionsanalyse

Die Tabellen 84 - 87 zeigen für vier ausgewählte Messtermine die Angaben zur Regressionsanalyse zwischen C_{ele} und der Korngröße sowie C_{org} im Oberboden. Da die Zahlenreihen des Messwerts C_{ele} negative Werte aufweisen ist eine Logarithmierung nicht möglich. Die Zahlenreihen der Korngrößen und C_{org} sind bei Bedarf logarithmiert.

Für die drei Messtermine im Frühjahr zeigt sich zwischen C_{ele} und den Korngrößen das beste Bestimmtheitsmaß bei einem linearen Modell. Davon abweichend ist das Ergebnis für den 19.09.2005. Hier ergibt sich das beste Bestimmtheitsmaß zwischen C_{ele} und Sand bei einem logarithmischen bzw. für C_{ele} und Schluff sowie Ton bei einem potenziellen Modell. Das Bestimmtheitsmaß verbessert sich, wenn die Zahlenreihen der Korngröße Ton und C_{org} logarithmiert werden, dieses ist für die Zahlenreihen der Korngrößen Sand und Schluff nicht notwendig. Zwischen C_{ele} und C_{org} zeigt sich ein exponentielles bzw. Herbst ein potenzielles Regressionsmodell als zweckhaft.

Tab. 84: Regressionsmodelle für die Korngröße Sand und elektrische Kapazität (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

Messzeitpunkt	Korngröße Sand ($y = \text{Sandgehalt}, x = C_{ele}$)			
	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
16.03.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = 0.0141x + 59.6237$	0.28
17.03.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = 0.0237x + 66.166$	0.42
21.03.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = 0.0729x + 54.2333$	0.48
19.09.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-76.372)\ln(x) + 531.283$	0.23

Tab. 85: Regressionsmodelle für die Korngröße Schluff und elektrische Kapazität (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

Korngröße Schluff ($y = \text{Schluffgehalt}$, $x = C_{ele}$)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
16.03.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = (-0.0077)x + 24.987$	0.26
17.03.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = (-0.0125)x + 21.5303$	0.36
21.03.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = (-0.0402)x + 27.9540$	0.45
19.09.2005	keine Aufbereitung	Potenziell	$y = 0.006 x^{1.7080}$	0.22

Tab. 86: Regressionsmodelle für die Korngröße Ton und elektrische Kapazität (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

Korngröße Ton ($y = \text{Tongehalt}$, $x = C_{ele}$)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
16.03.2005	logarithmiert*	Linear	$y = (-0.0002)x + 1.1762$	0.27
17.03.2005	logarithmiert*	Linear	$y = (-0.0003)x + 1.0949$	0.42
21.03.2005	logarithmiert*	Linear	$y = (-0.0009)x + 1.2405$	0.44
19.09.2005	logarithmiert*	Potenziell	$y = 0.0104 x^{0.7658}$	0.21

* nur die Zahlenreihe Korngröße Ton ist logarithmiert

Tab. 87: Regressionsmodelle für die organische Kohlenstoffgehalt (C_{org}) und elektrische Kapazität (C_{ele}) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für verschiedene Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

Korngröße C_{org} ($y = C_{org}$, $x = C_{ele}$)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
16.03.2005	logarithmiert*	Exponentiell	$y = 0.1481 e^{(-0.0004) x}$	0.16
17.03.2005	logarithmiert*	Exponentiell	$y = 0.1230 e^{(-0.0007) x}$	0.23
21.03.2005	logarithmiert*	Exponentiell	$y = 0.1739 e^{(-0.0022) x}$	0.29
19.09.2005	logarithmiert*	Potenziell	$y = 0.000000034 x^{2.4726}$	0.16

* nur die Zahlenreihe C_{org} ist logarithmiert

Es zeigt sich keine Verbesserung der Schätzergebnisse, wenn die Korngrößen anhand der C_{ele} -Werte abgeschätzt werden, im Vergleich zu den Ergebnissen der Schätzung anhand der EC25-Werte. Auch eine multiplen Regressionsgleichung mit Einschluss von EC25 und C_{ele} -Werten verbessert die Schätzung nicht.

4.2.2.3. Analyse der Einflussstärke der Korngröße und organischen Kohlenstoffgehalt auf die Messgröße elektrische Leitfähigkeit und elektrische Kapazität

Die Auswertung der maßgeblichen Einflussvariablen auf die Messwerte EC25 und C_{ele} erfolgt anhand einer multiplen Regressionsanalyse. Als maßgebliche Einflussvariablen (S1, U1, T1, C_{1org}) für EC25 zeigt sich für die vier ausgewählten Messtermine drei Mal die Korngröße Sand. Nur für den Messtermin 21.03.2005 wird als weitere Variable C_{1org} mit eingeschlossen. Für den 31.08.2005 weist die Regressionsanalyse die Korngröße Ton aus (s. Tab. 88). Werden die Zahlenreihen (EC25 und Korngröße sowie C_{org}) logarithmiert zeigt sich zweimal die Korngröße Sand und Ton (s. Tab. 89). Die Bestimmtheitsmaße sind mittelstark ausgeprägt; wird eine weitere Einflussvariable hinzugefügt verbessert sich das Bestimmtheitsmaß nur geringfügig (s. Tab. 88 und 89). Es zeigen sich für C_{ele} nahezu dieselben maßgeblichen Einflussvariablen und ähnlich Bestimmtheitsmaße wie für EC25. Werden die Zahlenreihen direkt ausgewertet ist für drei Termine S1 die maßgebliche Einflussvariable und für den 21.03.2005 wird C_{1org} als weitere Einflussvariable mit einbezogen (s. Tab. 90). Für den 31.08.2005 konnte keine Regressionsanalyse für die direkte und logarithmierte Datenreihen erstellt werden (s. Tab. 90 und 91). Werden die Datenreihen der Korngrößen und C_{org} logarithmiert, zeigt sich für die beiden Frühjahrmessungen ebenfalls dieselben maßgeblichen Einflussvariablen wie für EC25 (vgl. Tab. 89 und 91). Abweichend ergibt sich für den 19.09.2005 $\log(U1)$ als maßgebliche Einflussvariable. (s. Tab. 91)

Tab. 88: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu EC25 für vier ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem BOs - 1EP

Modell	B^2	Korrigiertes B^2	Änderung B^2	Einflussvariablen
Messtermin: 17.03.2005				
1	0.410	0.405	0.410	S1
1	Regression: $EC25 = (-0.079) * S1 + 9.754$			
Messtermin: 21.03.2005				
1	0.472	0.468	0.472	S1
2	0.514	0.506	0.042	S1, C_{org1}
1	Regression: $EC25 = (-0.063) * S1 + 7.547$			
2	Regression: $EC25 = (-0.05) * S1 + 1.132 * C_{org1} + 5.121$			
Messtermin: 31.08.2005				
1	0.386	0.380	0.386	T1
1	Regression: $EC25 = (0.164) * S1 + 2.113$			
Messtermin: 19.09.2005				
1	0.375	0.369	0375	S1
1	Regression: $EC25 = (-0.053) * S1 + 7.677$			

Tab. 89: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu EC25 (Zahlenreihen logarithmiert) für vier ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem BOs - 1EP

Modell	B ²	Korrigiertes B ²	Änderung B ²	Einflussvariablen
Messtermin: 17.03.2005				
1	0.413	0.408	0.413	Log(T1)
2	0.436	0.426	0.023	Log(T1), Log(U1)
1	Regression: $\text{Log}(\text{EC25}) = 0.527 * \text{Log}(\text{T1}) + 0.079$			
2	Regression: $\text{Log}(\text{EC25}) = 0.371 * \text{Log}(\text{T1}) + 0.251 * \text{Log}(\text{U1}) - 0.088$			
Messtermin: 21.03.2005				
1	0.431	0.426	0.431	Log(S1)
2	0.495	0.486	0.064	Log(S1), Log(C_{org1})
1	Regression: $\text{Log}(\text{EC25}) = (-0.856) * \text{Log}(\text{S1}) + 2.088$			
2	Regression: $\text{Log}(\text{EC25}) = (-0.631) * \text{Log}(\text{S1}) + 0.523 * \text{Log}(\text{C}_{org1}) + 1.609$			
Messtermin: 31.08.2005				
1	0.372	0.366	0.372	Log(T1)
1	Regression: $\text{Log}(\text{EC25}) = (0.580) * \text{Log}(\text{T1}) - 0.025$			
Messtermin: 19.09.2005				
1	0.382	0.377	0.382	Log(S1)
1	Regression: $\text{Log}(\text{EC25}) = (-0.633) * \text{Log}(\text{S1}) + 1.773$			

Tab. 90: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} zu C_{ele} für vier ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem BOs - 1EP

Modell	B ²	Korrigiertes B ²	Änderung B ²	Einflussvariablen
Messtermin: 17.03.2005				
1	0.419	0.414	0.419	S1
1	Regression: $C_{ele} = 17.714 * S1 - 1336.273$			
Messtermin: 21.03.2005				
1	0.480	0.476	0.480	S1
2	0.501	0.492	0.021	S1, C_{org1}
1	Regression: $C_{ele} = 6.587 * S1 - 319.881$			
2	Regression: $C_{ele} = 5.613 * S1 + (-82.252) * C_{org1} - 143.684$			
Messtermin: 31.08.2005				
	Regressionsanalyse nicht möglich			
Messtermin: 19.09.2005				
1	0.221	0.214	0.221	S1
1	Regression: $C_{ele} = (-1.439) * S1 + 568.049$			

Tab. 91: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} (Zahlenreihen logarithmiert) zu C_{ele} für vier ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem BOs - 1EP

Modell	B^2	Korrigiertes B^2	Änderung B^2	Einflussvariablen
Messtermin: 17.03.2005				
1	0.41	0.411	0.416	Log(T1)
2	0.436	0.426	0.021	Log(T1), Log(U1)
1	Regression: $C_{ele} = (-1413.408) * \text{Log}(T1) + 1382.327$			
2	Regression: $C_{ele} = (-1015.265) * \text{Log}(T1) + (-644.985) * \text{Log}(U1) + 1811.485$			
Messtermin: 21.03.2005				
1	0.467	0.463	0.467	Log(S1)
2	0.498	0.489	0.031	Log(S1), Log(C_{org1})
1	Regression: $C_{ele} = 832.931 * \text{Log}(S1) - 1402.742$			
2	Regression: $C_{ele} = 687.505 * \text{Log}(S1) + (-687.505) * \text{Log}(C_{org1}) - 1092.754$			
Messtermin: 31.08.2005				
	Regressionsanalyse nicht möglich			
Messtermin: 19.09.2005				
1	0.214	0.207	0.214	Log(U1)
1	Regression: $C_{ele} = 143.862 * \text{Log}(U1) + 282.138$			

4.2.2.4. Elektrisches Rauschen für die Fläche „Wellenkamp“

Der Zusammenhang zwischen dem elektrischen Rauschen und den Korngrößen sowie C_{org} im Oberboden ist sehr gering bis gering. Der Korrelationskoeffizient zwischen elektrischem Rauschen und C_{org} sind in Tendenz höher ausgeprägt im Vergleich zu den Korngrößen. Vier Messtermine sind in Tab. 92 aufgeführt.

Tab. 92: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen dem elektrischen Rauschen und den Korngrößen sowie C_{org} , Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

Messsystem	Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C_{org}
BOs - 1EP	17.03.2005	-0.04	0.06	-0.10	0.24 **
BOs - 1EP	31.08.2005	0.06	-0.01	-0.19 *	0.12
BOs - 1EP	13.09.2005	-0.34 **	0.37 **	0.18	0.43 **
BOs - 1EP	19.09.2005	-0.07	0.12	-0.06	0.15

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

* Die Korrelation ist auf dem 0.05 Niveau signifikant (zweiseitig)

Werden die Messergebnisse des elektrischen Rauschens anhand der einzelnen Messtermine miteinander verglichen, zeigt sich überwiegend eine mittlere Korrelation. In Tab. 93 sind vier ausgewählte Messtermine aufgeführt.

Tab. 93: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für das elektrische Rauschen zwischen den jeweiligen Messterminen, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

Messtermin	17.03.05	31.08.05	13.09.05	19.09.05
17.03.2005	1			
31.08.2005	0.58 **	1		
13.09.05	0.66 **	0.67 **	1	
19.09.05	0.53 **	0.55 **	0.62 **	1

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

Bei einem Vergleich der Feldkarten mit den interpolierten Messwerten fällt auf, dass sich für jeden Messtermin in der nordöstlichen Ecke eine Teilfläche mit erhöhten Rauschwerten abzeichnet. Die Größe der Teilfläche variiert zwischen den einzelnen Messterminen, aber die Position ist fest. Innerhalb dieser Bereiche liegen Funde von Abbrandrest von Anthrazitkohle, Porzellanreste und Einzelfunde von Bauschutt vor. Im Anhang sind drei ausgewählte Messtermine dargestellt (s. Anhang Abb. 38 - 40). Es zeigen sich weitere Teilflächen mit einem erhöhten elektrischen Rauschwert, allerdings sind diese nicht für jeden Messtermin erkennbar. So ist in der nordwestlichen Ecke für den 17.03.2005 eine Teilfläche mit erhöhten Rauschwerten erkennbar (s. Anhang Abb. 38). Für den 31.08.2005 ist diese aber nur noch ansatzweise erkennbar (s. Anhang Abb. 39) und für den 19.09.2005 nicht mehr erkennbar (s. Anhang Abb. 40). Ebenso ist eine Teilfläche am 17.03.2005 und 31.08.2005 mit erhöhten Rauschwerten im Südosten der Fläche erkennbar (s. Anhang Abb. 38 - 39). Für den 19.09.2005 ist diese Teilfläche schwächer ausgeprägt (s. Anhang Abb. 40). Zwischen dem elektrischen Rauschen und EC25 zeigt sich kein Zusammenhang.

4.2.2.5. Bodentemperatur für die Fläche „Wellenkamp“

Der Zusammenhang zwischen Bodentemperatur und Korngröße sowie C_{org} im Oberboden ist sehr indifferent. Es zeigen sich für den Messtermin 19.09.2005 mittlere Korrelationen: zwischen Bodentemperatur und Sand ist diese positiv, für Schluff, Ton und C_{org} dagegen negativ. Für die anderen Messtermine zeigen sich sehr geringe bis geringe Korrelationskoeffizienten (s. Tab. 94). Die Messtermine untereinander verglichen weisen sehr geringe bzw. geringe Zusammenhänge auf.

Tab. 94: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen Bodentemperatur (Messtiefe ca. 5 - 8 cm) und Korngröße sowie C_{org} (Probeentnahmetiefe: 0 - 30 cm), Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

Messsystem	Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C _{org}
BOs - 1EP	16.03.2005	0.27 **	-0.25 **	-0.27 **	-0.34 **
BOs - 1EP	17.03.2005	-0.02	0.01	-0.03	-0.01
BOs - 1EP	21.03.2005	-0.02	0.01	-0.03	-0.01
BOs - 1EP	19.08.2005	-0.17	0.20	0.10	0.25
BOs - 1EP	31.08.2005	0.36 **	-0.28 **	-0.54 **	-0.13 **
BOs - 1EP	13.09.2005	-0.11	0.02	0.23	0.30
BOs - 1EP	19.09.2005	0.68 **	-0.66 **	-0.62 **	-0.42 **

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

4.2.3. Geoelektrische Messung mit dem Messsystem ARP03

4.2.3.1. Elektrische Leitfähigkeit (ARP03)

Zum Zeitpunkt der geoelektrischen Messung mit dem ARP03 im Herbst 2004 war die Fläche mit Senf als Zwischenfrucht bestellt. Der Senf hatte eine Wuchshöhe von 30 cm - 50 cm. Eine Beeinträchtigung der geoelektrischen Messung durch den Pflanzenbestand ist auszuschließen (DABAS 2004). Die Messwerte für die drei Tiefen (EC1 = 0 - 50 cm, EC2 = 0 - 100 cm, EC3 = 0 - 200 cm) sind nicht auf 25 °C normiert.

Tabelle 95 weist die beschreibenden statistischen Werte des Auswerterasters auf. Mit zunehmender Tiefe steigt der gemessene EC-Wert des ARP03 an. Die Variation ist für EC2 etwas höher als EC1 und EC3. Im Vergleich mit den EC25-Ergebnissen des BOs - 1EP sind die gemessenen EC-Werte des ARP03 deutlich höher und variieren stärker.

Tab. 95: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Leitfähigkeit für die Fläche „Wellenkamp“ innerhalb des Auswerterasters, Angaben in mS/m außer VK, (IQR:Median) in % und Messtiefe in cm, Messsystem ARP03

Attribut	EC1	EC2	EC3
Minimum	2.6030	2.7397	3.4508
Maximum	13.5221	19.9631	17.2225
Spannweite	10.9183	17.2233	13.7717
Mittelwert	5.6402	6.9436	7.4508
s	2.6170	3.9659	3.1000
VK	46.4	57.1	41.6
Median	4.5000	5.2841	6.4382
IQR	3.1871	4.7797	4.9903
(IQR:Median)	70.8	90.5	77.5
N	117	117	117
Normalvert.	nein	nein	nein
Messtiefe	0 - 50	0 - 100	0 - 200

s = Standardabweichung VK = Variationskoeffizient
 IQR = Interquartillbereich n = Anzahl der Beprobungsorte
 Normalvert. = Normalverteilung (nach Kolmogorov-Smirnov -Test mit Lilliefors-Modifikation)

Vergleich der Feldkarte „elektrische Leitfähigkeit“ und „Korngrößenverteilung“

Im Anhang (s. Anhang Abb. 41) ist die interpolierte räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC1) für die Messtiefe 0 - 50 cm dargestellt. Die räumliche Verteilung der Korngrößen wird durch die räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit mit einer guten Ähnlichkeit wiedergegeben. Auch hier weist die südliche Teilfläche mit niedrigen Sandgehalten bzw. hohen Tongehalten höhere elektrische Leitfähigkeit auf als die nördliche Teilfläche mit hohen Sandgehalten bzw. niedrigeren Tongehalten. Allerdings zeichnet sich die bereits erwähnte Teilfläche mit höheren Sandgehalten innerhalb der nördlichen Teilfläche nicht so deutlich ab wie auf der Feldkarte mit den Sandgehalten zu erkennen ist. (s. Anhang Abb. 25, 27 und 41)

4.2.3.2. Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen EC1 und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt

Korrelationsanalyse

Es zeigt sich ein mittlerer bis hoher Zusammenhang zwischen EC1 bzw. EC2 und den Korngrößen. Zwischen EC3 und den Korngrößen ist der Zusammenhang für die jeweilige Tiefe schwächer ausgeprägt. Für C_{org} und EC1 sowie EC2 zeigt sich ein mittlerer Zusammenhang für die Tiefe 0 - 30 cm; für die Tiefe 30 - 60 cm nimmt hier der Zusammenhang deutlich ab (s. Tab. 96).

Tab. 96: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen EC des Messsystems ARP03 und den Korngrößen sowie C_{org}, Messtermin: Herbst 2004, Fläche „Wellenkamp“

Messsystem	Bodenproben-entnahme	Sand	Schluff	Ton	C _{org}
ARP03 EC1	0 - 30 cm	-0.77 **	0.78 **	0.65 **	0.58 **
ARP03 EC2	0 - 30 cm	-0.72 **	0.73 **	0.63 **	0.54 **
ARP03 EC3	0 - 30 cm	-0.54 **	0.57	0.54 **	0.38 **
ARP03 EC1	30 - 60 cm	-0.71 **	0.65 **	0.68 **	0.23 *
ARP03 EC2	30 - 60 cm	-0.65 **	0.61 **	0.62 **	0.20 *
ARP03 EC3	30 - 60 cm	-0.47 **	0.44 **	0.48 **	0.12
ARP03 EC1	0 - 60 cm	-0.75 **	0.74 **	0.67 **	0.51 **
ARP03 EC2	0 - 60 cm	-0.68 **	0.68 **	0.61 **	0.46 **
ARP03 EC3	0 - 60 cm	-0.48 **	0.47 **	0.47 **	0.30 **

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse zwischen EC1 und den Korngrößen in der Tiefe 0 - 30 cm weisen ein hohes Bestimmtheitsmaß für die Regressionsmodelle auf; es ist im Vergleich zu den Ergebnissen der Regressionsanalyse des BOs - 1EP stärker ausgeprägt. Das Bestimmtheitsmaß zwischen EC1 und C_{org} ist für beide Messsysteme annähernd gleich gut. (s. Tab. 97)

Tab. 97: Regressionsmodelle zwischen EC1 und den Korngrößen sowie C_{org} und das Bestimmtheitsmaß (B²), Messtermin: Herbst 2004, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem ARP03

(y = Korngröße, x = EC)				
Korngröße / C _{org}	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B ²
Sand	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-16.649) \ln(x) + 86.8020$	0.77
Schluff	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = 9.1018 \ln(x) + 10.1290$	0.71
Ton	keine Aufbereitung	Linear	$y = 1.1898x + 8.7440$	0.72
C _{org}	logarithmiert	Potenziell	$y = 0.1927 x^{0.7050}$	0.32

4.2.3.3. Schätzung der Korngrößen anhand der EC1-Werte

Auch hier erfolgte die Schätzung der Korngrößen wie im Kap. 4.1.2.1.3 beschrieben. Die beiden Schätzmethode „Wertetabelle“ und „Feldkarte“ weisen ein sehr zutreffendes Schätzergebnis auf. Das beste Schätzmodell ist das der „Wertetabelle“, weil es die kleinere Standardabweichung zwischen dem geschätzten und dem wahren Sandwert aufweist.

Etwa zwei Drittel der geschätzten Sandwerte weisen eine Abweichung von ± 3 Prozentpunkten bzw. 88% eine Abweichung von ± 6 Prozentpunkten gegenüber

dem wahren Sandwert auf. Die Schluff- und Tongehalte sind in einem hohen Maß korrekt abgeschätzt; drei Viertel der geschätzten Schluff- und Tonwerte weisen eine Differenz von ± 3 Prozentpunkten auf. Werden ± 6 Prozentpunkten als Abweichung akzeptiert, so sind nahezu alle Schluff- und Tongehalte korrekt geschätzt. (s. Tab. 98)

Ebenfalls wird der Tongehalt auf der nördlichen und eher sandigen Teilfläche überschätzt, wohingegen dieser auf der südlichen und vergleichsmäßigen tonigen Teilfläche unterschätzt wird. Mit mehr als 6 Prozentpunkten werden dieselben Rasterzellen unterschätzt, wie bereits bei der Schätzung anhand der Messdaten des BOs - 1EP. Auch die südwestliche Ecke, welche als Ranker ausgewiesen ist, wird ebenfalls deutlich unterschätzt. (s. Abb. 40)

Tab. 98: Differenz zwischen wahren und geschätzten Korngrößen, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Schätzmethode „Wertetabelle“, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem ARP03

	Korngröße		
	Sand	Schluff	Ton
Differenz in Prozentpunkte	Anzahl der Nennung von Rasterzellen gesamt (n= 117)		
0	14	23	14
± 1	36	48	46
± 2	60	73	70
± 3	77	93	90
± 4	90	103	98
± 5	97	115	108
± 6	103	116	113
Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung (Prozentpunkte)	-1.6	1.3	-0.4
Standardabweichung (nach KÖSTER 1979)	2.9	1.9	2.2
Maximale Überschätzung (Prozentpunkte)	14	7	4
Maximale Unterschätzung (Prozentpunkte)	-10	-7	-9

Die Summe der geschätzten Korngrößen Sand, Schluff und Ton ergibt einen Mittelwert von 100; der niedrigste und höchste Summenwert beträgt 99 bzw. 101.

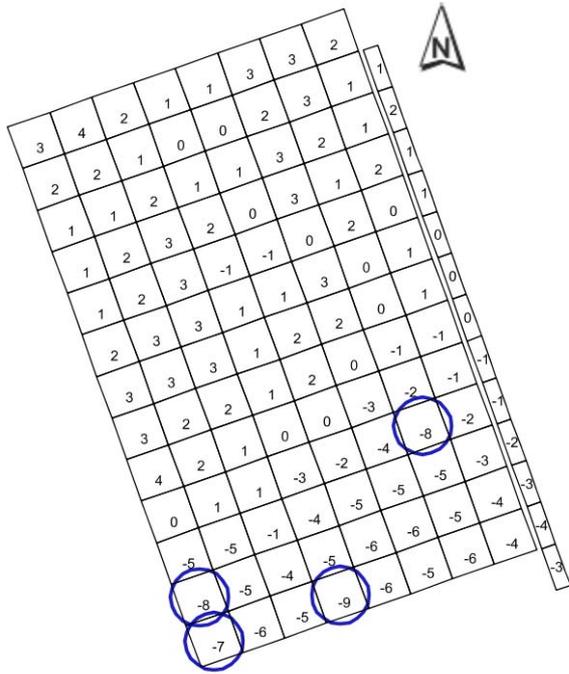


Abb. 40: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem ARP03, eine negative Zahl bezeichnet eine Unterschätzung des Tongehalts, eine positive Zahl bezeichnet eine Überschätzung, Kreise markieren Teilflächen mit einer Unterschätzung von mehr als 6 Prozentpunkten bzw. Bereiche, die ebenfalls vom BOs - 1EP kontinuierlich unterschätzt werden, Messtermin: Herbst 2004

4.2.3.4. Analyse der Einflussstärke der Korngrößen und organischen Kohlenstoffgehalt auf die Messgröße EC1

Das Ergebnis der multiplen Regressionsanalyse weist die Korngröße S1 als maßgebliche Einflussvariable aus. Als zweite Variable zeigt sich C1_{org}, allerdings verbessert sich das Bestimmtheitsmaß nur minimal. (s. Tab. 99)

Werden die Zahlenreihen logarithmiert, so wird nur log(S1) als maßgebliche Einflussvariable ausgewiesen.

Tab. 99: Analyse der Einflussstärke der Korngrößen und C_{org} zu EC1 auf der Fläche „Wellenkamp“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem ARP03

Modell	B ²	Korrigiertes B ²	Änderung B ²	Einflussvariablen
Messtermin: Herbst 2004				
1	0.758	0.758	0.758	S1
2	0.767	0.763	0.008	S1, C1 _{org}
1	Regression: EC1 = (-0.296) * S1 + 23.24			
2	Regression: EC1 = (-0.318) * S1 + (-1.862) * C _{org} + 27.228			

Vergleich der Feldkarte „EC1“ mit bodenkundlichen Karten

Anhand der Feldkarte mit den interpolierten EC1-Werten des ARP03 (s. Anhang Abb. 41) kann die südliche Teilfläche (aus grauem Tonstein entstanden), wie anhand der Bodenkarte (s. Abb. 19) zuerkennen ist, ansatzweise abgegrenzt werden. Dieser Bereich wird in der Bodenschätzung als Verwitterungsstandort mit einer deutlich

geringeren Boden-/Ackerzahl ausgegeben als der verbleibende nördliche Teil der Fläche (s. Abb. 18). Der nördliche Teil weist eine höhere Boden-/Ackerzahl auf, aber der EC1-Wert ist hier geringer als auf der südlichen Teilfläche (s. Anhang Abb.41). Eine weitere Unterteilung der nördlichen Teilfläche anhand der EC1-Werte wie in der geologischen Karte (s. Abb. 17) oder der Bodentypkarte (s. Abb. 19), ist nicht erkennbar. Am äußersten nördlichen Feldrand sind wiederum erhöhte EC1-Werte erkennbar (s. Anhang Abb. 41). Für diesen Bereich weist die Bodentypkarte einen „Gley“ aus (s. Abb. 19).

4.2.4. Geoelektrische Messung mit dem Messsystem EM38

4.2.4.1. Beschreibende Statistik der Messwerte (EM38)

Fünf ausgewählte Messtermine sind in Tab. 100 aufgeführt. Die Messung im Frühjahr 2005 erfolgte zu Fuß; für diesen Messtermin liegen nur Messergebnisse im vertikalen Messmodus vor. Die beiden anderen Messungen in 2005 erfolgten mit dem Schlepper, das EM38 war an einen gezogenen Holzschlitten montiert. Die beiden Messungen in 2006 fanden wiederum zu Fuß statt. Am 23.03.2006 war der Boden in der Tiefe nicht komplett aufgetaut.

Tab. 100: Messzeitpunkte mit dem EM38 auf der Fläche „Wellenkamp“

Messsystem	Messzeitpunkt	Bemerkung
EM38	17.03.2005	flach gegrubberter Boden, nur vertikaler Messmodus
EM38	31.08.2005	flach gegrubberter Boden
EM38	19.09.2005	gepflügten und saarfertigen Boden
EM38	23.03.2006	Kultur: Wintergerste, teilweise noch gefrorener Boden
EM38	03.05.2006	Kultur: Wintergerste, Bestandshöhe ca. 20 cm

In Tabelle 101 sind beschreibende statistische Werte angegeben. Eine Normierung der elektrischen Leitfähigkeit auf 25°C anhand der Bodentemperatur erfolgte nicht.

Am 23.03.2006 fallen bei den Messergebnissen die negativen Messwerte und die sich daraus ergebenden negativen Mittel-/Medianwerte im horizontalen Modus ($EC_{(hor)}$) auf. Vermutlich ist dieses durch den nicht vollständig aufgetauten Boden bedingt. Im Vergleich dazu ist der Mittelwert für die Messung im vertikalen Modus ($EC_{(ver)}$) deutlich höher und ähnlich hoch wie zu den anderen drei Messterminen.

Werden die Mittel-/Medianwerte der Termine unter Berücksichtigung des Messmodus untereinander verglichen (mit Ausnahme der Messung am 23.03.2006 im horizontalen Modus), so fällt ebenfalls wieder auf, dass diese nicht sehr stark schwanken.

Die Messergebnisse des EM38 weisen im Vergleich mit den Messergebnissen vom Bodensensorsystem FHOS und dem ARP03 in der Tendenz eine geringe Streuung auf (vgl. Tab. 67, 95 und 101).

Tab. 101: Beschreibende statistische Werte für die elektrische Leitfähigkeit (EM38) für die Fläche „Wellenkamp“, Angaben in mS/m außer VK und (IQR:Median) in % sowie BodTemp in °C, Messsystem EM38

Attribut	17.03.05	31.08.05	31.08.05	19.09.05	19.09.05	23.03.06	23.03.06	03.05.06	03.05.06
Messmodus	ver	hor	ver	hor	ver	hor	ver	hor	ver
Minimum	8.3076	6.3342	7.0478	8.3653	8.8499	-1.6575	10.9330	5.4839	9.7430
Maximum	16.7648	12.2150	17.1371	14.0720	15.5441	2.5787	16.8001	12.1510	18.2814
Spannweite	8.4572	5.8808	10.0893	5.7068	6.6942	4.2361	5.8671	6.6671	8.5385
Mittelwert	11.7168	8.1184	9.5799	10.5729	11.5390	-0.0614	13.1020	7.3452	12.3869
s	1.5892	1.0104	1.5542	0.9999	1.4983	0.9234	1.3329	1.1611	1.4863
VK	13.6	12.4	16.2	9.5	13.0	--	10.2	15.8	12.0
Median	11.6889	7.9900	9.2914	10.5697	11.2772	-0.1238	12.8230	7.2399	12.2417
IQR	1.9872	1.1854	1.5900	1.4985	1.9768	1.2575	1.9738	1.2413	1.9654
(IQR:Median)	17.0	14.8	17.1	14.2	17.5	--	15.4	17.1	16.1
n	117	117	117	117	117	117	117	117	117
BodTemp in 20 cm Tiefe	k.A.	19.9	19.9	12.5	12.5	k.A.	k.A.	13.3	13.3
Normalvert.	ja	nein	nein	ja	nein	ja	nein	nein	ja

s = Standardabweichung VK = Variationskoeffizient IQR = Interquartillbereich
n = Anzahl der Beprobungsorte BodTemp = Bodentemperatur in 10 cm Bodentiefe
k.A. = keine Angabe Normalvert. = Normalverteilung (nach Kolmogorov-Smirnov Test mit Lilliefors-Modifikation)
hor = horizontaler Messmodus ver = vertikaler Messmodus

Es sind geringe bis mittlere Korrelationskoeffizienten zwischen den einzelnen Messterminen für den horizontalen Modus erkennbar. Für den vertikalen Modus zeigen sich zwischen den einzelnen Messterminen mittlere bis hohe Korrelationskoeffizienten. Zwischen den beiden Messmodi am selben Tag kann überwiegend ein mittlerer bis hoher Zusammenhang festgestellt werden. (s. Tab. 102)

Tab. 102: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für die elektrische Leitfähigkeit im vertikalen und horizontalen Modus (EM38) zwischen den jeweiligen Messterminen, Fläche „Wellenkamp“

Messtermin	17.03.05	31.08.05	19.09.05	23.03.06	03.05.06	17.03.05	31.08.05	19.09.05	23.03.06	03.05.06
	Horizontaler Messmodus					Vertikaler Messmodus				
17.03.05	k.Md.									
31.08.05	k.Md.	1								
19.09.05	k.Md.	0.64**	1							
23.03.06	k.Md.	0.63**	0.25**	1						
03.05.06	k.Md.	0.63**	0.35**	0.67**	1					
17.03.05	k.Md.					1				
31.08.05	0.46**	0.79**				0.61**	1			
19.09.05	0.49**	0.74**	0.86**			0.49**	0.87**	1		
23.03.06	0.33**	0.63**	0.77**	0.30**		0.35**	0.75**	0.87**	1	
03.05.06	0.69**	0.74**	0.60**	0.60**	0.66**	0.58**	0.77**	0.66**	0.61**	1

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig) k.Md. = keine Messdaten vorhanden

Vergleich der Feldkarten „elektrische Leitfähigkeit“ und „Korngröße“

Werden die Feldkarten „elektrische Leitfähigkeit“ und „Korngröße“ miteinander verglichen (vgl. im Anhang Abb. 25 - 27 mit 42 - 47) zeigt sich eine schwache Ähnlichkeit zwischen den jeweiligen Abbildungen. In beiden Messmodi wird die südliche Teilfläche mit höheren Tongehalten nur im Ansatz durch höhere elektrische Leitwerte abgebildet. Die nördliche Teilfläche mit geringeren Tongehalten wird anhand der elektrischen Leitfähigkeit nicht dargestellt. Es zeigt sich aber in der Mitte der nördlichen Flächenhälfte in beiden Messmodi eine Teilfläche mit höheren elektrischen Leitwerten. Die räumliche Größe dieser Teilfläche variiert von Messtermin zu Messtermin aber die räumliche Lage kann als konstant beschrieben werden. Weiter fällt auf, dass sich in der östlichen Hälfte der südlichen Teilfläche, ein Flächenstück mit niedrigen elektrischen Leitwerten abzeichnet. Die Größe dieses Bereichs variiert je nach Messmodus und Termin, aber die räumliche Lage kann auch hier als konstant bezeichnet werden. Die „feste“ räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts, insbesondere im vertikalen Messmodus, zeigt sich ebenfalls anhand der Feldkarten.

4.2.4.2. Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen EM38 und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt

Korrelationsanalyse

Die Spearmanschen Korrelationskoeffizienten zwischen EC und den Korngrößen sowie C_{org} aus den drei Tiefen sind in Tab. 103 dargestellt. Unterteilt ist die Tabelle nach Messtermin, Messmodus und Probenentnahmetiefen.

Der Zusammenhang zwischen EC und den Korngrößen ist in beiden Messmodi nicht eindeutig. Dieser kann von sehr gering bis gering beschrieben werden und weist sowohl einen positiven, als auch einen negativen Zusammenhang für dieselbe Korngröße bzw. C_{org} auf.

Regressionsanalyse

Angaben zur Aufbereitung der Messdaten und zur Regressionsanalyse sind in Tab. 104 - 107 angegeben. Die Regressionsanalyse für den vertikalen Messmodus ergeben Bestimmtheitsmaße von kleiner als 0.10. Diese Ergebnisse sind nicht aufgeführt. Die Bestimmtheitsmaße für den horizontalen Messmodus weisen auf schwache Zusammenhänge zwischen $EC_{(hor)}$ und Korngröße sowie C_{org} hin. Für den 23.03.2006 ergeben sich für die Korngrößen und C_{org} im Vergleich zu den anderen drei Messterminen höhere Zusammenhänge. Im Vergleich zu den Bestimmtheitsmaßen der Regressionsanalysen des BOs - 1EP und des ARP03 sind die Bestimmtheitsmaße des EM38 schwächer ausgeprägt.

Tab. 103: Spearman'sche Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit ($EC_{(hor)}$ und $EC_{(ver)}$) und den Korngrößen sowie C_{org} , Bodenprobeentnahmetiefen: 0 - 30 cm, 30 - 60 cm und der Mittelwert aus 0 - 60 cm, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38

Messtermin	17.03.05	31.08.05	31.08.05	19.09.05	19.09.05	23.03.06	23.03.06	03.05.06	03.05.06
Korngröße / C_{org}	$EC_{(ver)}$	$EC_{(hor)}$	$EC_{(ver)}$	$EC_{(hor)}$	$EC_{(ver)}$	$EC_{(hor)}$	$EC_{(ver)}$	$EC_{(hor)}$	$EC_{(ver)}$
S1	0.10	-0.07	0.20 **	0.42 **	0.39 **	-0.49 **	0.41 **	-0.30 **	-0.02
U1	-0.05	0.10	-0.15	-0.34 **	-0.32 **	0.49 **	-0.32 **	0.35 **	0.08
T1	-0.07	0.22 *	-0.06	-0.32 **	-0.25 **	0.57 **	-0.30 **	0.32 **	0.10
$C1_{org}$	-0.35 **	-0.16	-0.40 **	-0.49 **	-0.53 **	0.32 **	-0.40 **	0.01	-0.23 *
S2	-0.14	-0.12	0.14	0.35 **	0.33 **	-0.47 **	0.33 **	-0.45 **	-0.11
U2	0.20 *	0.14	-0.08	-0.25 **	-0.26 **	0.45 **	-0.25 **	0.46 **	0.14
T2	0.04	0.13	-0.13	-0.39 **	-0.31 **	0.43 **	0.34 **	0.36 **	0.13
$C2_{org}$	0.03	-0.03	-0.11	-0.14	-0.12	-0.02	0.05	0.04	0.03
S12	-0.03	-0.05	0.23 **	0.44 **	0.41 **	-0.44 **	0.42 **	-0.36 **	-0.03
U12	0.07	0.06	-0.19	-0.36 **	-0.37 **	0.44 **	-0.36 **	0.39 **	0.07
T12	-0.04	0.11	-0.16	-0.43 *	-0.34 **	0.45 **	-0.38 **	0.31	0.07
$C12_{org}$	-0.18	-0.10	-0.32 **	-0.36 **	-0.39 **	0.16	-0.26 **	0.04	-0.09

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

* Die Korrelation ist auf dem 0.05 Niveau signifikant (zweiseitig)

Tab. 104: Regressionsmodelle für die Korngröße Sand (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen ($EC_{(hor)}$) sowie Bestimmtheitsmaß (B^2) für ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38

Korngröße Sand (y = Sandgehalt, x = EC)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
31.08.2005	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-2.7772)\ln(x) + 19.4398$	0.15
19.09.2005	logarithmiert	Expotenziell	$y = 0.7727 e^{0.1680 x}$	0.09
23.03.2006	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-4.5492)\ln(x) + 18.4835$	0.46
03.05.2006	keine Aufbereitung	Logarithmisch	$y = (-4.2879)\ln(x) + 24.8250$	0.26

Tab. 105: Regressionsmodelle für die Korngröße Schluff (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen Modus ($EC_{(hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38

Korngröße Schluff ($y = \text{Schluffgehalt}$, $x = EC$)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
31.08.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = 0.0601 x + 6.6110$	0.07
19.09.2005	logarithmiert	Linear	$y = (-0.1690) x + 1.2760$	0.13
23.03.2006	keine Aufbereitung	Linear	$y = 0.1242 x - 3.1759$	0.35
03.05.2006	keine Aufbereitung	Linear	$y = 0.1186 x + 4.3714$	0.20

Tab. 106: Regressionsmodelle für die Korngröße Ton (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen Modus ($EC_{(hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38

Korngröße Ton ($y = \text{Tongehalt}$, $x = EC$)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
31.08.2005	keine Aufbereitung	Linear	$y = 0.1201 x + 6.2621$	0.19
19.09.2005	logarithmiert	Potenziell	$y = 1.0659 x^{(-0.1449)}$	0.10
23.03.2006	logarithmiert	Linear	$y = 3.6553 x - 4.8425$	0.53
03.05.2006	keine Aufbereitung	Linear	$y = 0.1601 x + 4.8706$	0.26

Tab. 107: Regressionsmodelle für die Korngröße C_{org} (Tiefe 0 - 30 cm) und elektrische Leitfähigkeit EM38 im horizontalen Modus ($EC_{(hor)}$) sowie das Bestimmtheitsmaß (B^2) für ausgewählte Messtermine, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38

Organischer Kohlenstoffgehalt ($y = C1_{org}$, $x = EC$)				
Messzeitpunkt	Messwerte	Regressionsmodell	Regression	B^2
31.08.2005	logarithmiert	Linear	$y = (-0.1787) x + 0.9715$	0.04
19.09.2005	logarithmiert	Expotenziell	$y = 1.1146^{(-0.4456x)}$	0.34
23.03.2006	keine Aufbereitung	Linear	$y = 1.7845 x - 2.6275$	0.09
03.05.2006	Bestimmtheitsmaß (B^2) < 0.05			

4.2.4.3. Schätzen der Korngrößen anhand der $EC_{(hor)}$ -Werte

Das Abschätzen der Korngrößenverteilung erfolgt anhand der $EC_{(hor)}$ -Werte nach der in Kap. 4.1.2.1.3 beschriebenen Vorgehensweise. Die Differenzen zwischen dem wahren und dem geschätzten Korngrößenwert sowie weitere statistische Kenngrößen sind für die beiden Messtermine 31.08.2005 und 23.03.2006 in Tab. 108 angegeben. Als beste Schätzmethode erwies sich die Methode „Feldkarte“ und als alternative Methode die der „Wertetabelle“.

Ungefähr die Hälfte der Rasterzellen weisen für den geschätzten Sandwert eine Abweichung von ± 5 Prozentpunkten auf und 58 - 63% eine Abweichung von ± 6 Prozentpunkten gegenüber den wahren Sandwerten auf. Wird für den Schluffgehalt eine Abweichung von ± 3 Prozentpunkten akzeptiert, sind ca. zwei Drittel (65 - 68%) der Rasterzellen treffend geschätzt; bei einer Abweichung von ± 6 Prozentpunkten sind es ca. 85 - 90% der Rasterzellen. 66 - 83% der Rasterzellen für den Tongehalt sind mit einer Toleranz von ± 3 Prozentpunkten bzw. ca. 97 - 100% mit einer Abweichung von ± 3 Prozentpunkten treffend geschätzt.

Die Summe der geschätzten Korngrößen Sand, Schluff und Ton ergibt einen Mittelwert von 100; der niedrigste Summenwert beträgt 98 und der höchste 101.

Tab. 108: Differenz zwischen wahren und geschätzten Korngrößen, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung, Schätzmethode „Feldkarte“, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38

Korngröße	Messtermin					
	31.08.2005			23.03.2006		
Differenz in Prozentpunkte	S1	U1	T1	S1	U1	T1
	Anzahl der Nennung von Rasterzellen gesamt (n= 117)					
0	11	9	7	12	12	18
± 1	23	29	28	28	37	50
± 2	25	54	54	41	59	75
± 3	33	75	77	51	79	97
± 4	45	89	101	63	94	108
± 5	58	93	110	74	100	113
± 6	68	100	113	82	105	117
Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung (Prozentpunkte)	0	0	0	1	1	0
Standardabweichung (nach KÖSTER 1979)	5.2	3.1	2.4	4.2	2.7	1.9
Maximale Überschätzung (Prozentpunkte)	19	10	5	13	10	5
Maximale Unterschätzung (Prozentpunkte)	-15	-11	-9	-14	-8	-6

Innerhalb der nördlichen Teilfläche wird der Tongehalt, wie bei den beiden anderen Messsystemen, überschätzt. Die Rasterzellen innerhalb der südlichen Teilfläche mit verhältnismäßig hohen Tongehalten werden unterschätzt (s. Abb. 41 und 42). In Abbildung 41 ist die Differenz des geschätzten und des wahren Tongehalts in den einzelnen Rasterzellen vom 31.08.2005 abgebildet. Mit einem durchgängigen Kreis

sind die Rasterzellen markiert, die ebenfalls bei der Schätzung mit den Messergebnissen des BOs - 1EP und ARP03 eine Abweichung von mehr als 6 Prozentpunkten ausweisen. Die gestrichelten Kreise markieren Rasterzellen, welche ebenfalls eine Abweichung von mehr als 6 Prozentpunkten ausweisen, aber nicht bei jeder Schätzung.

Für die Schätzung vom 23.03.2006 beträgt die maximale Überschätzung 5 Prozentpunkt und die maximale Unterschätzung -6 Prozentpunkte, somit sind keine Rasterzellen markiert (s. Abb. 42).

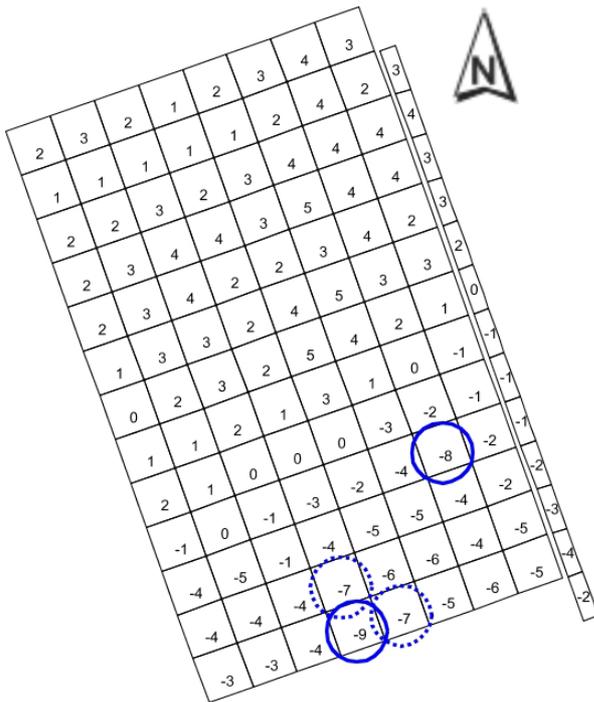


Abb. 41: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38 (horizontaler Messmodus), eine negative Zahl bezeichnet eine Unterschätzung des Tongehalts, eine positive Zahl bezeichnet eine Überschätzung, Kreise markieren Teilflächen mit einer Unterschätzung von mehr als 6 Prozentpunkten bzw. Bereiche, die ebenfalls vom BOs - 1EP kontinuierlich unterschätzt werden, Messtermin: 31.08.2005

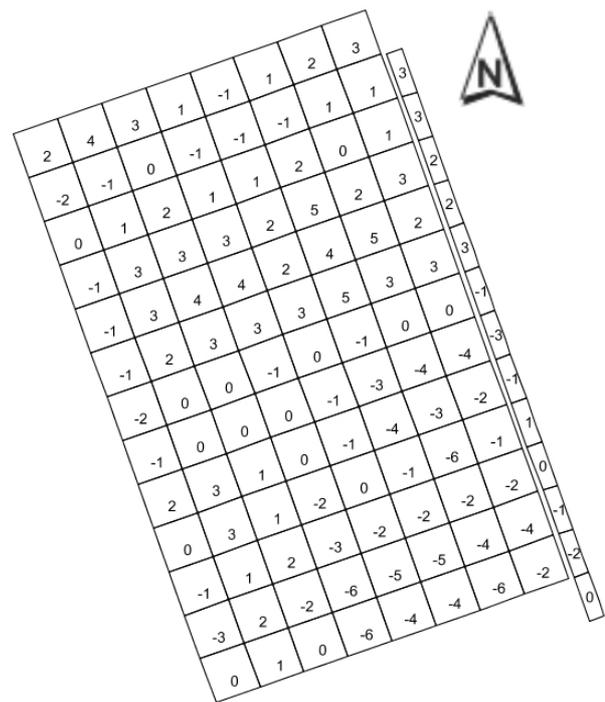


Abb. 42: Räumliche Verteilung der Differenz zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem EM38 (horizontaler Messmodus), eine negative Zahl bezeichnet eine Unterschätzung des Tongehalts, eine positive Zahl bezeichnet eine Überschätzung, Kreise markieren Teilflächen mit einer Unterschätzung von mehr als 6 Prozentpunkten bzw. Bereiche, die ebenfalls vom BOs - 1EP kontinuierlich unterschätzt werden, Messtermin: 23.03.2006

Vergleich der Feldkarten „EC_(hor)“ mit bodenkundlichen Karten

Anhand der EC-Werte des EM38, abhängig vom Messtermin oder vom Messmodus, kann die südliche Teilfläche ansatzweise bis gut abgegrenzt werden, welche in Abb. 17 als „aus grauem Tonstein entstanden“ beschrieben ist. Der südliche Teil wird nach der geologischen Karte (s. Abb. 17) weiter differenziert. Diese Differenzierung kann anhand der EC-Werte des EM38 so nicht erkannt werden. Ebenso kann auch eine Unterscheidung innerhalb der Fläche, wie diese in den Karten der Boden-

schätzung (s. Abb. 18) und der Bodentypen (s. Abb. 19) vorliegt, nur sehr bedingt erkannt werden.

Der Bereich innerhalb der südlichen Teilfläche mit höheren EC-Werten kann anhand des Kartenmaterials nicht erklärt werden.

4.2.4.4. Analyse der Einflussstärke der Korngrößen und organischen Kohlenstoffgehalt auf die Messgröße $EC_{(hor)}$

Als maßgebliche Einflussvariable zeigt sich im horizontalen Messmodus der Tongehalt für die beiden ausgewählten Messtermine. Am 31.08.2005 verbessert sich das Bestimmtheitsmaß deutlich, wenn $C1_{org}$ hinzugefügt wird. Für den 23.03.2006 wird nur T1 als maßgebliche Einflussvariable ausgewiesen (s. Tab. 109). Werden die Zahlenreihen logarithmiert verändern sich die maßgeblichen Einflussvariablen nicht.

Tab. 109: Analyse der Einflussstärke der Korngrößen und C_{org} zu $EC_{(hor)}$ für zwei ausgewählte Messtermine auf der Fläche „Wellenkamp“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte, Messsystem EM38

Modell	B^2	Korrigiertes B^2	Änderung B^2	Einflussvariablen
Messtermin: 31.08.2005				
1	0.190	0.183	0.190	T1
2	0.333	0.321	0.143	T1, $C1_{org}$
1	Regression: $EC_{(hor)} = (0.12) * T1 + 6.262$			
2	Regression: $EC_{(hor)} = (0.188) * T1 + (-2.9) * C1_{org} + 9.381$			
Messtermin: 23.03.2006				
1	0.494	0.490	0.494	T1
1	Regression: $EC_{(hor)} = 0.177 * T1 - 2.798$			

4.2.4.5. Suszeptibilität

Der Zusammenhang zwischen der Suszeptibilität und der Korngröße sowie C_{org} im Oberboden ist unterschiedlich stark ausgeprägt. Für den Messtermin 19.09.2005 ist der Korrelationskoeffizient deutlich höher als bei den zwei anderen Terminen. Für alle Termine zeigt sich ein positiver Zusammenhang zwischen der Suszeptibilität und der Korngröße Sand; für die Korngrößen Schluff und Ton sowie C_{org} ist dieser negativ. (s. Tab. 109)

Tab. 110: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen der Suszeptibilität und den Korngrößen sowie C_{org}

Messsystem	Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C _{org}
EM38, vertikaler Messmodus	31.08.2005	0.22 *	-0.21 *	-0.15 *	-0.02
EM38, vertikaler Messmodus	19.09.2005	0.61 **	-0.58	-0.51 **	-0.43 **
EM38, vertikaler Messmodus	08.05.2006	0.35 **	-0.34 **	-0.31 **	-0.30 **

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

* Die Korrelation ist auf dem 0.05 Niveau signifikant (zweiseitig)

Die Reproduzierbarkeit der drei Messtermine ist gering. Tabelle 111 weist die Spearmanschen Korrelationskoeffizienten der Messtermine untereinander auf. Bei einem Vergleich der Feldkarten im Anhang (s. Anhang Abb. 48 - 50) zeigt sich, dass insbesondere in der nordöstlichen Ecke der Fläche für jeden der drei Messtermine eine erhöhte Suszeptibilität feststellbar ist. Zwischen den Messterminen variiert zwar die Größe aber die räumliche Lage dieser Teilfläche kann als konstant beschrieben werden.

Tab. 111: Spearmansche Korrelationskoeffizienten für die Suszeptibilität zwischen den jeweiligen Messterminen

Messtermin	31.08.05	19.09.05	23.03.06
31.08.05	1		
19.09.05	0.30 **	1	
23.03.06	0.36 **	0.25 **	1

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

4.2.5. Vergleich von Ertragsergebnissen mit Korngröße und organischem Kohlenstoffgehalt sowie elektrischer Leitfähigkeit des Bodens

4.2.5.1. Statistische Kenngrößen der Ertragsdaten

Es liegen Ertragsdaten aus sechs Jahren vor (s. Tab. 112). Die Mittel- bzw. Medianwerte schwanken fruchtartbedingt zwischen den Jahren. Im Vergleich mit der Tab. 4 ergeben sich Abweichungen für den Ertragsmittelwert. Dieses ist dadurch bedingt, dass für die Tab. 112, nur das Auswerteraster (s. Abb. 22) berücksichtigt ist. Der Variationskoeffizient bzw. das Verhältnis (IQR:Median) weisen für 2002 eine geringere Streuung der Ernteergebnisse als in den anderen Jahren auf. (s. Tab. 112)

Tab. 112: Beschreibende statistische Werte für den Ertrag für die Fläche „Wellenkamp“ in verschiedenen Erntejahren, Angaben in t/ha außer VK und (IQR:Median) in %

Attribut	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Frucht	Winterweizen	Winterhafer	Winterweizen	Triticale	Hafer	Wintergerste
Minimum	4.72	3.37	3.74	4.99	2.53	3.53
Maximum	9.71	5.67	8.02	9.70	5.56	7.46
Spannweite	4.99	2.29	4.29	4.71	3.03	3.93
Mittelwert	7.70	4.84	6.17	7.65	4.50	5.98
s	1.13	0.46	1.03	1.06	0.69	0.87
VK	14.7	9.5	16.7	13.9	15.3	14.5
Median	7.45	4.86	6.30	7.83	4.66	6.02
IQR	2.01	0.61	1.83	1.54	0.96	1.09
(IQR:Median)	27.0	12.6	29.0	19.7	20.6	18.1
n	117	117	117	117	117	117
Normalvert.	nein	ja	ja	nein	nein	ja

s = Standardabweichung VK = Variationskoeffizient IQR = Interquartillbereich
n = Anzahl der Beprobungsorte
Normalvert.= Normalverteilung (nach Kolmogorov-Smirnov Test mit Lilliefors-Modifikation)

4.2.5.2. Vergleich der Feldkarten „Ertrag“ und „Korngrößen“ sowie sonstige Bodenkarten

Die räumliche Verteilung der Erträge auf der Fläche „Wellenkamp“ weist eine zeitliche Variation auf, z.B. korrelieren die Erträge zwischen den beiden Jahr 2001 und 2006 nur schwach mit 0.21 und zwischen den Jahren 2002 und 2005 hoch mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.76 (s. Tab. 113). Bei einem Vergleich der interpolierten Ertragskarten im Anhang (s. Anhang Abb. 51 - 56) sind Bereiche erkennbar, welche differenzierte Ertragniveaus aufweisen. So ist z.B. ein durchschnittlicher bis unterdurchschnittlicher Ertrag in der südlichen Feldhälfte erkennbar. Dieser Bereich weist zwar die höchsten Tongehalte für diese Fläche auf (s. Anhang Abb. 27), aber die Bodenschätzung (s. Abb. 18) weist für diesen Bereich einen Verwitterungsstandort mit dem Klassenzeichen SL 4 Vg 34/35 auf. Das Entstehungsmerkmal „Vg“ gibt einen Hinweis auf einem eingeschränkten Wurzelraum (s. Kap. 2.2).

Tab. 113: Spearmansche Korrelationskoeffizienten der Erntejahre untereinander

Erntejahr	2001	2002	2003	2004	2005	2006
2001	1					
2002	0.44 **	1				
2003	0.40 **	0.29 **	1			
2004	0.45 **	0.74 **	0.55 **	1		
2005	0.37 **	0.76 **	0.37 **	0.64 **	1	
2006	0.40 *	0.62 **	0.59 **	0.71 **	0.47 **	1

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

Die Ertragskarten zeigen ein höheres Niveau für die sandige nördliche Teilfläche mit einem Klassenzeichen SL 3 D 52/53 im Vergleich zur südlichen Teilfläche. Für diesen Bereich ist aber anhand des Kartenmaterials keine gravierende Beeinträchtigung des durchwurzelbaren Bodenraums ersichtlich.

Für 2003 sind die höchsten Erträge an der nördlichen Feldgrenze erkennbar; für die anderen fünf Jahre sind die Erträge für diesen Bereich durchschnittlich bis unterdurchschnittlich. Dieser Bereich wird in der Bodenkarte (s. Abb. 19) als Gley ausgewiesen. Da 2003 ein sehr trockenes Jahr war, wird vermutet, dass auf dem Gley zwar kein Wassermangel auftrat, aber aufgrund der Trockenheit die Grundwasserlinie sank und somit der Wurzelraum größer war als in anderen Jahren; folglich war ein überdurchschnittlicher Ertrag möglich.

4.2.5.3. Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zwischen Ertrag und Korngrößen sowie der elektrischen Leitfähigkeit

Für 2001 zeigen sich sehr geringe Korrelationskoeffizienten zwischen dem Ertrag und der Korngröße sowie C_{org} . Für die Jahre 2002 bis 2006 weist der Ertrag und die Korngröße Sand einen überwiegend mittleren und positiven Zusammenhang auf. Der Ertrag und die Korngrößen Schluff weisen einen überwiegend mittleren und negativen Zusammenhang auf; zwischen dem Ertrag und Korngröße Ton sowie C_{org} besteht ein geringer bis mittlerer und negativer Zusammenhang. Zwischen den beiden Tiefen nimmt der Zusammenhang zwischen dem Ertrag und den Korngrößen generell geringfügig und zwischen dem Ertrag und C_{org} deutlich ab. (s. Tab. 114)

Tab. 114: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen Ertrag der einzelnen Jahre und Korngröße sowie C_{org} , Bodenprobeentnahmetiefen: 0 - 30 cm, und 30 - 60 cm und der Mittelwert aus 0 - 60 cm

Erntejahr	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Korngröße / C_{org}						
S1	0.04	0.49 **	0.57 **	0.61 **	0.44 **	0.47 **
U1	-0.04	-0.53 **	-0.53 **	-0.60 **	-0.49 **	-0.47 **
T1	-0.06	-0.29 **	-0.62 **	-0.55 **	-0.30 **	-0.41 **
$C1_{org}$	-0.10	-0.41 **	-0.37 **	-0.49 **	-0.30 **	-0.41 **
S2	-0.11	0.46 **	0.26 **	0.49 **	0.41 **	0.33 **
U2	0.08	-0.46 **	-0.21 *	-0.48 **	-0.41 **	-0.33 **
T2	0.13	-0.36 **	-0.38 **	-0.42 **	-0.38 **	-0.27 **
$C2_{org}$	0.03	-0.33 **	0.07	-0.22 *	-0.16	-0.10
S12	-0.10	0.47 **	0.34 **	0.52 **	0.40 **	0.37 **
U12	0.08	-0.53 **	-0.31 **	-0.54 **	-0.44 **	-0.41 **
T12	0.09	-0.33 **	-0.45 **	-0.46 **	-0.32 **	-0.32 **
$C12_{org}$	-0.03	-0.46 **	-0.15	-0.43 **	-0.27 **	-0.31 *

** Die Korrelation ist auf dem 0.01 Niveau signifikant (zweiseitig)

* Die Korrelation ist auf dem 0.05 Niveau signifikant (zweiseitig)

Die Regressionsanalyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} aus der obersten Bodenprobeentnahmetiefe (0 - 30 cm) auf das Ertragsniveau weist für 2001 zwar T1 aus, aber das Bestimmtheitsmaß ist sehr schwach ausgeprägt. Für die weiteren Jahre ergeben sich mittelstark ausgeprägte Bestimmtheitsmaße. Als maßgebliche Einflussvariable weist SPSS je nach Jahr Sand, Schluff oder Ton aus (s. Tab. 115). Werden als weitere Einflussgrößen die Korngrößen sowie C_{org} aus der zweiten Bodenprobeentnahmetiefe (30 - 60 cm) mitberücksichtigt, so verbessert sich das Bestimmtheitsmaß generell nur geringfügig. Die erste maßgebliche Einflussvariable ändert sich nicht. Für 2002 werden als weitere Einflussvariable U2, S2 und $C2_{org}$ mit eingeschlossen, so verbessert sich das Bestimmtheitsmaß auf 0.37. Für 2003 weist die Regressionsanalyse ebenfalls weitere Einflussvariablen aus: S2 und $C2_{org}$ und das Bestimmtheitsmaß verbessert sich auf 0.54.

Werden die geoelektrische Messergebnisse vom Frühjahr 2005 einzeln gegenüber dem Ertrag 2005 in Beziehung gesetzt, ergeben sich schwache Bestimmtheitsmaße von 0.06 bis 0.23.

Tab. 115: Analyse der Einflussstärke der Korngröße und C_{org} auf das Ertragsniveau des jeweiligen Jahres auf der Fläche „Wellenkamp“, angegeben sind die Korngrößen bzw. C_{org} im Oberboden, welche die multiple Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable ermittelte

Modell	B^2	Korrigiertes B^2	Änderung B^2	Einflussvariablen
Erntejahr 2001				
1	0.043	0.035	0.043	T1
1	Regression: Ertrag 2001 = (-0.064) * T1 + 8.69			
Erntejahr 2002				
1	0.26	0.255	0.262	U1
1	Regression: Ertrag 2002 = (-0.512) * U1 + 6.198			
Erntejahr 2003				
1	0.523	0.518	0.523	T1
1	Regression: Ertrag 2003 = (-0.203) * T1 + 9.315			
Erntejahr 2004				
1	0.471	0.467	0.471	S1
	Regression: Ertrag 2004 = 0.095 * S1 + 2.026			
Erntejahr 2005				
1	0.319	0.313	0.319	S1
1	Regression: Ertrag 2005 = 0.051 * S1 + 1.475			
Erntejahr 2006				
1	0.259	0.253	0.259	U1
1	Regression: z-Wert Ertrag 2006 = (-0.101) * U1 + 8.508			

4.2.5.4. Multiple Regressionsanalyse zwischen dem Ertrag und den geoelektrischen Messergebnissen

Beispielhaft wird für den Ertrag 2005 mit Hilfe einer multiplen Regressionsanalyse der Zusammenhang zwischen den geoelektrischen Messwerten BOs - 1EP (EC25, Cele, elektrisches Rauschen (eleRausch) und Bodentemperatur (BodTemp)) und des EM38 ($EC_{(ver)}$) vom 17.03.2005 sowie des ARP03 ($EC_{1,2,3}$) vom Herbst 2004 analysiert (s. Tab. 116). Ein hohes Maß des Ertragsniveaus 2005 kann anhand des Messwerts EC1 erklärt werden. Wird das elektrische Rauschen mit hinzugenommen, verbessert sich das Bestimmtheitsmaß deutlich. Durch das weitere Hinzufügen weiterer Einflussvariablen verbessert sich das Bestimmtheitsmaß auf 0.741. (s. Tab. 116)

Tab. 116: Analyse des Zusammenhangs zwischen den geoelektrischen Messwerten ARP03, EM38 und BOs - 1EP und dem Trockenmasse-Ertrag 2005 auf der Fläche „Wellenkamp“, aufgeführt sind die Messwerte, welche nach der multiplen Regressionsanalyse in SPSS als Einflussvariable angegeben sind

Modell	B ²	Korrigiertes B ²	Änderung B ²	Einflussvariablen
Erntejahr 2005				
1	0.529	0.525	0.529	EC1
2	0.619	0.612	0.090	EC1, _{ele} Rausch
3	0.677	0.668	0.058	EC1, _{ele} Rausch, EC _(ver)
4	0.716	0.706	0.039	EC1, _{ele} Rausch, EC _(ver) , EC25
5	0.728	0.715	0.012	EC1, _{ele} Rausch, EC _(ver) , EC25, EC3
6	0.742	0.728	0.014	EC1, _{ele} Rausch, EC _(ver) , EC25, EC3, C _{ele}
7	0.755	0.740	0.013	EC1, _{ele} Rausch, EC _(ver) , EC25, EC3, C _{ele} , EC2
8	0.754	0.741	-0.001	_{ele} Rausch, EC _(ver) , EC25, EC3, C _{ele} , EC2
1	Regression: Ertrag 2005 = (-0.193) * EC1 + 5.585			
2	Regression: Ertrag 2005 = (-0.195) * EC1 + (-2.093) * _{ele} Rausch + 7.321			
3	Regression: Ertrag 2005 = (-0.173) * EC1 + (-2.833) * _{ele} Rausch + (-0.121) * EC _(ver) + 9.221			
4	Regression: Ertrag 2005 = (-0.214) * EC1 + (-2.643) * _{ele} Rausch + (-0.126) * EC _(ver) + 0.187 * EC25 + 8.476			
5	Regression: Ertrag 2005 = (-0.285) * EC1 + (-2.838) * _{ele} Rausch + (-0.136) * EC _(ver) + 0.214 * EC25 + 0.062 * EC3 + 8.476			
6	Regression: Ertrag 2005 = (-0.289) * EC1 + (-2.707) * _{ele} Rausch + (-0.131) * EC _(ver) + 0.483 * EC25 + 0.073 * EC3 + 0.001 * C _{ele} + 7.259			
7	Regression: Ertrag 2005 = (-0.068) * EC1 + (-2.908) * _{ele} Rausch + (-0.126) * EC _(ver) + 0.528 * EC25 + 0.152 * EC3 + 0.001 * C _{ele} + (-0.209) * EC2 + 6.777			
8	Regression: Ertrag 2005 = (-2.950) * _{ele} Rausch + (-0.124) * EC _(ver) + 0.533 * EC25 + 0.168 * EC3 + 0.001 * C _{ele} + (-0.266) * EC2 + 6.663			

4.2.5.5. Analyse Ertragsniveau und Tongehalt

Wird der Ertrag des jeweiligen Jahres als z-Wert transformiert und gegenüber dem aufsteigend sortierten Tongehalt als eine polynomische Funktion aufgetragen, zeigt sich, dass der Ertrag für alle sechs Jahre auf den sandigen Bereichen über- bis durchschnittlich ist (z-Wert größer als 0). Beispielhaft ist in Abb. 43 der Verlauf der Ertragskurve 2005 dargestellt.

Es zeigen sich für die Fläche „Wellenkamp“ über- bis durchschnittliche Erträge bei einem Tongehalt von ca. 11% bis 18%. Diese Spanne ist sehr eng, da der minimale Wert 11% beträgt. Überwiegend wird der Ertrag ab einem Tongehalt von 16 - 18% unterdurchschnittlich und nimmt mit weiter steigendem Tongehalt ab. Tongehalt über

18% sind vorwiegend in der südlichen Hälfte der Fläche in dem Bereich mit der Klassenzeichenbenennung der Bodenschätzung Vg (für steinreiche Verwitterungsböden) zu finden. Dieses gibt einen wichtigen Hinweis auf einen eingeschränkten Wurzelraum. Hiermit lassen sich die sinkenden Erträge für diesen Bereich, insbesondere bei Trockenheit auf der Fläche erklären. So war 2003 z.B. ein sehr trockener Sommer. Die verhältnismäßigen unterdurchschnittlichen Erträge 2003 auf der südlichen Teilfläche könnten auf den zwar tonreichen aber relativ flachgründigen Bereich mit Wassermangel erklärt werden. Auch 2005 ist im Juni eine niederschlagsarme Zeit zu verzeichnen. Anders 2004, für dieses Jahr weist die Wasserbilanz für das Frühjahr bis in den Herbst Werte von 200 mm und mehr auf. Es wird vermutet, dass der Boden mit höheren Tongehalten einen höheren Wassergehalt aufwies, mit der Folge eines verminderten Luftgehalts im Boden sowie niedrigeren Bodentemperaturen. Dieses kann ebenfalls ertragsmindernd wirken.

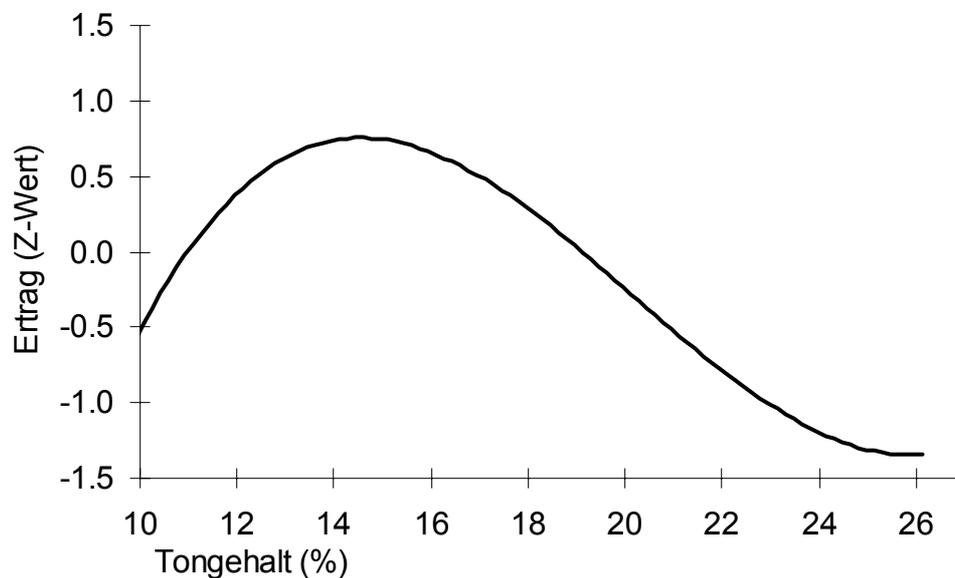


Abb. 43: z-transformierter Ertrag 2005 auf der Fläche „Wellenkamp“, aufgetragen gegenüber dem aufsteigend sortierten Tongehalt

4.3. Überprüfung des Einflusses der Bodenfeuchte auf die Messergebnisse des BOs - 1EP

Anhand der ausgesuchten Rasterzellen der Messbahnen auf den beiden Flächen (s. Kap. 3.2.1 und 3.2.2) wird der Einfluss des Bodenwassers auf die Messergebnisse des BOs - 1EP überprüft. Die Messungen fanden zu verschiedenen Terminen statt: 2005, 2006 sowie ein weiteres Mal 2007. Die exakten Messzeitpunkte sind in den Tabellen 116 und 177 angegeben. Zur Feststellung des Zusammenhanges zwischen dem Bodenwassergehalt und der Korngröße sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt wird eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Der Einfluss des Bodenwassergehalts auf die Messergebnisse wird anhand einer Regressionsanalyse überprüft.

Die Korrelationsanalyse zwischen dem Bodenwassergehalt und den Korngrößen sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt im Oberboden zeigt, dass der Zusammenhang zwischen der Korngröße und dem Bodenwassergehalt auf den beiden Flächen unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Für die Fläche „Im Berge“ zeigt sich, überwiegend eine hohe bis sehr hohe Korrelation zwischen der jeweiligen Korngröße und dem Bodenwassergehalt. Weiter ist erkennbar, dass der Zusammenhang zwischen dem Bodenwassergehalt und der Korngröße Sand für die überwiegende Anzahl der Messtermine stärker ausgeprägt ist als für die Korngrößen Schluff, Ton oder dem C_{org} . Der organische Kohlenstoffgehalt weist einen mittleren Korrelationskoeffizienten zum Bodenwassergehalt auf. (s. Tab. 117)

Für die Fläche „Wellenkamp“ ist zwischen dem Bodenwassergehalt und den Korngrößen überwiegend ein mittlerer Zusammenhang erkennbar. Wobei der Zusammenhang zwischen dem Bodenwassergehalt und der Korngröße Schluff mehrheitlich stärker ausgeprägt ist als zwischen den Korngrößen Sand und Ton sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt. Geringe bis mittlere Zusammenhänge zeigen sich zwischen dem Bodenwassergehalt und C_{org} . (s. Tab. 118)

Tab. 117: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen Bodenwassergehalt (Probeentnahmetiefe: 20 - 25 cm) und Korngröße sowie C_{org} (Probeentnahmetiefe: 0 - 30 cm), Fläche „Im Berge“

Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C _{org}
Bodenwassergehalt zu ...				
14.04.2005	-0.92 **	0.87 **	0.88 **	0.49
22.04.2005	-0.88 **	0.90 **	0.81 **	0.49 *
11.05.2005	-0.87 **	0.75 **	0.86 **	0.58 **
26.05.2005	-0.79 **	0.67 **	0.75 **	0.57 **
08.06.2005	-0.93 **	0.83 **	0.85 **	0.51 **
14.09.2005	-0.53 *	0.46 *	0.49 *	0.66 **
06.10.2005	-0.88 **	0.96 **	0.74 **	0.82 **
21.03.2006	-0.88 **	0.76 **	0.85 **	0.63 **
06.04.2006	-0.57 **	0.54 **	0.51 *	0.72 **
24.04.2006	-0.88 **	0.82 **	0.82 **	0.46 *
03.05.2006	-0.84 **	0.72 **	0.78 **	0.64 **
08.05.2006	-0.93 **	0.80 **	0.87 **	0.63 **
15.05.2006	-0.88 **	0.74 **	0.82 **	0.61 **
24.05.2006	-0.86 **	0.80 **	0.80 **	0.72 **
13.06.2006	-0.87 **	0.80 **	0.83 **	0.56 **
14.03.2007	-0.90 **	0.79 **	0.89 **	0.46 *

Tab. 118: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen Bodenwassergehalt (Probeentnahmetiefe: 20 - 25 cm) und Korngröße sowie C_{org} (Probeentnahmetiefe: 0 - 30 cm), Fläche „Wellenkamp“

Messzeitpunkt	Sand	Schluff	Ton	C _{org}
Bodenwassergehalt zu ...				
28.04.2005	-0.70 **	0.79 **	0.42	0.53 *
12.05.2005	-0.64 **	0.64 **	0.39	0.41
27.05.2005	-0.69 **	0.71 **	0.44	0.33
22.06.2005	-0.51 *	0.62 **	0.22	0.58 *
13.09.2005	-0.65 *	0.66 *	0.53	0.41
19.09.2005	-0.76 **	0.75 **	0.62 *	0.73 **
06.04.2006	-0.58 *	0.61 *	0.54 *	0.11
24.04.2006	-0.33	0.32	.031	0.13
03.05.2006	-0.61 **	0.66 **	0.45	0.40
08.05.2006	-0.67 **	0.72 **	0.46	0.59 *
15.05.2006	-0.62 **	0.67 **	0.41	0.38
24.05.2006	-0.67 **	0.67 **	0.54 *	0.35
13.06.2006	-0.49 *	0.52 *	0.30	0.31
17.07.2006	-0.58 *	0.59 *	0.40	0.21

Anhand einer multiplen Regressionsanalyse (s. Tab. 119 und Tab. 120) wird die maßgebliche Einflussvariable auf die entsprechende Messgröße (EC25, C_{ele} , $_{ele}Rausch$) des BOs - 1EP überprüft. Es sind folgende Faktoren eingesetzt:

Korngrößen (S1, U1, T1),
organischer Kohlenstoffgehalt ($C1_{org}$) und
gravimetrischer Bodenwassergehalt ($BodH_2O$).

Tab. 119: Maßgebliche Einflussvariable(n) und deren Bestimmtheitsmaß(e) der Messgrößen elektrische Leitfähigkeit (EC25), elektrische Kapazität (C_{ele}) und elektrisches Rauschen ($_{ele}Rausch$) anhand einer multiplen Regressionsanalyse ermittelt, Fläche „Im Berge“, Messsystem BOs - 1EP

Messtermin	EC25	C_{ele}	$_{ele}Rausch$
maßgebliche Einflussvariable(n) und Bestimmtheitsmaß(e) der Regressionsanalyse			
14.04.2005	$C1_{org}$; 0.33	$C1_{org}$; 0.30	--
22.04.2005	$C1_{org}$; 0.60	--	--
11.05.2005	$BodH_2O$; 0.65	$BodH_2O$; 0.71	$C1_{org}$; 0.20
26.05.2006	$BodH_2O$; 0.63	$BodH_2O$; 0.60	(1) $C1_{org}$; 0.22 (2) T1; 0.44
08.06.2005	$BodH_2O$; 0.53	S1; 0.54	--
14.09.2005	(1) $BodH_2O$; 0.68 (2) U1; 0.77	(1) $BodH_2O$; 0.67 (2) U1; 0.75	(1) $BodH_2O$; 0.21 (2) T1; 0.68
06.10.2005	--	--	--
21.03.2006	S1; 0.79	T1; 0,53	(1) $C1_{org}$; 0.27 (2) $BodH_2O$; 0.59
06.04.2006	S1; 0.59	(1) S1; 0.47 (2) $BodH_2O$; 0.59	(1) $C1_{org}$; 0.33 (2) S1; 0,64
24.04.2006	S1; 0.72	T1; 0.47	(1) T1; 0.20 (2) $C1_{org}$; 0.42
03.05.2006	S1; 0.83	$BodH_2O$; 0,50	(1) $C1_{org}$; 0.23 (2) $BodH_2O$; 0.58
08.05.2006	S1; 0.63	S1; 0.47	(1) $C1_{org}$; 0.39 (2) T1; 0.68
15.05.2008	$BodH_2O$; 0.65	T1; 0.70	(1) $C1_{org}$; 0.37 (2) T1; 0.56
24.05.2006	S1; 0.76	S1; 0.83	(1) $C1_{org}$; 0.24 (2) $BodH_2O$; 0.59
13.06.2006	$BodH_2O$; 0.41	$C1_{org}$; 0.24	(1) $C1_{org}$; 0.28 (2) T1; 0.56
14.03.2007	S1; 0.65	S1; 0.65	(1) $C1_{org}$; 0.22 (2) T1; 0.53

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse für die elektrische Leitfähigkeit weist für die Fläche „Im Berge“ von den 16 Messterminen 7-mal die Korngröße Sand, 2-mal den organische Kohlenstoffgehalt und 6-mal den Bodenwassergehalt als die maßgebliche Einflussvariable aus. Für einen Messtermin war die Erstellung der Regression nicht möglich. Als maßgebliche Einflussvariable der elektrischen Kapazität werden 5-mal die Korngröße Sand, 3-mal die Korngröße Ton, 2-mal der organische Kohlenstoffgehalt und 4-mal der Bodenwassergehalt genannt. Für zwei Messtermine konnte keine Regressionsanalyse errechnet werden. (s. Tab. 119)

Das elektrische Rauschen wird für die Mehrzahl der Termine auf beiden Flächen maßgeblich vom $C1_{org}$ beeinflusst. Dieses zeigt sich insbesondere für die Fläche „Im Berge“. (s. Tab. 119 und 120)

Für die Fläche „Wellenkamp“ liegen Ergebnisse von 14 Messterminen in den Messbahnen vor. Hier weist die Regressionsanalyse als Ergebnis für die elektrische Leitfähigkeit 9-mal den Bodenwassergehalt und 1-mal die Korngröße Schluff als maßgebliche Einflussvariable aus. Für vier Messtermine ist eine Durchführung der Regressionsanalyse für die elektrische Leitfähigkeit nicht möglich gewesen. Für die elektrische Kapazität ist es für fünf Messtermine nicht möglich gewesen, eine Regressionsanalyse zu errechnen. Für die verbleibenden 9 Messtermine wird 5-mal der Bodenwassergehalt, 2-mal die Korngröße Sand und 2-mal der organische Kohlenstoffgehalt als die maßgebliche Einflussvariable auf die elektrische Kapazität genannt. (s. Tab. 120)

Tab. 120: Maßgebliche Einflussvariable(n) und deren Bestimmtheitsmaß(e) der Messgrößen elektrische Leitfähigkeit (EC_{25}), elektrische Kapazität (C_{ele}) und elektrisches Rauschen ($_{ele}Rausch$) anhand einer multiplen Regressionsanalyse ermittelt, Fläche „Wellenkamp“, Messsystem BOs - 1EP

Messtermin	EC_{25}	C_{ele}	$_{ele}Rausch$
maßgebliche Einflussvariable(n) und Bestimmtheitsmaß(e) der Regressionsanalyse			
28.04.2005	BodH ₂ O; 0.33	(1) BodH ₂ O; 0.37 (2) T1; 0.64 (3) C1 _{org} ; 0.79	C1 _{org} ; 0.53
12.05.2005	BodH ₂ O; 0.25	C1 _{org} ; 0.37	nn
27.05.2005	U1; 0.44	S1; 0.48	C1 _{org} ; 0.39
22.06.2005	BodH ₂ O; 0.41	(1) BodH ₂ O; 0.45 (2) C1 _{org} ; 0.72	--
13.09.2005	--	--	--
19.09.2005	--	--	--
06.04.2006	--	--	--
24.04.2006	BodH ₂ O; 0.32	BodH ₂ O; 0.25	C1 _{org} ; 0.29
03.05.2006	(1) BodH ₂ O; 0.63 (2) U1; 0.87	--	--
08.05.2006	(1) BodH ₂ O; 0.46 (2) C1 _{org} ; 0.62	(1) BodH ₂ O; 0.44 (2) C1 _{org} ; 0.77	--
15.05.2006	(1) BodH ₂ O; 0.57 (2) T1; 0.79	(1) BodH ₂ O; 0.47 (2) T1; 0.73	C1 _{org} ; 0.30
24.05.2006	--	--	C1 _{org} ; 0.36
13.06.2006	BodH ₂ O; 0.41	S1; 0.52	--
17.07.2006	(1) BodH ₂ O; 0.59 (2) T1; 0.75	C1 _{org} ; 0.32	BodH ₂ O; 0.31

5. Diskussion

5.1. BOs - 1EP (Bodensensorsystem Fachhochschule Osnabrück)

5.1.1. Elektrische Leitfähigkeit und Korngröße sowie organischer Kohlenstoffgehalt

Die im Anhang in Tab.2 aufgeführten Autoren (z.B. JUNG et al. 2005, HEINIGER et al. 2003, SUDDUTH et al. 2003, BANTON et al. 1997) geben zwischen elektrischer Leitfähigkeit (EC) und der Korngröße Sand einen negativen bzw. zwischen EC und Ton einen positiven Zusammenhang an. Weiter stellt die überwiegende Anzahl der ausgewählten Autoren einen negativen Zusammenhang zwischen EC und der Korngröße Schluff fest (z.B. JUNG et al. 2005, SUDDUTH et al. 2003, MUELLER et al. 2003). Dagegen kommen HEINIGER et al. (2003) und BANTON et al. (1997) zu überwiegend positiven Zusammenhängen zwischen EC und Schluff. Nur wenige Autoren ermitteln den Zusammenhang zwischen EC und dem organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}). So beschreiben z.B. JUNG et al. (2005) geringe und positive Korrelationen zwischen EC und C_{org} ; BANTON et al. (1997) führen hierzu mittlere und positive Korrelationen an. JOHNSON et al. (2001) dagegen weisen einen geringen und negativen Zusammenhang zwischen EC und C_{org} auf; PERRON et al. (2002) ermitteln einen Zusammenhang nahe null. (s. Anhang Tab. 2)

Die eigenen Untersuchungsergebnisse bestätigen die Angaben aus der Literatur für die Zusammenhänge zwischen EC und den Korngrößen Sand bzw. Ton. So konnten zwischen EC25 (BOs - 1EP) und der Korngröße Sand ein negativer Zusammenhang bzw. zwischen EC25 und der Korngröße Ton ein positiver Zusammenhang nachgewiesen werden. Die eigenen Messungen zeigen einen positiven und mittleren Korrelationskoeffizienten zwischen EC25 und der Korngröße Schluff, somit bestätigen sich die Angaben von den Autoren HEINIGER et al. (2003) und BANTON et al. (1997). Des Weiteren bestätigen die eigenen Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen EC25 und C_{org} ein weiteres Mal die Angaben von BANTON et al. (1997), welche positive und mittlere Korrelationskoeffizienten zwischen EC und C_{org} angeben. (s. Tab. 121)

Werden die Korrelationskoeffizienten zwischen EC25 und den Korngrößen sowie C_{org} der beiden Untersuchungsflächen „Im Berge“ und „Wellenkamp“ miteinander verglichen, zeigt sich ein stärkerer Zusammenhang für die Fläche „Im Berge“ (s. Tab. 121). Dieses spiegelt sich ebenfalls in der Güte des Bestimmtheitsmaßes der Regressionsanalyse zwischen der EC25 und den Korngrößen sowie C_{org} wider. Die Bestimmtheitsmaße für die Fläche „Im Berge“ sind wesentlich stärker ausgeprägt als für die Fläche „Wellenkamp“ (s. Tab. 121).

Tab. 121: Vergleich der Korrelationen und Güte der Bestimmtheitsmaße zwischen EC25 und den Korngrößen sowie C_{org} zwischen beiden Flächen, Messsystem BOs - 1EP

		Fläche	
		Im Berge	Wellenkamp
Korrelation zwischen	Probentiefe	Stärke der Korrelation	
EC25 und Sand	0 - 30	hoch (-0.7 - -0.8) ¹	mittel - hoch (-0.5 - -0.7) ²
EC25 und Schluff	0 - 30	mittel - hoch (0.5 - 0.8)	gering - mittel (0.4 - 0.7) ²
EC25 und Ton	0 - 30	hoch (0.7 - 0.8) ¹	mittel (0.4 - 0.6) ²
EC25 und C _{org}	0 - 30	mittel (0.4 - 0.6)	mittel (0.4 - 0.6) ²
Bestimmtheitsmaß zwischen		Güte des Bestimmtheitsmaß	
EC25 und Sand	0 - 30	0.6 - 0.7 ¹	0.4 - 0.5 ³
EC25 und Schluff	0 - 30	0.4 - 0.6	0.3 - 0.4 ³
EC25 und Ton	0 - 30	0.7 - 0.8 ¹	0.4 ³
EC25 und C _{org}	0 - 30	0.2 - 0.4	0.1 - 0.3 ²

¹ = mit Ausnahme vom 14.09.2005

² = mit Ausnahme vom 19.08.2005

³ = mit Ausnahme vom 19.08.2005 und 13.09.2005

Für die Fläche „Im Berge“ ist der Zusammenhang zwischen EC25 und den Korngrößen für die Bodenprobeentnahmetiefe 0 - 30 cm stärker ausgeprägt als für die Bodenprobeentnahmetiefe 30 - 60 cm. Bei der Fläche „Wellenkamp“ sind die Zusammenhänge zwischen EC25 und den Korngrößen in beiden Tiefen ähnlich stark ausgeprägt. Zwischen EC25 und C_{org} ist für beide Flächen der stärkste Zusammenhang in der Messtiefe von 0 - 30 cm feststellbar. (s. Tab. 122)

Für eine Reproduzierbarkeit der Messung spricht ebenfalls eine annähernd gleich bleibende räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit, insbesondere ist dieses auf der Fläche „Im Berge“ erkennbar (s. Anhang Abb. 5 - 9). Die einzelnen Messtermine untereinander weisen eine hohe bis sehr hohe Korrelation auf (s. Tab. 13). Für die Fläche „Wellenkamp“ weisen die einzelnen Messtermine untereinander überwiegend mittlere bis hohe Korrelationskoeffizienten auf (s. Tab. 68). Die Feldkarten mit den interpolierten Leitwerten weisen eine gute Ähnlichkeit auf (s. Anhang Abb. 29 - 33). Ausnahme ist der Messtermin 19.08.2005, dieser korreliert mit den anderen Messterminen nur sehr gering. Hier fällt die nördliche Teilfläche mit Verhältnis hohen EC-Werten auf. Die Bodenkarte weist für diesen Bereich als Bodentyp einen Gley, evtl. beeinflusste ein hoch anstehender Grundwasserstand die geoelektrische Messung.

Tab. 122: Vergleich der Korrelationen zwischen EC25 und den Korngrößen Sand und Ton sowie C_{org} zwischen den Flächen für die beiden Tiefen, Messsystem BOs - 1EP

Korrelation zwischen	Probentiefe	Fläche	
		Im Berge	Wellenkamp
		Stärke der Korrelation	
EC25 und Sand	0 - 30	hoch (-0.7 - -0.8) ¹	mittel - hoch (-0.5 - -0.7) ²
EC25 und Sand	30 - 60	mittel (-0.5 - -0.6)	mittel - hoch (-0.5 - -0.7) ²
EC25 und Ton	0 - 30	hoch (0.7 - 0.8) ¹	mittel - hoch (0.5 - 0.6) ²
EC25 und Ton	30 - 60	mittel (0.5 - 0.6)	mittel (0.5 - 0.6) ²
EC25 und C _{org}	0 - 30	mittel (0.4 - 0.6)	mittel (0.4 - 0.6) ²
EC25 und C _{org}	30 - 60	gering (0.2 - 0.4)	sehr gering (0.1 - 0.3)

¹ = mit Ausnahme vom 14.09.2005

² = mit Ausnahme vom 19.08.2005

Die Ergebnisse weisen auf eine gute bis hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse mit dem BOs - 1EP hin. Wobei diese auf der Fläche „Im Berge“ höher ist als auf der Fläche „Wellenkamp“.

Weiter ist zu beachten, dass die Messungen auf beiden Flächen zu unterschiedlichen Jahreszeiten stattfanden. So sind die Korrelationskoeffizienten zwischen Frühjahrmessung (mit eher feuchten Bodenbedingungen) und Spätsommersmessung (mit eher trockenen Bodenbedingungen) für beide Flächen als mittel bis hoch zu beurteilen (s. Tab. 13 und 68). Auch die Feldkarten mit der räumlichen Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit weisen über den zeitlichen Verlauf eine hohe Ähnlichkeit auf, dieses gilt insbesondere für die Fläche „Im Berge“ (vgl. Anhang Abb. 5, 8 und 9). Aber auch für die Fläche „Wellenkamp“ ist eine gute bis hohe Ähnlichkeit vorhanden (s. Anhang Abb. 29, 32 und 33).

Wird weiter für die Fläche „Im Berge“ die maßgebliche Einflussvariable der elektrischen Leitfähigkeit berücksichtigt, geben die Regressionsanalyseergebnisse einen Hinweis darauf, dass die elektrische Leitfähigkeit des Bodens zu einem hohen Maß von der Korngrößenzusammensetzung bestimmt wird (s. Tab. 119). Für die Fläche „Wellenkamp“ weisen die Feldkarten der elektrischen Leitfähigkeit zwar eine gute Ähnlichkeit auf, aber die Ergebnisse der Regressionsanalyse zeigen überwiegend den Bodenwassergehalt als maßgebliche Einflussvariable auf die elektrische Leitfähigkeit (s. Tab. 120). Dieses erklärt auch die schwächeren Zusammenhänge zwischen EC25 und den Korngrößen auf der Fläche „Wellenkamp“ im Vergleich zur Fläche „Im Berge“.

5.1.2. Elektrische Kapazität und Korngröße

Zwischen elektrischer Leitfähigkeit (EC25) und elektrischer Kapazität (C_{ele}) besteht für die Mehrzahl der Messtermine eine enge Beziehung. Somit ist die Stärke des Zusammenhangs zwischen der C_{ele} und den Korngrößen ähnlich stark ausgeprägt wie zwischen EC25 und den Korngrößen, allerdings wechselt teilweise das Vorzeichen. (s. Tab. 123)

Tab. 123: Vergleich der Korrelationen und die Güte der Bestimmtheitsmaße zwischen C_{ele} und den Korngrößen sowie C_{org} für beide Flächen, Messsystem BOs - 1EP

		Fläche	
		Im Berge	Wellenkamp
Korrelation zwischen	Probentiefe	Stärke der Korrelation	
C_{ele} und Korngröße ^a	0 - 30	sehr gering - hoch (0.2 - 0.8) ¹	sehr gering - hoch (0.1 - 0.7) ²
C_{ele} und C_{org}	0 - 30	sehr gering - mittel (0.1 - 0.6)	sehr gering - mittel (0.1 - 0.7)
Bestimmtheitsmaß zwischen		Güte des Bestimmtheitsmaß	
C_{ele} und Sand	0 - 30	0.5 - 0.7 ³	0.3 - 0.5 ⁴
C_{ele} und Schluff	0 - 30	0.4 - 0.6 ³	0.2 - 0.4 ⁴
C_{ele} und Ton	0 - 30	0.4 - 0.7 ³	0.2 - 0.4 ⁴
C_{ele} und C_{org}	0 - 30	0.2 - 0.4 ³	0.2 - 0.3 ⁴

^a = Es zeigen sich für die Korngröße Sand positive und für die Korngrößen Schluff sowie Ton negative Korrelationskoeffizienten

¹ = Änderung des Vorzeichen an den beiden Messterminen: 14.09.2005 und 14.03.2007

² = Änderung des Vorzeichen an den beiden Messterminen: 13.09.2005 und 19.09.2005

³ = 3 ausgewählte Messtermine (Fläche „Im Berge“): 15.03.2005, 30.08.2005 und 14.03.2007

⁴ = 4 ausgewählte Messtermine (Fläche „Wellenkamp“): 16.03.2005, 17.03.2005, 21.03.2005 und 19.09.2005

Die räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität unterscheidet sich bei Messungen im Frühjahr von denen im Spätsommer stark. Die Korrelationskoeffizienten der Messungen vom Frühjahr zu Sommer sind schwächer im Vergleich zu den Korrelationskoeffizienten der einzelnen Messtermine nur für das Frühjahr bzw. nur für den Sommer. Für einzelne Messtermine zeigen sich auch negative Korrelationen (s. Tab. 25 und 81). Die räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität ändert sich insbesondere zu den Messterminen mit einer negativen Korrelation (vgl. im Anhang Abb. 10 - 12 oder Abb. 34, 36 und 37). Wird C_{ele} gegenüber der Wasserbilanz grafisch aufgetragen, sind geringere Spannweiten und positive Werte zu Zeitpunkten mit niedriger bzw. negativer Wasserbilanz erkennbar (s. Abb. 31 und 39). Ein Zeitpunkt mit niedriger bzw. negativer Wasserbilanz wird gleichgesetzt mit einem trockenen Boden. Die Regressionsanalyse weist zwar mehrfach den Bodenwassergehalt als maßgebliche Einflussvariable auf. Wird aber weiter nach den beiden Flächen differenziert, zeigt sich für die Fläche „Im Berge“, dass die Korngrößen Sand und Ton oder auch der organische Kohlenstoffgehalt häufiger als der Bodenwassergehalt genannt sind (s. Tab. 119). Auf der Fläche

„Wellenkamp“ wird von 9 Messterminen 5-mal der Bodenwassergehalt genannt (s. Tab. 120). Da sich die räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität im Laufe des Messzeitraums deutlich ändert, wird vermutet, dass diese Messgröße einerseits stark vom Bodenwassergehalt in der absoluten Höhe und andererseits aber auch von der Korngrößenverteilung, hier insbesondere auf der Fläche „Im Berge“ beeinflusst wird.

5.1.3. Elektrisches Rauschen, Suszeptibilität und Bodentemperatur

Das elektrische Rauschen sollte zur Überprüfung der Kontaktqualität zwischen Messchar und Boden dienen. Zwischen dem elektrischen Rauschen und den Korngrößen sowie C_{org} im Oberboden ist der Zusammenhang auf beiden Flächen als sehr gering bis gering zu beurteilen (s. Tab. 124). Aber anhand der Feldkarten (s. Anhang Abb. 13 - 15 und Abb. 38 - 40) wird ersichtlich, dass sich zum einen zufällig räumlich gestreute erhöhte Rauschwerte, z.B. durch den Aufprall der Elektroden auf einen großen Stein, zeigen. Zum anderen zeichnen sich Teilflächen ab, welche zu den verschiedenen Messterminen, immer einen erhöhten Rauschwert aufweisen. Auffällig ist, dass für diese Teilflächen bei der Messung der Suszeptibilität mit dem Messsystem EM38 ebenfalls ein erhöhter Wert aufgenommen ist (vgl. Anhang Abb. 13 - 15 mit 19 - 21 und 38 - 40 mit 48 - 50). Allerdings ist der Zusammenhang zwischen der Suszeptibilität und den Korngrößen sowie C_{org} auf der Fläche „Im Berge“ sehr gering (s. Tab. 124). Im Vergleich dazu ist der Zusammenhang auf der Fläche „Wellenkamp“ stärker ausgeprägt (s. Tab. 124).

Zwar weist die Regressionsanalyse zur Ermittlung der maßgeblichen Einflussvariable auf das elektrische Rauschen für beide Flächen den organischen Kohlenstoff am häufigsten aus (s. Tab. 119 und 120), aber die genauen Zusammenhänge konnten in dieser Arbeit nicht geklärt werden.

Die Erfassung der Bodentemperatur dient zur Normierung der elektrischen Leitfähigkeit auf eine Temperatur von 25°C. Es zeigen sich sehr geringe bis geringe Korrelationen mit wechselnden Vorzeichen zu den Korngrößen sowie C_{org} auf der Fläche „Im Berge“. Für die Fläche „Wellenkamp“ sind ebenfalls sowohl negative als auch positive und geringe bis mittlere Korrelationskoeffizienten feststellbar. (s. Tab. 124)

Tab. 124: Vergleich der Korrelationen zwischen elektrischen Rauschen ($_{ele}Rausch$, Messsystem BOs - 1EP), Bodentemperatur (in 5 - 8 cm Bodentiefe, BodTemp, Messsystem BOs - 1EP) und Suszeptibilität (Suszept., Messsystem EM 38) und den Korngrößen sowie C_{org} für beide Flächen

Korrelation zwischen	Probentiefe	Fläche	
		Im Berge	Wellenkamp
		Stärke der Korrelation	
$_{ele}Rausch$ und Sand	0 - 30	gering (0.2 - 0.3)	sehr gering - gering (-0.3 - 0.1)
$_{ele}Rausch$ und Schluff	0 - 30	sehr gering (-0.1 - -0.2)	sehr gering - gering (0.0 - 0.4)
$_{ele}Rausch$ und Ton	0 - 30	gering (-0.2 - -0.4)	sehr gering - gering (-0.2 - 0.2)
$_{ele}Rausch$ und C_{org}	0 - 30	gering (0.2 - 0.3)	sehr gering - gering (0.1 - 0.4)
BodTemp und Sand	0 - 30	sehr gering - gering (-0.2 - 0.4)	sehr gering - mittel (-0.2 - 0.7)
BodTemp und Schluff	0 - 30	sehr gering - gering (-0.4 - 0.2)	sehr gering - mittel (-0.7 - 0.2)
BodTemp und Ton	0 - 30	sehr gering - gering (-0.3 - 0.2)	sehr gering - mittel (-0.6 - 0.2)
BodTemp und C_{org}	0 - 30	sehr gering - mittel (-0.5 - 0.4)	sehr gering - mittel (-0.4 - 0.3)
Suszept. und Sand	0 - 30	sehr gering (0.0 - 0.2)	gering - mittel (0.2 - 0.6)
Suszept. und Schluff	0 - 30	sehr gering (-0.2 - 0.1)	gering - mittel (-0.2 - -0.6)
Suszept. und Ton	0 - 30	sehr gering (-0.1 - -0.2)	gering - mittel (-0.2 - -0.5)
Suszept. und C_{org}	0 - 30	sehr gering (0.2 - 0.3)	sehr gering - gering (-0.2 - -0.4)

5.2. ARP03 und EM38

5.2.1. ARP03

In Bezug auf die Zusammenhänge zwischen EC1 und den Korngrößen Sand und Ton können wieder die im Anhang in Tab. 2 genannten Autoren (z.B. JUNG et al. 2005, HEINIGER et al. 2003, SUDDUTH et al. 2003, BANTON et al. 1997) bestätigt werden. Die Analyse der eigenen Messergebnisse (EC1) des ARP03 geben für EC1 und der Korngröße Sand negative bzw. für EC1 und der Korngröße Ton positive Korrelationen aus (s. Tab. 125). DABAS et al. (2002) ermitteln speziell zum Messsystem ARP03 eine mittlere und positive Korrelation zwischen elektrischer Leitfähigkeit und der Korngröße Ton an (s. Anhang Tab. 2). Somit können DABAS et al. (2002) grundsätzlich anhand der eigenen festgestellten positiven und hohen Korrelationen zwischen EC1 und der Korngröße Ton bestätigt werden. Die Zusammenhänge zwischen EC1 und der Korngröße Schluff für beide Flächen weisen hohe und positive Korrelationen auf (s. Tab. 125), somit werden wieder die Autoren HEINIGER et al. (2003) und BANTON et al. (1997) bestätigt. Weiter zeigen die eigenen Untersuchungen mittlere Korrelationskoeffizienten zwischen EC1 und C_{org} ; BANTON et al. (1997) kommen zu ähnlichen Ergebnissen.

Der starke Zusammenhang zwischen EC1 und den Korngrößen bzw. C_{org} spiegelt sich ebenfalls in der Güte des Bestimmtheitsmaßes der Regressionsanalyse zwischen der EC25 und den Korngrößen sowie C_{org} wider (s. Tab. 125).

Tab. 125: Vergleich der Korrelationen und die Güte der Bestimmtheitsmaße zwischen EC1 und den Korngrößen sowie C_{org} für beide Flächen, Messsystem ARP03

		Fläche	
		Im Berge	Wellenkamp
Korrelation zwischen	Probentiefe	Stärke der Korrelation	
EC1 und Sand	0 - 30	hoch (-0.7)	hoch (-0.8)
EC1 und Schluff	0 - 30	hoch (0.7)	hoch (0.8)
EC1 und Ton	0 - 30	hoch (0.7)	mittel (0.7)
EC1 und C_{org}	0 - 30	mittel (0.6)	mittel (0.4 - 0.6)
Bestimmtheitsmaß zwischen		Güte des Bestimmtheitsmaß	
EC1 und Sand	0 - 30	0.6	0.8
EC1 und Schluff	0 - 30	0.6	0.7
EC1 und Ton	0 - 30	0.7	0.7
EC1 und C_{org}	0 - 30	0.4	0.3

Werden die Ergebnisse des Messsystems ARP03 der beiden Flächen miteinander verglichen, so ist der Zusammenhang zwischen EC1 und den Korngrößen auf beiden Flächen als hoch zu bewerten. Dementsprechend hoch ist ebenfalls die Güte des Bestimmtheitsmaßes. Allerdings ist die Güte des Bestimmtheitsmaßes für die Fläche „Wellenkamp“ etwas stärker ausgeprägt als für die Fläche „Im Berge“. Der Zusammenhang zwischen EC und C_{org} ist auf beiden Flächen als mittel zu beurteilen. Somit kann das Messsystem ARP03 den Zusammenhang zwischen EC1 und den Korngrößen sowie C_{org} auf beiden Flächen in einem hohen Maß darstellen.

Ebenfalls kann, wie bereits anhand der Ergebnisse des BOs - 1EP gezeigt, eine Differenzierung der Zusammenhänge für die beiden Tiefen auf der Fläche „Im Berge“ beobachtet werden. So ist der Zusammenhang zwischen EC1 und den Korngrößen im Oberboden stärker ausgeprägt als im krumennahen Unterboden. Für die Fläche „Wellenkamp“ ist der Zusammenhang für die beiden vorliegenden Tiefen annähernd gleich. Für beide Flächen kann der stärkste Zusammenhang zwischen EC1 und C_{org} im Oberboden beobachtet werden. (s. Tab. 126)

Tab. 126: Vergleich der Korrelationen zwischen elektrischer Leitfähigkeit und den Korngrößen sowie C_{org} zwischen den Flächen für die beiden Tiefen, Messsystem ARP03 (EC1)

		Fläche	
		Im Berge	Wellenkamp
Korrelation zwischen	Probentiefe	Stärke der Korrelation	
EC1 und Sand	0 - 30	hoch (-0.7)	hoch (-0.8)
EC1 und Sand	30 - 60	mittel (-0.6)	hoch (-0.7)
EC1 und Ton	0 - 30	hoch (0.7)	hoch (0.7)
EC1 und Ton	30 - 60	mittel (0.6)	hoch (0.7)
EC1 und C_{org}	0 - 30	mittel (0.6)	mittel (0.6)
EC1 und C_{org}	30 - 60	gering (0.3)	sehr gering (0.2)

5.2.2. EM38

Die Messergebnisse des EM38 zeigen für die beiden Versuchsflächen unterschiedliche Zusammenhänge. Für die Fläche „Im Berge“ zeigen sich negative und geringe bis mittlere Korrelationskoeffizienten zwischen $EC_{(hor,ver)}$ und der Korngröße Sand, bzw. positive und sehr geringe bis mittlere Korrelationskoeffizienten zwischen $EC_{(hor,ver)}$ und den Korngrößen Schluff und Ton sowie C_{org} (s. Tab. 127). Für die Fläche „Wellenkamp“ zeigen sich zwischen $EC_{(hor,ver)}$ und den Korngrößen sowie C_{org} ebenfalls sehr gering bis mittel ausgeprägte Korrelationskoeffizienten, wobei das Vorzeichen allerdings sowohl positiv, als auch negativ für dieselbe Korngröße sein kann (s. Tab. 127, 128 und auch 103). Auf beiden Flächen sind die Korrelation im vertikalen Messmodus insgesamt gering ausgeprägt, entsprechend schwach sind die Bestimmtheitsmaße (s. Tab. 128).

Im Vergleich mit den Angaben zur Literatur (s. ausgewählte Autoren Anhang Tab. 2) weisen die eigenen Messergebnisse Abweichungen auf. Die Ergebnisse der Fläche „Im Berge“ weisen negative und geringe bis mittlere Korrelationen zwischen EC25 und S1 auf (s. Tab. 127 und 128); JUNG et al. (2005) und HEINIGER et al. (2003) geben ähnliche Ergebnisse an. Für die Fläche „Wellenkamp“ zeigen sich sowohl negative als auch positive, geringe bis mittlere Korrelationen zwischen $EC_{(hor,ver)}$ und der Korngröße Sand. MUELLER et al. (2003) geben ebenfalls positive Korrelationskoeffizienten zwischen EC und der Korngröße Sand an. Dort kam das Messsystem VERIS3100 zum Einsatz. Aber alle ausgewählten Autoren bestimmen einen positiven Korrelationskoeffizienten zwischen EC und der Korngröße Ton. Hierzu ergeben die eigenen Messergebnisse von der Fläche „Wellenkamp“ sowohl positive, als auch negative Korrelationen zwischen $EC_{(hor,ver)}$ und der Korngröße Ton (s. Tab. 127 und 128).

Tab. 127: Vergleich der Korrelationen und die Güte der Bestimmtheitsmaße zwischen $EC_{(hor)}$ und den Korngrößen sowie C_{org} zwischen beiden Flächen, Messsystem EM38

		Fläche	
		Im Berge	Wellenkamp
Korrelation zwischen	Probentiefe	Stärke der Korrelation	
$EC_{(hor)}$ und Sand	0 - 30	gering - mittel (-0.2 - -0.6)	sehr gering - mittel (-0.5 - 0.4)
$EC_{(hor)}$ und Schluff	0 - 30	gering - mittel (0.3 - 0.7)	sehr gering - mittel (-0.3 - 0.5)
$EC_{(hor)}$ und Ton	0 - 30	sehr gering - mittel (0.1 - 0.6)	gering - mittel (-0.3 - 0.6)
$EC_{(hor)}$ und C_{org}	0 - 30	gering - mittel (0.4 - 0.6)	sehr gering - mittel (-0.5 - 0.3)
Bestimmtheitsmaß zwischen		Güte des Bestimmtheitsmaß	
$EC_{(hor)}$ und Sand	0 - 30	0.2 - 0.5	0.1 - 0.5
$EC_{(hor)}$ und Schluff	0 - 30	0.3 - 0.6	0.1 - 0.4
$EC_{(hor)}$ und Ton	0 - 30	0.2 - 0.5	0.1 - 0.5
$EC_{(hor)}$ und C_{org}	0 - 30	0.2 - 0.4	0.0 - 0.3

Tab. 128: Vergleich der Korrelationen und die Güte der Bestimmtheitsmaße zwischen $EC_{(ver)}$ und den Korngrößen sowie C_{org} zwischen beiden Flächen, Messsystem EM38

		Fläche	
		Im Berge	Wellenkamp
Korrelation zwischen	Probentiefe	Stärke der Korrelation	
$EC_{(ver)}$ und Sand	0 - 30	gering (-0.2 - -0.3)	sehr gering - mittel (0.0 - 0.4)
$EC_{(ver)}$ und Schluff	0 - 30	gering (0.2 - 0.4)	sehr gering - gering (-0.3 - 0.1)
$EC_{(ver)}$ und Ton	0 - 30	sehr gering - gering (0.1 - 0.3)	sehr gering - gering (-0.3 - 0.1)
$EC_{(ver)}$ und C_{org}	0 - 30	gering (0.3 - 0.4)	gering - mittel (-0.2 - -0.5)
Bestimmtheitsmaß zwischen		Güte des Bestimmtheitsmaß	
$EC_{(ver)}$ und Sand	0 - 30	0.1 - 0.2	< 0.1
$EC_{(ver)}$ und Schluff	0 - 30	0.2 - 0.3	< 0.1
$EC_{(ver)}$ und Ton	0 - 30	0.1 - 0.3	< 0.1
$EC_{(ver)}$ und C_{org}	0 - 30	0.2	< 0.1

Für die Fläche „Im Berge“ weisen die eigenen Messergebnisse zwischen $EC_{(hor,ver)}$ und der Korngröße Ton einen positiven und sehr geringen bis mittleren Zusammenhang auf (s. Tab. 127 und 128). HEINIGER et al. (2003) führen zum Teil sowohl geringe als auch hohe Zusammenhänge zwischen $EC_{(hor,ver)}$ und der Korngröße Ton für die Untersuchungstiefe von 0 bis 30 cm an. Ebenso können JUNG et al. (2005) für geoelektrische Untersuchungen mit dem EM38 im Oberboden hohe Korrelationskoeffizienten zwischen $EC_{(hor,ver)}$ und der Korngröße Ton anführen. SUDDUTH et al. (2003) und DURLESSER (1999) weisen hohe bis sehr hohe

Korrelationskoeffizienten zwischen $EC_{(ver)}$ und der Korngröße Ton nach und kommen zu der Aussage, dass die Bodenprobeentnahmetiefe entsprechend der Messtiefe des Messsystem anzupassen sei. Die Entnahmetiefe beträgt bei SUDDUTH et al. (2003) von 0 bis 120 cm und bei DURLESSER (1999) von 0 bis 150 cm. Diese Gegebenheit ist bei der Interpretation der eigenen Ergebnisse zu berücksichtigen, da die eigenen Bodenproben aus den Tiefen 0 bis 30 cm und 30 bis 60 cm entnommen wurden und nicht über den gesamten Messbereich des EM38.

Werden die eigenen Korrelationskoeffizienten im horizontalen Messmodus zwischen $EC_{(hor)}$ und den Korngrößen aus den Tiefen 0 - 30 cm, 30 - 60 cm bzw. 0 - 60 cm miteinander verglichen so sind keine eindeutigen Abweichungen erkennbar (s. Tab. 47 und Tab. 103). In diesem Zusammenhang sei noch mal auf die unterschiedliche Messtiefe und Messempfindlichkeit je Messmodus hingewiesen, so beschreiben im horizontalen Messmodus zwar 63% des Signalanteils die obersten 60 cm Bodentiefe, aber die Messempfindlichkeit des EM38 (s. Abb. 9) ist direkt unter dem Gerät am höchsten und nimmt mit zunehmender Messtiefe überproportional ab (s. Kap. 2.4.2).

Zwischen EC und der Korngröße Schluff kann auf der Fläche „Im Berge“ ebenfalls eine positive Korrelation nachgewiesen werden (s. Tab. 127 und Tab. 128), somit bestätigen sich wieder BANTON et al. (1997) und HEINIGER et al. (2003). Wobei HEINIGER et al. (2003) teilweise auch deutlich stärkere Zusammenhänge angeben. Auf der Fläche „Wellenkamp“ zeigen sich zwischen $EC_{(hor,ver)}$ und der Korngröße Schluff wiederum positive und negative Korrelationen, mit einer sehr unterschiedlichen Stärke (s. Tab. 127 und 128).

JUNG et al. (2005) geben einen sehr geringen und positiven Korrelationskoeffizienten zwischen EC und C_{org} in beiden Messmodi an, diese Angaben werden anhand der eigenen Messergebnisse von der Fläche „Im Berg“ bestätigt (s. Tab. 127 und 128). Für die Fläche „Im Berge“ sind anhand der eigenen Ergebnisse mittlere und positive Zusammenhänge zwischen $EC_{(hor)}$ und $C1_{org}$ erkennbar. Auf der Fläche „Wellenkamp“ sind die Zusammenhänge zwischen $EC_{(hor)}$ und $C1_{org}$ von negativ und gering, bis positiv und gering zu beschreiben.

Die Zusammenhänge zwischen $EC_{(hor,ver)}$ und den Korngrößen zwischen den beiden Tiefen sind ähnlich stark ausgeprägt. Auffällig ist, dass die Korrelationskoeffizienten zwischen $EC_{(hor,ver)}$ und C_{org} zwischen den beiden Tiefen dennoch einen Unterschied aufweisen. (s. Tab. 129)

Tab. 129 : Vergleich der Korrelationen zwischen elektrischer Leitfähigkeit und den Korngrößen sowie C_{org} zwischen den Flächen für die beiden Tiefen, Messsystem EM38

		Fläche	
		Im Berge	Wellenkamp
Korrelation zwischen	Probentiefe	Stärke der Korrelation	
$EC_{(hor)}$ und Sand	0 - 30	sehr gering - mittel (-0.2 - -0.6)	sehr gering - mittel (-0.5 - 0.4)
$EC_{(hor)}$ und Sand	30 - 60	sehr gering - mittel (-0.2 - -0.5)	sehr gering - mittel (-0.5 - 0.4)
$EC_{(hor)}$ und Ton	0 - 30	sehr gering - mittel (0.1 - 0.6)	gering (-0.3 - 0.3)
$EC_{(hor)}$ und Ton	30 - 60	sehr gering - mittel (0.1 - 0.5)	sehr gering - mittel (-0.4 - 0.6)
$EC_{(hor)}$ und C_{org}	0 - 30	gering - mittel (0.4 - 0.6)	sehr gering - gering (-0.4 - 0.4)
$EC_{(hor)}$ und C_{org}	30 - 60	sehr gering (0 - 0.2)	sehr gering (-0.1 - 0)
$EC_{(ver)}$ und Sand	0 - 30	sehr gering - gering (-0.2 - -0.3)	sehr gering - mittel (0.0 - 0.4)
$EC_{(ver)}$ und Sand	30 - 60	sehr gering - gering (-0.2 - -0.3)	sehr gering - gering (-0.1 - 0.3)
$EC_{(ver)}$ und Ton	0 - 30	sehr gering - gering (0.1 - 0.3)	gering (-0.3 - 0.1)
$EC_{(ver)}$ und Ton	30 - 60	sehr gering - gering (0.1 - 0.3)	gering (-0.3 - 0.3)
$EC_{(ver)}$ und C_{org}	0 - 30	gering (0.3 - 0.4)	sehr gering - gering (-0.2 - -0.4)
$EC_{(ver)}$ und C_{org}	30 - 60	sehr gering (0 - -0.1)	sehr gering (-0.1 - 0.1)

Werden die Korrelationskoeffizienten der Fläche „Im Berge“ zwischen $EC_{(hor)}$ bzw. $EC_{(ver)}$ und den Korngrößen nach dem Messmodus verglichen, besteht ein Unterschied zwischen den entsprechenden Messmodi (s. Tab. 129 und auch Tab. 47). Im horizontalen Messmodus ist der Zusammenhang zwischen EC und den Korngrößen im Oberboden deutlich besser ausgeprägt als im vertikalen Messmodus. Dieses kann mit der gerätelageabhängigen Messempfindlichkeit des EM38 erklärt werden. 43% des Signalanteils beschreiben im horizontalen Messmodus die Tiefe bis zu 30 cm. Während es im vertikalen Messmodus nur ca. 14% des Signalanteils sind. Der Einfluss auf das Messergebnis aus größeren Tiefen ist somit im vertikalen Messmodus stärker als im horizontalen Messmodus.

Die einzelnen Messtermine weisen untereinander eine geringe bis hohe Korrelation auf (s. Tab. 46 und 102). Werden die Feldkarten der elektrischen Leitfähigkeit für die Fläche „Wellenkamp“ miteinander verglichen, so zeigt sich im Süden der Fläche, entsprechend der hohen Tongehalte, eine hohe elektrische Leitfähigkeit. Aber auch im Norden der Fläche zeichnet sich in beiden Messmodi eine Teilfläche mit ähnlich hohen elektrischen Leitfähigkeit ab wie im Süden der Fläche (vgl. Anhang Abb. 42 - 47). Es wird vermutet, dass aufgrund der großen Messtiefe des EM38 ebenfalls Bodenunterschiede erfasst werden, welche unterhalb von 60 cm liegen und in der vorliegenden Bodenanalyse nicht ersichtlicht sind.

Der Mittel- bzw. Medianwert der elektrischen Leitfähigkeit weist im vertikalen Mess-

modus zu den verschiedenen Jahreszeiten auf beiden Flächen nur eine geringe Schwankung auf (s. Tab. 45 und 101). Zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur besteht ein Zusammenhang: mit zunehmender Temperatur steigt die elektrische Leitfähigkeit an (s. Kap. 2.3.2). Es wird aber vermutet, dass der Temperaturgang als Einflussgröße im vertikalen Messmodus aufgrund der großen Messtiefe (s. Kap. 2.4.2) nur sehr gering ist. In diesem Zusammenhang wird auf BREVIK et al. (2004) verwiesen, die den (täglichen) Temperaturgang des Bodenraums als Einflussgröße auf die elektrische Leitfähigkeit des EM38 ausschließen. Weiter spricht für diese Annahme, dass der Jahrestemperaturgang ab einer Bodentiefe von 4 m geringe (BLUME 2004a, HARTGE und HORN 1999) und bei 6 m sehr geringe (BLUME 2004a) Schwankungen aufweist.

Mehrere Autoren (BREVIK et al. 2004, DOOLITTLE et al. 2002, SUDDUTH et al. 2001, DURLESSER 1999) geben im vertikalen Messmodus eine höhere elektrische Leitfähigkeit an als im horizontalen Messmodus. Bei den eigenen Messungen fällt auf der Fläche „Im Berge“ am 30.08.2005 und 14.03.2007 auf, dass die elektrische Leitfähigkeit im horizontalen Messmodus höher ist als vertikalen Messmodus. Ein Erklärungsansatz für diese Besonderheit konnte nicht ermittelt werden.

5.3. Schätzung der Korngrößenverteilung anhand des Messergebnisses „elektrische Leitfähigkeit“

Mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit und ausgewählten Bodenproben zur Kalibrierung ist es möglich die Korngrößenverteilung der beiden Flächen unter Berücksichtigung einer akzeptierten Toleranz abzuschätzen. Es sind drei unterschiedliche Schätzmethode in Hinsicht auf die Auswahl der Kalibrierbodenproben entwickelt worden (s. Kap. 4.1.2.1.3). Die Schätzmethode „Wertetabelle“ und „Feldkarte“ haben sich als annähernd gleich gut erwiesen und werden bei den drei Messsystemen angewandt. Gravierende Abweichungen bei der Schätzgenauigkeit zeigt das Messsystem EM38 auf der Fläche „Im Berge“ bei der Schätzmethode „Willkürliche Auswahl“. Die Summe der Korngrößen ist deutlich mehr als 100. Bei den beiden anderen Messsystemen erweist sich diese Schätzmethode aber dennoch als anwendbar. Bewertungskriterium ist die Standardabweichung zwischen geschätztem und wahren Wert, diese ist bei der Schätzmethode „Willkürliche Auswahl“ etwas höher bei den beiden anderen Schätzmethode.

Für die Fläche „Im Berge“ kann das beste Schätzergebnis mit Hilfe der Messergebnisse des BOs - 1EP erreicht werden. Anhand der Messergebnisse des ARP03 kann für die Fläche „Wellenkamp“ die höchste Schätzgenauigkeit erreicht werden. Die Schätzgenauigkeit ist auf der Fläche „Im Berge“ höher als auf der Fläche „Wellenkamp“.

Auffällig ist, dass auf beiden Flächen Rasterzellen vorhanden sind, bei denen mit jedem Messsystem der Tongehalt unterschätzt wird. Ein Erklärungsansatz für diese Besonderheit liegt nicht vor.

Eine Feldkarte mit der geschätzten Korngrößenverteilung bietet neben der

Information über die Bodenart selbst, auch abgeleitete Informationen, z.B. nFK, Durchwurzelungstiefe (s. z.B. AG Boden 2005). Weiter kann diese Feldkarte eine Grundlage für weitere Managemententscheidungen bilden, z.B. eine der Bodenart angepasste Bodenbearbeitungstiefe und -intensität (s. z.B. VOßHENRICH 2003) oder Applikationsmenge (z.B. Variation der Saatgutmenge, eine der Bodenart angepasste Kalkung und Grunddüngung). Ebenso bietet solch eine Feldkarte die Grundlage für eine beprobungsarme Flächenkartierung zur gezielten Entnahme von Bodenproben (z.B. zur Nährstoffbestimmung).

5.4. Vergleich der drei geoelektrischen Messsysteme

Bei einem Vergleich der Messsysteme anhand der Bestimmtheitsmaße, zeigt sich für die beiden galvanisch angekoppelten Messsysteme (ARP03 und BOs - 1EP) der stärkste Zusammenhang zwischen EC und Korngrößen im Oberboden. Das BOs - 1EP weist hierbei einen besseren Zusammenhang für die Fläche „Im Berge“ auf als das ARP03. Das ARP03 hat wiederum einen besseren Zusammenhang für die Fläche „Wellenkamp“ als das BOs - 1EP. Das EM38 zeigt einen deutlich schwächeren Zusammenhang zwischen $EC_{(hor,ver)}$ und den Korngrößen sowie C_{org} auf, insbesondere zeigt die Messung im vertikalen Messmodus einen sehr geringen Zusammenhang. Die Tiefenauflösung des EM38 ist für geoelektrische Messung im Oberboden zu gering. (s. Tab. 130)

Als maßgebliche Einflussvariable auf die elektrische Leitfähigkeit zeigt sich je nach Aufbereitung der Zahlenreihen (logarithmiert bzw. nicht logarithmiert) die Korngröße Ton bzw. Sand. Die Korngröße Ton bzw. die Tonminerale haben deutlich stärker ausgeprägte elektrische Eigenschaften als die Korngrößen Sand oder Schluff. Das erklärt die Korngröße Ton als maßgebliche Einflussvariable. Da die Korngröße Sand ein schlechter elektrischer Leiter ist, kann Sand (hier im negativen Sinne als schlechter Leiter) ebenso die elektrische Leitfähigkeit maßgeblich beeinflussen (s. Kap. 2.3).

Tab. 130: Vergleich der Güte der Bestimmtheitsmaße zwischen EC und den Korngrößen sowie C_{org} im Oberboden der drei Messsysteme

Bestimmtheitsmaß zwischen	Probentiefe	Fläche	
		Im Berge	Wellenkamp
		Güte des Bestimmtheitsmaß	
EC25 und Sand	0 - 30	0.6 - 0.7 ¹	0.4 - 0.5 ³
EC25 und Schluff	0 - 30	0.4 - 0.6	0.3 - 0.4 ³
EC25 und Ton	0 - 30	0.7 - 0.8 ¹	0.4 ³
EC25 und C _{org}	0 - 30	0.2 - 0.4	0.1 - 0.3 ²
EC1 und Sand	0 - 30	0.6	0.8
EC1 und Schluff	0 - 30	0.6	0.7
EC1 und Ton	0 - 30	0.7	0.7
EC1 und C _{org}	0 - 30	0.4	0.3
EC _(hor) und Sand	0 - 30	0.2 - 0.5	0.1 - 0.5
EC _(hor) und Schluff	0 - 30	0.3 - 0.6	0.1 - 0.4
EC _(hor) und Ton	0 - 30	0.2 - 0.5	0.1 - 0.5
EC _(hor) und C _{org}	0 - 30	0.2 - 0.4	0.0 - 0.3
EC _(ver) und Sand	0 - 30	0.1 - 0.2	< 0.1
EC _(ver) und Schluff	0 - 30	0.2 - 0.3	< 0.1
EC _(ver) und Ton	0 - 30	0.1 - 0.3	< 0.1
EC _(ver) und C _{org}	0 - 30	0.2	< 0.1

¹ = mit Ausnahme vom 14.09.2005

² = mit Ausnahme vom 19.08.2005

³ = mit Ausnahme vom 19.08.2005 und 13.09.2005

Auch ist es möglich anhand der Messergebnisse der drei Systeme, eine weitere Differenzierung der Korngrößenverteilung über vorliegendes Kartenmaterial hinaus vorzunehmen. Die beiden galvanisch angekoppelten Messsysteme weisen hierbei ein besseres Ergebnis auf als das elektromagnetisch-induktive Messsystem. Die geoelektrische Differenzierung der beiden galvanisch angekoppelten Messsysteme wird durch die Korngrößenanalyse bestätigt.

Werden die geoelektrischen Messwerte zur Schätzung der Korngröße im Oberboden herangezogen, trifft die beste Aussage auf die Schätzung anhand der Messwerte für die Fläche „Im Berge“ auf das BOs - 1EP zu (s. Tab. 131).

Tab. 131: Vergleich der Differenzen zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt im Oberboden, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung der drei Messsysteme, Fläche „Im Berge“

Messsystem	BOs - 1EP	ARP03	EM38
Datum	15.03.2005	Herbst 2004	14.03.2007
Schätzmethode	Wertetabelle	Wertetabelle	Feldkarte
Korngröße	Ton	Ton	Ton
Differenz in Prozentpunkte	Anzahl der Nennung von den gesamten Rasterzellen (n= 224)		
0	22	20	12
± 1	75	67	57
± 2	122	106	98
± 3	156	135	126
± 4	148	160	145
± 5	193	177	161
± 6	214	194	178
Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung (Prozentpunkte)	0.4	0	0
Standardabweichung (nach KÖSTER 1979)	3.5	4.3	5.0
Maximale Überschätzung (Prozentpunkte)	9	13	16
Maximale Unterschätzung (Prozentpunkte)	-14	-14	-12

Für die Fläche „Wellenkamp“ zeigen die beiden galvanisch angekoppelten Messsysteme eine vergleichbare gute Schätzung (s. Tab. 132). Das Messsystem EM38 weist für die Fläche „Wellenkamp“ zwar eine ähnlich gute Schätzung der Korngröße Ton auf, aber für die Fläche „Im Berge“ eine geringe Treffergenauigkeit (s. Tab. 131 und 132). Dieser Befund ist im Hinblick auf die deutlich schwächere Güte des Bestimmtheitsmaßes erstaunlich (vgl. Tab. 127 mit 125 und 126). Werden die geschätzten Sandgehalte berücksichtigt, zeigt sich bei den beiden galvanisch angekoppelten Messsystemen für beide Flächen eine höhere Treffergenauigkeit (vgl. Tab. 21, 41 und 52 sowie Tab. 77, 98 und 108). Auch ist die deutlich geringere Fehlerwahrscheinlichkeit (bei der Auswahl der Beprobungsorte) der beiden galvanisch angekoppelten Messsysteme zu beachten.

Auffällig ist ein erhöhtes elektrisches Rauschsignal (BOs - 1EP) auf denselben Teilflächen mit einer erhöhten Suszeptibilität (EM38) (vgl. im Anhang Abb. 13 - 15 mit Abb. 19 - 21 und Abb. 38 - 40 mit Abb. 50). Hierzu wird eine gemeinsame Ursache (z.B. die Einzelfunde von Bauschutt oder die Abbrandresten von Anthrazitkohle) vermutet, welche in weiteren Untersuchungen zu klären ist.

Tab. 132: Vergleich der Differenzen zwischen wahrem und geschätztem Tongehalt im Oberboden, Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung sowie maximaler Wert der Über- und Unterschätzung der drei Messsysteme, Fläche „Wellenkamp“

Messsystem	BOs - 1EP	ARP03	EM38
Datum	17.03.2005	Herbst 2004	31.08.2005
Schätzmethode	Wertetabelle	Wertetabelle	Feldkarte
Korngröße	Ton	Ton	Ton
Differenz in Prozentpunkte	Anzahl der Nennung von den gesamten Rasterzellen (n= 117)		
0	18	14	7
± 1	48	46	28
± 2	69	70	54
± 3	91	90	77
± 4	106	98	101
± 5	112	108	110
± 6	113	113	113
Mittelwert der durchschnittlichen Abweichung (Prozentpunkte)	0	-0.4	0
Standardabweichung (nach KÖSTER 1979)	2.1	2.2	2.4
Maximale Überschätzung (Prozentpunkte)	5	4	5
Maximale Unterschätzung (Prozentpunkte)	-8	-9	-9

5.5. Korngrößenverteilung und Ertragsniveau

Nach Angaben aus der Literatur (REINER et al. 1994, 1992) sind steigende Erträge bei steigenden Tongehalten zu erwarten (s. Abb. 44 / s. Kap. 2.2). Erklären lässt sich dieses mit einem zunehmenden Speichervermögen von pflanzenverfügbarem Wasser und Nährstoffen (LENNARTZ 2004, BLUME 2004b, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, KUNTZE et al. 1994) sowie einer besseren Durchwurzelbarkeit des Bodens (AG Boden 2005, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, ROTH und WERNER 2000) (s. Kap. 2.1). Ab einer bestimmten Höhe des Tongehalts ist allerdings auch wieder mit abnehmenden Erträgen zu rechnen (s. Abb. 44 / REINER et al. 1994, 1992). Mit dem Tongehalt steigt der Totwasser-Gehalt des Bodens an, so dass auf stark tonhaltigen Böden das pflanzenverfügbare Bodenwasser wiederum abnimmt. Ein hoher Ton- und Wassergehalt hat darüber hinaus einen geringen Gasaustausch des Bodenraums zur Folge (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, KUNTZE et al. 1994).

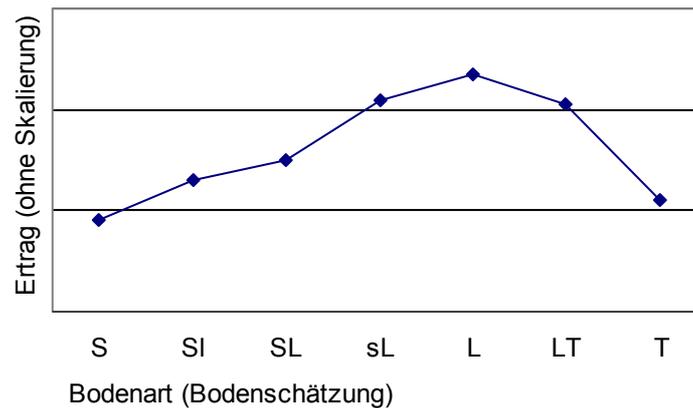


Abb. 44: Einfluss der Bodenart auf den Ertragskurvenverlauf (REINER et al. 1992, verändert)

Auch die Erwärmbarkeit toniger Böden ist im Frühjahr geringer als bei sandigen oder lehmigen Böden (HARTGE und HORN 1999). Weiter weisen diese Böden eine geringere Dränfähigkeit auf (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, HARTGE und HORN 1999, KUNTZE et al. 1994), so dass nach Niederschlägen die Stauwassergefahr groß ist. Stauende Nässe bedeutet wiederum einen gestörten Gasaustausch. Als Folge davon kann sich die Wurzelentwicklung gegenüber den sandigen oder lehmigen Standorten verzögern. (s. Kap. 2.1)

Wird der Tongehalt direkt mit dem Ertrag korreliert (s. Tab. 133), zeigt sich für die Fläche „Im Berge“ zwischen der Korngröße Ton und Ertrag 2001 ein positiver und mittel stark ausgeprägter Zusammenhang. Dieses Ergebnis ist anhand der Literatursagen erwartet worden. Wird allerdings der Zusammenhang zwischen dem Tongehalt und dem Ertrag von 2007 betrachtet, ist dieser negativ. Dieses steht den Angaben aus der Literatur entgegen (s. Kap. 2.1). Allerdings ist zu berücksichtigen, dass 2007 ein niederschlagsreiches Jahr ab Mai bis zur Ernte im August war. Es wird vermutet, dass auf Teilflächen mit einem hohen Tongehalt aufgrund des damit verbundenen hohen Bodenwassergehalts die Durchlüftung nicht optimal war. Als eine Folge davon wird eine gestörte Wurzelentwicklung angenommen und dieses kann zu geringeren Erträgen geführt haben. Für 2006 ist der Zusammenhang zwischen dem Ertrag und den Korngrößen nahe Null. Es zeigen sich also für die drei Jahre sehr unterschiedliche Zusammenhänge. Dementsprechend ist eine räumliche Reproduzierbarkeit der Erträge der Einzeljahre gering. (s. Tab. 58)

Auf der Fläche „Im Berge“ zeigt sich in jedem der drei Jahre ein unterdurchschnittlicher Ertrag auf der sandigen südlichen Teilfläche (s. Anhang Abb. 22 - 24). Diese ist nach der Bodenschätzung mit den Klassenzeichen SL 4 D 46/47 und IS D 39/41 kartiert worden.

Obwohl sich sehr unterschiedliche Korrelationskoeffizienten zwischen Ertrag und Korngröße zeigen, bildet sich ein Zusammenhang zwischen der Ertragshöhe und dem Tongehalt ab. Wird der Ertrag gegenüber dem Tongehalt aufgetragen, so steigt auf der Fläche „Im Berge“ der Ertrag mit steigenden Tongehalten bis zu einer Höhe von ca. 21% - 23% (s. Abb. 35). Für die Jahre 2006 und 2007 sinkt der Ertrag ab

einem Tongehalt über 21% - 23% wieder ab (s. Abb. 35). 2001 hingegen steigt der Ertrag über diesen Tongehalt weiter an (s. Abb. 45). Demnach wird das Ertragsniveau aus einer Kombination von Bodenart und jährlichen Witterungsverlauf bestimmt. JUNG et al. (2005) geben einen ähnlichen Zusammenhang an.

Tab. 133: Vergleich der Spearmanschen Korrelationskoeffizienten zwischen Ertrag der einzelnen Jahre und Korngröße sowie C_{org} für die Flächen „Im Berge“ und „Wellenkamp“, Bodenprobeentnahmetiefen: 0 - 30 cm, 30 - 60 cm und der Mittelwert aus 0 - 60 cm

Erntejahr	Im Berge			Wellenkamp					
	2001	2006	2007	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Korngröße / C_{org}									
S1	-0.64 **	0.13	0.44 **	0.04	0.49 **	0.57 **	0.61 **	0.44 **	0.47 **
U1	0.69 **	0.01	-0.36 **	-0.05	-0.53 **	-0.53 **	-0.60 **	-0.49 **	-0.46 **
T1	0.58 **	-0.02	-0.46 **	-0.06	-0.29 **	-0.62 **	-0.55 **	-0.30 **	-0.41 **
$C1_{org}$	0.57 **	-0.05	-0.01	-0.11	-0.41 **	-0.37 **	-0.49 **	-0.30 **	-0.41 **
S2	-0.47 **	-0.03	0.28 **	-0.11	0.46 **	0.26 **	0.49 **	0.41 **	0.33 **
U2	0.48 **	0.04	-0.18 **	0.07	-0.46 **	-0.21 *	-0.48 **	-0.41 **	-0.33 **
T2	0.44 **	0.04	-0.31 **	0.13	-0.36 **	-0.38 **	-0.42 **	-0.38 **	-0.27 **
$C2_{org}$	0.18 **	0.12	-0.16 *	0.03	-0.33 **	0.07	-0.22 *	-0.16	-0.10
S12	-0.30 **	-0.13 *	0.34 **	-0.10	0.47 **	0.34 **	0.52 **	0.40 **	0.37 **
U12	0.63 **	-0.08	-0.15 *	0.08	-0.53 **	-0.31 **	-0.54 **	-0.44 **	-0.41 **
T12	0.66 **	-0.11	-0.21 **	0.09	-0.33 **	-0.45 **	-0.46 **	-0.32 **	-0.32 **
$C12_{org}$	0.38 **	0.06	-0.10	-0.03	-0.46 **	-0.15	-0.43 **	-0.27 **	-0.31 *

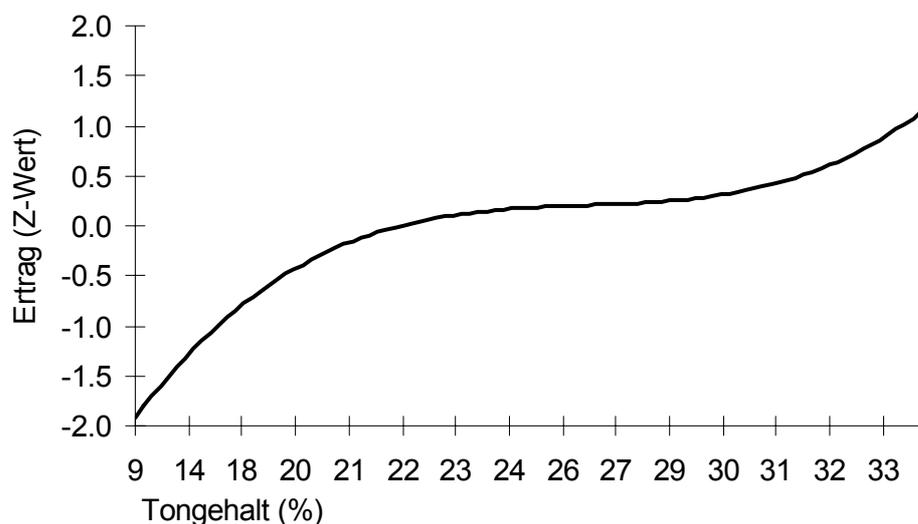


Abb. 45 : z-transformierter Ertrag 2001 auf der Fläche „Im Berge“ aufgetragen gegenüber dem aufsteigend sortierten Tongehalt

Auf der Fläche „Wellenkamp“ ist eine andere Gegebenheit feststellbar. 2001 ist der Zusammenhang zwischen den Korngrößen und dem Ertrag nahe 0. Für die Jahre 2002 bis 2006 ist der Zusammenhang zwischen dem Ertrag und den Korngrößen

Ton sowie Schluff negativ und gering bis mittel ausgeprägt. Entsprechend zeigt sich ein positiver und mittlerer Zusammenhang zwischen der Korngröße Sand und Ertrag (s. Tab. 133). Erwartet wurde ebenfalls, dass der Ertrag mit dem Tongehalt positiv korreliert. Zwar führen JUNG et al. (2005) ebenfalls negative Korrelationskoeffizienten zwischen der Korngröße Ton und dem Ertrag in einzelnen Jahren an; aber es ist zu beachten, dass bei deren Untersuchungen ein deutlich höherer Tongehalt (bis zu 56% - 63%) im Oberboden ermittelt wurde. Da der max. Tongehalt auf der Fläche „Wellenkamp“ 26% beträgt, sind diese Ergebnisse nicht vergleichbar. Als eine mögliche Erklärung der unterdurchschnittlichen Erträge auf der südlichen, tonigen Teilfläche wird eine eingeschränkte Gründigkeit vermutet. Dieses wird aus dem Klassenzeichen SL 4 Vg 34/35 abgeleitet (s. Abb. 18) und des Weiteren von der kleinräumigen Kartierung z.T. bestätigt (s. Abb. 21). Im Klassenzeichen ist für das Bewertungskriterium „Entstehung“ entsprechend für einen Verwitterungsboden (V) mit hohem Skelettanteil (g) ein „Vg“ angegeben. Dieses gibt einen Hinweis auf einen eingeschränkten durchwurzelbaren Bodenraum (SAUER et al. 2003) und damit eine geringere nutzbare Feldkapazität (VORDERBRÜGGE et al. 2006) als beim angrenzenden Klassenzeichen SL 3 D 52/53. Es kann zwar anhand der Korngrößenanalyse erkannt werden, dass der Tongehalt deutlich sinkt, der Ertrag aber steigt auf dieser Teilfläche. So ist die Auswirkung auf das Ertragsniveau des sinkenden Tongehalts geringer als die verminderte Durchwurzelbarkeit.

Wird für die Fläche „Wellenkamp“ der Ertrag gegenüber der Korngröße Ton aufgetragen, zeigt sich auf Teilflächen mit einem Tongehalt von 11% bis ca. 18% ein über- bzw. durchschnittlicher Ertrag (s. Abb. 43 oder Abb. 46). Ab diesem Tongehalt fällt der Ertrag kontinuierlich ab; je nach Jahres-Witterungsverlauf zeigt sich eine jährliche Variation (vgl. Abb. 43 und Abb. 46).

Die räumliche Reproduzierbarkeit des Ertrags kann auf der Fläche „Wellenkamp“ von gering bis hoch beschrieben werden; JUNG et al. (2005) und SCHMERLER et al. (2001) weisen ebenfalls auf eine stark schwankende räumliche Reproduzierbarkeit der Erträge hin.

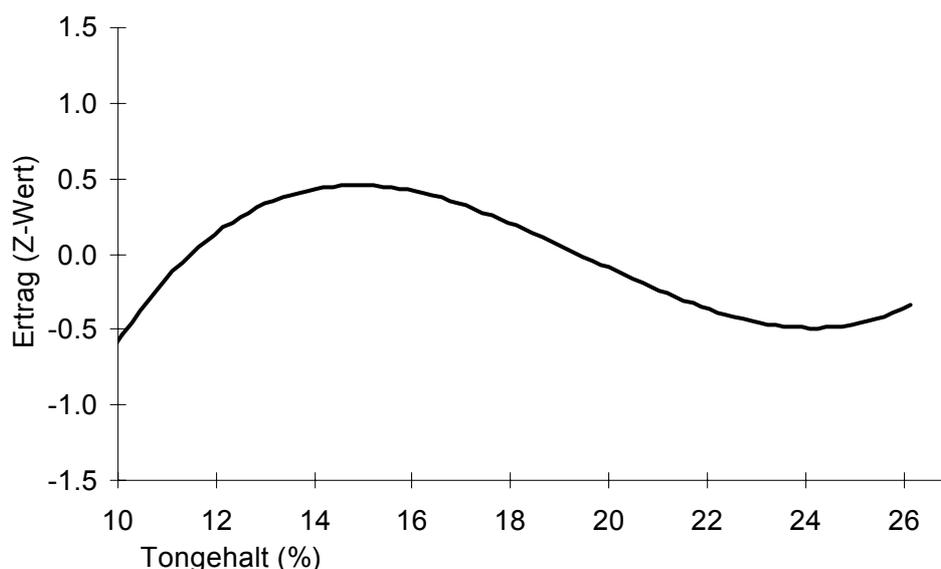


Abb. 46: z-transformierter Ertrag 2001 auf der Fläche „Wellenkamp“ aufgetragen gegenüber dem aufsteigend sortierten Tongehalt

Geoelektrische Messergebnisse und Ertragniveau

Da auf der Fläche „Im Berge“ eine enge Beziehung zwischen EC25 und der Korngröße Ton besteht (s. Tab. 15), verhält sich der Zusammenhang zwischen EC25 und Ertrag ähnlich. Es zeigt sich ebenfalls ein schwacher Zusammenhang zwischen EC25 und Ertrag 2007 (s. Kap. 4.1.5.3). Wird der Ertrag gegenüber dem aufsteigenden EC25 aufgetragen (s. Abb. 47), ergibt sich ein ähnlicher Trend wie in Abb. 35.

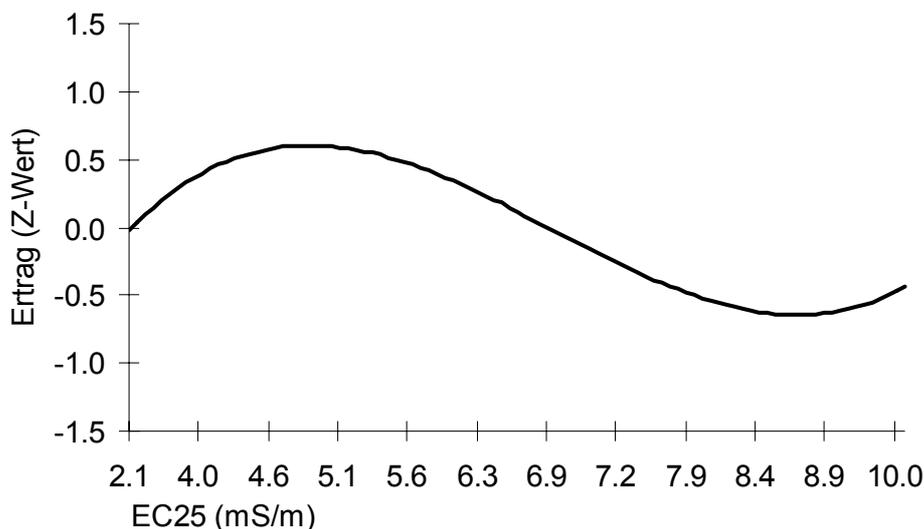


Abb. 47: z-transformierter Ertrag 2007 auf der Fläche „Im Berge“ aufgetragen gegenüber dem aufsteigend sortierten EC25

Auch auf der Fläche „Wellenkamp“ besteht nur ein schwacher Zusammenhang zwischen Ertrag 2005 und EC25 (s. Kap. 4.2.5.3). Wird hier der Ertrag 2005 gegenüber dem aufsteigenden EC25 aufgetragen (s. Abb. 48), sind Unterschiede zu Abb. 43 erkennbar. Ein überdurchschnittlicher Ertrag ergibt sich auf den Rasterzellen mit einem niedrigen EC25. Diese sind bei der Frühjahrsmessung 2005 auf den sandigen Bereichen gemessen worden. Es wird vermutet, dass auf dem sandigen, am Hangende liegenden Bereich Hangabzugswasser bzw. der Einfluss von Grundwasser den Ertrag positiv gefördert hat. Evtl. können damit auch die hohen EC25 in diesem Bereich am 19.08.2005 erklärt werden (s. Anhang Abb. 31).

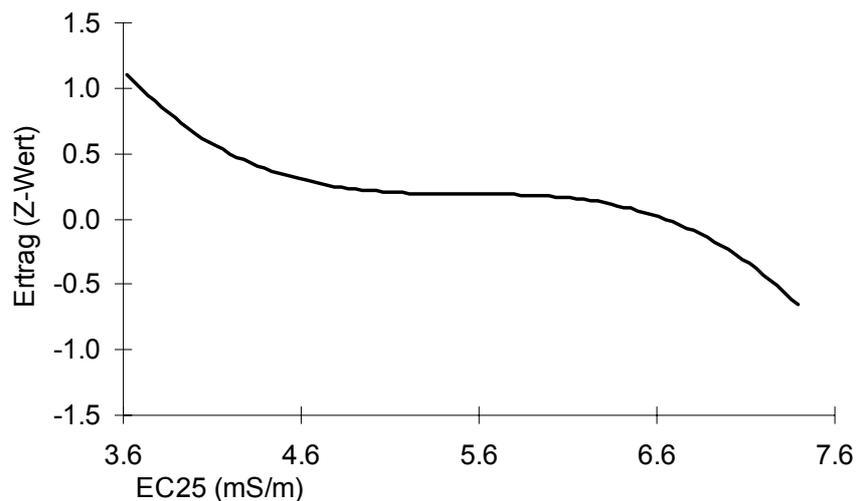


Abb. 48: z-transformierter Ertrag 2005 auf der Fläche „Wellenkamp“ aufgetragen gegenüber dem aufsteigend sortierten EC25

Das Ergebnis einer multiplen Regressionsanalyse zwischen geoelektrischen Messwerten und Ertrag zeigt für beide Flächen ein hohes Bestimmtheitsmaß (B^2) (s. Tab. 134 und auch Tab. 61 und Tab. 116).

Tab. 134: Vergleich der Ergebnisse der Regressionsanalyse zwischen Ertrag und geoelektrischen Messwerte für die Fläche „Im Berge“ und „Wellenkamp“

B^2	Korrigiertes B^2	Änderung B^2	Einflussvariablen
Ergebnis Regressionsanalyse für das Erntejahr 2007, Fläche „Im Berge“			
0.601	0.591	0.014	EC3, EC1, $_{ele}Rausch$, BodTemp., $EC_{(ver)}$
Regression: Ertrag 2007 = 0.075 * EC3 + (-0.076) * EC1 + 1.074 * $_{ele}Rausch$ + (-0.118) * BodTemp + 0.039 * $EC_{(ver)}$ + 3.202			
Ergebnis Regressionsanalyse für das Erntejahr 2005, Fläche „Wellenkamp“			
0.754	0.741	-0.001	$_{ele}Rausch$, $EC_{(ver)}$, EC25, EC3, C_{ele} , EC2
Regression: Ertrag 2005 = (-2.950) * $_{ele}Rausch$ + (-0.124) * $EC_{(ver)}$ + 0.533 * EC25 + 0.168 * EC3 + 0.001 * C_{ele} + (-0.266) * EC2 + 6.663			

Dieses Ergebnis überrascht, da die geoelektrischen Messwerte einzeln betrachtet nur eine schwache Beziehung zum Ertrag zeigen. Ebenso ist auffällig, dass das elektrische Rauschen auf beiden Flächen mit in die Regression aufgenommen wird. Das Bestimmtheitsmaß verbessert sich dadurch deutlich (s. Tab. 61 und 116). Auf der Fläche „Im Berge“ besteht ein positiver Zusammenhang und auf der Fläche „Wellenkamp“ ein negativer Zusammenhang zwischen elektrischem Rauschen und Ertrag (s. Tab. 134). Zur Ursachenklärung des erhöhten elektrischen Rauschsignals und dessen Zusammenhang zur Ertragshöhe bedarf es weiterer Untersuchungen. Der Zusammenhang des Messwertes EC3 auf den Ertrag ist auf beiden Flächen

positiv (s. Tab. 134). Auf der Fläche „Im Berge“ wird dieser Messwert als maßgebliche Einflussvariable genannt. Ebenso beschreibt $EC_{(ver)}$ einen positiven Bezug zum Ertrag auf der Fläche „Im Berge“ (s. Tab. 134). Beide Messwerte bilden hauptsächlich Informationen unterhalb des Oberbodens ab, welche von Bedeutung für die Durchwurzelung des Unterbodens und der einhergehenden Ertragsentwicklung sind (s. Kap. 2.1).

Insbesondere der April 2007 war sehr niederschlagsarm, so dass die Wasserversorgung der Pflanze aus tieferen Bodenbereichen erfolgte. Gleichzusetzen ist ein steigender EC_3 oder $EC_{(ver)}$ mit steigenden Tongehalten und damit ein steigender Bodenwassergehalt. Auf beiden Flächen ist der Zusammenhang zwischen Ertrag und EC_1 negativ. Für die Fläche „Im Berge“ wird eine Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums auf den tonigen Bereichen (mit hohen EC_1) durch die Folgen der hohen Niederschlagsmengen ab Mai 2007 vermutet. Auf der Fläche „Wellenkamp“ ist EC_1 als maßgebliche Einflussvariable genannt; der Zusammenhang zwischen EC_1 und dem Ertrag ist negativ (s. Tab. 116). Hier ist vermutlich der Einfluss der Gründigkeit, insbesondere auf der tonigen Teilfläche auf den Ertrag größer als die Bodenart.

Zur Ableitung des Zusammenhangs zwischen den geoelektrischen Messwerten und dem Ertrag bedarf es einer aufwändigen Betrachtung und Analyse der Messergebnisse. Trotz allem lässt sich anhand der geoelektrischen Messungen, insbesondere mit den galvanisch angekoppelten Messsystemen, Unterschiede in der Bodenart erkennen, und es ist möglich einen Zusammenhang zur Ertragsbildung herzustellen.

Für weitere Managemententscheidungen (z.B. Kalkung, Grunddüngung, gezielte Anpassung der Bearbeitungstiefe an die jeweilige Bodenart) kann eine generierte Feldkarte mit der geschätzten Korngrößenverteilung genutzt werden. Ebenso ist es möglich, anhand der generierten Feldkarte mit der geschätzten Korngrößenverteilung bzw. mit der interpolierten elektrischen Leitfähigkeit ein Beprobungsplan der Fläche für eine beprobungsarme und gezielte Beprobung zu erstellen. So können Teilflächen nach Höhe der elektrischen Leitfähigkeit abgegrenzt und gezielt beprobt werden (HINCK et al. 2008, BOESS 2007, DOMSCH 2003).

5.6. Einfluss der Bodenfeuchte auf die Messergebnisse des BOs - 1EP

Zwischen dem Bodenwassergehalt und der Bodenart besteht ein kausaler Zusammenhang (s. Kap. 2.1). So wird der Bodenwassergehalt bei Böden ohne Stauwasser- und Grundwassereinfluss mit einem annähernd gleich bleibenden Humusgehalt maßgeblich von der Bodenart bestimmt (LENNARTZ 2004, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, KUNTZE et al. 1994). Somit sind hohe Zusammenhänge zwischen der Korngröße und dem Bodenwassergehalt zu erwarten, dieses trifft besonders auf die Fläche „Im Berge“ zu (s. Tab. 117). Für die Fläche „Wellenkamp“ sind die Zusammenhänge zwischen dem Bodenwassergehalt und der Korngröße sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt schwächer

(s. Tab. 118). Es wird vermutet, dass der Bodenwassergehalt noch von weiteren Faktoren beeinflusst; so ist die nördliche und eher sandige Teilfläche z.B. zum Teil grundwassernahe (s. Kap. 3.2.2). Hier kann sich durch den Grundwassereinfluss ein höherer Bodenwassergehalt einstellen als für den entsprechenden Sandgehalt zu erwarten wäre.

Die Zusammenhänge zwischen dem Bodenwassergehalt und der Korngröße sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt sind für die beiden Flächen unterschiedlich stark ausgeprägt. Das spiegelt sich auch im Einfluss der maßgeblichen Einflussvariablen auf die elektrische Leitfähigkeit wider. So wird die elektrische Leitfähigkeit auf der Fläche „Im Berge“ für die Mehrzahl der Messtermine von der Korngröße Sand und dem organischen Kohlenstoffgehalt beeinflusst (s. Tab. 119). Für die Fläche „Im Berge“ wird die getroffene Aussage aufrechterhalten, dass die elektrische Leitfähigkeit stark von der Bodenart beeinflusst wird. Weiter gilt es, dass die Bodenart den Bodenwassergehalt im hohen Maße beeinflusst. Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Resultat aus beiden Faktoren.

Für die Fläche „Wellenkamp“ wird für die meisten Termine als maßgebliche Einflussvariable der elektrischen Leitfähigkeit der Bodenwassergehalt aufgeführt (s. Tab. 120). Auf der Fläche „Wellenkamp“ korreliert der Bodenwassergehalt nur mäßig mit der Bodenart (s. Tab. 118) und somit wird die elektrische Leitfähigkeit entsprechend in einem erheblichen Maße vom Bodenwasser beeinflusst.

Die elektrische Leitfähigkeit und die elektrische Kapazität weisen untereinander eine hohe Korrelation auf. Doch zeigt sich bei einem Vergleich der maßgeblichen Einflussvariablen der elektrischen Leitfähigkeit und elektrischer Kapazität für einige Termine eine Differenzierung. Das elektrische Rauschen wird an den überwiegenden Messterminen auf beiden Flächen maßgeblich vom organischen Kohlenstoffgehalt beeinflusst. (s. Tab. 119 und Tab. 120)

6. Abschließende Betrachtung von Pflanzenstandort und geoelektrischer Messung

Das Ertragspotenzial eines Standortes wird maßgeblich durch die Ton- und Humusgehalte des Bodens bestimmt, da beide Größen einen bedeutenden Einfluss auf die Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit haben. Mit zunehmenden Ton- und Humusgehalten steigt in der Regel der Wasser- und Nährstoffgehalt des Bodens an (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002, KUNTZE et al. 1994) (s. Kap. 2.1). Ebenso bestimmen die Wasser- und Nährstoffgehalte die elektrische Leitfähigkeit des zu untersuchenden Bodens (elektrolytische Leitfähigkeit / s. Kap. 2.3). Häufig wird in der Literatur explizit der Tongehalt als Zielgröße einer geoelektrischen Messung auf landwirtschaftlichen Flächen genannt. In der Regel steigt die elektrische Leitfähigkeit mit zunehmendem Tongehalt (HEINIGER et al. 2003, MUELLER et al. 2003, SUDDUTH et al. 2003, DURLESSER 1999) (s. Kap. 2.5.2). Indirekt kann also innerhalb einer Fläche mit steigender elektrischer Leitfähigkeit ein ansteigender Tongehalt angenommen werden. Zu beachten ist, dass die elektrische Leitfähigkeit direkt von der Ionenkonzentration des Elektrolyts bestimmt wird, welche wiederum in den meisten Fällen in Abhängigkeit zum Tongehalt steht (s. Kap. 2.3.1). Die Korngröße Ton ist sowohl ein wichtiger Parameter für das bodenbürtige Ertragspotenzial als auch indirekt eine maßgebliche Einflussgröße für die elektrische Leitfähigkeit des Bodens. Weitere Bodeneigenschaften, z.B. der Grund- oder Stauwassereinfluss sind anhand weiterer Informationsquellen (z.B. Bodenkarten) bei der Interpretation der geoelektrischen Ergebnisse zu berücksichtigen.

Die geoelektrischen Messergebnisse des BOs - 1EP (Bodensensorsystem der Fachhochschule Osnabrück) belegen, dass es möglich ist, mit dem Messprinzip „Erfassung des komplexen elektrischen Leitwerts“ mit einem Elektrodenpaar in einer bestimmaren Tiefe (z.Z. bis 25 cm) in einem bestimmten Messvolumen zuverlässige Messungen vorzunehmen. Im Vergleich mit zwei anderen anerkannten Messsystemen, zeigen die Ergebnisse des BOs - 1EP ebenso gute Zusammenhänge wie das Messsystem ARP03. Das dritte Messsystem EM38 weist einen schwächeren Zusammenhang zur Korngröße auf.

Es ist möglich, mit allen drei Messsystemen die Korngrößenverteilung im Oberboden anhand der elektrischen Leitfähigkeit mit einer Toleranz abzuschätzen. Die geschätzte Korngrößenverteilung wird in Form einer Feldkarte dargestellt. Die Schätzgenauigkeit ist bei den beiden galvanisch angekoppelten Messsystemen höher. Eine weitere wichtige Erkenntnis ist, dass eine Fehlinterpretation der geoelektrischen Messergebnisse zur Auswahl der Beprobungsorte bei den Messsystemen ARP03 und BOs - 1EP gering ist.

Prinzipiell lassen sich Unterschiede in der Bodenart mit Hilfe der geoelektrischen Messung erkennen. Aus diesen Daten generierte Feldkarten, bilden die Grundlage zur Erstellung eines Plan für eine beprobungsarme Flächenkartierung, aus denen anschließend weitere Managemententscheidungen, z.B. notwendige Kalkmengen oder die Applikationshöhe von Düngermitteln abgeleitet werden. Diese Maßnahmen können helfen, die Pflanzenproduktion zu optimieren, die Standortpotenziale besser

auszuschöpfen und umweltschutzrelevante Belange stärker zu berücksichtigen. Ein Zusammenhang zwischen dem Ertrag und den Korngrößen oder der elektrischen Leitfähigkeit kann anhand des vorliegenden Datenmaterials und einer ausführlichen Betrachtung und Analyse abgeleitet werden. Es ist möglich, Teilflächen mit unter-, über- oder durchschnittlichen Ertragspotenzialen zu erkennen. Teilweise können die Ertragsunterschiede anhand der Bodenart erklärt werden. Neben der Bodenart können auch Erkenntnisse aus der Bodenschätzung ergänzend herangezogen werden, um Ertragsunterschiede zu erklären. Ebenso ist es möglich, vorliegendes bodenkundliches Kartenmaterial mit Hilfe einer geoelektrischen Messung weiter zu differenzieren.

Bei einem Vergleich der drei Messsysteme weisen die beiden galvanisch angekoppelten Messsysteme einen deutlich besseren Zusammenhang zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und der Korngrößenzusammensetzung sowie dem organischen Kohlenstoffgehalt im Oberboden auf. Werden nun die beiden galvanisch angekoppelten Messsysteme verglichen, stellt sich die Frage nach den besonderen Vorteilen des BOs - 1EP.

Gegenüber anderen geoelektrischen Messsystemen bietet das BOs - 1 EP den Vorteil, dass Messtiefe und -volumen genau bekannt und definiert sind. Messstörungen durch möglicherweise vorliegende Schichtungen im Boden wirken nur minimal auf das Messergebnis. Der derzeitige Einsatzbereich des BOs - 1EP sind gezielte Messungen im Oberboden. Auch ist zu beachten, dass eine Messung mehrere Messgrößen als Ergebnis liefert. So besteht z.B. die Möglichkeit die elektrische Leitfähigkeit mit Hilfe der erfassten Bodentemperatur auf eine normierte Temperatur von 25°C zu verrechnen. Die beiden weiteren Messgrößen elektrische Kapazität der Plattenanordnung und das elektrische Rauschen des Messsignals liefern zusätzliche Informationen oder weisen auf weitere Besonderheiten hin, z.B. besteht ein ungeklärter Zusammenhang zwischen dem elektrischen Rauschen und dem Ertrag (s. Kap. 4.1.5.4 und 4.2.5.4). Die vorliegenden Ergebnisse weisen auf einen weiteren Forschungsbedarf insbesondere an den beiden zuletzt genannten Messgrößen hin. Weiter bietet das vorgestellte Messprinzip die Voraussetzung für eine Implementierung direkt an landwirtschaftliche Geräte. Das weitere Nutzungs- und Entwicklungspotenzial des vorgestellten Messsystem BOs - 1EP ist also sehr vielseitig und eine gute Grundlage für weitere Forschungsarbeiten.

7. Zusammenfassung

Die Fachhochschule Osnabrück hat ein eigenes Bodensensorsystem (BOs - 1EP) entwickelt. Neu an diesem System ist die Nutzung des Messprinzips „Erfassung des komplexen elektrischen Leitwerts“ mit nur einem Elektrodenpaar für geoelektrische Online-Messungen im Feld. In der vorliegenden Arbeit wird die Funktions- und Einsatzfähigkeit dieses neuen Messsystems vorgestellt und überprüft.

Der Einsatz dieses Messsystems erfolgte auf zwei Flächen der Fachhochschule Osnabrück. Beide Flächen sind in einem 10 x 10 Meter Raster bodenkundlich kartiert. Es liegen Laboranalyseergebnisse der Korngrößen Sand, Schluff und Ton sowie des organischen Kohlenstoffgehalts (C_{org}) aus den Tiefen von 0 bis 30 cm und von 30 bis 60 cm vor. Die Spannweiten der ermittelten Werte, z.B. des Tongehalts, sind auf beiden Flächen sehr unterschiedlich. Auf der Fläche „Im Berge“ (2,4 ha) zeigen sich im Oberboden beispielsweise Tongehalte von 9% bis 40% und für die Fläche „Wellenkamp“ (1,4 ha) beträgt die Wertespanne für diese Tiefe 11% bis 26%. Des Weiteren ist die gravimetrische Bodenfeuchte an mehreren Messterminen für bestimmte Positionen im Feld bestimmt worden. Die Messergebnisse des BOs - 1EP, die Korngrößen, C_{org} und die Bodenfeuchte werden zueinander in Beziehung gesetzt und analysiert.

Eine weitere Überprüfung der Ergebnisse des vorgestellten Messprinzips geschieht mit Hilfe zweier anerkannter Messsysteme (ARP03 und EM38), welche ebenfalls auf beiden Flächen eingesetzt werden. Ein Vergleich zwischen der elektrischen Leitfähigkeit (EC) des Bodens und den Korngrößen sowie C_{org} zeigt den Zusammenhang eines jeden Messsystems zur Korngröße und C_{org} auf. Die Stärke des Zusammenhangs wird anhand des Korrelationskoeffizienten und dem Bestimmtheitsmaß dargestellt. Dabei sind für die beiden galvanisch angekoppelten Messsysteme (ARP03 und BOs - 1EP) deutlich höhere Korrelationskoeffizienten und stärkere Bestimmtheitsmaße als für das elektromagnetische Messsystem EM38 feststellbar. Werden die beiden galvanisch angekoppelten Messsysteme miteinander verglichen, zeigen sich ähnlich gute Zusammenhänge zwischen EC und den Korngrößen.

Für eine beprobungsarme Kartierung der räumlichen Korngrößenverteilung innerhalb einer Fläche wird eine Schätzung anhand der elektrischen Leitfähigkeit durchgeführt. Mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit und ausgewählten Bodenproben wird die jeweilige zu schätzende Korngröße ermittelt. Auf der Fläche „Wellenkamp“ ist eine zufrieden stellende Schätzung der räumlichen Korngrößenverteilung mit den Ergebnissen aller drei Messsysteme möglich. Für die Fläche „Im Berge“ kann ebenfalls eine zufrieden stellende Schätzung durchgeführt werden, dies gilt insbesondere für die beiden galvanisch angekoppelten Messsysteme. Das Messsystem EM38 weist teilweise eine geringere Treffergenauigkeit auf, zudem erhöht sich bei einer falschen Vorgehensweise durch die Auswahl der Kalibrier-Bodenproben die Fehlerquote deutlich.

Für den Landwirt stellt sich zwangsläufig die Frage nach dem Zusammenhang zwischen der Korngrößenverteilung und dem Ertragspotenzial innerhalb einer Fläche. Ein überdurchschnittliches Ertragsniveau ist auf der Fläche „Im Berge“ je nach Witterungsverlauf für einen Tongehalt ab ca. 16% bis 21% feststellbar. Im

trockenen Sommer 2001 steigt der Ertrag mit weiter zunehmendem Tongehalt an; allerdings sinkt der Ertrag im „nassen“ Jahr 2007 bei einem Tongehalt von mehr als 27% wieder auf ein unterdurchschnittliches Niveau ab. Für die Fläche „Wellenkamp“ ist ein überdurchschnittlicher Ertrag auf den Teilflächen mit einem Tongehalt von 11% bis ca. 18% erkennbar. Werden die Erträge den einzelnen geoelektrischen Messwerten gegenübergestellt, zeigen sich schwache Zusammenhänge. Eine multiple Regressionsanalyse mit mehreren geoelektrischen Messwerten zeigt jedoch hohe Bestimmtheitsmaße zwischen den Messwerten und dem Ertrag.

Der Einfluss der Bodenfeuchte auf die gemessene elektrische Leitfähigkeit des BOs - 1EP ist für beide Flächen unterschiedlich. Auf der Fläche „Im Berge“ wird für die Mehrzahl der Messtermine die elektrische Leitfähigkeit von der Korngröße Sand und C_{org} bestimmt. Für die Fläche „Wellenkamp“ zeigt sich der Bodenwassergehalt für die Mehrzahl der Messtermine als maßgebliche Einflussvariable. Zwei weitere Messgrößen sind die elektrische Kapazität und das elektrische Rauschen. Als maßgebliche Einflussvariablen zeigen sich für die elektrische Kapazität zum Großteil dieselben Einflussvariablen wie für die elektrische Leitfähigkeit, allerdings bestehen für einige Messtermine Differenzen. Das elektrische Rauschen wird an den überwiegenden Messterminen auf beiden Flächen vom organischen Kohlenstoffgehalt bestimmt.

Die aufgeführten Ergebnisse und Vergleiche, insbesondere solche mit dem anerkannten Messsystem ARP03, bestätigen die Funktionsfähigkeit des BOs - 1EP. Es ist möglich mit dem Messprinzip „Erfassung des komplexen elektrischen Leitwerts“ mit nur einem Elektrodenpaar zuverlässig geoelektrische Messungen im Feld vorzunehmen.

8. Summary

The University of Applied Sciences Osnabrück (FH OS) has developed its own soil sensor system (BOs - 1EP). What is novel about this system is the use of the measuring principle “recording of complex electric conductance” with just one pair of electrodes for geoelectrical online measurements in the field. The operational capability and utilisability of this system are presented in this thesis.

The BOs - 1EP was used on two of its test fields. Both fields were meticulously pedologically mapped in a 10 m x 10 m grid. Laboratory analysis results are available for the grain sizes of sand, silt and clay, as well as for the organic carbon content (C_{org}) from the depths of 0 to 30 cm and 30 to 60 cm. The range, for instance, of the clay content, differs greatly in both fields. In the “Im Berge” field (2.4 ha) clay contents of 9% to 40% are revealed in the surface soil, and for the “Wellenkamp” field (1.4 ha) the range of clay contents for this depth is between 11% and 26%. Furthermore, the gravimetric soil moisture was determined for certain positions in the field on several measuring dates. The measurement results of BOs - 1EP are correlated with the grain sizes, C_{org} and the soil moisture, and analysed.

The measurement results of the presented measuring principle are subjected to further tests with the assistance of two acknowledged measuring systems (ARP03 and EM38), which are also employed on both fields. A comparison of the electric conductance (EC) of the soil and the grain sizes as well as C_{org} reveals the correlation of each measuring system to the grain size and C_{org} . The correlation strength is portrayed using the correlation coefficient and the coefficient of determination. In so doing, the two galvanically coupled measuring systems (ARP03 and BOs - 1EP) revealed considerably higher correlation coefficients and stronger coefficients of determination than for the electromagnetic measuring system EM38. If the two galvanically coupled measuring systems are compared with one another, similarly good correlations between EC and the grain sizes are revealed.

In order to be able to map the spatial grain size distribution within an area with a minimum of sampling, an estimation is carried out on the basis of the electric conductance. The grain size to be estimated is determined with the aid of the electric conductance and selected soil samples. On the “Wellenkamp” field, satisfactory estimations of the spatial grain size distribution are possible using the results of all three measuring systems. A satisfactory estimation can also be carried out for the “Im Berge” field, in particular for the two galvanically coupled measuring systems. The EM38 measuring system sometimes reveals lower accuracy, and the error rate increases considerably if the calibration soil samples are selected using an incorrect method.

Agriculturalists may be interested in the correlation between the grain size distribution and yield potential within a field. An above-average yield level is ascertainable for a clay content from approx. 16% to 21% on the “Im Berge” field, depending on the weather patterns. In the dry summer of 2001, the yield rises further with increasing clay content; however, the yield falls again to a below-average level in the “wet” year of 2007 from a clay content of approx. 27%. For the “Wellenkamp” field, an above-average yield on the partial areas with a clay content of 11% to

approx. 18% is revealed. If the yields of the individual geoelectrical measurements are compared, weak correlations are revealed. A multiple regression analysis with several geoelectrical measured values, however, reveals high coefficients of determination between the measured values and the yield.

The influence of the soil moisture on the electric conductance of the BOs - 1EP differs for the two fields. On the "Im Berge" field, the electric conductance is determined on most measurement dates by the grain size of sand and C_{org} . For the "Wellenkamp" field, the soil water content is shown to be the decisive influence for the majority of the measurement dates. Two further indicators are capacitance and electrical noise. For capacitance, the same decisive influences are generally revealed as for electric conductance, although differences occurred on some measurement dates. Electrical noise from both fields was determined from the organic carbon content on the majority of measuring dates.

The presented results and comparisons, in particular with the acknowledged measuring system ARP03, prove the operational capability of the BOs - 1EP. It is possible to reliably carry out geoelectrical measurements in the field with the measuring principle "recording of complex electric conductance" with just one pair of electrodes.

9. Literatur

ADAMCHUCK, V. I., HUMMEL J.W., MORGAN, M.T., UPADHYAYA, S.K. (2004): On-the-go soil sensors for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture Jahrgang 44, S. 71 - 91.

AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5.Aufl. Ad-hoc Arbeitsgruppe Boden der geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

ANDERSON-COOK, C.M., ALLEY, M. M., ROYGARD, J.K.F., KHOSLA, R., NOBLE, R.B., DOOLITTLE, J.A. (2002): Differentiating Soil Types Using Electromagnetic Conductivity and Crop Yield Maps. Soil Sci. Soc. Am. J., Jahrgang 66, S. 1562 - 1570.

BANTON, O., SEGUIN, M.K., CIMON, M.A. (1997): Mapping Field-Scale Physical Properties of Soil with Resistivity. Soil Sci. Soc. Am. J., Jahrgang 61, S. 1010 - 1017.

BERKTOLD, A. (1997): Geoelektrik - Vierpunkt-Verfahren, S. 97 - 129 in Umweltgeophysik, Hrsg: Beblo, M. Ernst&Sohn Verlag, Berlin

BIKERMANN, J. J. (1935): Die Oberflächenleitfähigkeit und ihre Bedeutung. Kolloid-Zeitschrift 72, S. 100 - 108.

BLECK, R. D. (1965): Zur Durchführung der Phosphatmethode. Ausgrabungen und Funde, Band 10, Jahrgang 1965, S. 213 - 218.

BLINDOW, N., RICHTER, Th., PETZOLD, H. (2005): Bodenradar, S. 389 - 425 in Geophysik, Hrsg.: Knödel, K., Krummel, H., Lange, G. Springer- Verlag, Berlin.

BLUME 2004a:

BLUME, H.-P.: Böden als Naturkörper, S. 4 - 28 in Handbuch des Bodenschutzes, 3. Auflage, Hrsg.: Blume, H.-P. ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg am Lech, 2004.

BLUME 2004b:

BLUME, H.-P.: Böden als Filter, Puffer und Transformator, S. 120 - 130 in Handbuch des Bodenschutzes, 3. Auflage, Hrsg.: Blume, H.-P. ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg am Lech, 2004.

BodSchätzDB: Durchführungsbestimmungen zum Bodenschätzungsgesetz, RGBI I 1935, 198, 276.

BodSchätzG: Gesetz über die Schätzung des Kulturbodens, RGBI I 1934, 1050.

BOESS, J. (2007): Nutzung geophysikalischer Verfahren zur Verbesserung hoch auflösender Bodenkarten für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung. Z. dt. Ges. Geologie, Jahrgang 158(1), S. 165 - 176.

BOESS, J. (2004): Kartierkonzept zur Erstellung einer hoch auflösenden Bodenkarte für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung, S. 35 - 45 in Arbeitsheft Boden. Hrsg.: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.

BREVIK, E.C., FENTON, T.E., HORTON, R. (2004): Effect of Daily Soil Temperature Fluctuations on Soil Electrical Conductivity as Measured with Geonics EM-38. Precision Agriculture, Jahrgang 5, S. 145 - 152.

BROZIO, S (2004): Teilflächenspezifische Stickstoff-Düngung, S. 4.2-17 - 4.2-25, in Precision Farming (KTBL-Schrift 419), Hrsg.: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. Druckerei Lokay, Reinheim.

BRÜNING, M., KIELHORN, A., BIERMANN, J., GERVENS, T., RAHN, O. (2007): Statistikwerkzeuge in OpenJUMP - Implementationen der PIROL Edition, Online-Wiki der FOSSGIS-Konferenz, Humboldt- Universität zu Berlin. Internetadresse: http://www.projekt-pirol.de/uploads/media/Statistik_in_OpenJUMP_01.pdf (19.07.2009)

CHRISTY, C.D., DRUMMOND, P., LUND, E. (2006): Precision agriculture applications of an on-the-go soil reflectance sensor. In Proceedings of the 8th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management, Editor: P. C. Roberts, Minneapolis, USA. Internetadresse: http://www.veristech.com/pdf_files/Optical_8thintlconf.pdf (19.07.2009)

CLAASSEN, N. (1993): Die Bedeutung des Aneignungsvermögens der Pflanzen für den Nährstoffhaushalt, S. 85 - 170 in Berichte über die Landwirtschaft, Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Sonderheft 2007, Hrsg.: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Paul Parey Verlag, Hamburg.

CORNELL, R.M., SCHWERTMANN, U. (2003): The Iron Oxides. 2. Auflage. WILEY-VCH Verlag, Weinheim.

CORWIN, D.L., LESCH, S.M., SHOUSE, P.J., SOPPE, R., AYARS, J.E. (2003): Identifying Soil Properties that Influence Cotton Yield Using Soil Sampling Directed by Apparent Soil Electrical Conductivity. Agron. J., Jahrgang 95, S. 352 - 364.

DABAS, M. (2004), persönliche Auskunft, Firma GEOCARTA, Paris, Frankreich.

DABAS, M., PERRAD, C., MECJLER, P., TABBAGH, J., BOISGONTIER, D. (2002): A Study of the Spatial Correlation between highly sampled Data (Electrical Resistivity, Yield) and other Pedo-Agronomic Parameters, S. 799 - 809. In Proceedings of the 6th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management, Editor: P. C. Roberts. 14.07. - 17.07.2002 Minneapolis, USA.

DENKER, S., VOLK, L., LÜCKE, W. (2007): Systematic approaches of soil mechanical stress induction in arable lands, S. 441 - 445. Im Tagungsband der 65. Internationalen Tagung "LABD.TECHNIK – AgEng 2007" (VDI-Bericht 2001) vom 09.11. - 10.11.2007 in Hannover.

DIEPENBROCK, W., ELLMER, F., LÉON, J. (2005): Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.

DIN ISO Norm: Handbuch der Bodenuntersuchung, Grundwerk 2000, 26. Ergänzungslieferung Dez. 2007. Wiley VCH, Weinheim. (ISBN 3-527-19080-5)

DUMBECK, G., (1986): Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. Dissertation an der Justus-Liebig Universität zu Gießen

DURLESSER, H. (1999): Bestimmung der Variation bodenphysikalischer Parameter in Raum und Zeit mit elektromagnetischen Induktionsverfahren. Shaker Verlag, Stuttgart. Dissertation an der Technischen Universität München.

DOBERS, E. S. (2002): Methoden der Standorterkundung als Grundlage des DGPS-gestützten Ackerbaus. Göttinger Bodenkundliche Berichte 115. Dissertation an der Georg-August-Universität Göttingen.

DOOLITTLE, J.A., INDORANTE, S.J., POTTER, D.K., HEFNER, S.G., McCAULEY, W.M. (2002): Comparing three geophysical tools for locating sand blows in alluvial soils of southeast Missouri. *Journal of Soil and Water Conservation*, Jahrgang 57, S. 175 - 182.

DOMSCH, H. (2004): Aufnahme und Interpretation der elektrischen Bodenleitfähigkeit für eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung, S. 11 - 20 in Arbeitsheft Boden. Hrsg.: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.

DOMSCH, H., GIEBEL, A. (2004): Estimation of Soil Textural Features from Soil Electrical Conductivity Recorded Using the EM38. *Precision Agriculture*, Jahrgang 5, S. 389 - 409.

DOMSCH, H., PETELKAU, H. (1997): Messplatz zur Kennzeichnung des Bodengefüges, S. 53 - 68 in: Tagungsband „Konservierende Bodenbearbeitung auf Lehmböden“, Hrsg.: Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig - Völkenrode (FAL), Eigenverlag.

DZIEIA, W., KAMMERER, J., OBERTHÜR, W., SIEDLER, H.-J., ZASTROW, P. (2001): *Elektrotechnische Grundlagen der Elektronik*, 6.Auflage. Pflaum Verlag, München.

EMEIS, N. (2007a): Numerische Rechnung EM38 (unveröffentlicht). Teilprojektleiter Bodensensorik im Forschungsschwerpunkt PIROL an der Fachhochschule Osnabrück

EMEIS, N. (2007b), mündliche Auskunft. Teilprojektleiter Bodensensorik im Forschungsschwerpunkt PIROL an der Fachhochschule Osnabrück

EMEIS, N. (2007c): Numerische Rechnung - BOs - 1EP (Bodensensorsystem Fachhochschule Osnabrück) (unveröffentlicht). Teilprojektleiter Bodensensorik im Forschungsschwerpunkt PIROL an der Fachhochschule Osnabrück

EHLERS, W. (1996): *Wasser in Boden und Pflanze*. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.

FINKE, L. (1971): *Die Verwertung der Bodenschätzungsergebnisse für die Landschaftsökologie*. Ferdinand Schöningh, Paderborn.

FRITSCH, V. (1949): *Grundzüge der angewandten Geoelektrik*. Manzsche Verlags- und Universitätsbuchhandlung, Wien.

FROHNE, H., LÖCHERER, K.-H., MÜLLER, H. (2002): *Moeller - Grundlagen der Elektrotechnik*, 19. Auflage. Teubner Verlag, Stuttgart.

GEBBERS, R., LÜCK, E. (2006): Geoelektrische Methoden zur Bodenkartierung in der Landwirtschaft, S. 3.2.3-113 - 3.2.3-135 in *Precision Farming (KTBL-Schrift 419)*, Hrsg.: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. Druckerei Lokay, Reinheim (Ergänzungslieferung 8/2006).

GEBBERS, R. (2004a): Teilflächenspezifische Grunddüngung, S. 4.2-5 - 4.2-12, in *Precision Farming (KTBL-Schrift 419)*, Hrsg.: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. Druckerei Lokay, Reinheim.

GEBBERS, R. (2004b): Mehrjährige Auswertung von Ertragskarten, S. 3.2.-77 - 3.2.-82, in Precision Farming (KTBL-Schrift 419), Hrsg.: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. Druckerei Lokay, Reinheim.

GEONICS (2005): Bedienungsanleitung EM38, Stand Januar 2005, Firma Geonics Ltd., Ontario, Kanada

GREINWALD, S. und THIERBACH, R. (1997): Elektrische Eigenschaften der Gesteine, S. 89 - 96 in Umweltphysik, Hrsg.: Beblo, M. Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

GÜNZEL, F. (1997): Einfluss der Geologie auf die elektrische Leitfähigkeit - Detektion von Grundwasser-Kontaminationen, S. 153 - 174 in Umweltgeophysik. Hrsg.: Martin Beblo. Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

HARRACH, T. (2004): Interpretation der Bodenschätzungsdaten, insbesondere der Daten am höchsten und niedrigsten bewerteter Böden in unterschiedlichen Naturräumen, S. 19 - 20 in Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Mitteilungen, Band 104, Hrsg.: Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft. Eigenverlag, Oldenburg.

HARRACH, T., VORDERBRÜGGE, T. (1991): Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. Berichte über Landwirtschaft 204 in Sonderheft: „Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit“, S.69 - 82, Band 2. Verlag Paul Parey, Hamburg.

HARTGE, K, HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. 3. Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

HEIMSOTH, W. (2006): Vergleich der Bodenfeuchtigkeit und Messergebnisse vom Bodensensorsystem FH, EM38, TDR- und FDR-Sonde unter Berücksichtigung der Bodenart. Diplomarbeit an der Fachhochschule Osnabrück.

HEINIGER, R.W., McBride, R.G., CLAY, D.E. (2003): Using Soil Electrical Conductivity to Improve Nutrient Management. Agron. J., Jahrgang 95, S. 508 - 519.

HERBST, R. (2004): Ertragskartierung von Getreide, S. 3.2-73 - 3.2-76 in Precision Farming (KTBL-Schrift 419), Hrsg.: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. Druckerei Lokay, Reinheim.

HINCK, S., MUELLER, K., EMEIS, N., CHRISTEN, O. (2008): Abgrenzen von Teilflächen mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit (Anwendungsbeispiel), in Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, S. 289 - 290, Band 20, Hrsg.: S. Hoffmann, A. Herrmann, F. Taube; Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V. Verlag Schmidt&Klaunig KG, Kiel.

HINCK, S., MUELLER, K., EMEIS, N. CHRISTEN, O. (2006): Development of a multi-sensor system for the low-sample recording of soil properties, S. 892 - 896 in Proceedings der 17. Konferenz der International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO) vom 28.08.2006 - 03.09.2006 in Kiel.

HEZARJARIBI, A., SOURELL, H. (2007): Feasibility Study of Monitoring the Total Available Water Content Using Non-Invasive Electromagnetic Induction-Based and Electrode-Based Soil Electrical Conductivity Measurements. Irrig. And Drain. Jahrgang 56, S. 53 - 65.

HORN, R. (2004): Böden als Pflanzenstandorte, S. 93 - 108 in Handbuch des Bodenschutzes, 3. Auflage, Hrsg.: Blume, H.-P. ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg am Lech.

- HORN, R. (1999b): Unterbodenverdichtung - gibt es gesicherte Hinweise auf nachhaltige Ertragseinbußen?. *Wasser & Boden*, Jahrgang 51(12), S. 15 - 18.
- HORN, R. (1992): Böden als Pflanzenstandorte, S. 72 - 97 in: *Handbuch des Bodenschutzes*, Hrsg.: BLUME, H.P., 2. Auflage. Ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg/Lech.
- ISYS (2002): Abschlussbericht des Interdisziplinären Forschungsprojekts „Intelligente Sensorsysteme (ISYS)“ an der Fachhochschule Osnabrück, S. 10 - 22. Eigenverlag, Osnabrück.
- JÄGER, W. (2005): Spezifischer elektrischer Widerstand, S. 1009 - 1013 in *Geophysik*, Hrsg.: Knödel, K., Krummel, H., Lange, G. Springer-Verlag, Berlin.
- JOHNSON, C.K, DORAN, J.W., DUKE, H.R., WIENHOLD, B.J., ESKRIDGE, K.M., SHANAHAN, J.F. (2001): Field-Scale Electrical Conductivity Mapping for Delineating Soil Condition. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Jahrgang 65, S. 189 - 1837.
- JUNG, W. K., KITCHEN, N. R., SUDDUTH, K. A., KREMER, R. J., MOTAVALLI, P.P. (2005): Relationship of Apparent Soil Electrical Conductivity to Claypan Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Jahrgang 69, S. 883 - 892.
- KATASTERAMT OSNABRÜCK (2001a): Flurkarte des Flurstücks 30/6 (1:2000). Gemarkung Lechtingen. Gemeinde Wallenhorst. Osnabrück.
- KATASTERAMT OSNABRÜCK (2001b): Flurkarte des Flurstücks 14/1(1:2000). Gemarkung Rulle. Gemeinde Wallenhorst. Osnabrück.
- KELLER, G.V., FRISCHSKNECHT, F.C (1977): *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press, New York.
- KIELHORN, A. und TRAUTZ, D. (2007): Site specific contribution margin as decision support for flexible landuse. In *Poster Proceedings of the 6th European Conference on Precision Agriculture (ECPA)*, Skiathos, Greece. Internetadresse: http://www.piol.fh-osnabrueck.de/fileadmin/users/159/upload/pdf_events/KIELHORN_TRAUTZ_6thECPA_2007_economic_A0.pdf (19.07.2009)
- KIELHORN, A., BIERMANN, J., GERVENS, T., RAHN, O., TRAUTZ, D. (2007): Precision Farming mit freiem OpenSource-GIS, S. 107 - 110 im Tagungsband der 27. GIL-Jahrestagung vom 05. - 07.03.2007 in Stuttgart.
- KIELHORN, A., Rahn, O. (2006): PIROL - OpenJUMP: Precision Farming als Managementsystem in der informationsgeleiteten Landbewirtschaftung. Dauerhaftes Online-Wiki der FOSSGIS-Konferenz 2006, Universität Bonn. Internetadresse: http://www.fossgis.de/konferenz/wiki/PIROL_-_Open_Jump:_Precision_Farming_als_Managementsystem_in_der_informationsgeleiteten_Landbewirtschaftung (19.07.2009)
- KIELHORN, A. (2004): Mündliche Auskunft, wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsschwerpunkt PIROL an der Fachhochschule Osnabrück.
- KILIAN, B (2004): Kriterien für die ökonomische Bewertung einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung, S. 6-1 - 6-25, in *Precision Farming (KTBL-Schrift 419)*, Hrsg.: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. Druckerei Lokay, Reinheim.

- KITCHEN, N.R., DRUMMOND, S. T., LUND, E.D., SUDDUTH, K. A., BUCHLEITER, G.W. (2003): Soil Electrical Conductivity and Topography Related to YIELD for Three Contrasting Soil-Crop Systems. *Agron. J.*, Jahrgang 95, S. 483 - 495.
- KLASSEN, H. (1984): Geologie des Osnabrücker Berglandes. Naturwissenschaftliches Museum Osnabrück, Osnabrück.
- KLITZSCH, N. (2004): Ableitung von Gesteinseigenschaften aus Messungen der spektralen induzierten Polarisierung (SIP) an Sedimentgesteinen. Dissertation an der Universität zu Leipzig.
- KNÖDEL, K., KRUMMEL, H., LANGE, G. (2005): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3, Geophysik, 2. Aufl. Springer Verlag, Berlin.
- KÖHLER, W., SCHACHTEL, G., VOLESKE, P. (2001): Biostatistik, 3. Auflage. Springer Verlag, Berlin/ Heidelberg.
- KÖSTER, H. M. (1979): Die chemische Silikatanalyse. Springer-Verlag, Berlin.
- KRAVCHENKO, A.N., BOLLERO, G.A., OMONODE, R.A., BULLOCK, D.G. (2002): Quantitative Mapping of Soil Drainage Classes Using Topographical Data and Soil Electrical Conductivity. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, Jahrgang 66, S. 235 - 243.
- KÜNKEL, K.-J., BACHMANN, G., BÖKEN, H. (2001): Einleitung. In: Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenverdichtung und Bodenerosion, Seite 9 - 12, Hrsg.: BMVEL, Juli 2001.
- KUCHLING, H. (2001): Taschenbuch der Physik. Fachbuchverlag Leipzig, München.
- KUHLMANN, H. (1988): Ursachen und Ausmaß der N-,P-,K- und Mg-Ernährung der Pflanze aus dem Unterboden. Genehmigte Habilitationsschrift am Fachbereich für Gartenbau der Universität Hannover.
- KUNTZE, H., ROESCHMANN, G., SCHWERDTFEGGER, G. (1994): Bodenkunde, 5. Auflage. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.
- KUTSCHERA, L. (1960): Wurzelatlas. DLG - Verlag, Frankfurt a.M.
- LABJACK: LABJACK U12 User's Guide, Revision 1.04, Stand 05.11.2002.
- LAGALY, G. (1993): Reaktionen der Tonminerale, S. 89 - 167, in Tonminerale und Tone, Hrsg.: JASMUND, K. und G. LAGALY. Steinkopf Verlag, Darmstadt.
- LANGE, G. (2005): Gleichstromelektrik, S. 128 - 172 in Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3, Geophysik, Hrsg.: KNÖDEL, K., KRUMMEL, H., LANGE, G. Springer Verlag, Berlin.
- LENNARTZ, B. (2004): Boden- und Landschaftswasserhaushalt, S. 29 - 58 in Handbuch des Bodenschutzes, 3. Auflage, Hrsg.: Blume, H.-P. ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg am Lech.
- LOZÁN, J.L., KAUSCH, H. (2007): Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler, 4. Auflage. Wissenschaftliche Auswertung (Verlag), Hamburg.
- LÜCK, E. (2006): persönliche Auskunft. Erika Lück, Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften.

LÜCK, E., RÜHLMANN, J., SPANGENBERG, U. (2005): Physical background of soil EC mapping: laboratory, theoretical and field studies, S. 417 - 424. In: Precision Agriculture 2005. Editor: Stafford, J.V. Wageningen Academic Publishers, 2005.

LUND, E.D., ADAMCHUK, V.I., COLLINGS, K.L., DRUMMOND P.E. CHRISTY, C.D. (2005): Development of soil pH and lime requirement maps using on-the-go soil sensors, S. 457 - 464. In: Precision Agriculture 2005. Editor: Stafford, J.V. Wageningen Academic Publishers, 2005. (ISBN 9-076-99869-8) Internetadresse: http://www.veristech.com/pdf_files/5thECPA.pdf (19.07.2009)

MÄHNER, K.-T. (1999): Wachstum und Ertrag von Getreide nach mechanischer Bodenbelastung in unterschiedlichen Bearbeitungssystemen. Dissertation an der Georg-August-Universität zu Göttingen. Veröffentlicht als elektronische Dissertation unter: <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/1999/maehner/inhalt.htm> (19.07.2009)

MAIDL, F.-X., BRUNNER, R., STICKSEL, E., FISCHBECK, G. (1999): Ursachen kleinräumiger Ertragsschwankungen im bayerischen Tertiärhügelland und Folgerung für eine teilschlagbezogene Düngung. J. Plant. Nutr. Soil. Sci, Jahrgang 162, S. 337 - 342.

MAIER, G., SCHOLGER, R., SCHÖN, J. (2006): The influence of soil moisture on magnetic susceptibility measurements. Journal of Applied Geophysics, Jahrgang 59, S. 162 - 175.

McNEILL, J.D. (1980): Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical Note TN-5 der Firma Geonics Ltd., Ontario, Kanada

MILITZER, H., PORSTENDORFER, G., RÖSLER, R., WEBER, F. (1985): Gleichstrommethoden, S. 30 - 90 in Angewandte Geophysik, Band 2, Geoelektrik – Geothermik – Radiometrie – Aerogeophysik. Hrsg.: Militzer, H. und Weber, F. Springer Verlag, Wien.

MUELLER, K. (2000): Böden des Osnabrücker Berglandes. In: Exkursionsführer, Böden der Geest, Moor und Berg-Landschaft und anthropogene Böden im westlichen Niedersachsen. Hrsg.: MUELLER, K., MEUSER, H., HUISCHEN, L., GROMES, R., Fachhochschule Osnabrück, Fachbereich Agrarwissenschaften, Osnabrück.

MUELLER, T.G., HARTSOCK, N.J., STOMBAUGH, T.S., SHEARER, S.A., CORNELIUS P.L., BARNHISEL, R.I. (2003): Soil Electrical Conductivity Map Variability in Limestone Soil Overlain by Loess. Agron. J., Jahrgang 95, S. 496 - 507.

MUNDRY, E. (1985): Gleichstromverfahren, S. 299 - 338 in Angewandte Geowissenschaften , Band II. Hrsg.: Bender, F. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

NDS. LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 1976

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung: Bodenkarte von Niedersachsen (1:25000). Grundlagenkarte. Blatt 3614 Rulle. Hannover, 1976.

NDS. LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG 1979

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung: Geologische Karte von Niedersachsen (1:25000), Blatt 3614 / Wallenhorst. Hannover, 1979

OSTERMANN, S. (2005): Realisierung der KRIG- Interpolation und Integration in einen Geodatenbetrachter, Diplomarbeit Fachhochschule Osnabrück, Forschungsschwerpunkt PIROL, 2005

- PERRON, I., CLUIS, D.A., NOLIN, M.C., LECLERC, M.L. (2002): Influence of Microtopography and Soil Electrical Conductivity on Soil Quality and Crop Yields, S. 1001 - 1014 in Proceedings of the 6th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management, Editor: P. C. Roberts. July 14 - 17, 2002 Minneapolis, MN, USA.
- PETER, M., SAUER, S., SIEBERT, S. (1999): Die Bodenschätzung als großmaßstäbliche Datenbasis für Bodenschutzplanungen, S. 62 - 67 in Bodenschutz 2/1999
- PFEIFER, E.-M., SAUER, S., ENGEL, E. (2003): Bodenschätzung und Bodenbewertung. Verlag Chmielorz GmbH, Wiesbaden.
- PREGLA, R. (1998): Grundlagen der Elektrotechnik. Hüthig GmbH, Heidelberg.
- PREIS, M., SAUER, S., PETER, M., HARRACH, T. (2001): Bodenkundliche Aussagekraft von Bodenwertzahlen der Bodenschätzung, S. 545 - 546 in Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Mitteilungen, Band 96/2, Hrsg.: Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft. Eigenverlag, Oldenburg.
- RADIC, T., WELLER, A. (2005): Induzierte Polarisation, S. 174 - 214 in Geophysik, Hrsg.: Knödel, K., Krummel, H., Lange, G. Springer-Verlag, Berlin.
- RAUPENSTRAUCH, G. J., SELIGE, T., BOBERT, J. (2002): Geophysikalische Erfassung von Standorteigenschaften, S. 53 - 64 im Tagungsband Precision Agriculture Tage, Hrsg.: Werner, A., Jarfe, A. Tagung: Precision Agriculture: Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis, 13.-15. März 2002 in Bonn. KTBL-Sonderveröffentlichung 038.
- REICHE, E.-W. (2004): Berücksichtigung ökologischer sensibler Zonen, S 4.3-1 - 4.3-6, in Precision Farming (KTBL-Schrift 419), Hrsg.: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. Druckerei Lokay, Reinheim.
- REINER, L., BECKER, F.A., KLASSEN, M., MEIER, B., REHSE, E., ULONSKA, E., PRÖSTLER, V., MANGSTL, A., DÖRRE, R.: (1994): SOMMERGERSTE aktuell. 2. Auflage. DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
- REINER, L., BUHLMANN, V., GRASER, S., HEIßENHUBER, A., KLASSEN, M., PFEFFERKORN, V., SPANAKAKIS, A., STRAß, F. u.a. (1992): Weizen aktuell. 2. Auflage. DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
- RENGER, M., WESSOLEK, G., GÄTH, S. (1993): Nährstoffhaushalt des Unterbodens und seine Bedeutung für die Nährstoffversorgung der Pflanzen, S. 121 - 140 in Berichte über die Landwirtschaft, Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Sonderheft 2007, Hrsg.: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Paul Parey Verlag, Hamburg.
- REX, M., HARRACH, T. (1984): Die Bedeutung der Unterbodenbeschaffenheit für die Ertragsbildung von Getreide. Feldversuche auf verschiedenen Bodentypen mit variiertem Nährstoffversorgung, S. 384 - 394 in Landwirtschaftliche Erzeugung, Produktverarbeitung, Lebensmittelqualität. Schriftenreihe. Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft Nr. 40.
- RHOADES, J.D., MANTEGHI, N.A., SHOUSE, P.J., ALVES, W.J. (1989): Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibrations. Soil. Sci. Soc. Am. J., Jahrgang 53/ 1989a, S. 433 - 439.

- ROBERT, P. (1993): Characterization of soil conditions at the field level for soil specific management. *Geoderma*, Jahrgang 60, S. 57 - 72.
- ROBINSON, D.A., LEBRON, S.M., LESCH, S.M., SHOUSE, P. (2004): Minimizing Drift in Electrical Conductivity Measurements in High Temperature Environments using the EM-38. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Jahrgang 68, S. 339 - 345.
- ROEMER, Th., SCHEFFER, F. (1949): *Lehrbuch des Ackerbaues*. Paul Parey Verlag, Berlin.
- ROTH, R. (2004): Teilflächenspezifische Aussaat von Getreide, Speziell Winterweizen, S. 4.2-13 - 4.2-16, in *Precision Farming (KTBL-Schrift 419)*, Hrsg.: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. Druckerei Lokay, Reinheim.
- ROTH, D., WERNER, D. (2000): Bewässerung. Kapitel 5.3.4.2., 9. Ergänzungslieferung Oktober 2000 in: *Handbuch der Bodenkunde*. Hrsg.: BLUME, H.P., FELIX-HENNIGSEN, P., FISCHER, W.R., FREDE, H.G., HORN, R., STAHR, K., Erscheinungsjahr des Grundwerks 1996. ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg/Lech.
- ROTHKEGEL, W. (1950): *Geschichtliche Entwicklung der Bodenbonitierung und Wesen und Bedeutung der deutschen Bodenschätzung*. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.
- RÖTSCHER, T. (2008): Beitrag von Bodenschätzungsdaten zur Klimadiskussion, S. 287 - 290 in *UBA-Workshop (Texte 25/2008) „Böden im Klimawandel - Was tun?!“*, Hrsg.: Umweltbundesamt, Eigenverlag, Dessau-Roßlau. Internetadresse: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3495.pdf> (19.07.2009)
- RÖTSCHER, T., CHRISTEN, O., SPILKE, J. (2008): Zusammenhänge zwischen Wertzahlen der Bodenschätzung und dem Naturalertrag auf einem Ackerschlag in Thüringen II. Vortrags- und Exkursionstagung der Arbeitsgruppe Bodenschätzung und Bodenbewertung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft am 11. und 12. September 2008 in Weimar, Berichte der DBG, im Druck.
- SACHS, L. (2002): *Angewandte Statistik - Anwendung statistischer Methoden*. 11. Auflage. Springer-Verlag, Berlin.
- SAUER, S., MILLER, R., PETER, M., VORDERBRÜGGE, Th. (2003): „Bodenfunktionsbezogene Auswertung von Bodenschätzungsdaten für Hessen und Rheinland-Pfalz - Methodenentwicklung“, S. 557 - 558 in *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Mitteilungen*, Band 102/2, Hrsg.: Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft. Eigenverlag, Oldenburg.
- SATLOC (2004): *Technisches Datenblatt des GPS-Empfängers AgIQ*
- SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002
Blume, H.-P., Brümmer, G.W., Schwertmann, U., Horn, R., Kögel-Knabner, I., Stahr, K., Auerswald, K., Beyer, L., Hartmann, A., Litz, N., Scheinost, A., Stanjek, H., Welp, G., Wilke, B. M.: *Lehrbuch für Bodenkunde*, 15 Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 2002.
- SCHEUERMANN, A., SCHLAEGER, S., BECKER, R., SCHÄDEL, W., SCHUMANN, R. (2002): Nutzen der TDR-Messtechnik zur Beurteilung ungesättigter Böden in der Geotechnik. *BAW-Kolloquium, der Einfluss von Lufteinschlüssen auf die Strömungs- und Druckdynamik*, Karlsruhe.

SCHMERLER, J., HEISIG, M., SCHOBER, H., SCHELLPEPER, G. ADAMEK, R. GROTHE, K., GIEBEL, A., FLEMMING-FISCHER, E., FRANK, U., ANLAUFF, A., WENDT, U. (2001): Ergebnisse über Verfahren zur teilflächenspezifischen Pflanzenproduktion. Forschungsbericht 2001/1 des ATB. Eigenverlag, Institut für Agrartechnik Bormin e.V.

SCHMITT, D. (2002): Charakterisierung der Bindung von Metallionen an natürliche organische Substanzen und deren Auswirkungen auf Adsorption und Transport. Genehmigte Dissertation an der Universität Fridericiana Karlsruhe (TH).

SCHOPPER, J.R., KULENKAMP J.M., DEBSCHÜTZ, W.G. (2005): Grenzflächenleitfähigkeit, S. 1014 - 1017 in Geophysik, Hrsg.: Knödel, K., Krummel, H., Lange, G. Springer-Verlag, Berlin.

SCHÖN, J. (1983): Petrophysik. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

SCHRÖTKE, A. (2001): Bodenkundliche Grundlagenuntersuchungen auf ausgewählten Teilflächen der FH Osnabrück zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung (Precision Farming). Diplomarbeit an der Fachhochschule Osnabrück.

SCHUTTE, B. (2005): Bestimmung von Bodenunterschieden durch Zugkraftmessungen bei der Bodenbearbeitung. Dissertation an der Universität Hohenheim. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG 429.

SCHWARK, A., RECKLEBEN, Y. (2006): Das EM38 - System als Bodensensor für die Praxis. Sonderdruck aus der Kartei für Rationalisierung 4.1.0, Hrsg.: Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft (RKL), Rendsburg.

SEIDEL, K. (2005): Prinzip der Methode, S. 241 - 265 in Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3, Geophysik, Hrsg.: KNÖDEL, K., KRUMMEL, H., LANGE, G. Springer Verlag, Berlin.

SHEETS, K.R., HENDRICKX, J.M.H. (1995): Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induct. Wat. Res. Res. J., Jahrgang 31, Heft 10, S. 2401 - 2410.

SLAVICH, P.G., PETTERSON, G.H. (1990) Estimating average rootzone salinity from electromagnetic induction (EM-38) measurements. Aust. J. Soil Res., Jahrgang 28, S. 453 - 463.

SPOSITO, G. (1998): Bodenchemie. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

SUDDUTH, K.A., KITCHEN, N.R., BOLLERO, G.A., BULLOCK, D.G., WIEBOLD, W.J. (2003): Comparison of Electromagnetic Induction and Direct Sensing of Soil Electrical Conductivity. Agron. J., Jahrgang 95, S. 472 - 482.

SUDDUTH, K.A., KITCHEN, N.R., BATCHELOR, W.D., BOLLERO, G.A., BULLOCK, D.G., CLAY, D.E., Palm, H.L., WIEBOLD, W.J., PIERCE, F.J., SCHULER, R.T., THELEN, K.D. (2002): Characterizing Field-Scale Soil Variability across the Midwest with Soil Electrical Conductivity. S. 1015 - 1031 in Proceedings of the 6th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management, Editor: P. C. Roberts. July 14 - 17, 2002 Minneapolis, MN, USA.

SUDDUTH, K.A., DRUMMOND, S.T., KITCHEN, N.R. (2001): Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. Comput. Electron. Agric., Jahrgang 31, S. 239 - 264.

- TENHOLTERN, R. (2000): Bodengefüge, Durchwurzelung und Ertrag als Indikatoren für Lockerungsbedürftigkeit und Lockerungserfolg auf rekultivierten Standorten im rheinischen Braunkohlerevier. Dissertation an der Justus-Liebig Universität zu Gießen. Erschienen in der Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskultur und Landschaftsökologie, Band 28.
- TIPLER, P.A. (2000): Physik, 3. korrigierter Nachdruck der 1.Auflage. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg.
- TN31: Technical Note TN-31 der Firma Geonics Limited, Internetadresse: <http://www.geonics.com/pdfs/technicalnotes/tn31.pdf> (19.07.2009)
- TRAUTZ, D., DRESSLER, v. H., KIELHORN, A., STILLGER, V., STRACKE, F. (2007): Precision Farming as an instrument for nature conservation objectives in agricultural landuse. In Poster Proceedings of the 6th European Conference on Precision Agriculture (ECPA), Skiathos, Greece. Internetadresse: http://www.piol.fh-osnabrueck.de/fileadmin/users/159/upload/pdf_events/TRAUTZ_et-al_6thECPA_2007_integration_A0.pdf (19.07.2009)
- U.S.D.A Agricultural Handbook 60 (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils, Hrsg.: L.A. Richards, U.S. Govt. Print. Off., Washington, D.C.
- VDLUFA: Methodenbuch - Die Untersuchung von Böden. 4. Teillieferung 2004. VDLUFA Verlag, Darmstadt, 1991.
- VORDERBRÜGGE, Th., FRIEDRICH, K., SAUER, S., PETER, M., MILLER, R. (2006): -Methodendokumentation- Ableitung der nFK für Acker aus dem Klassenzeichen der Bodenschätzung. Internetadresse: http://www.hlug.de/medien/boden/fisbo/bs/doku/zwischenbericht2005/CD%20Zwischenbericht%202005/methode_FK_al_20060329.pdf (19.07.2009)
- VORDERBRÜGGE, Th., MILLER, R., PETER, M., SAUER, S. (2004): Ableitung der nutzbaren Feldkapazität aus den Klassenzeichen der Bodenschätzung, S. 33 - 34 in Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Mitteilungen, Band 104, Hrsg.: Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft. Eigenverlag, Oldenburg.
- VOßHENRICH, H.H. (2003): Ortspezifische Bodenbearbeitung und Einsparpotenzial - die wichtigen Schritte zum Erfolg, S. 87 - 95 in Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 256, Hrsg.: Artmann, R., Bockisch, F.-J., Eigenverlag.
- WAGNER, P. (2004): Wirtschaftlichkeit von Precision Farming - Methoden und Möglichkeiten der Wirtschaftlichkeitsüberprüfung im landwirtschaftlichen Unternehmen, S. 6-31 - 6-53, in Precision Farming (KTBL-Schrift 419), Hrsg.: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. Druckerei Lokay, Reinheim.
- WEIDEL, P. (2005): Grundlagen, S. 71 - 100 in Geophysik, Hrsg.: Knödel, K., Krummel, H., Lange, G. Springer-Verlag, Berlin.
- WIESEHOFF, M. (2005): Teilflächenspezifische Aussaat von Winterweizen. Dissertation an der Universität Hohenheim. Eigenverlag.
- ZIECHMANN, W., MÜLLER-WEGENER, U. (1990): Bodenchemie. Wissenschaftsverlag, Mannheim.

Weitere Quellen:

Geocarta: <http://82.225.240.170/geocarta/fr/home.html>

Veris Technologie: <http://www.veristech.com>

Anhang

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Technische Daten ausgewählter Bodensensorsysteme.....	a
Tab. 2: Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Korngröße sowie C_{org} von diversen ausgewählten Autoren	b

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Räumliche Verteilung des Sandgehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Im Berge“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“	d
Abb. 2: Räumliche Verteilung des Schluffgehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Im Berge“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“	e
Abb. 3: Räumliche Verteilung des Tongehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Im Berge“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“	f
Abb. 4: Räumliche Verteilung des organischen Kohlenstoffgehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Im Berge“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“	g
Abb. 5: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 15.03.2005, Interpolationsmethode „Kriging“	h
Abb. 6: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 19.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“	i
Abb. 7: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 30.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“	j
Abb. 8: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 06.10.2005, Interpolationsmethode „Kriging“	k
Abb. 9: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 14.03.2007, Interpolationsmethode „Kriging“	l
Abb. 10: Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität (Angabe in pF) der Plattenanordnung auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 15.03.2005, Interpolationsmethode „Kriging“	m
Abb. 11: Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität (Angabe in pF) der Plattenanordnung auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 30.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“	n
Abb. 12: Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität (Angabe in pF) der Plattenanordnung auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 14.03.2007, Interpolationsmethode „Kriging“	o
Abb. 13: Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens (Angabe dimensionslos) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 15.03.2005, Interpolationsmethode „Kriging“	p

Abb. 14: Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens (Angabe dimensionslos) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 30.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“	q
Abb. 15: Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens (Angabe dimensionslos) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 14.03.2007, Interpolationsmethode „Kriging“	r
Abb. 16: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC ₁ / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: 0 - 50 cm, Messsystem: ARP03, Messtermin: Herbst 2004, Interpolationsmethode „Kriging“	s
Abb. 17: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC _{hor} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Im Berge“, Messsystem: EM38 (horizontaler Messmodus), Messtermin: 14.03.2007, Interpolationsmethode „Kriging“	t
Abb. 18: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC _{ver} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Im Berge“, Messsystem: EM38 (horizontaler Messmodus), Messtermin: 14.03.2007, Interpolationsmethode „Kriging“	u
Abb. 19: Räumliche Verteilung der Suszeptibilität (Angabe dimensionslos) auf der Fläche „Im Berge“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 30.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“	v
Abb. 20: Räumliche Verteilung der Suszeptibilität (Angabe dimensionslos) auf der Fläche „Im Berge“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 15.03.2006, Interpolationsmethode „Kriging“	w
Abb. 21: Räumliche Verteilung der Suszeptibilität (Angabe dimensionslos) auf der Fläche „Im Berge“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 14.03.2007, Interpolationsmethode „Kriging“	x
Abb. 22: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Im Berge“, Erntejahr 2001, Frucht: Einkorn, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“	y
Abb. 23: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Im Berge“, Erntejahr 2006, Frucht: Dinkel, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“	z
Abb. 24: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Im Berge“, Erntejahr 2007, Frucht: Sommerhafer, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“	aa
Abb. 25: Räumliche Verteilung des Sandgehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Wellenkamp“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“	bb
Abb. 26: Räumliche Verteilung des Schluffgehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Wellenkamp“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“	cc
Abb. 27: Räumliche Verteilung des Tongehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Wellenkamp“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“	dd
Abb. 28: Räumliche Verteilung des organischen Kohlenstoffgehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Wellenkamp“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“	ee

- Abb. 29: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 17.03.2005, Interpolationsmethode „Kriging“ ff
- Abb. 30: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 21.03.2005, Interpolationsmethode „Kriging“ gg
- Abb. 31: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 19.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“ hh
- Abb. 32: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 31.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“ ii
- Abb. 33: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 19.09.2005, Interpolationsmethode „Kriging“ jj
- Abb. 34: Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität (Angabe in pF) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 17.03.2005, Interpolationsmethode „Kriging“ kk
- Abb. 35: Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität (Angabe in pF) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 31.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“ ll
- Abb. 36: Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität (Angabe in pF) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 13.09.2005, Interpolationsmethode „Kriging“ mm
- Abb. 37: Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität (Angabe in pF) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 19.09.2005, Interpolationsmethode „Kriging“ nn
- Abb. 38: Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens (Angabe dimensionlos) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 17.03.2005, Interpolationsmethode „Kriging“ oo
- Abb. 39: Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens (Angabe dimensionlos) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 31.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“ pp
- Abb. 40: Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens (Angabe dimensionlos) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 19.09.2005, Interpolationsmethode „Kriging“ qq
- Abb. 41: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_1 / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: 0 - 50 cm, Messsystem: ARP03, Messtermin: Herbst 2004, Interpolationsmethode „Kriging“ rr
- Abb. 42: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_{hor} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (horizontaler Messmodus), Messtermin: 31.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“ ss

Abb. 43: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_{ver} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 31.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“	tt
Abb. 44: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_{hor} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (horizontaler Messmodus), Messtermin: 19.09.2005, Interpolationsmethode „Kriging“	uu
Abb. 45: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_{ver} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 19.09.2005, Interpolationsmethode „Kriging“	vv
Abb. 46: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_{hor} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (horizontaler Messmodus), Messtermin: 23.03.2006, Interpolationsmethode „Kriging“	ww
Abb. 47: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_{ver} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 23.03.2006, Interpolationsmethode „Kriging“	xx
Abb. 48: Räumliche Verteilung der Suszeptibilität (Angabe dimensionlos) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 31.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“	yy
Abb. 49: Räumliche Verteilung der Suszeptibilität (Angabe dimensionlos) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 19.09.2005, Interpolationsmethode „Kriging“	zz
Abb. 50: Räumliche Verteilung der Suszeptibilität (Angabe dimensionlos) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 08.05.2006, Interpolationsmethode „Kriging“	aaa
Abb. 51: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Wellenkamp“, Erntejahr 2001, Frucht: Winterweizen Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“	bbb
Abb. 52: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Wellenkamp“, Erntejahr 2002, Frucht: Winterhafer, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“	ccc
Abb. 53: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Wellenkamp“, Erntejahr 2003, Frucht: Winterweizen, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“	ddd
Abb. 54: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Wellenkamp“, Erntejahr 2004, Frucht: Triticale, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“	eee
Abb. 55: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Wellenkamp“, Erntejahr 2005, Frucht: Hafer, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“	fff
Abb. 56: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Wellenkamp“, Erntejahr 2006, Frucht: Wintergerste, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“	ggg
Abb. 57: Klimadaten für das Untersuchungsgebiet, Jahresdaten 2005 und das langjährige Mittel für Monatsdurchschnittstemperatur und Monatsniederschlagsrate	hhh

Tab. 1: Technische Daten ausgewählter Bodensensorsysteme

Messtechnik	Messverfahren	Anregung	Ankopplung	Messfrequenz	Messgröße(n)	Messdurchführung	Messtiefe	Messergebnis
EM38	Elektromagnetische Messung	Induktiv (berührungslos)	Sendespule	14.6 kHz	Scheinbare elektrische Leitfähigkeit, Suszeptibilität	von Hand geführt oder vom Fahrzeug gezogen	Zwei Messmodi; Horizontaler Modus: 63 % des Signalanteils aus einer Tiefe bis 60 cm; Vertikaler Modus: 63 % des Signalanteils aus einer Tiefe bis 130 cm	Messergebnis ist das Integral über die jeweilige Messtiefe; Messtiefe wird durch den Messmodus bestimmt (bzw. durch den Abstand der Spulen zueinander)
Veris 3100	Gleichstrom-geoelektrik (Vierpunkt-Verfahren)	Galvanisch (Kontaktmessung)	Stromzuführungselektrode	225 Hz	Scheinbarer elektrischer Widerstand	vom Fahrzeug gezogen	Zwei Messtiefen: Messtiefe 1: 0 bis 30 cm Messtiefe 2: 0 bis 90 cm	Messergebnis ist das Integral über die jeweilige Messtiefe; Messtiefe wird durch den Elektrodenabstand bestimmt
ARP03	Gleichstrom-geoelektrik (Vierpunkt-Verfahren)	Galvanisch (Kontaktmessung)	Stromzuführungselektrode	150 Hz	Scheinbarer elektrischer Widerstand	vom Fahrzeug gezogen	Drei Messtiefen: Messtiefe 1: 0 bis 50 cm Messtiefe 2: 0 bis 100 cm Messtiefe 3: 0 bis 200 cm	Messergebnis kann einem definierten Volumen in einer definierten Tiefe zugeordnet werden
BOs-EP1 (Bodensensorsystem der FH Osnabrück)	Erfassung des komplexen elektrischen Leitwerts	Galvanisch (Kontaktmessung)	Elektrode	125 kHz	Elektrische Leitfähigkeit und Kapazität; Rauschen des Messstroms, Bodentemperatur	vom Fahrzeug gezogen	Definierte Tiefe z.Z. von 0 cm bis 25 cm; justierbar	Messergebnis kann einem definierten Volumen in einer definierten Tiefe zugeordnet werden

Tab. 2: Korrelationskoeffizienten zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Korngröße sowie C_{org} von diversen ausgewählten Autoren

Korngröße	$r = EC_a \dots$	K.- typ ¹	Btiefe ²	Mt. ³	Bemerkung	Autor(en)
Sand	(-0,31) – (-0,39)	P	15 – 30	A	Gerätehöhe variierte, eine Teilfläche	JUNG et al. 2005
Sand	(-0,27) – (-0,32)	P	15 – 30	B	Gerätehöhe variierte, eine Teilfläche	JUNG et al. 2005
Sand	(-0,18) – (-0,67)	P	0 – 30	C	diverse Felder	HEINIGER et al. 2003
Sand	(-0,08) – (-0,77)	P	30 – 90	C	diverse Felder	HEINIGER et al. 2003
Sand	(-0,20) – 0,88	k.A.	0 – 15	sh	diverse Felder an zwei Terminen	MUELLER et al. 2003
Sand	(-0,73)	Sp	0 – 20	sh	ein Feld	PERRON et al. 2002
Sand	(-0,05)	P	0 – 30	sh	diverse Felder	JOHNSON et al. 2001
Sand	(-0,07) – 0,77	k.A.	0 – 15	dp	diverse Felder an zwei Terminen	MUELLER et al. 2003
Sand	(-0,78)	Sp	0 – 20	dp	ein Feld	PERRON et al. 2002
Sand	(-0,54) / (-0,64)	P	0 – 75	4P	Messung Boden nass / trocken	BANTON et al. 1997
Schluff	(-0,73) – (-0,78)	P	15 – 30	A	Gerätehöhe variierte, eine Teilfläche	JUNG et al. 2005
Schluff	(-0,72) – (-0,76)	P	15 – 30	B	Gerätehöhe variierte, eine Teilfläche	JUNG et al. 2005
Schluff	(-0,65) – (-0,84)	P	0 – 120	B	diverse Felder	SUDDUTH et al. 2003
Schluff	(-0,17) – 0,73	P	0 – 30	C	diverse Felder	HEINIGER et al. 2003
Schluff	(-0,14) – 0,73	P	30 – 90	C	diverse Felder	HEINIGER et al. 2003
Schluff	(-0,23) – (-0,90)	k.A.	0 – 15	sh	diverse Felder an zwei Terminen	MUELLER et al. 2003
Schluff	(-0,28)	P	0 – 30	sh	diverse Felder	JOHNSON et al. 2001
Schluff	(-0,60) – (-0,71)	P	0 – 120	sh	2 Felder	SUDDUTH et al. 2003
Schluff	(-0,18) – (-0,80)	k.A.	0 – 15	dp	diverse Felder an zwei Terminen	MUELLER et al. 2003
Schluff	(-0,73) – (-0,79)	P	0 – 120	dp	2 Felder	SUDDUTH et al. 2003
Schluff	0,45 / 0,53	P	0 - 75	4P	Messung Boden nass / trocken	BANTON et al. 1997
Grobschluff	(-0,60) – (-0,68)	P	15 – 30	A	Gerätehöhe variierte, eine Teilfläche	JUNG et al. 2005
Feinschluff	(-0,72) – (-0,75)	P	15 – 30	A	Gerätehöhe variierte, eine Teilfläche	JUNG et al. 2005
Grobschluff	(-0,65) – (-0,69)	P	15 – 30	B	Gerätehöhe variierte, eine Teilfläche	JUNG et al. 2005
Feinschluff	(-0,67) – (-0,70)	P	15 – 30	B	Gerätehöhe variierte, eine Teilfläche	JUNG et al. 2005
Mittelschluff	(-0,42)	Sp	0 – 20	sh	Ein Feld	PERRON et al. 2002
Feinschluff	0,59	Sp	0 – 20	sh	Ein Feld	PERRON et al. 2002
Mittelschluff	(-0,38)	Sp	0 – 20	dp	ein Feld	PERRON et al. 2002
Feinschluff	0,63	Sp	0 – 20	dp	ein Feld	PERRON et al. 2002

Korngröße	$r = EC_a \dots$	K.- typ ¹	Btiefe ²	Mt. ³	Bemerkung	Autor(en)
Ton	0,71 – 0,77	P	15 - 30	A	Gerätehöhe variierte, eine Teilfläche	JUNG et al. 2005
Ton	0,62 – 0,90	P	0 - 100	A	Ergebnis bezieht auf 4 Tiefenstufen	DOOLITTLE et al. 2002
Ton	0,71 – 0,74	P	15 – 30	B	Gerätehöhe variierte, eine Teilfläche	JUNG et al. 2005
Ton	0,74	P	0 - 120	B	Diverse Flächen in Brandenburg	DOMSCH&GIEBEL 2004
Ton	0,59 – 0,88	P	0 – 120	B	diverse Felder	SUDDUTH et al. 2003
Ton	0,55 – 0,87	P	0 - 100	B	Ergebnis bezieht auf 4 Tiefenstufen	DOOLITTLE et al. 2002
Ton	0,67 – 0,81	P	0 - 150	B	diverse Felder	DURLESSER 1999
Ton	0,22 – 0,70	P	0 – 30	C	diverse Felder	HEINIGER et al. 2003
Ton	0,12 – 0,75	P	30 – 90	C	diverse Felder	HEINIGER et al. 2003
Ton	0,32 – 0,86	k.A.	0 – 15	sh	diverse Felder an zwei Terminen	MUELLER et al. 2003
Ton	0,57 – 0,78	P	0 - 100	sh	Ergebnis bezieht auf 4 Tiefenstufen	DOOLITTLE et al. 2002
Ton	0,70	Sp	0 – 20	sh	ein Feld	PERRON et al. 2002
Ton	0,50	P	0 – 30	sh	diverse Felder	JOHNSON et al. 2001
Ton	0,70 – 0,89	P	0 – 120	sh	diverse Felder	SUDDUTH et al. 2003
Ton	0,26 – 0,77	k.A.	0 – 15	dp	diverse Felder an zwei Terminen	MUELLER et al. 2003
Ton	0,58 – 0,89	P	0 - 100	dp	Ergebnis bezieht auf 4 Tiefenstufen	DOOLITTLE et al. 2002
Ton	0,74	Sp	0 – 20	dp	ein Feld	PERRON et al. 2002
Ton	0,74 – 0,83	P	0 – 120	dp	diverse Felder	SUDDUTH et al. 2003
Ton	0,76	P	0 – 180	4P	ein Feld	CORWIN et al. 2003
Ton	0,53 / 0,64	P	0 – 75	4P	Messung Boden nass / trocken	BANTON et al. 1997
Ton	0,42 – 0,48 _a	k.A.	k.A.	ARP	1 Feld / 3 Messtiefen	DABAS et al. 2002
C _{org}	0,19 – 0,22	P	15 – 30	A	Gerätehöhe variierte	JUNG et al. 2005
C _{org}	0,17 – 0,20	P	15 – 30	B	Gerätehöhe variierte	JUNG et al. 2005
C _{org}	0,05	Sp	0 – 20	sh	ein Feld	PERRON et al. 2002
C _{org}	(-0,34)	P	0 – 30	sh	diverse Felder	JOHNSON et al. 2001
C _{org}	0,09	Sp	0 – 20	dp	ein Feld	PERRON et al. 2002
C _{org}	0,52 / 0,65	P	0 – 75	4P	Messung Boden nass / trocken	BANTON et al. 1997

¹ Korrelationskoeffiziententyp: P = Pearson Korrelationskoeffizienten; Sp = Spearman Korrelationskoeffizient; k.A. = keine Angabe

² Bodenprobtiefe in cm, Wertespanne bezeichnet einen Tiefenbereich für eine Mischprobe

³ Messtechnik: A = EM38 im horizontalen Modus; B = EM38 im vertikalen Modus; C = EM38 ECa-Messtiefe, Ableitung nach Formel; sh = Veris flacher Messmodus (Messtiefe 0 - 30 cm); dp = Veris tiefer Messmodus (Messtiefe 0 - 90 cm); 4P = 4-Punktanordnung (Messtiefe 1,2 m - 1,5 m); ARP = ARP03 (3 Messtiefen: 0 - 50 cm, 0 - 100 cm, 0 - 200 cm)

_a Originalwert ist in der Originalquelle mit negativen Vorzeichen und bezieht sich auf den elektrischen Widerstand, da dieser reziproke zum elektrischen Leitwert ist, kehrt sich das Vorzeichen bei einer Angabe mit der elektrischen Leitfähigkeit um

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung des Sandgehalts 0 - 30 cm Tiefe

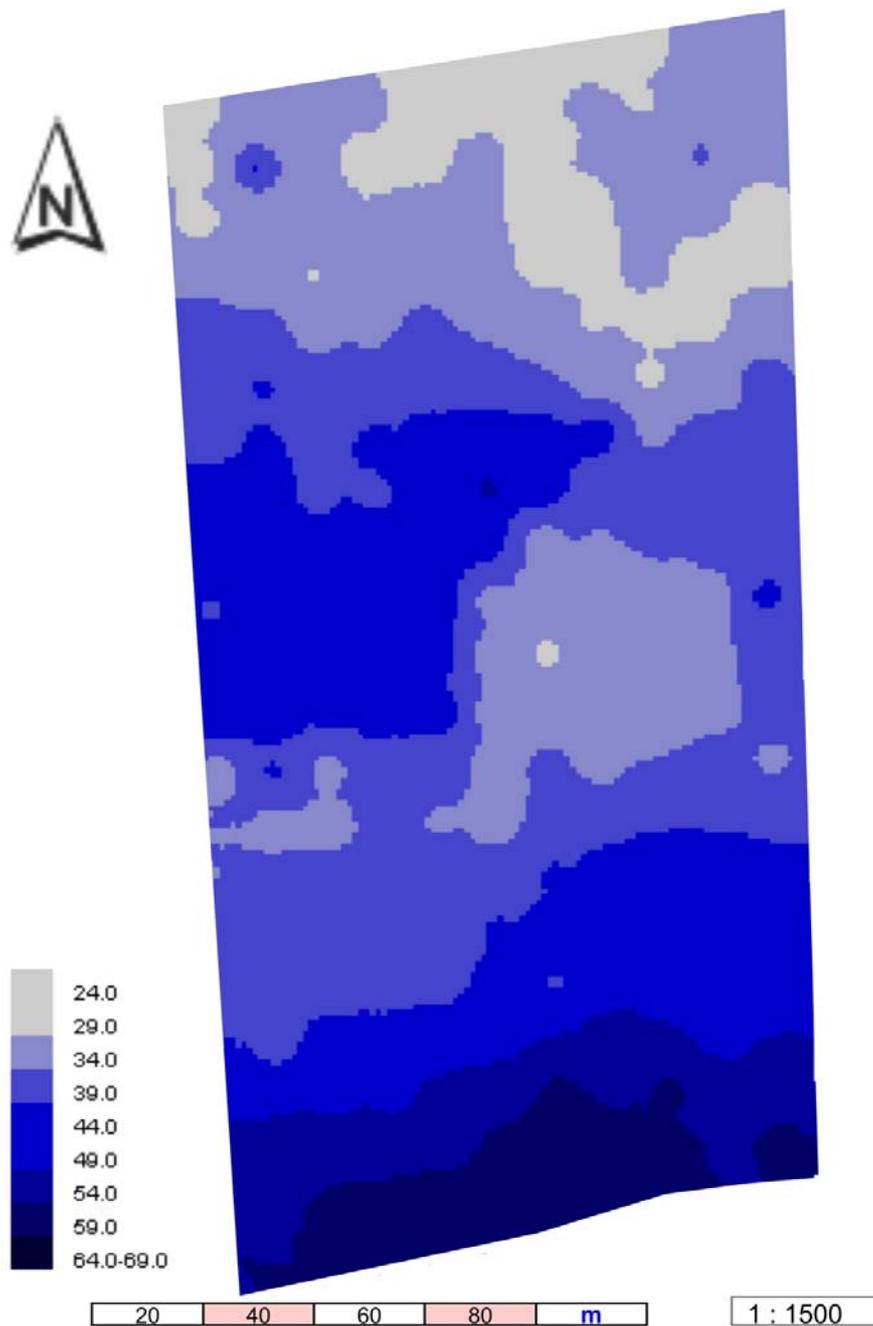


Abb. 1: Räumliche Verteilung des Sandgehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Im Berge“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung des Schluffgehalts 0 - 30 cm Tiefe

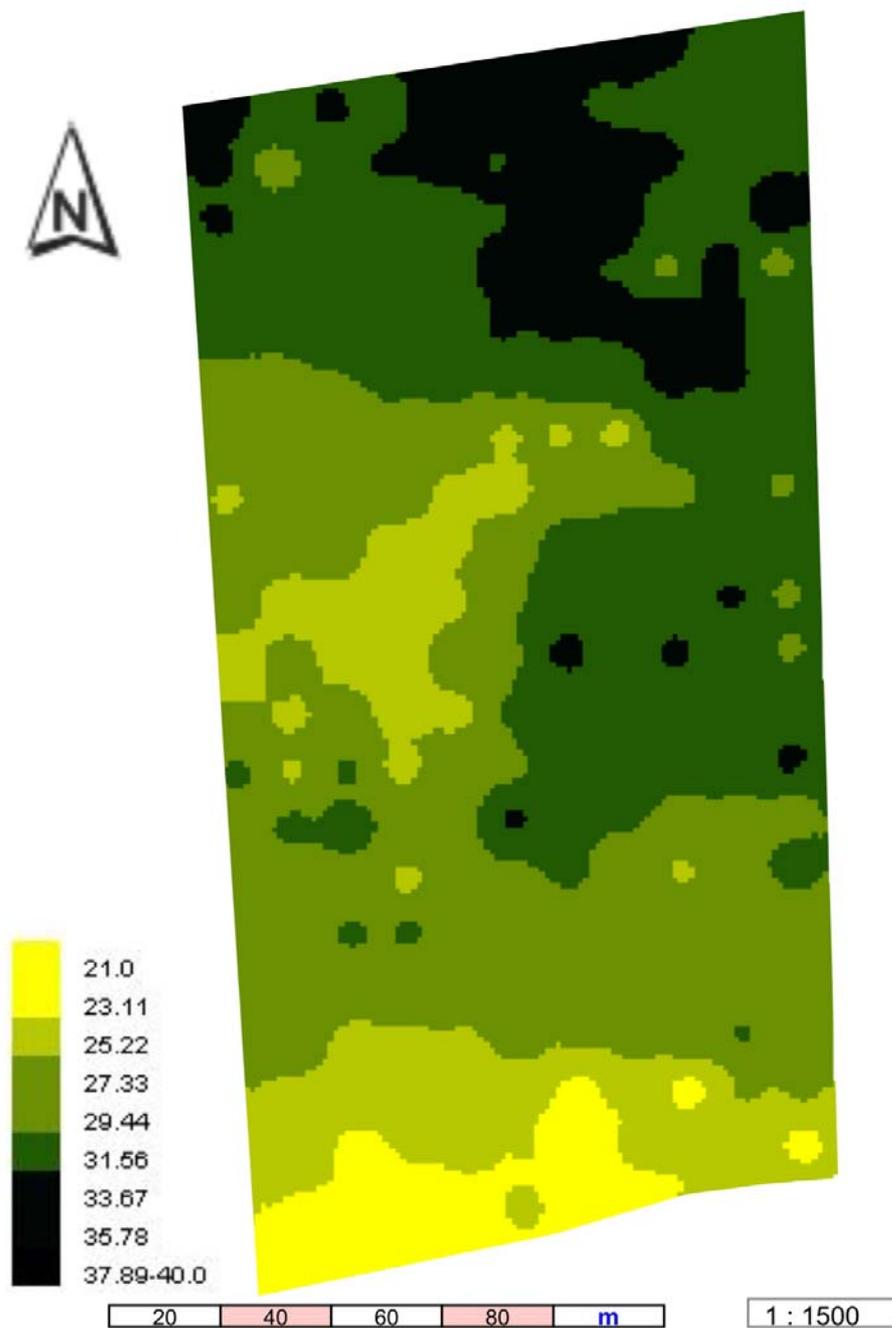


Abb. 2: Räumliche Verteilung des Schluffgehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Im Berge“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung des Tongehalts 0 - 30 cm Tiefe

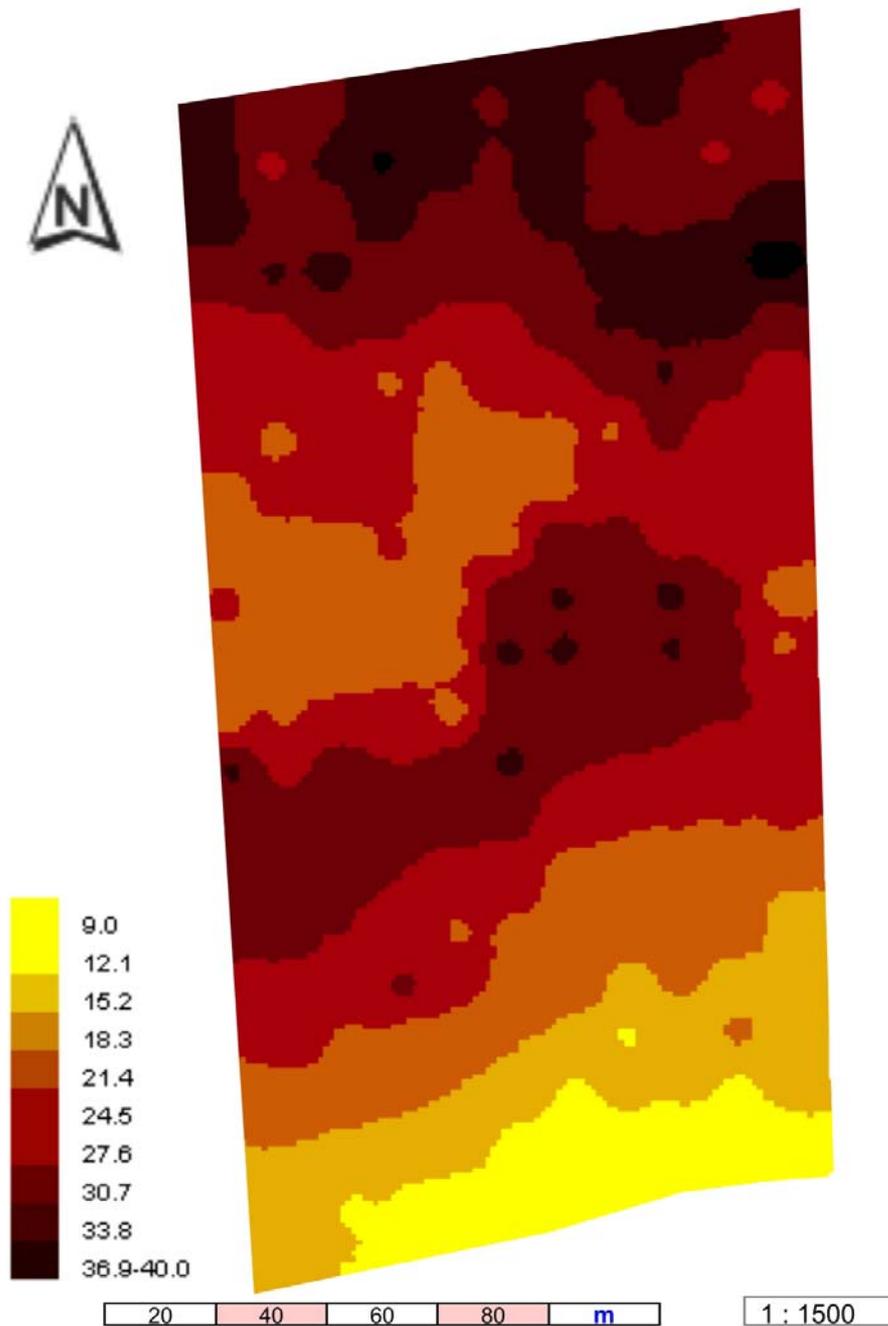


Abb. 3: Räumliche Verteilung des Tongehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Im Berge“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung des organischen Kohlenstoffgehalts 0 - 30 cm Tiefe

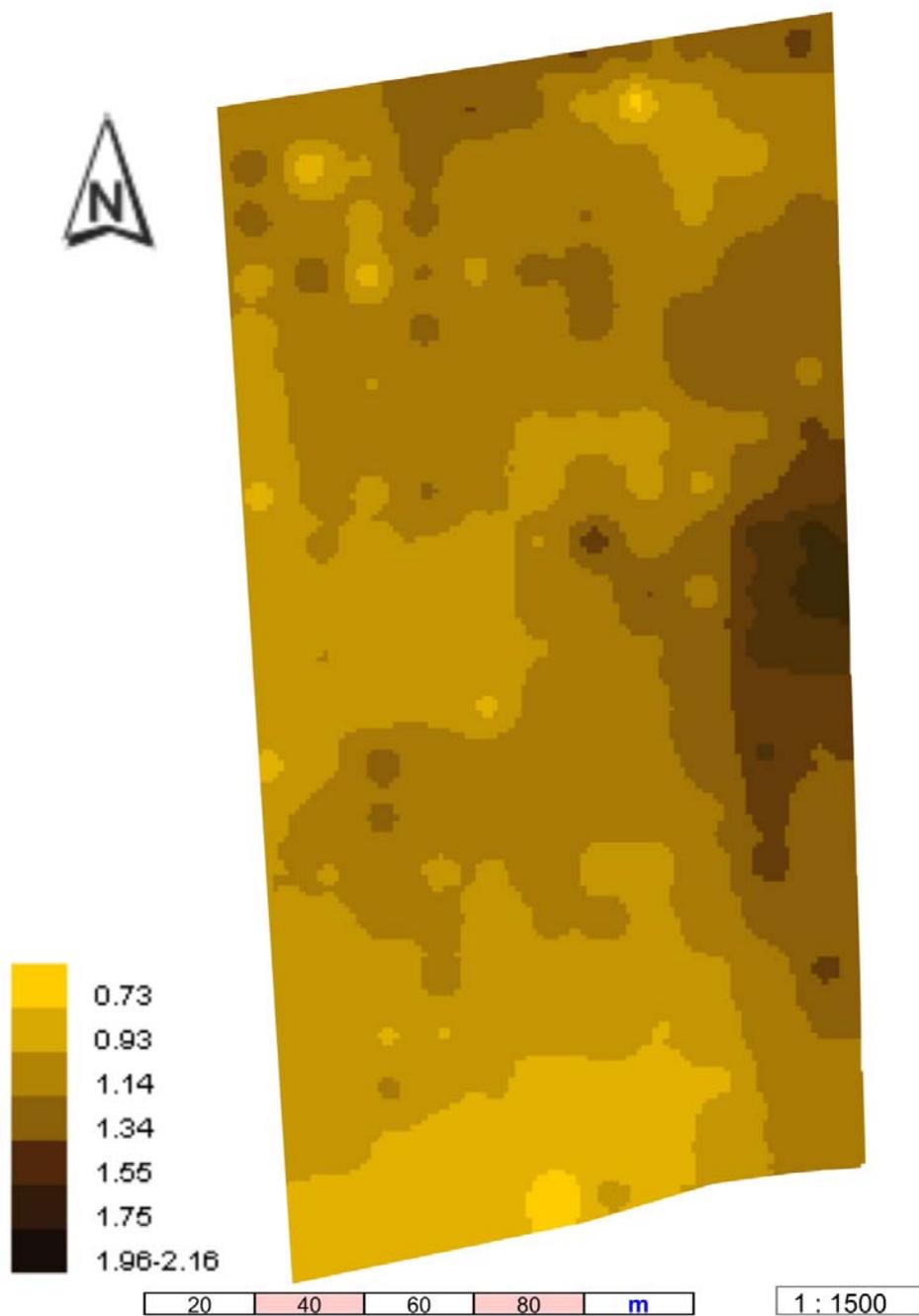


Abb. 4: Räumliche Verteilung des organischen Kohlenstoffgehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Im Berge“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 15.03.2005

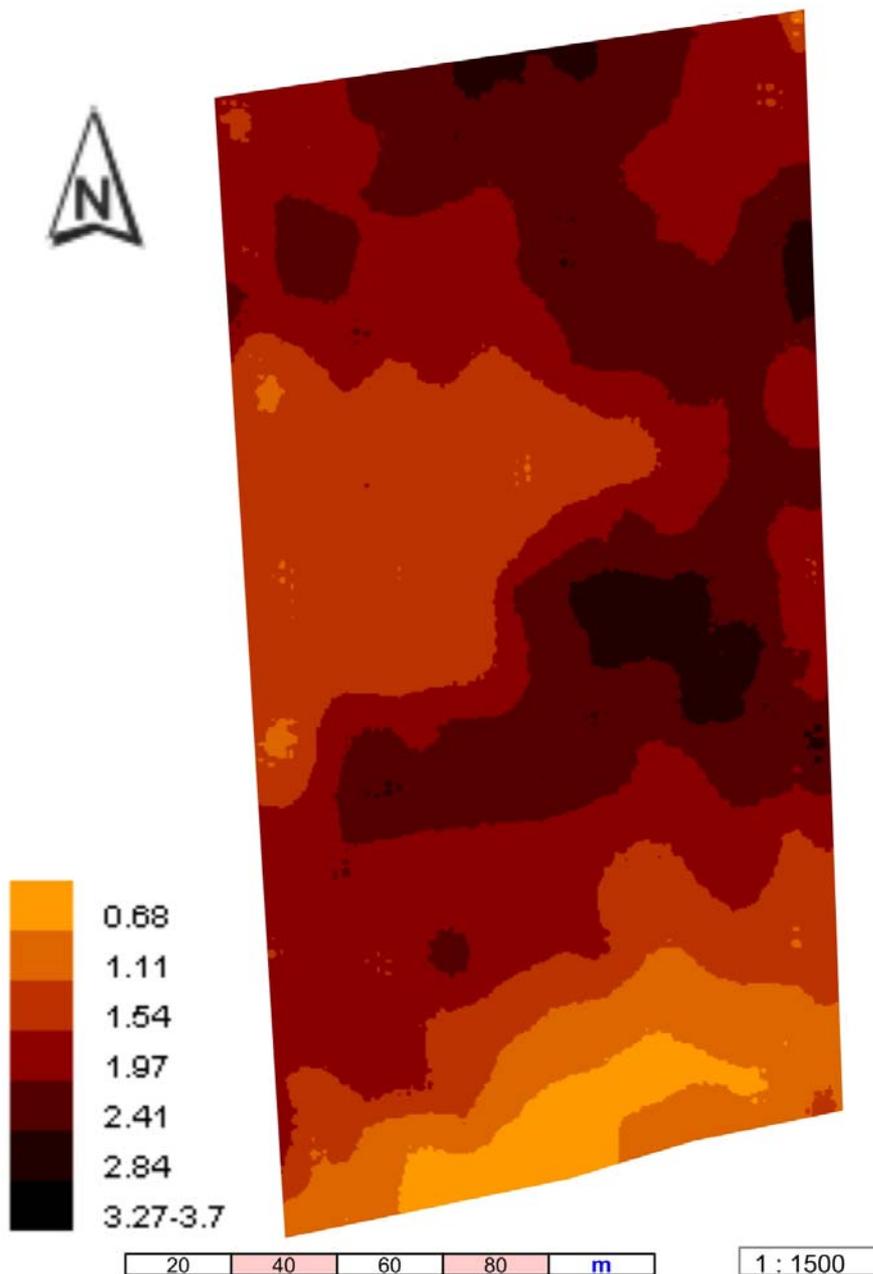


Abb. 5: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 15.03.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 19.08.2005

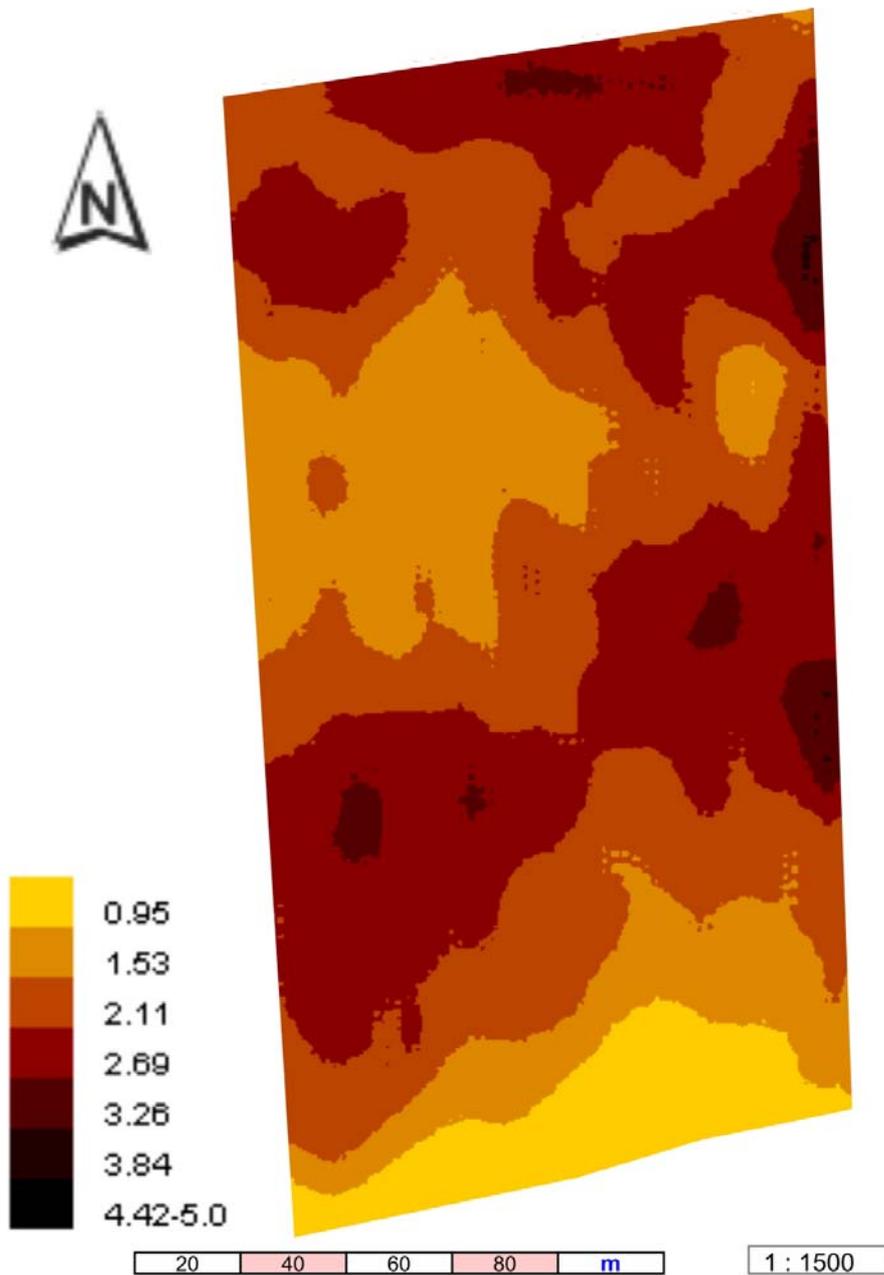


Abb. 6: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 19.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 30.08.2005

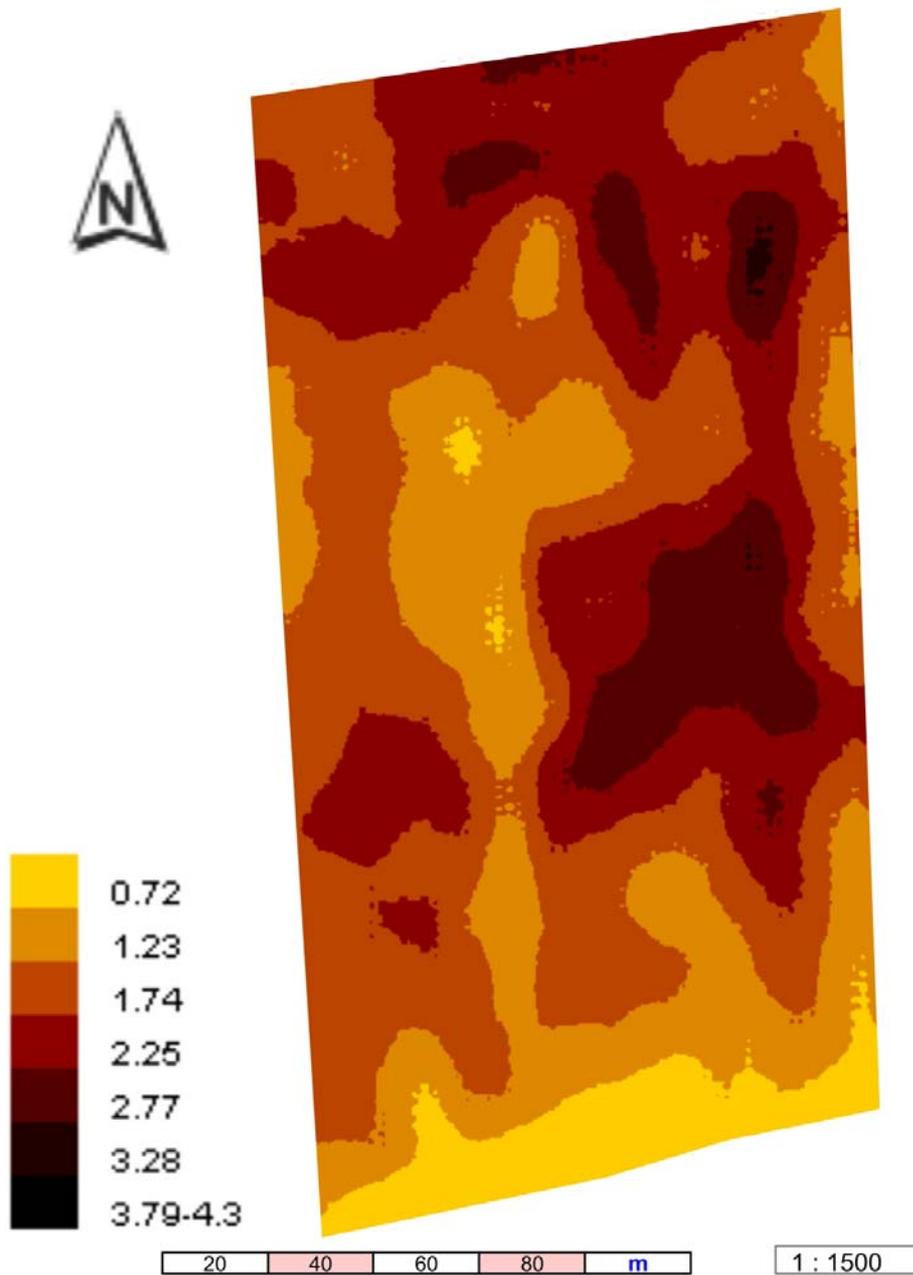


Abb. 7: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 30.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 06.10.2005

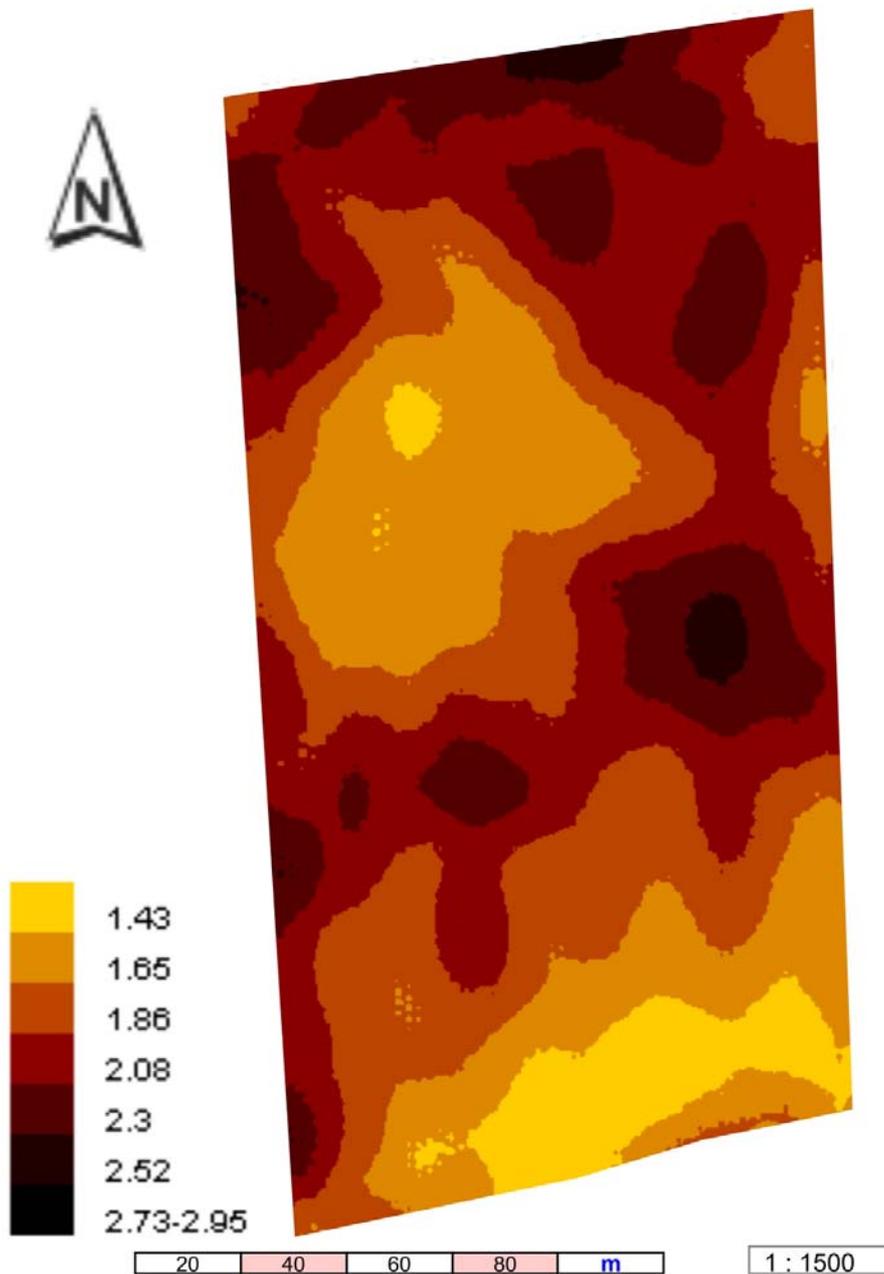


Abb. 8: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 06.10.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 14.03.2007

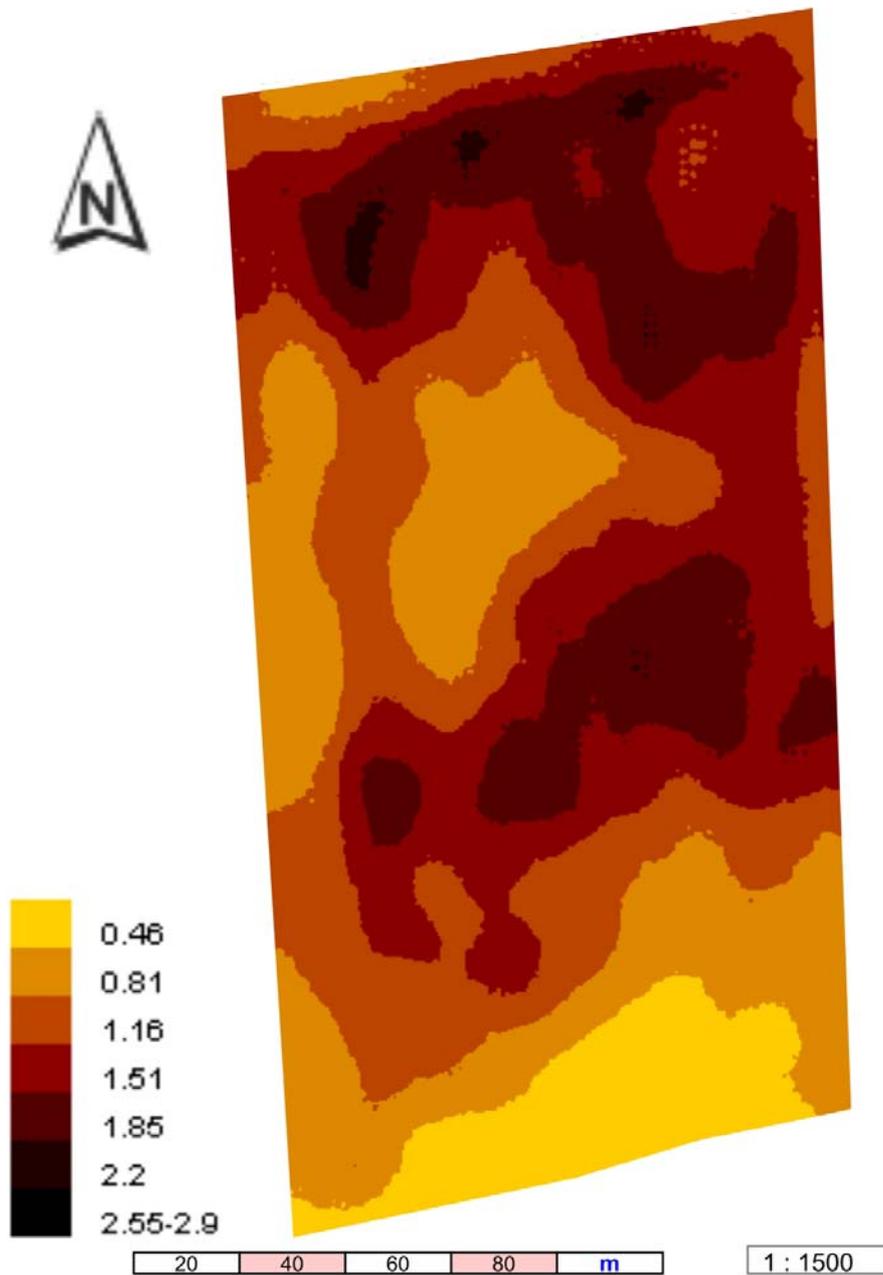


Abb. 9: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 14.03.2007, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 15.03.2005

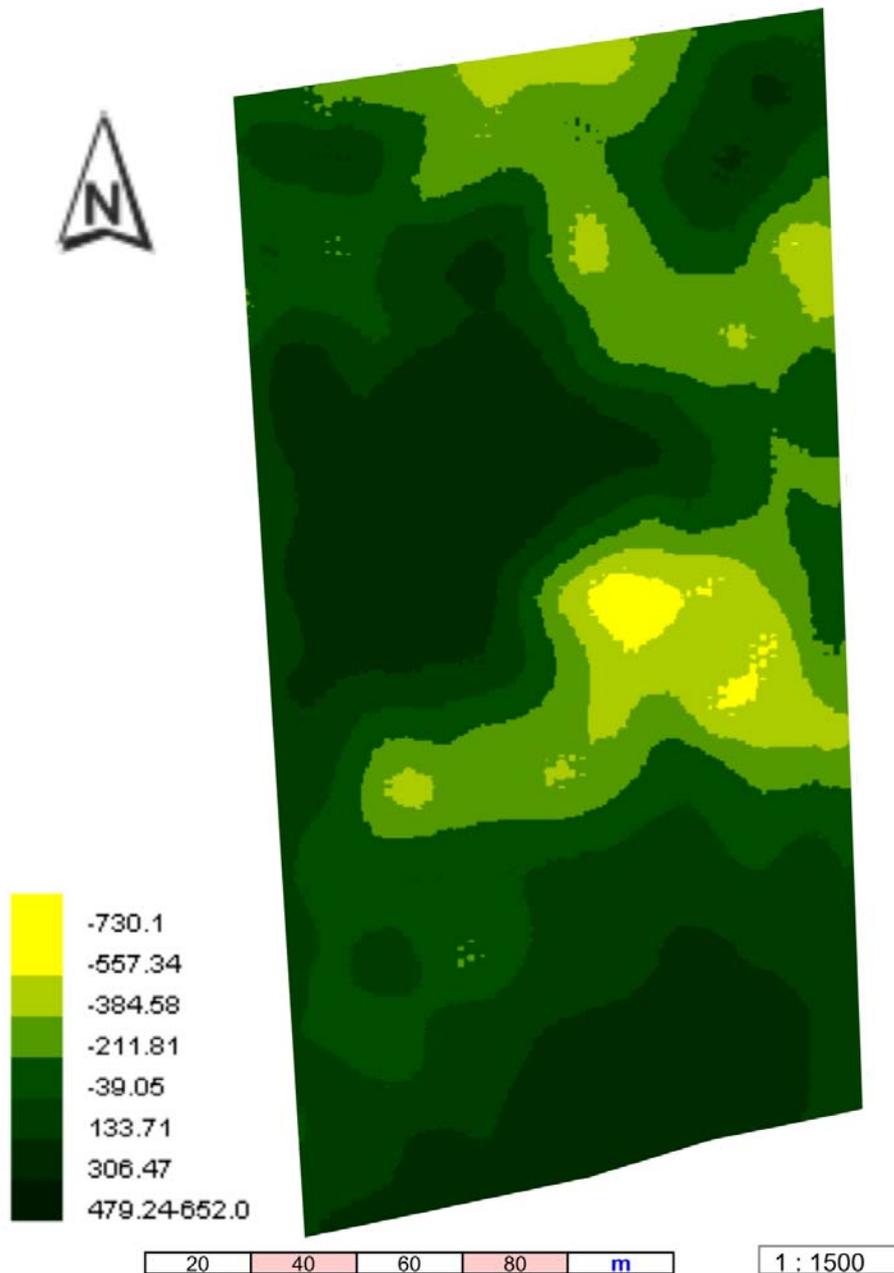


Abb. 10: Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität (Angabe in pF) der Plattenanordnung auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 15.03.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 30.08.2005

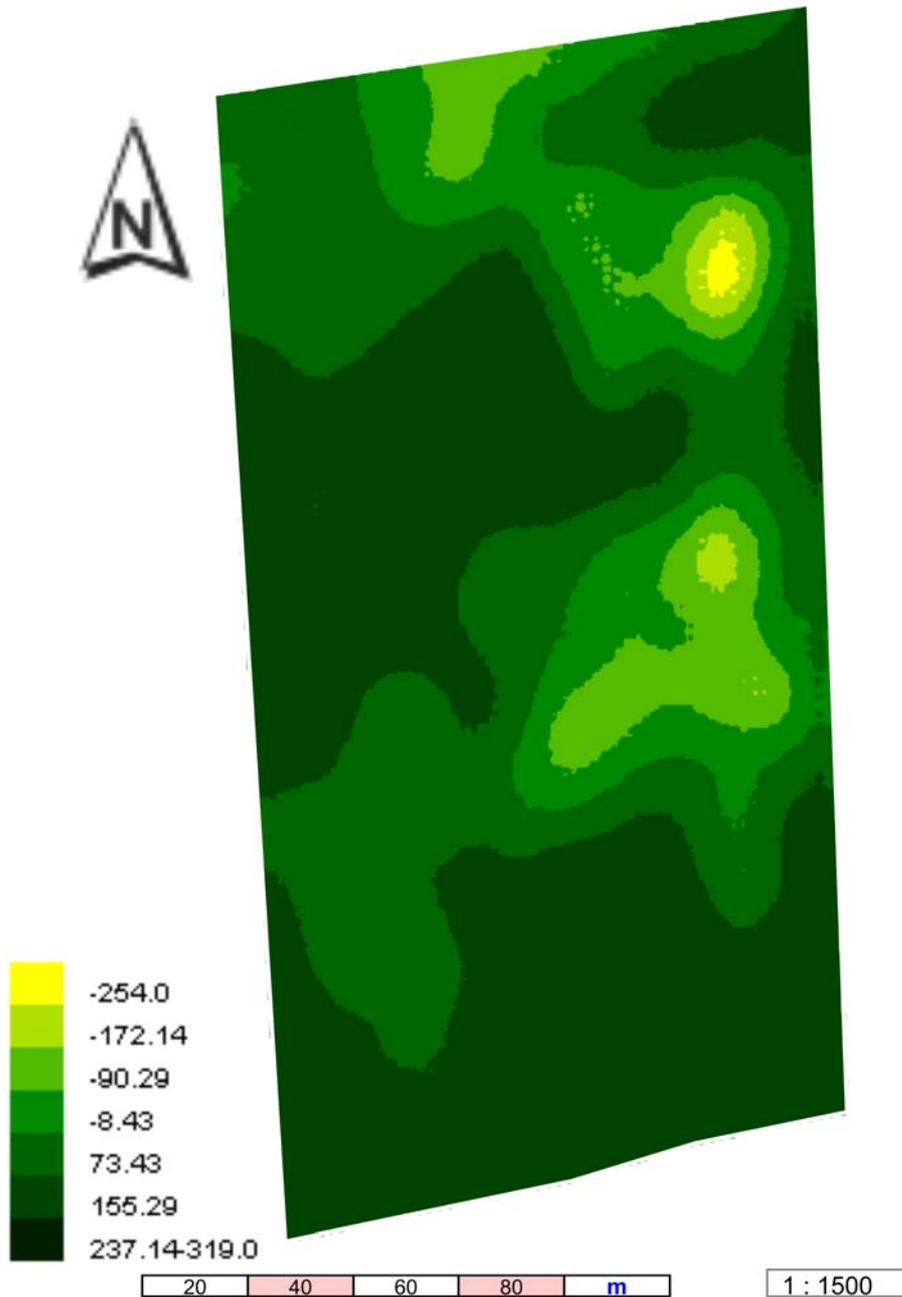


Abb. 11: Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität (Angabe in pF) der Plattenanordnung auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 30.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 14.03.2007

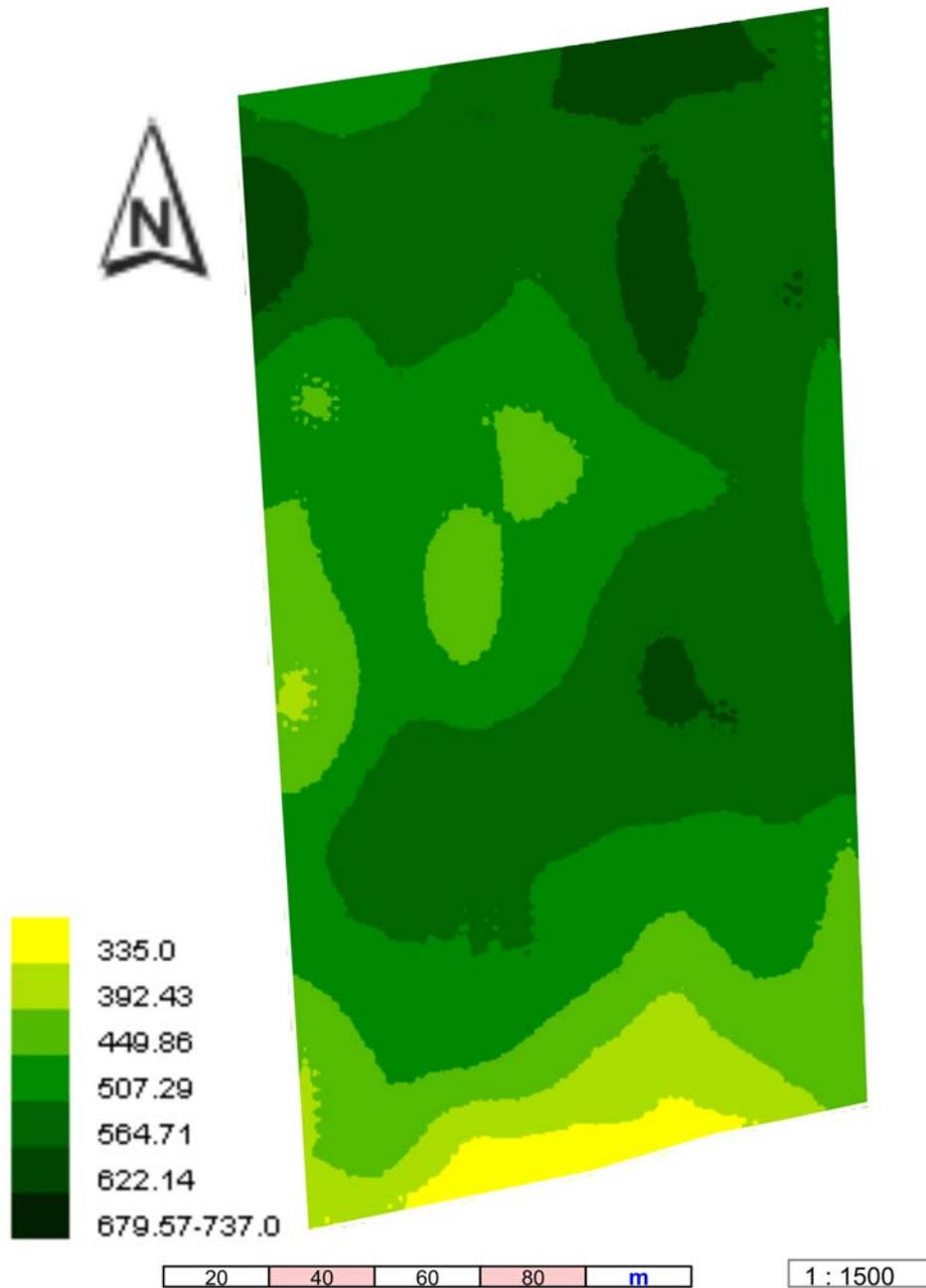


Abb. 12: Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität (Angabe in pF) der Plattenanordnung auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 14.03.2007, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 15.03.2005

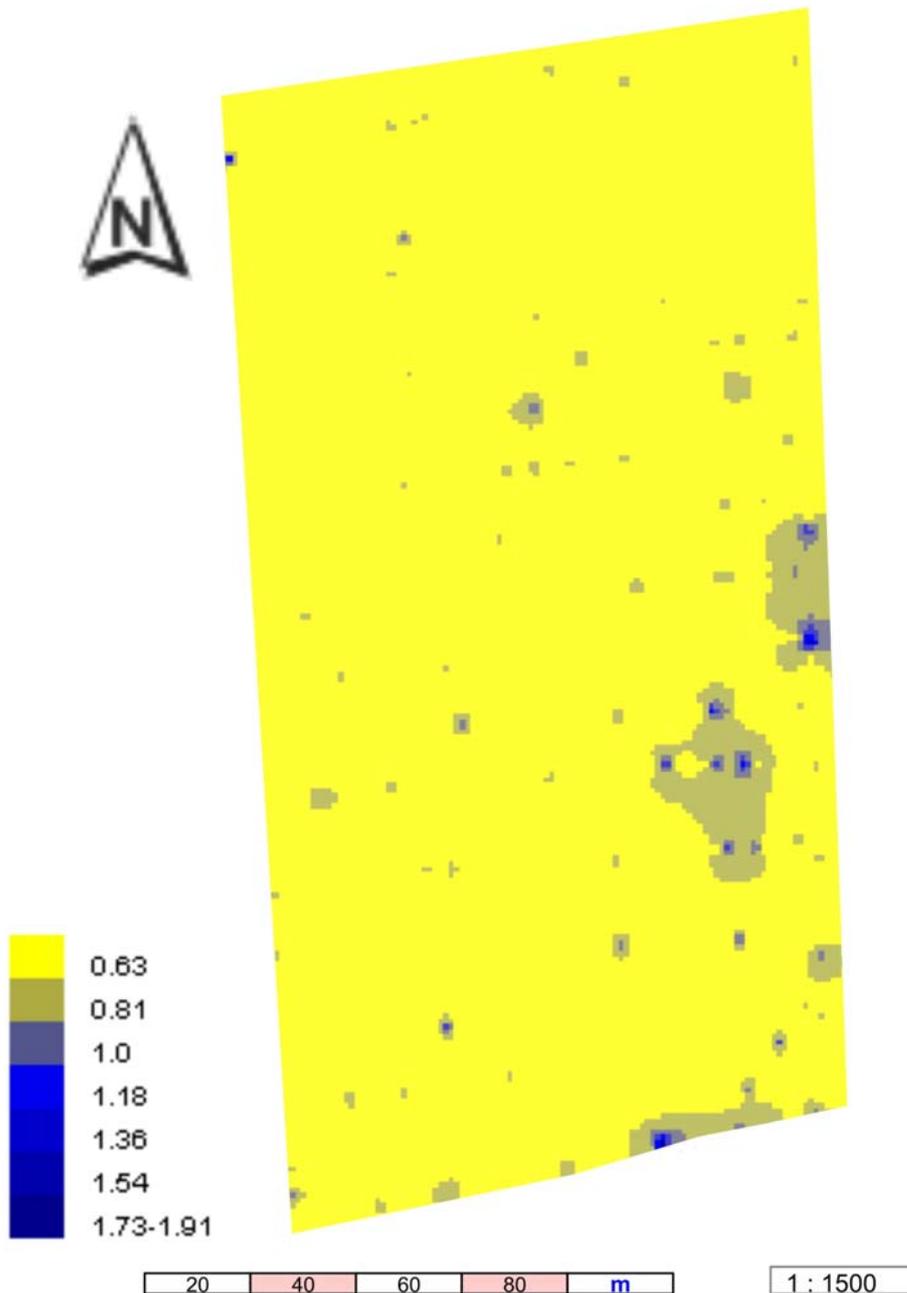


Abb. 13: Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens (Angabe dimensionslos) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 15.03.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 30.08.2005

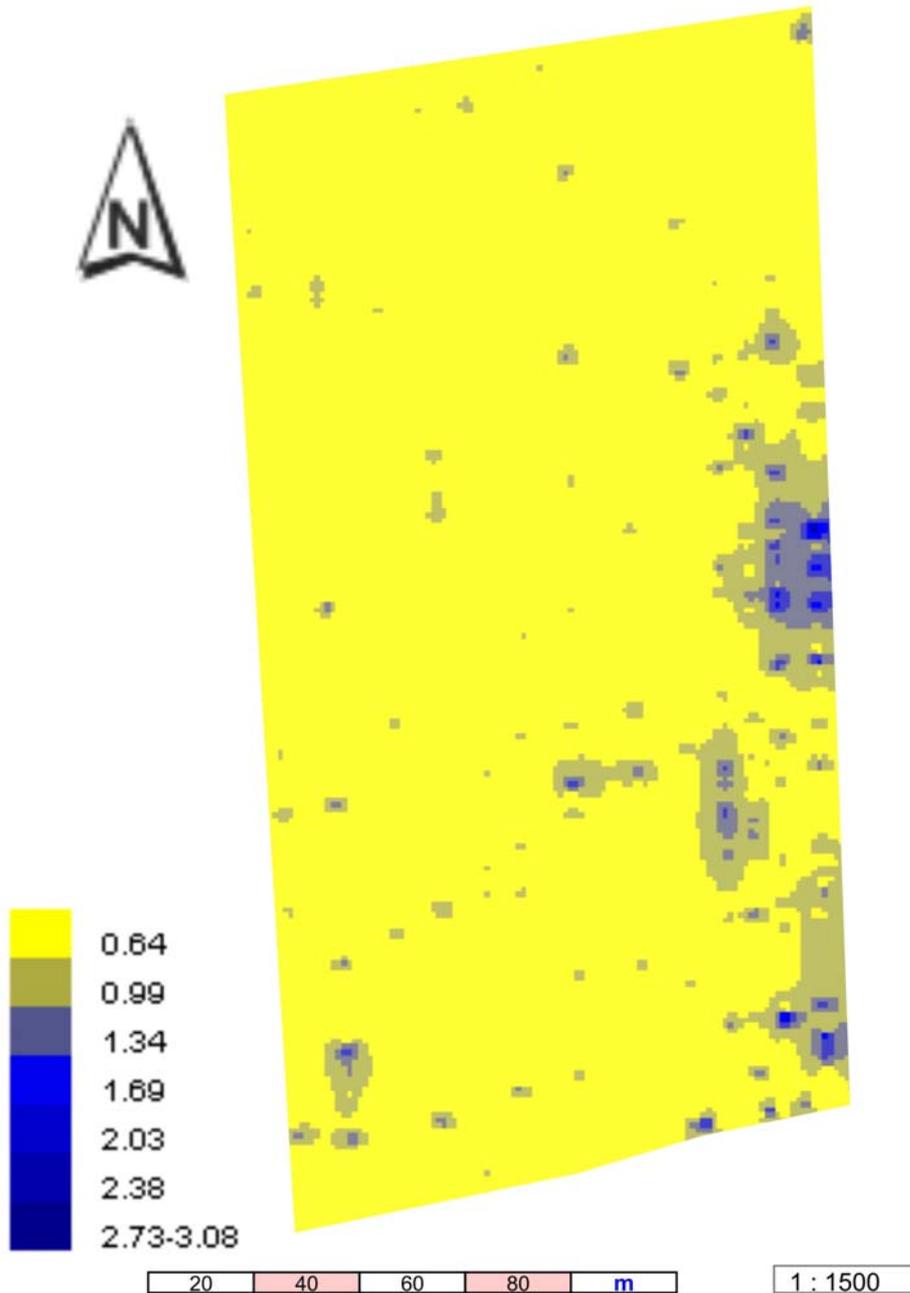


Abb. 14: Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens (Angabe dimensionslos) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 30.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 14.03.2007

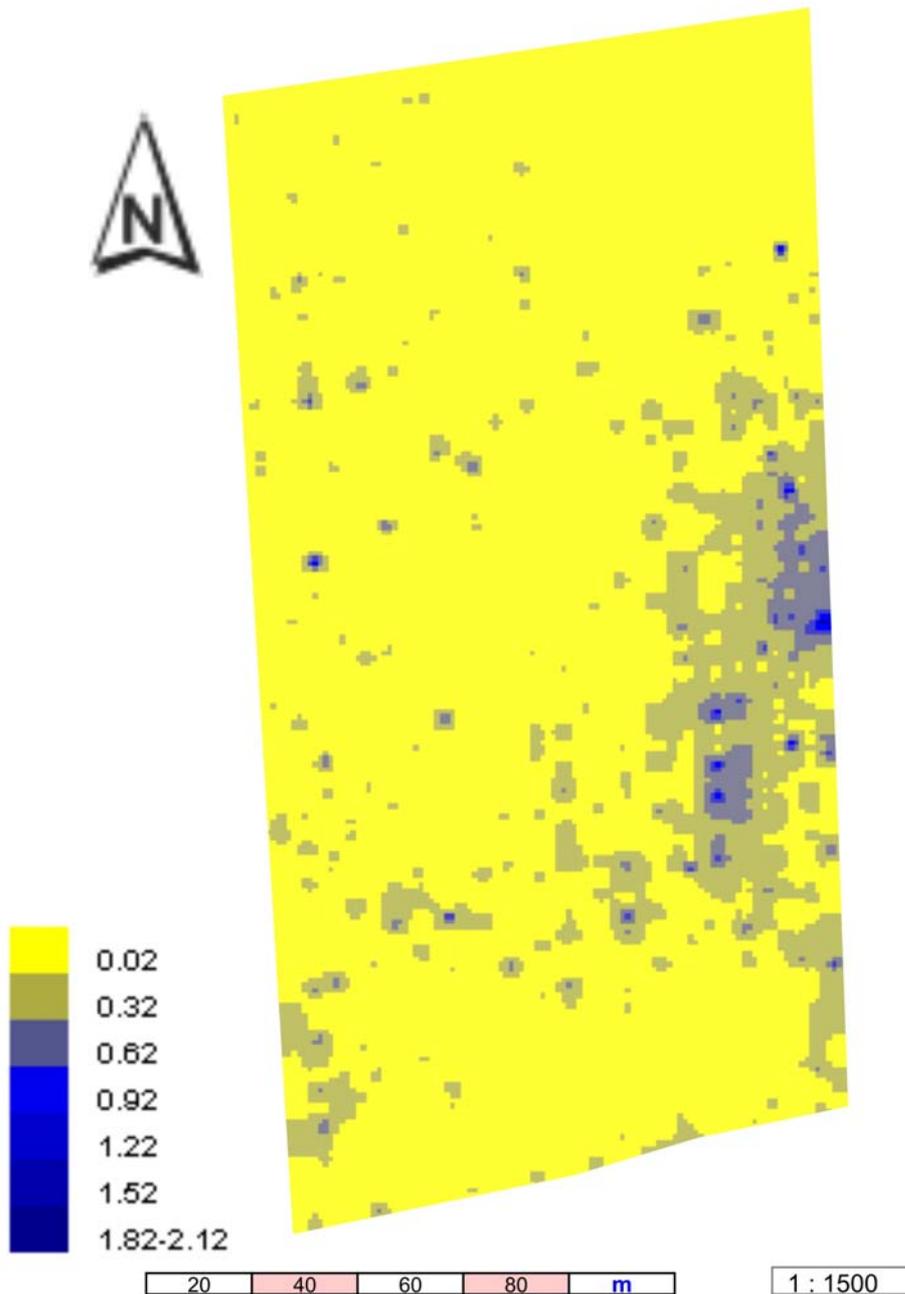


Abb. 15: Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens (Angabe dimensionslos) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 14.03.2007, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC1)

Messsystem: ARP03, Messtiefe: 0 - 50 cm, Messtermin: Herbst 2004

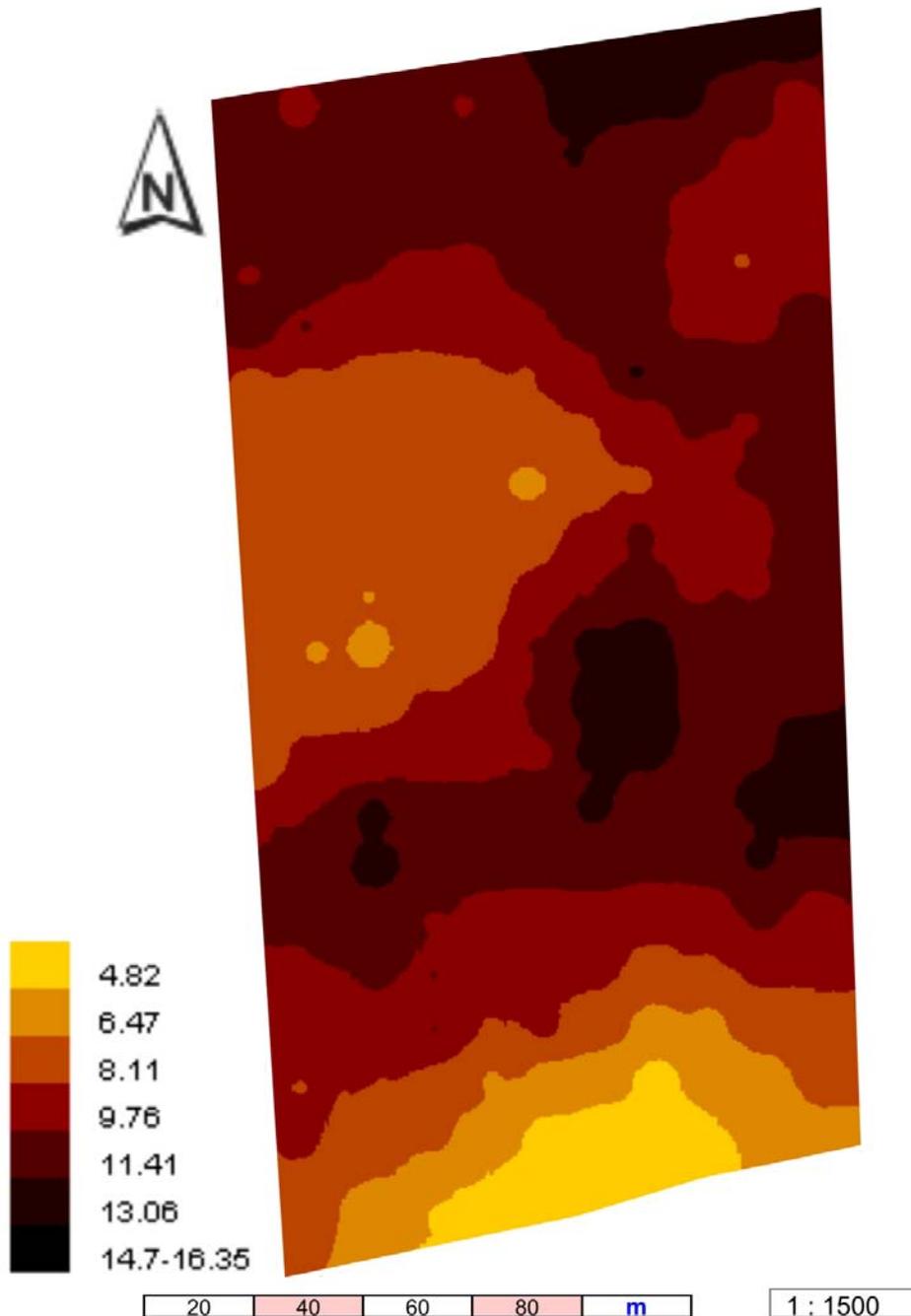


Abb. 16: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC1 / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: 0 - 50 cm, Messsystem: ARP03, Messtermin: Herbst 2004, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit

Messsystem: EM38, horizontaler Messmodus, Messtermin: 14.03.2007

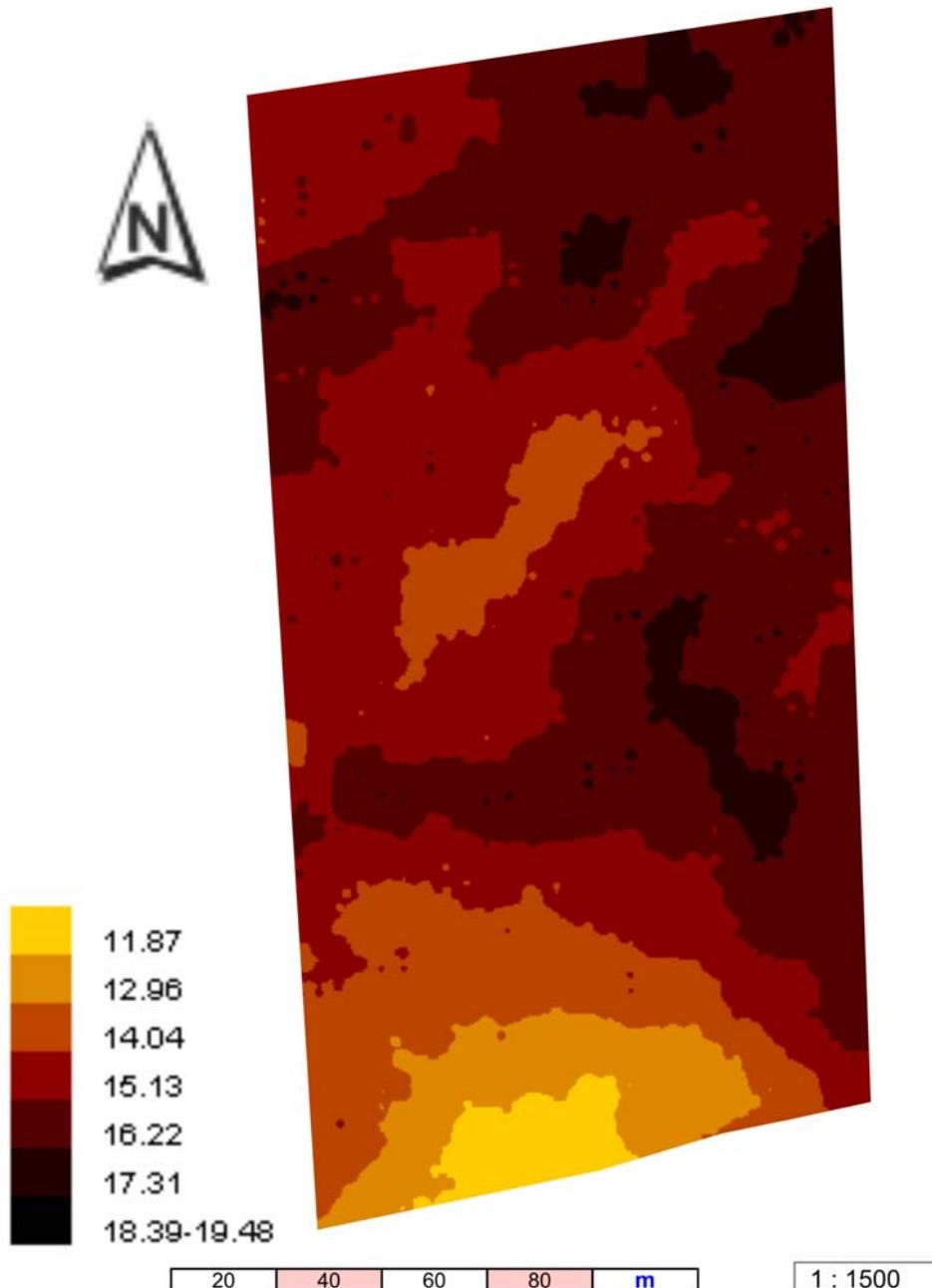


Abb. 17: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_{hor} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Im Berge“, Messsystem: EM38 (horizontaler Messmodus), Messtermin: 14.03.2007, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit

Messsystem: EM38, vertikaler Messmodus, Messtermin: 14.03.2007

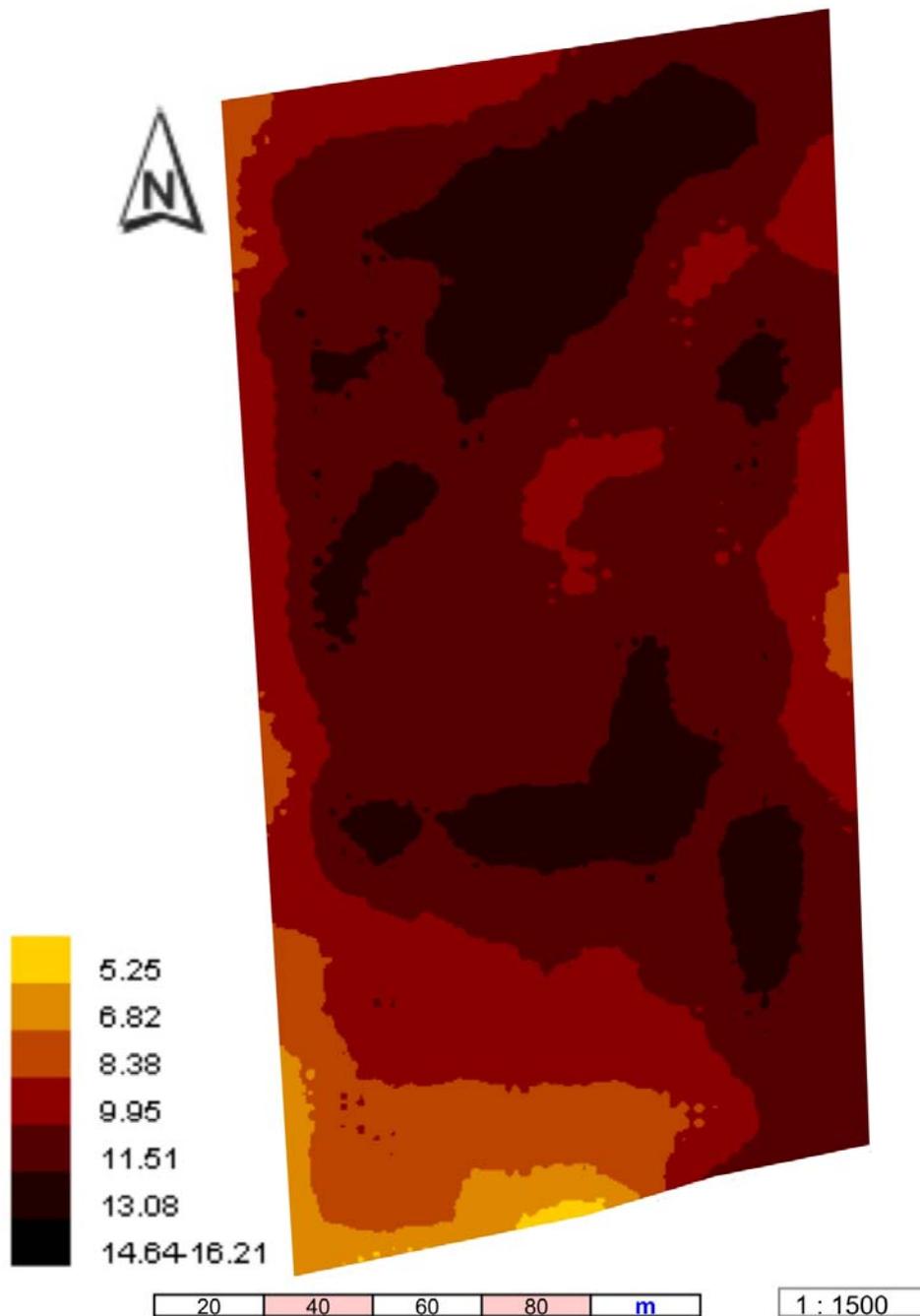


Abb. 18: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_{ver} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Im Berge“, Messsystem: EM38 (horizontaler Messmodus), Messtermin: 14.03.2007, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung der Suszeptibilität

Messsystem: EM38, vertikaler Messmodus, Messtermin: 30.08.2005

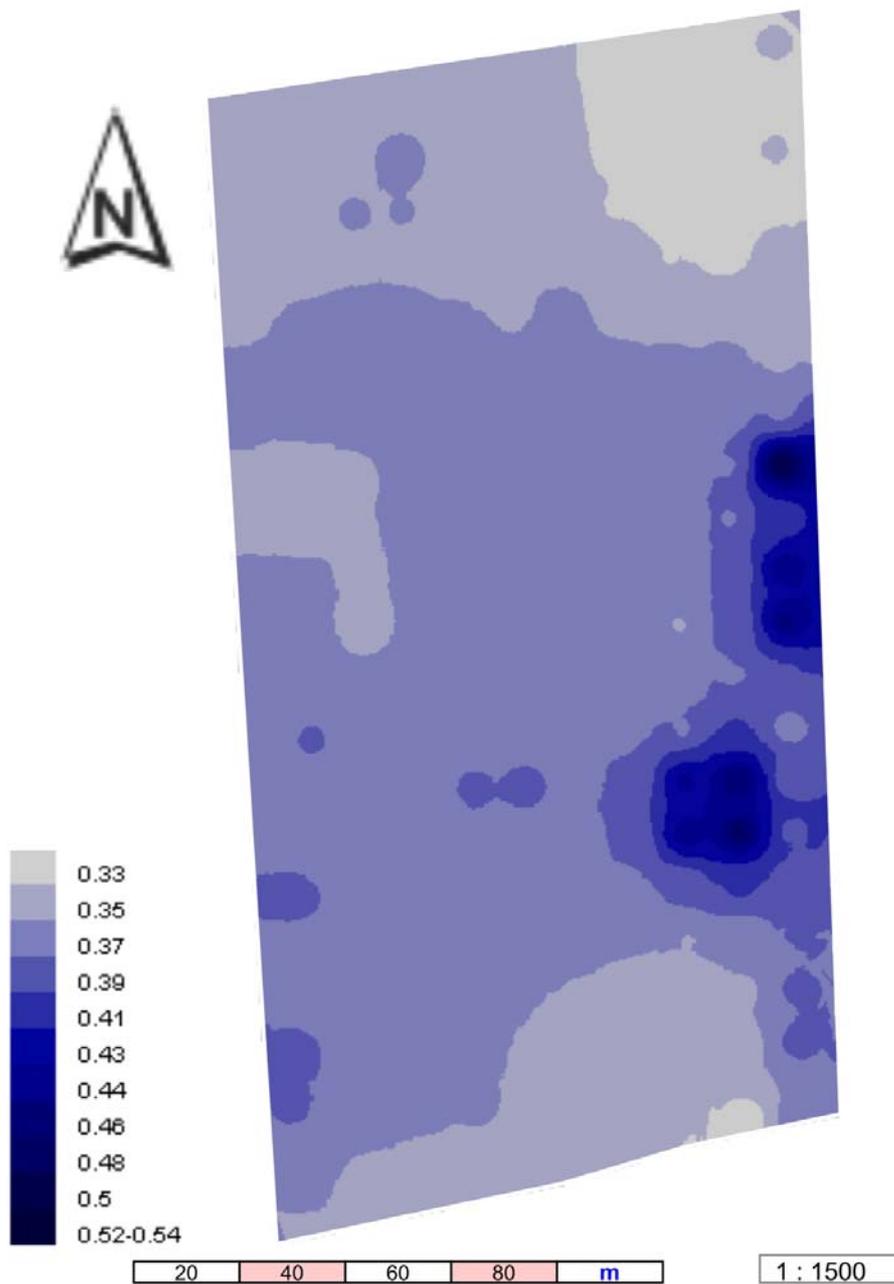


Abb. 19: Räumliche Verteilung der Suszeptibilität (Angabe dimensionslos) auf der Fläche „Im Berge“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 30.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung der Suszeptibilität

Messsystem: EM38, vertikaler Messmodus, Messtermin: 15.03.2006

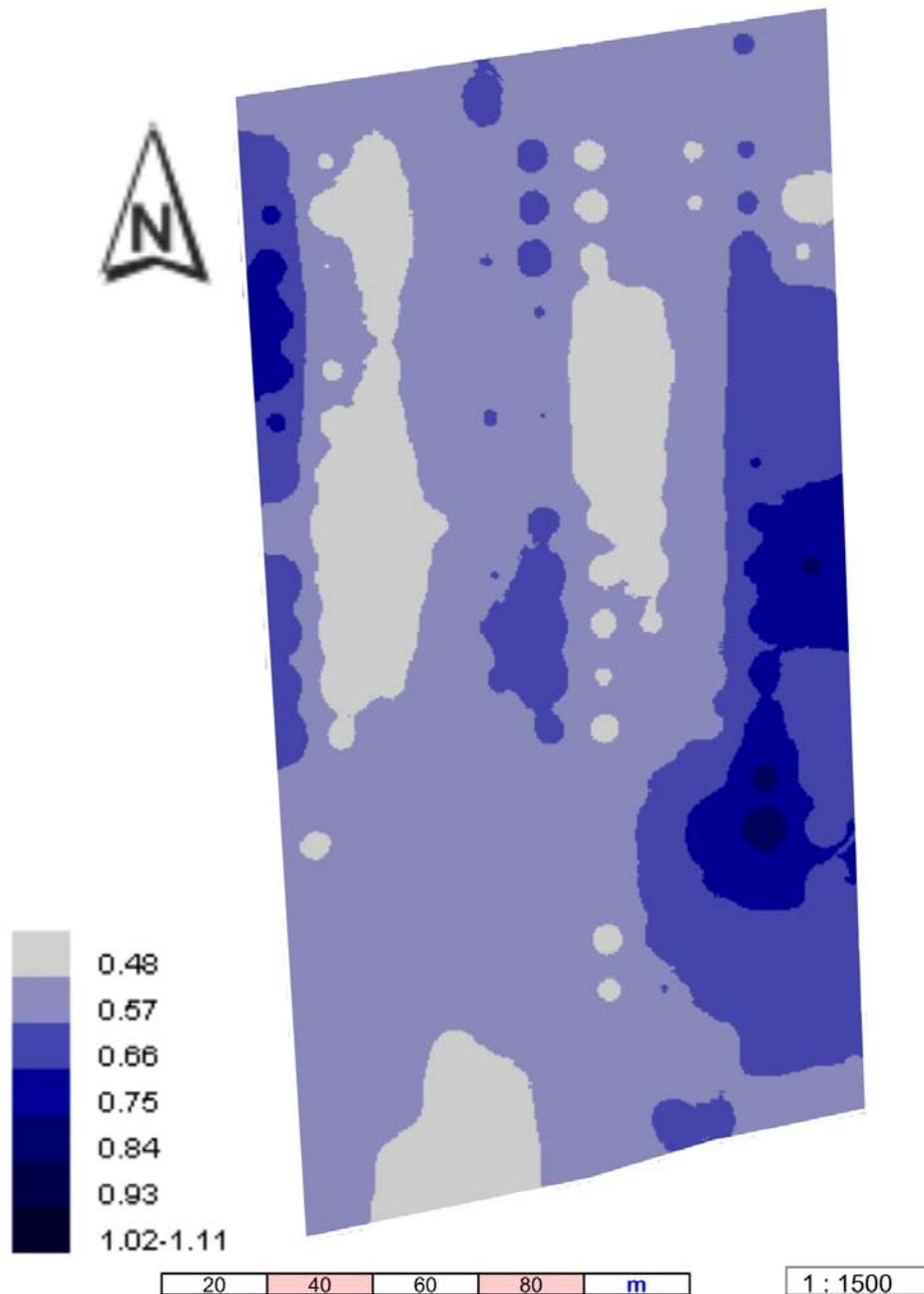


Abb. 20: Räumliche Verteilung der Suszeptibilität (Angabe dimensionslos) auf der Fläche „Im Berge“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 15.03.2006, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Räumliche Verteilung der Suszeptibilität

Messsystem: EM38, vertikaler Messmodus, Messtermin: 14.03.2007

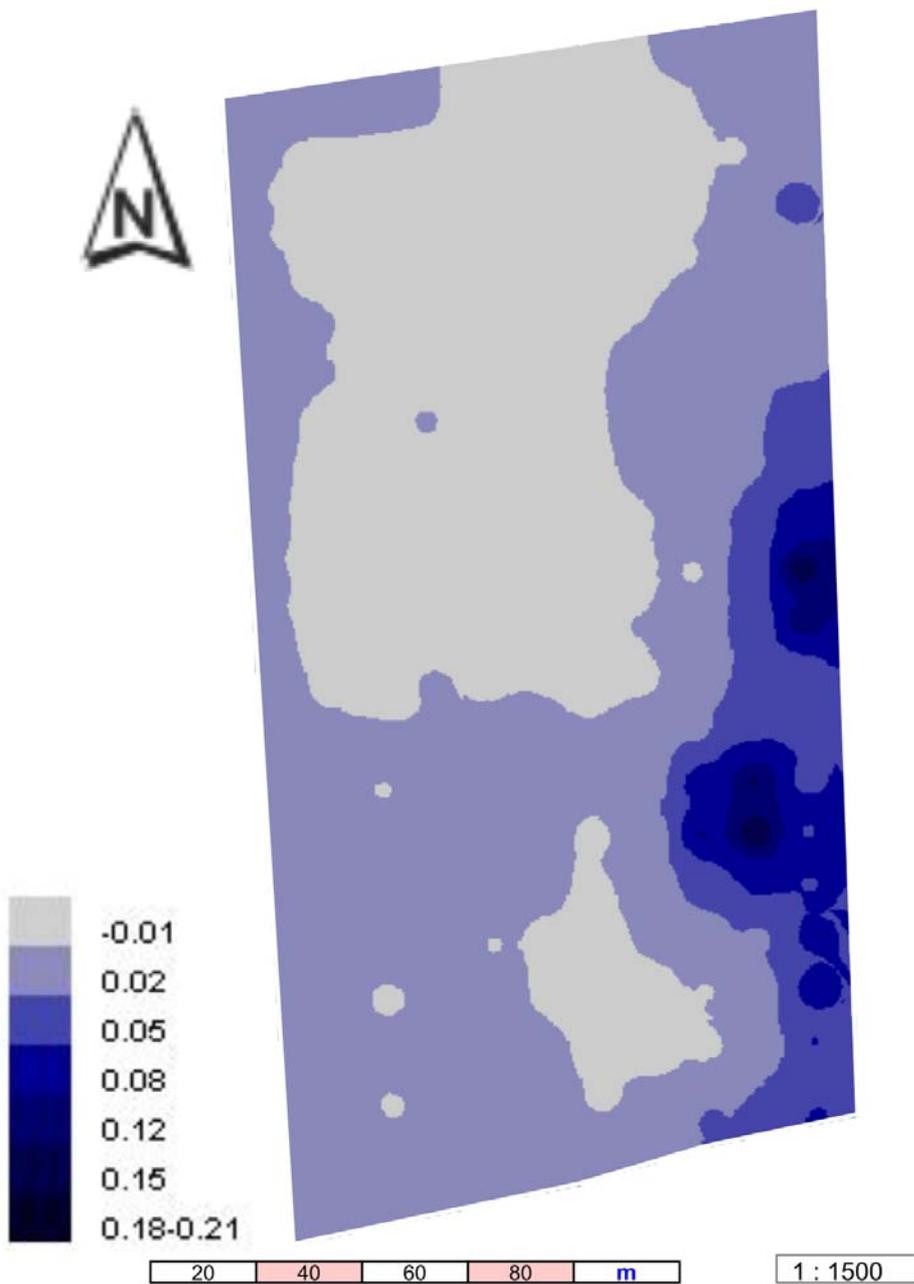


Abb. 21: Räumliche Verteilung der Suszeptibilität (Angabe dimensionslos) auf der Fläche „Im Berge“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 14.03.2007, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Ertrag 2001

Frucht: Einkorn, Ertrag z-transformiert

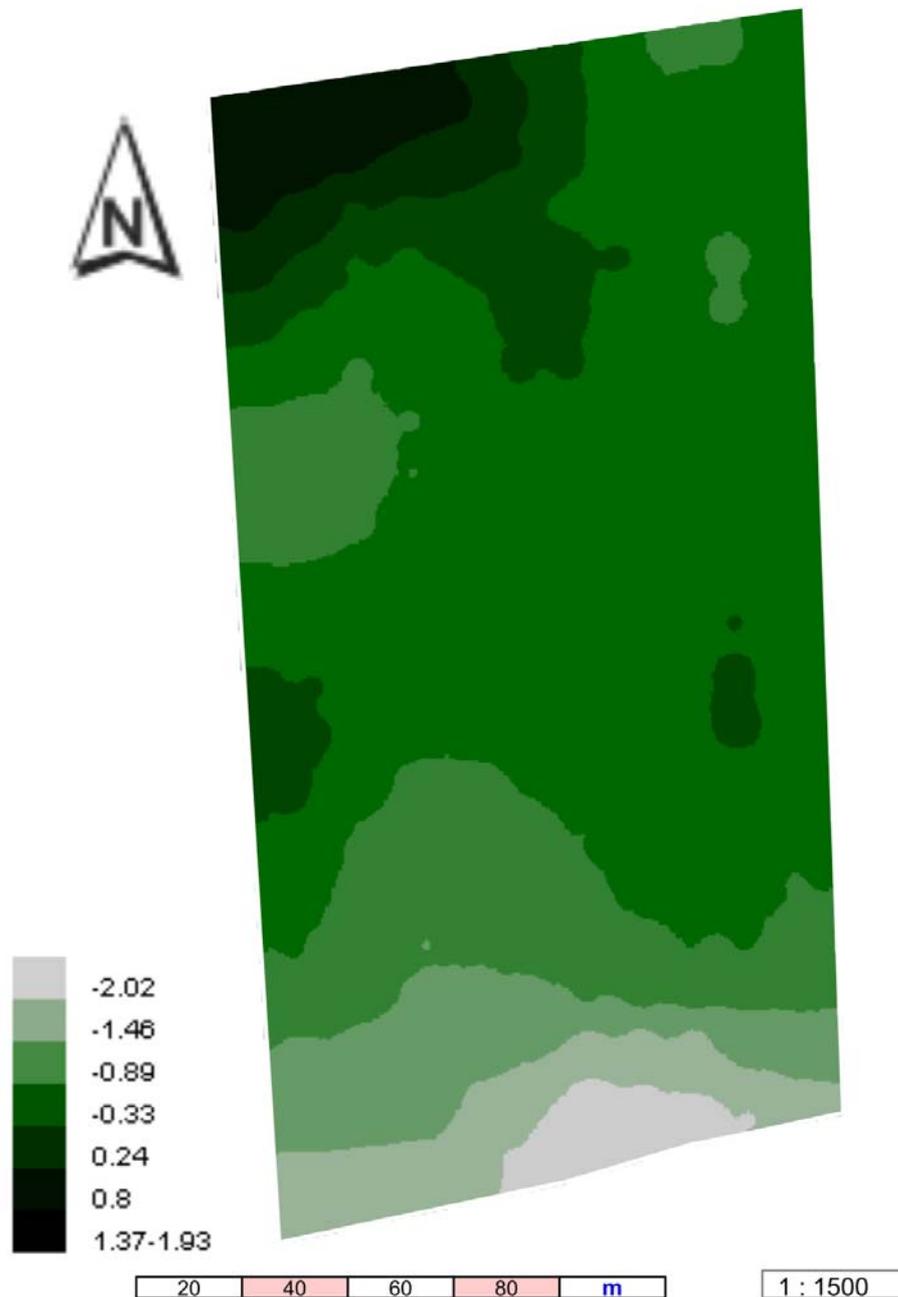


Abb. 22: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Im Berge“, Erntejahr 2001, Frucht: Einkorn, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Ertrag 2006

Frucht: Dinkel, Ertrag z-transformiert

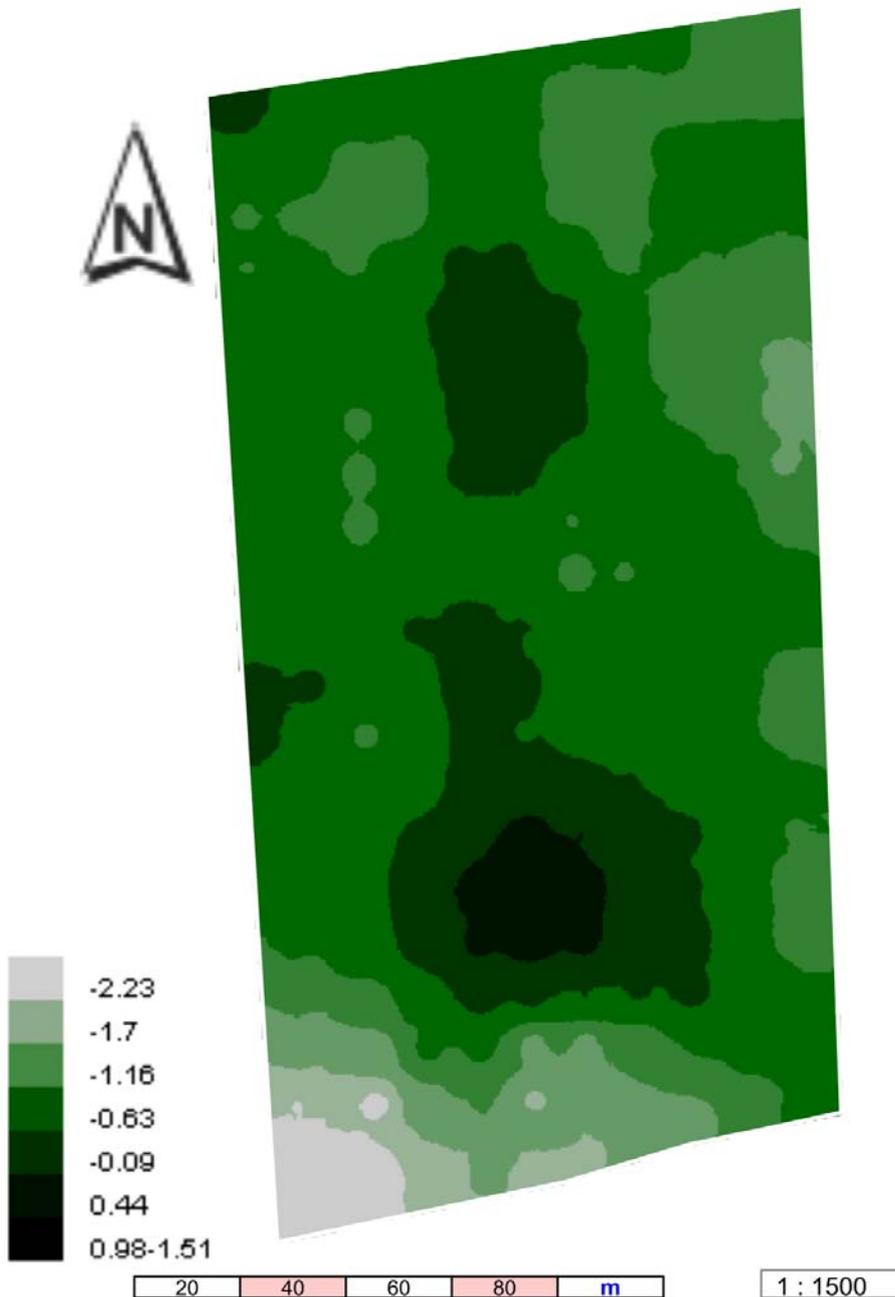


Abb. 23: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Im Berge“, Erntejahr 2006, Frucht: Dinkel, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Im Berge“

Ertrag 2007

Frucht: Sommerhafer, Ertrag z-transformiert

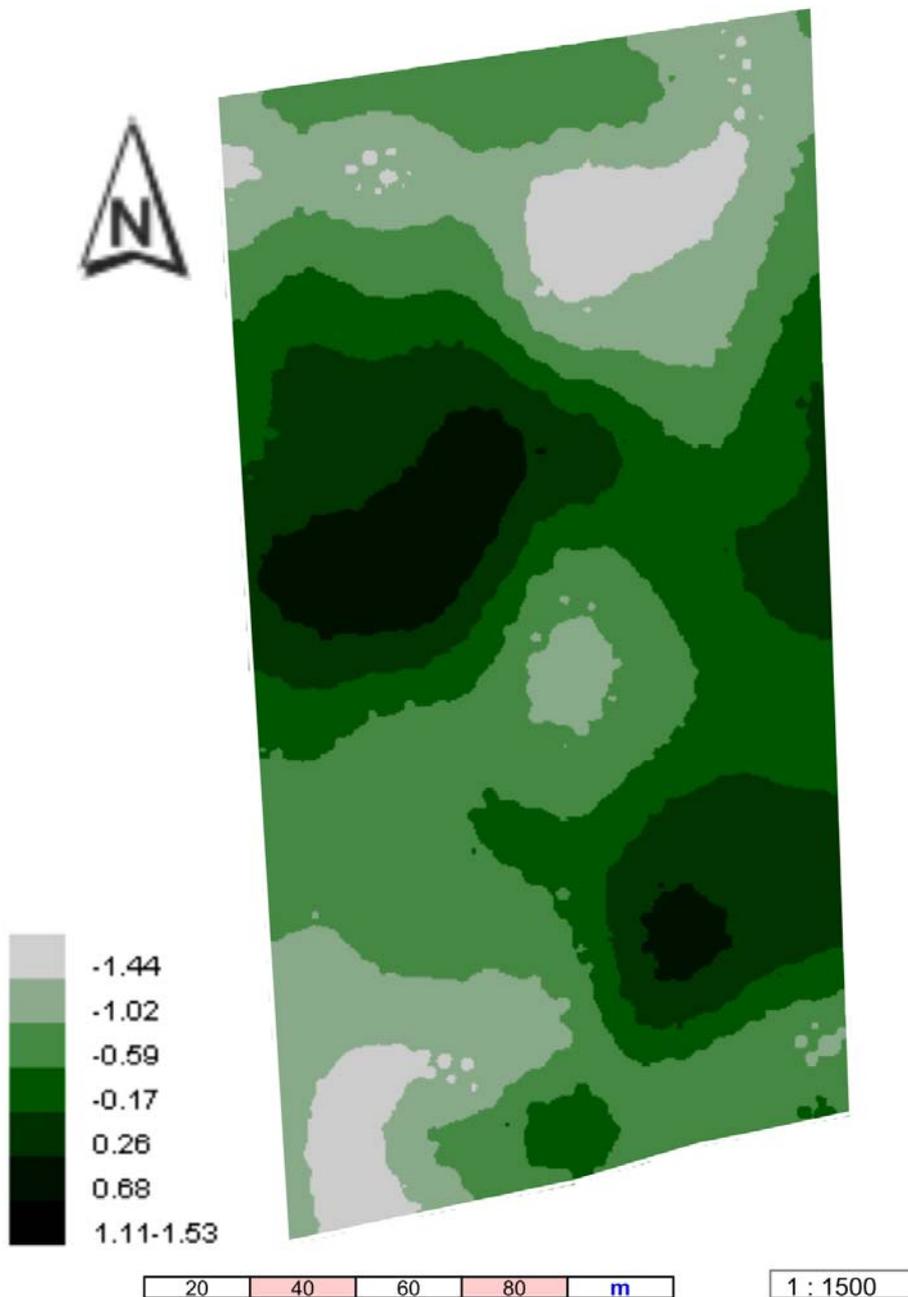


Abb. 24: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Im Berge“, Erntejahr 2007, Frucht: Sommerhafer, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung des Sandgehalts 0 - 30 cm Tiefe

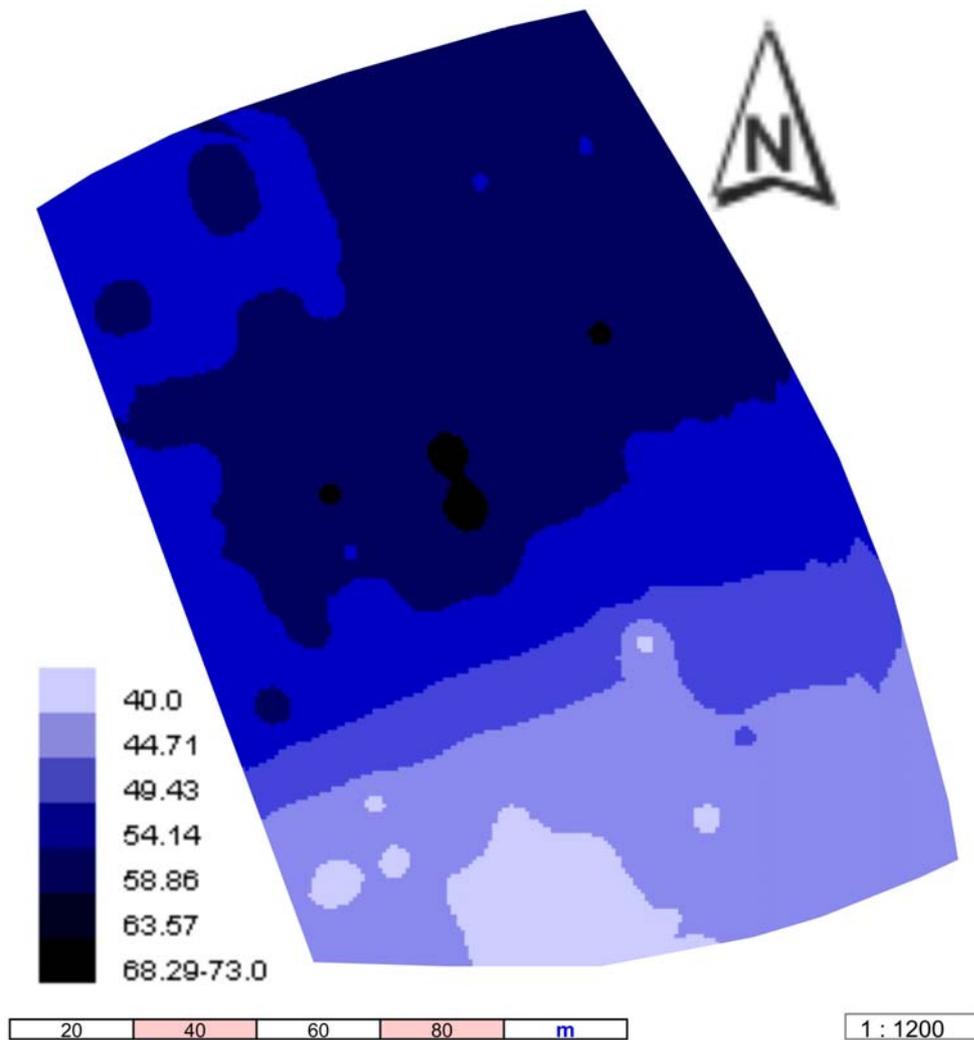


Abb. 25: Räumliche Verteilung des Sandgehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Wellenkamp“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung des Schluffgehalts 0 - 30 cm Tiefe

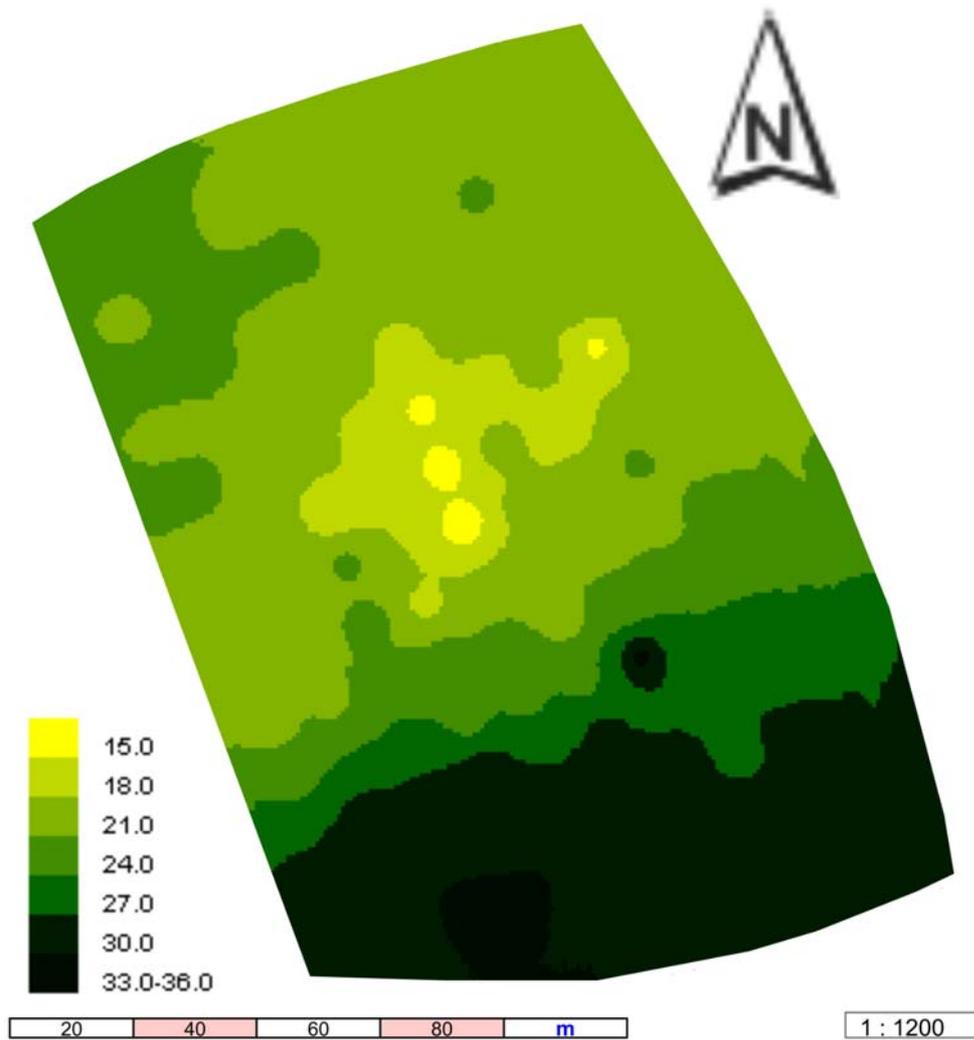


Abb. 26: Räumliche Verteilung des Schluffgehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Wellenkamp“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung des Tongehalts 0 - 30 cm Tiefe

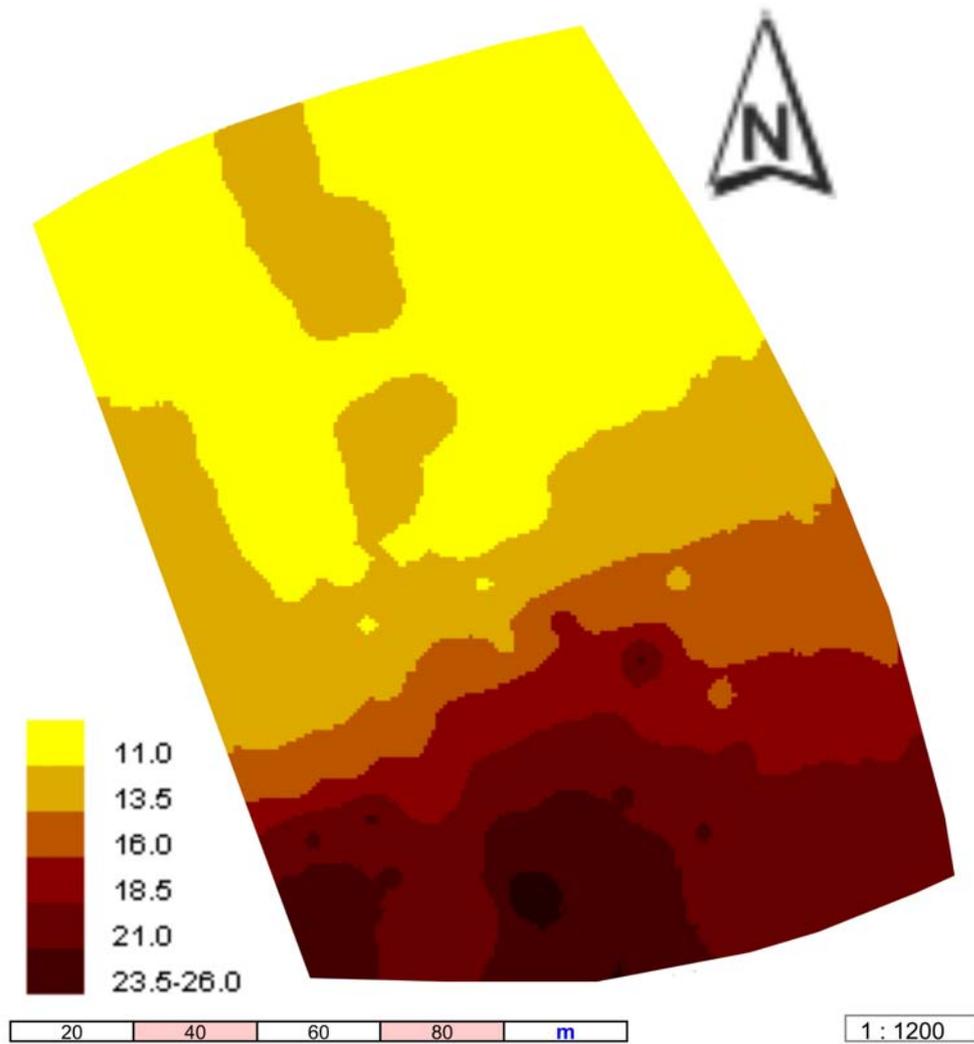


Abb. 27: Räumliche Verteilung des Tongehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Wellenkamp“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung des organischen Kohlenstoffs 0 - 30 cm Tiefe

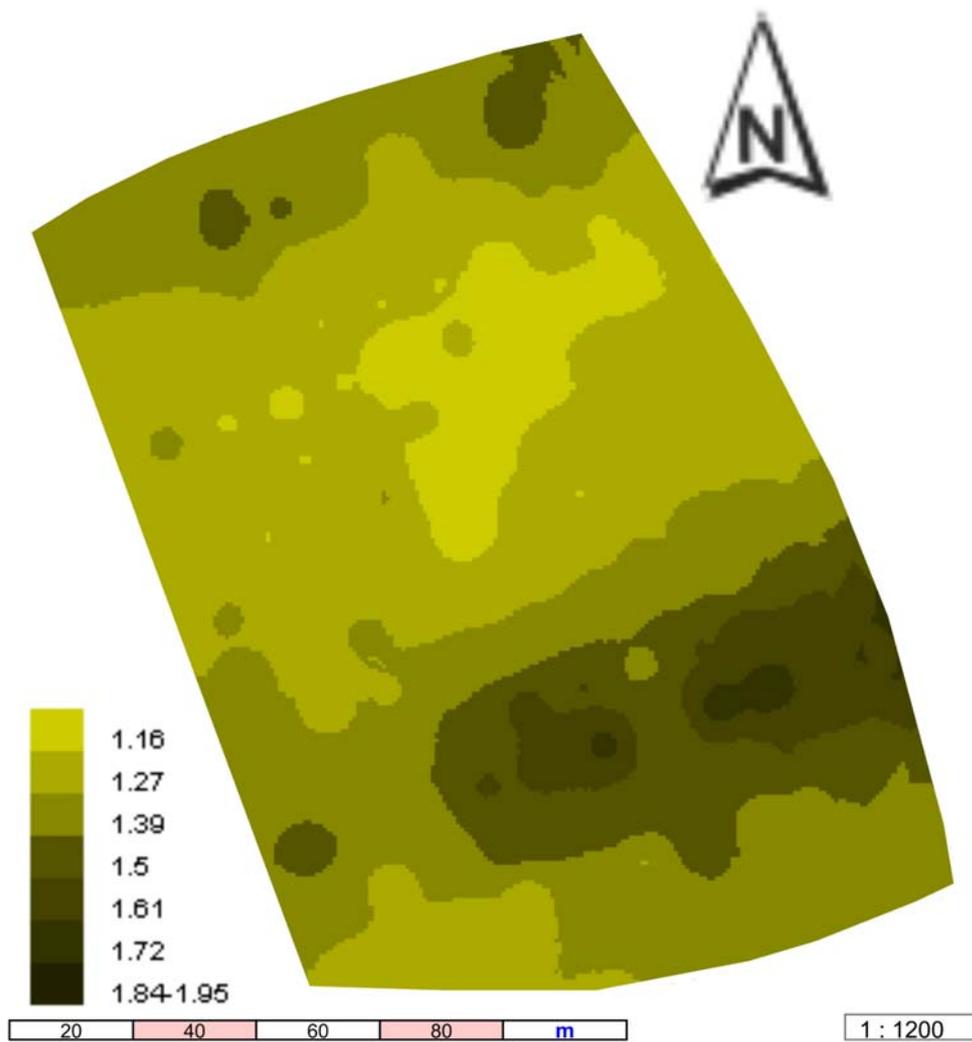


Abb. 28: Räumliche Verteilung des organischen Kohlenstoffgehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Wellenkamp“, Interpolationsmethode „Inverse Distanz“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 17.03.2005

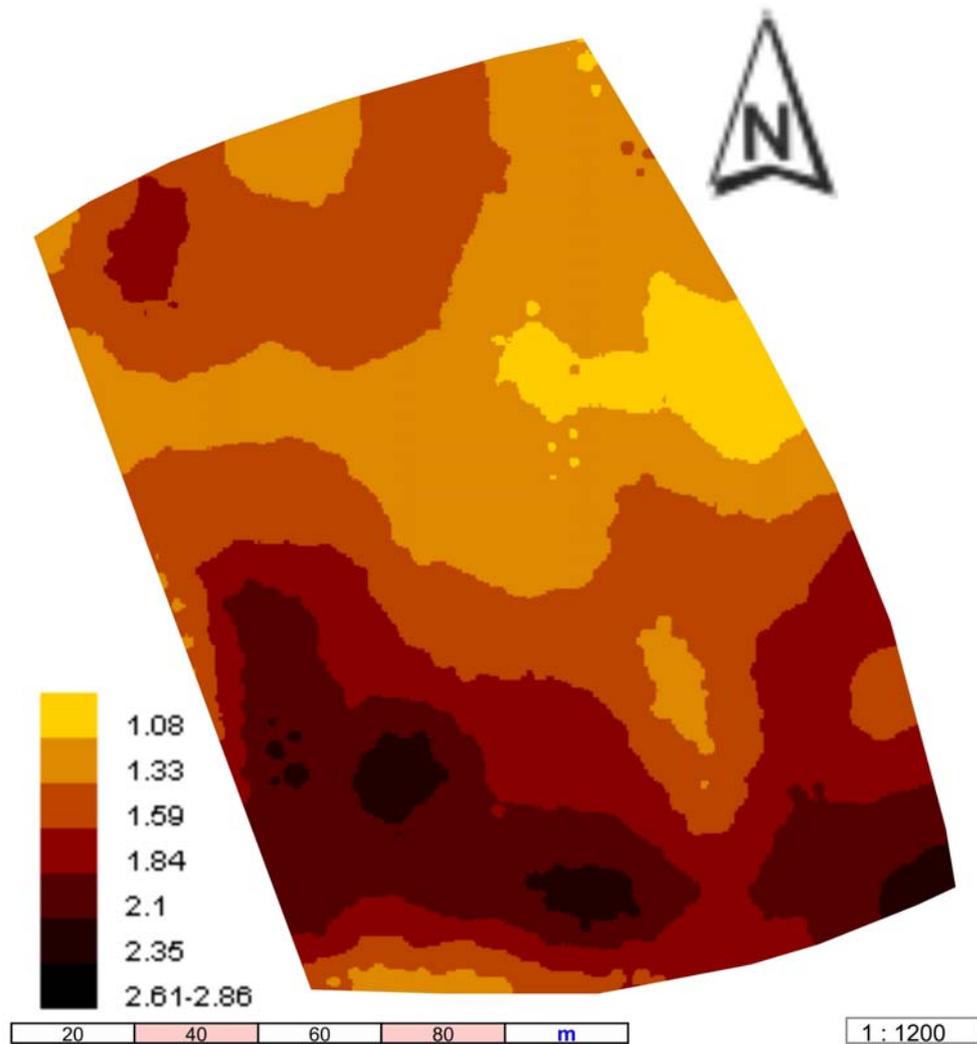


Abb. 29: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 17.03.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 21.03.2005

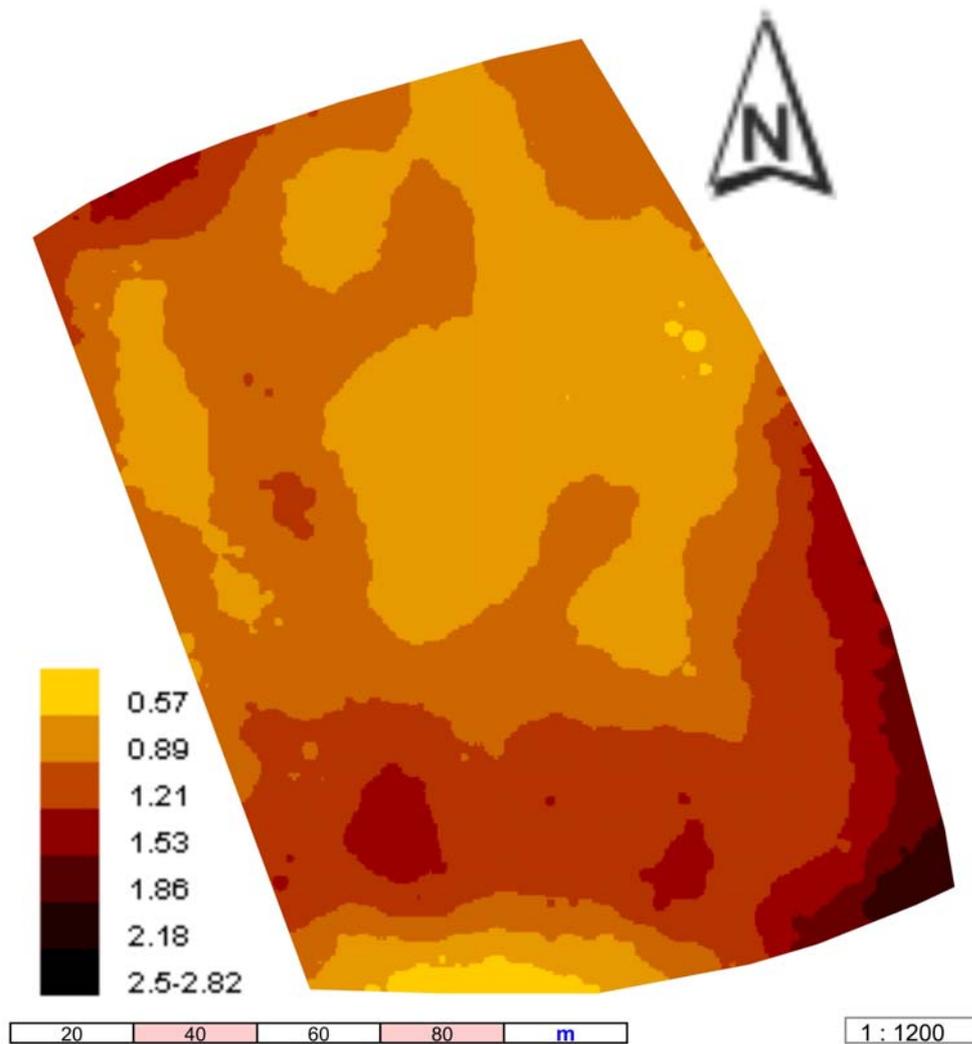


Abb. 30: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 21.03.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 19.08.2005

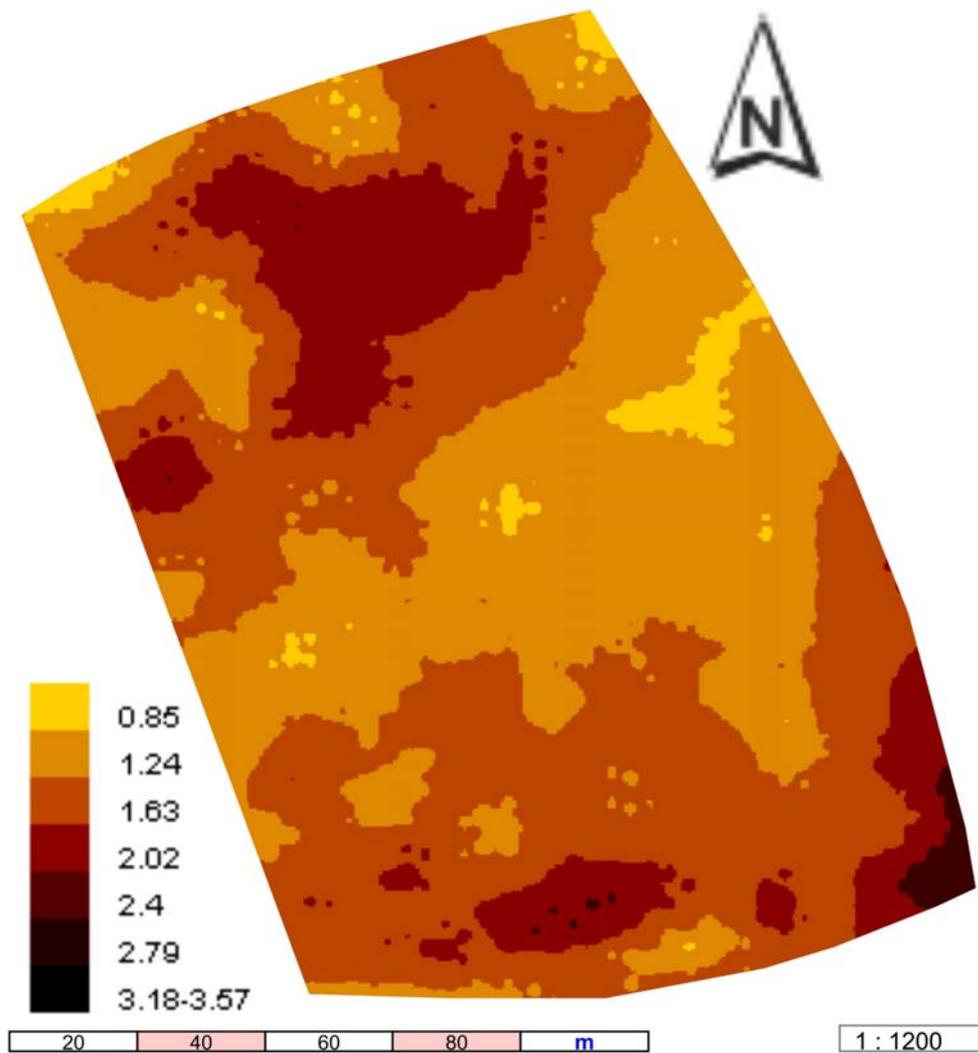


Abb. 31: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 19.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 31.08.2005

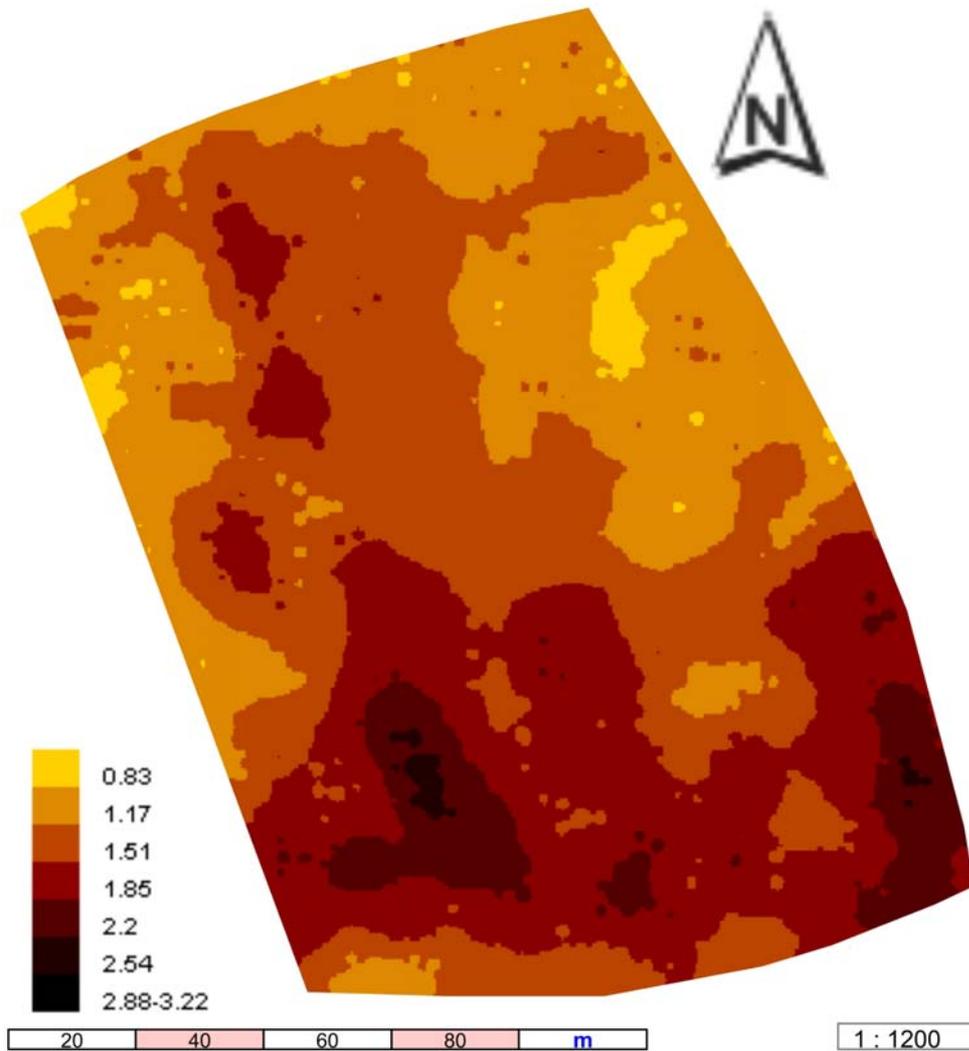


Abb. 32: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 31.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 19.09.2005

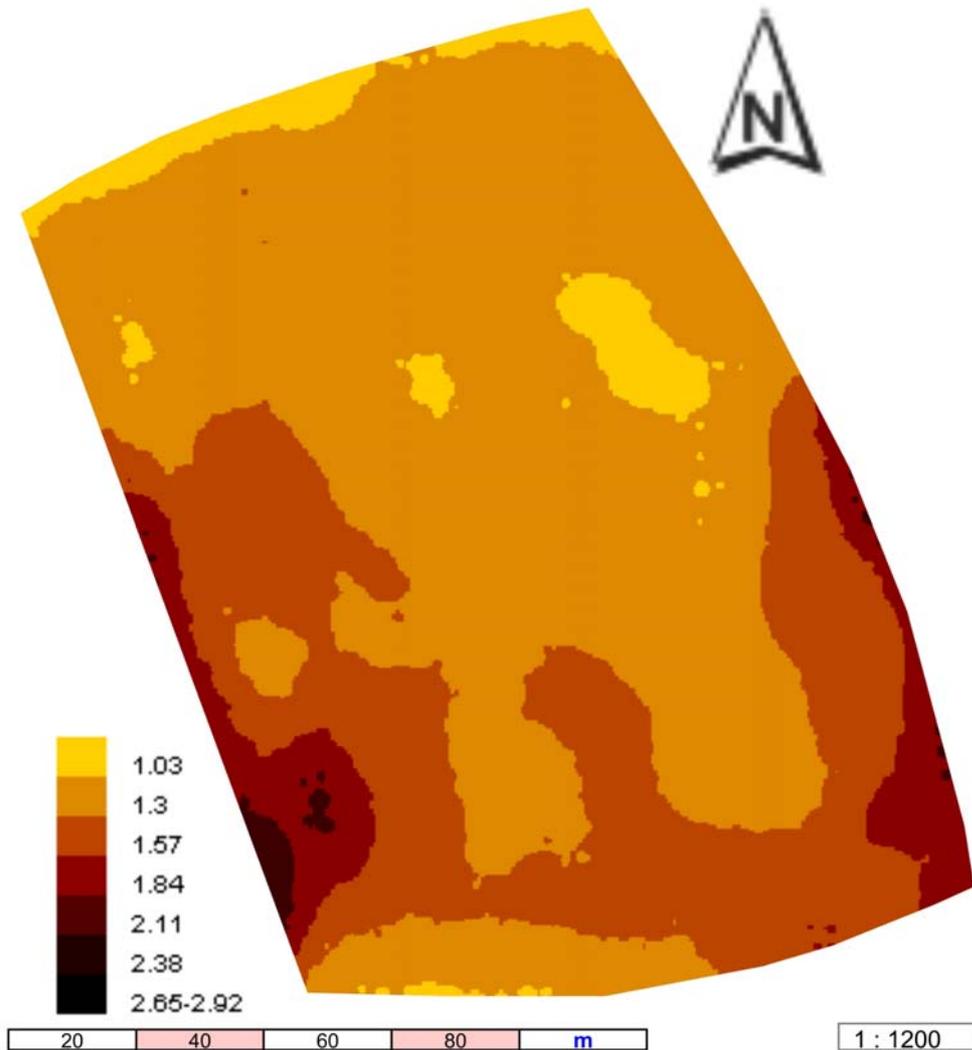


Abb. 33: Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 19.09.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 17.03.2005

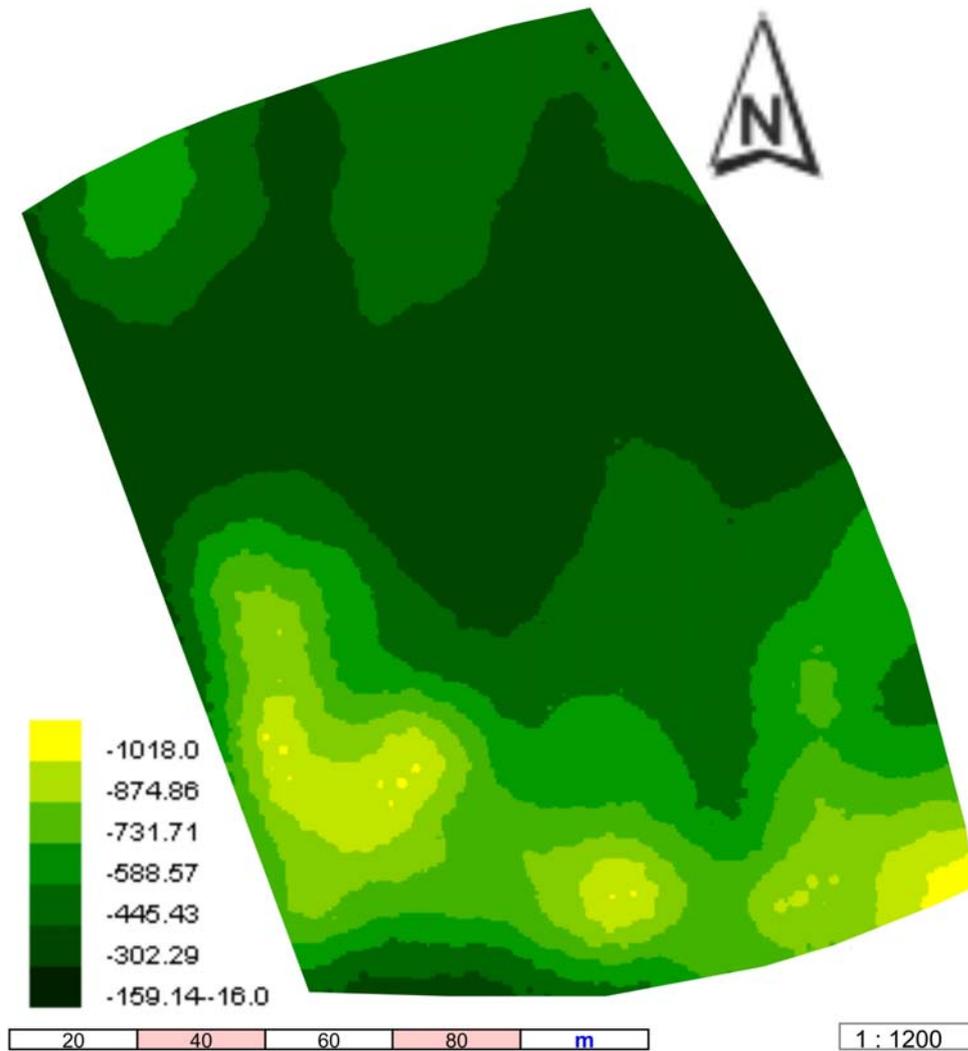


Abb. 34: Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität (Angabe in pF) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 17.03.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 31.08.2005

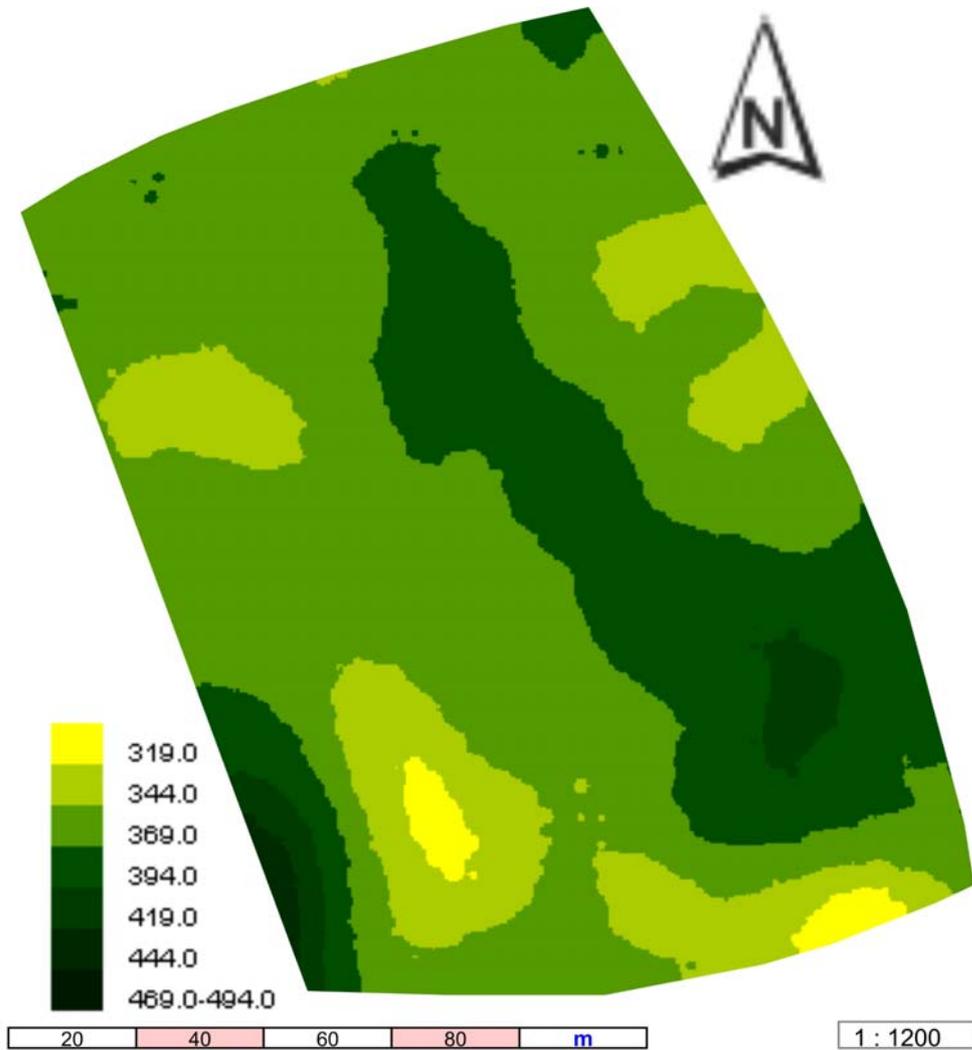


Abb. 35: Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität (Angabe in pF) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 31.08.2005, Interpolationsmethode“ Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 13.09.2005

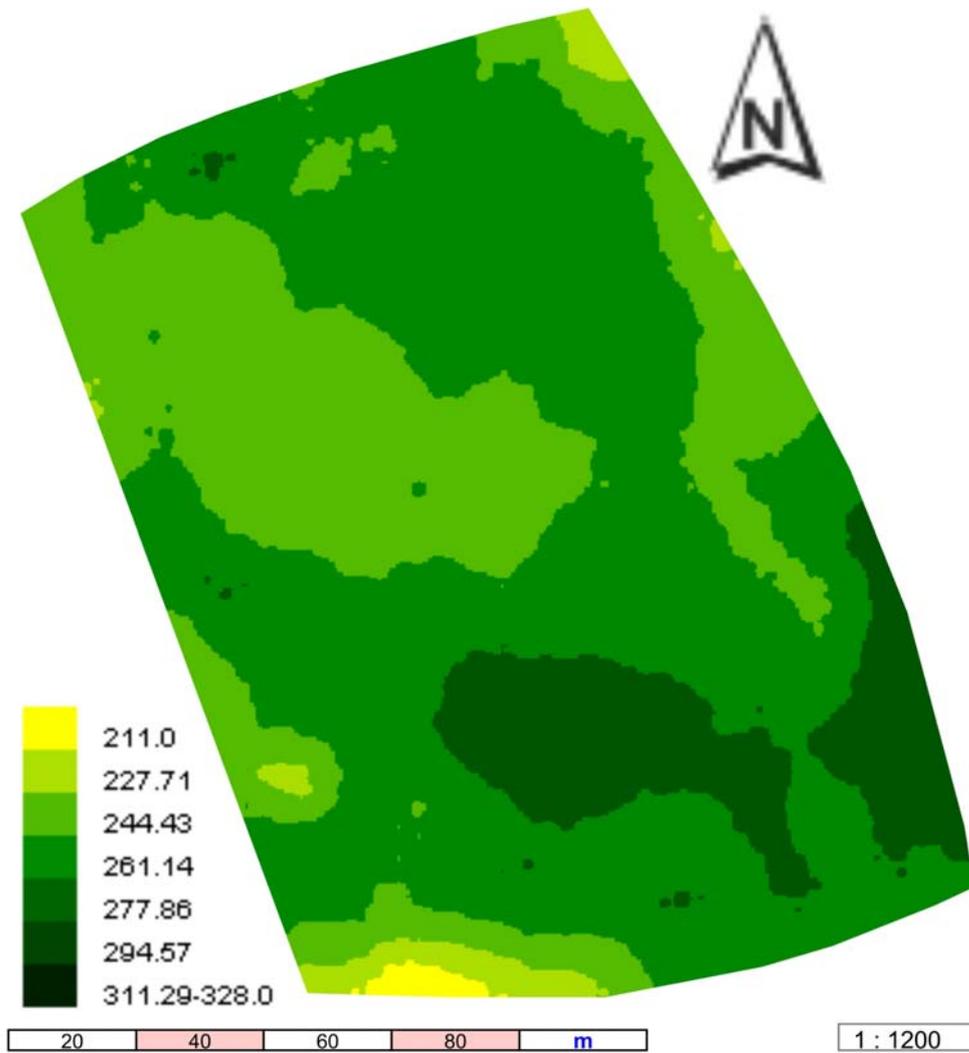


Abb. 36: Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität (Angabe in pF) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 13.09.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 19.09.2005

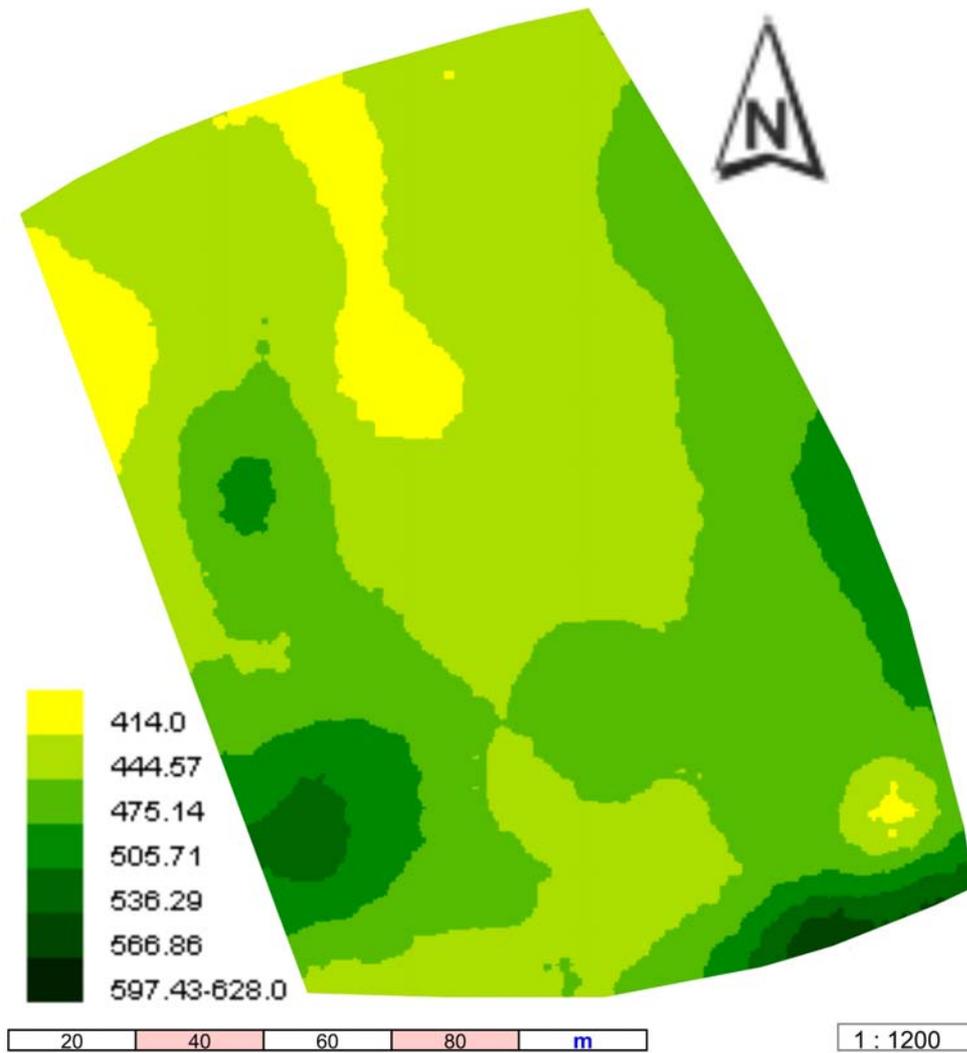


Abb. 37: Räumliche Verteilung der elektrischen Kapazität (Angabe in pF) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 19.09.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 17.03.2005

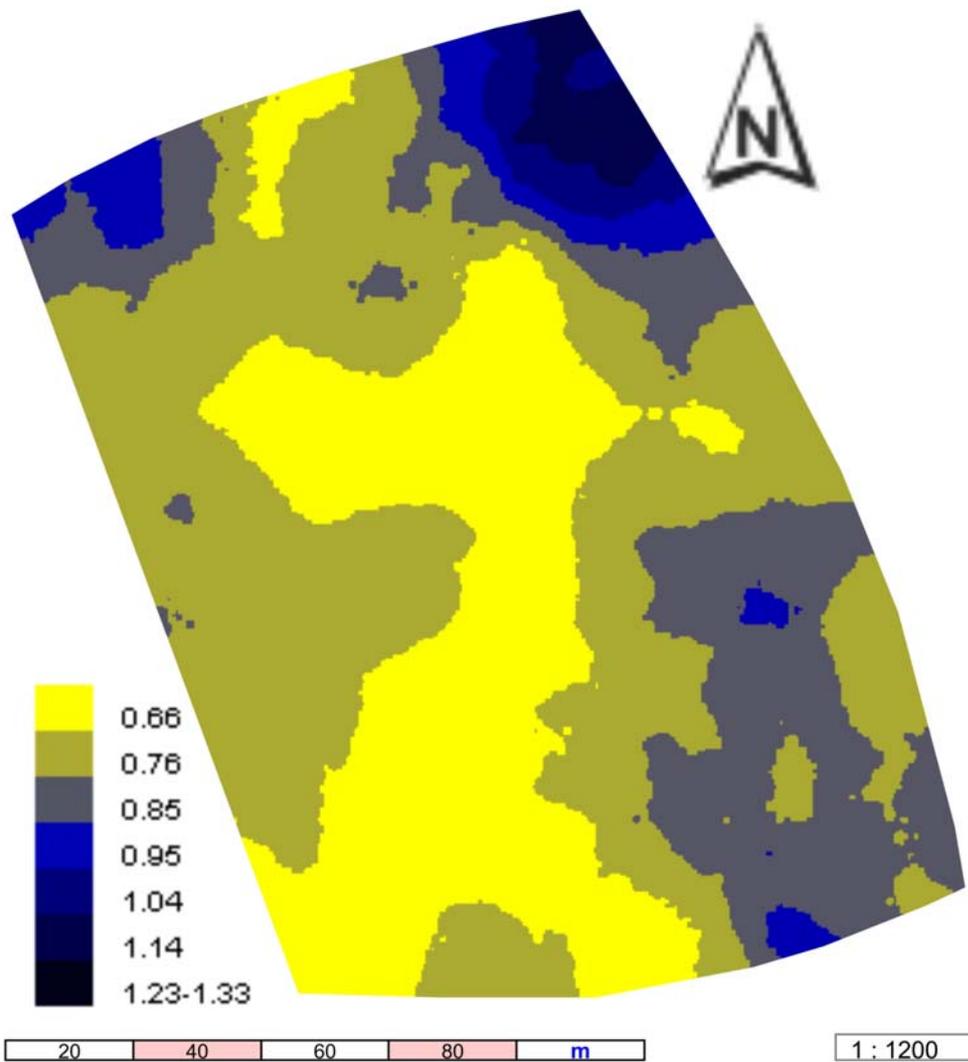


Abb. 38: Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens (Angabe dimensionlos) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 17.03.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 31.08.2005

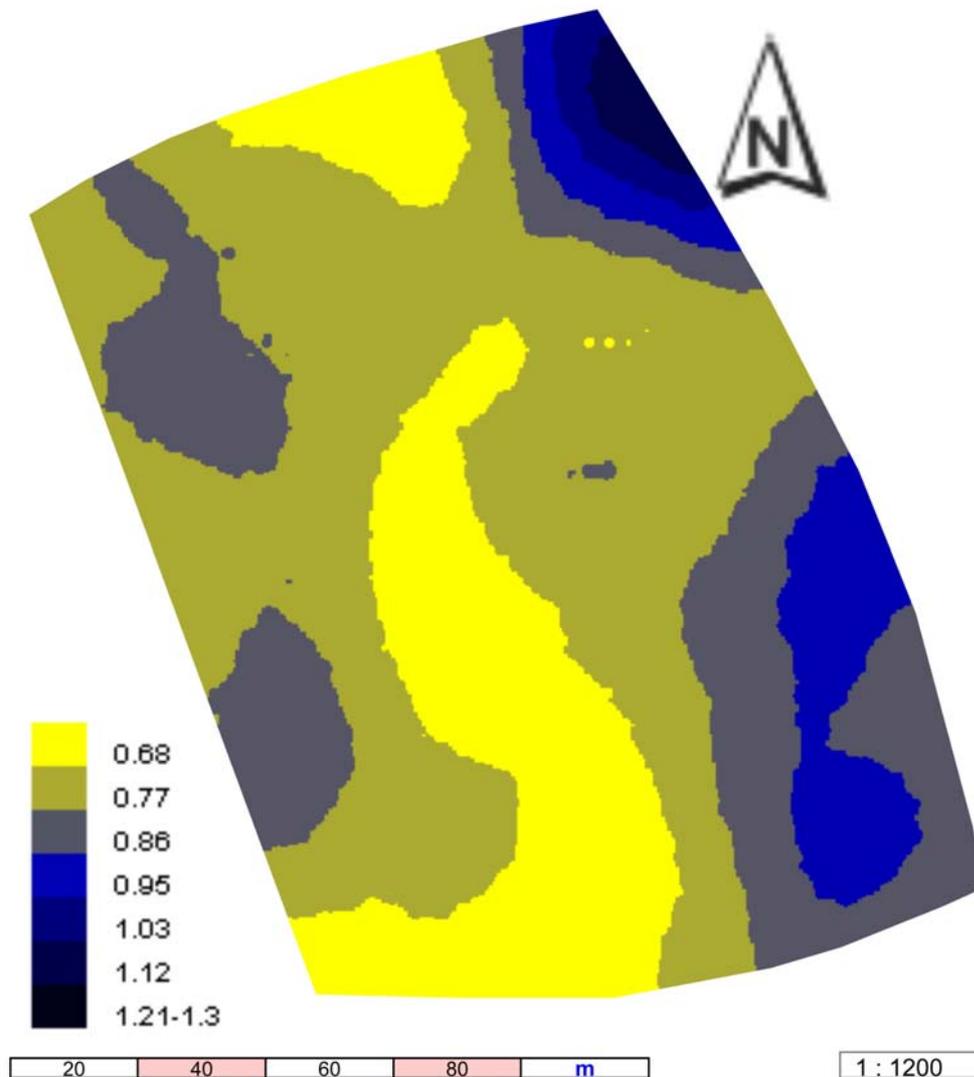


Abb. 39: Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens (Angabe dimensionlos) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 31.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens

Messsystem: BOs - 1EP, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 19.09.2005

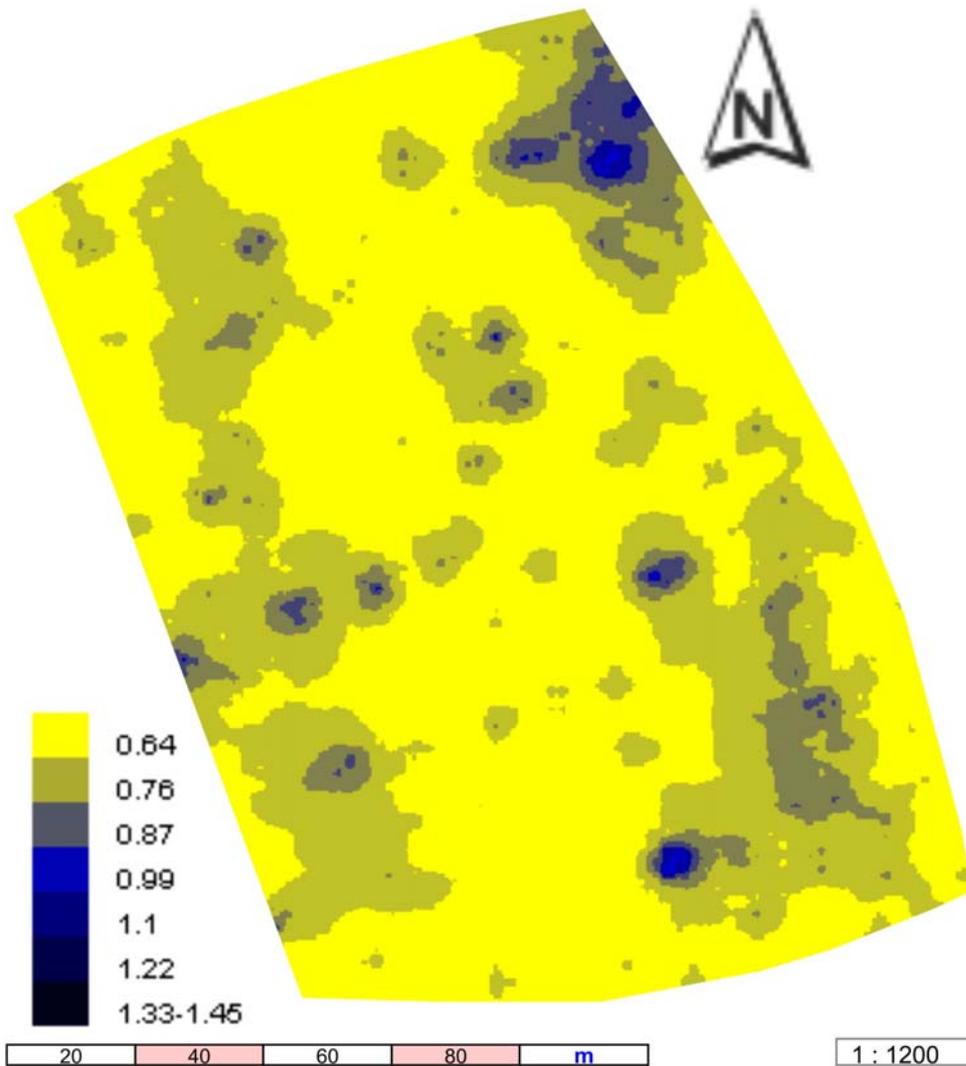


Abb. 40: Räumliche Verteilung des elektrischen Rauschens (Angabe dimensionlos) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messsystem: BOs - 1EP, Messtermin: 19.09.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC1)

Messsystem: ARP03, Messtiefe: 0 - 50 cm, Messtermin: Herbst 2004

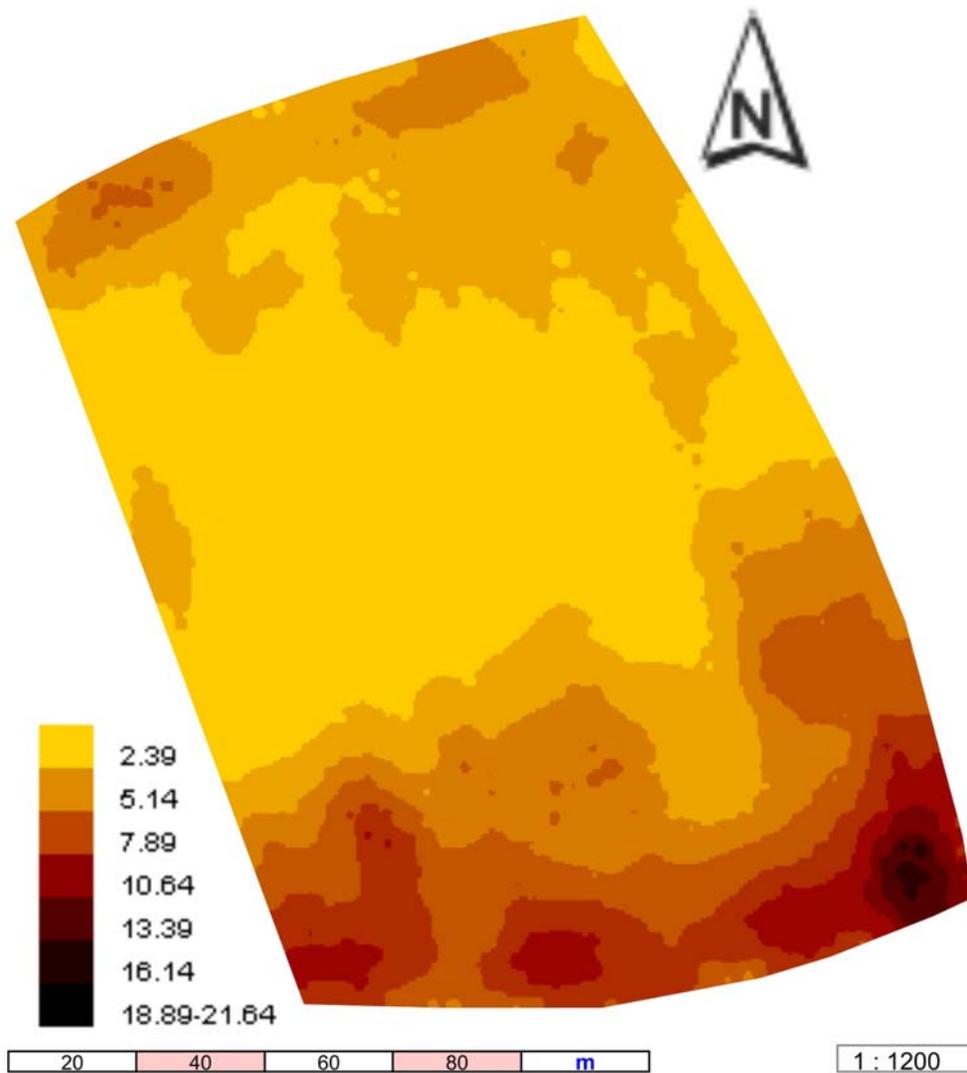


Abb. 41: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC1 / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messtiefe: 0 - 50 cm, Messsystem: ARP03, Messtermin: Herbst 2004, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit

Messsystem: EM38, horizontaler Messmodus, Messtermin: 31.08.2005

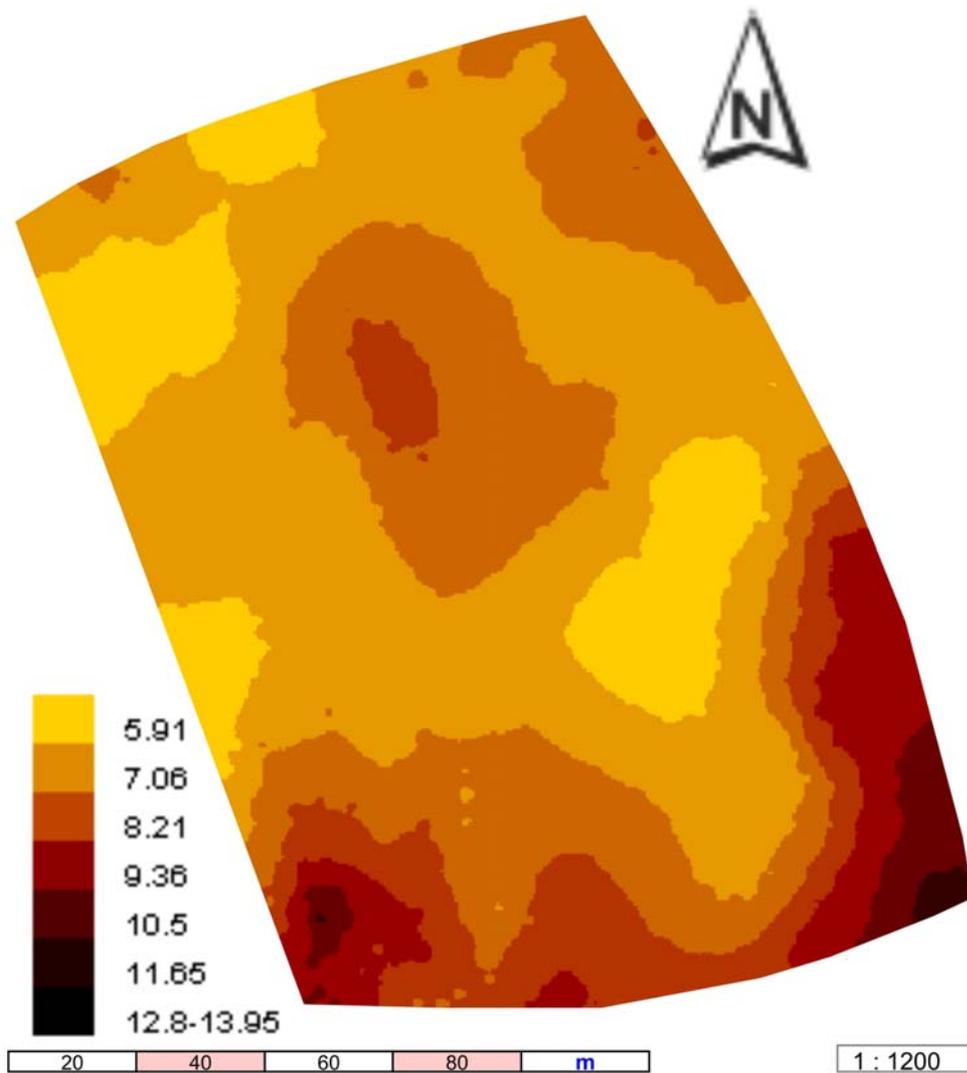


Abb. 42: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_{hor} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (horizontaler Messmodus), Messtermin: 31.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit

Messsystem: EM38, vertikaler Messmodus, Messtermin: 31.08.2005

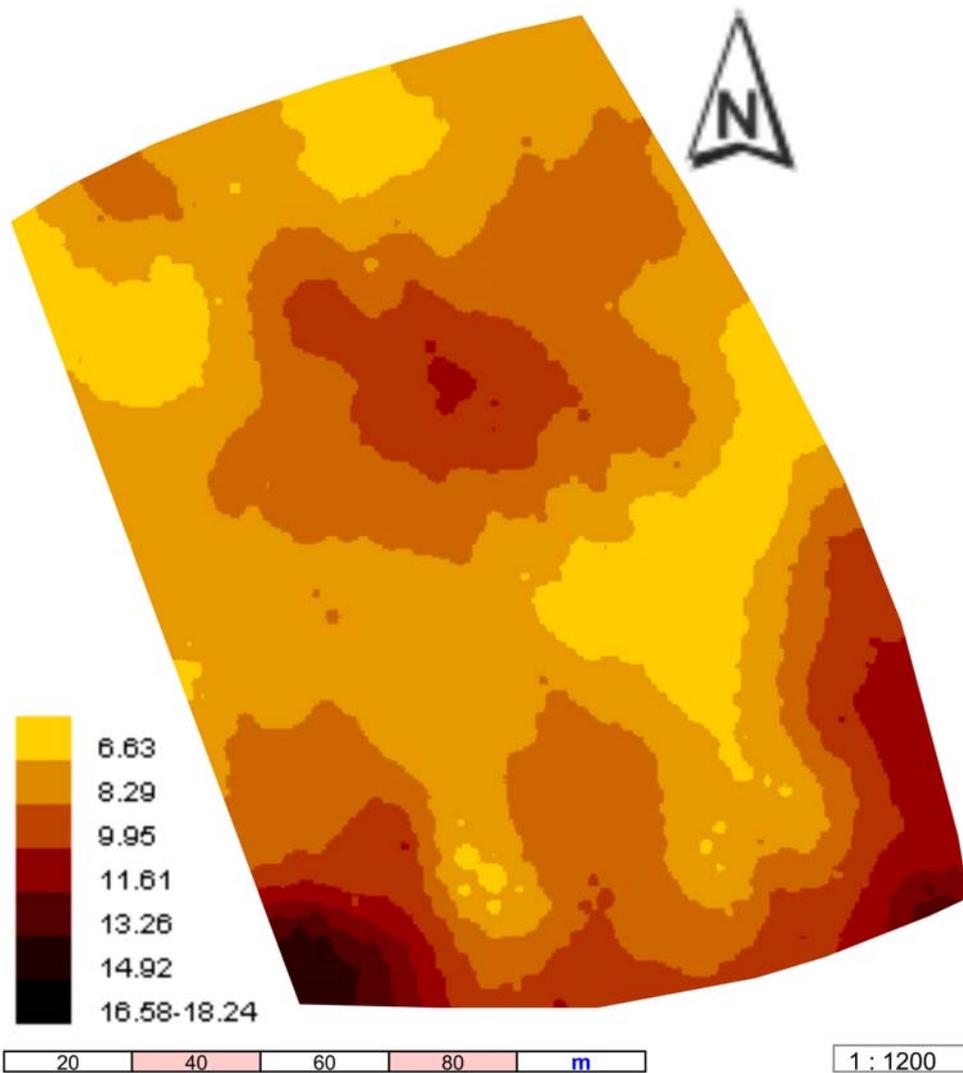


Abb. 43: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_{ver} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 31.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit

Messsystem: EM38, horizontaler Messmodus, Messtermin: 19.09.2005

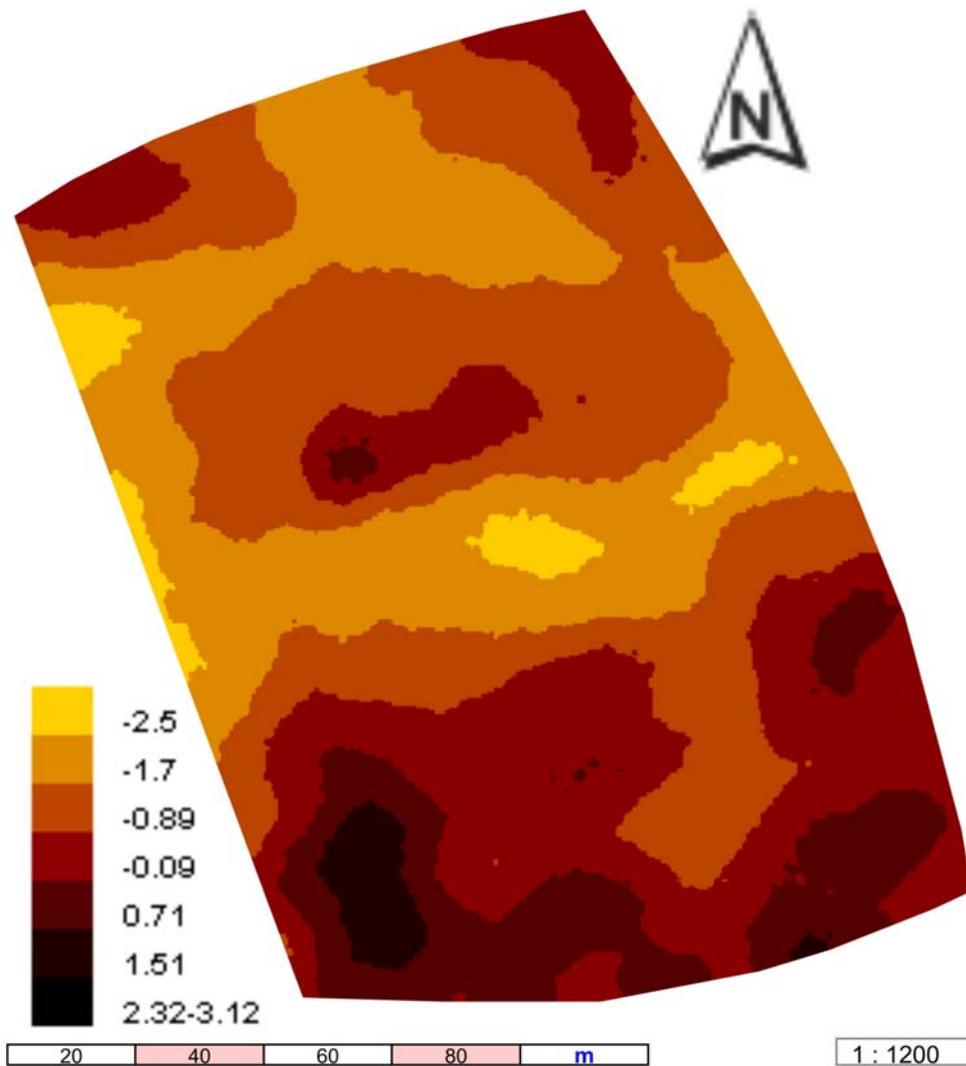


Abb. 44: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_{hor} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (horizontaler Messmodus), Messtermin: 19.09.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit

Messsystem: EM38, vertikaler Messmodus, Messtermin: 19.09.2005

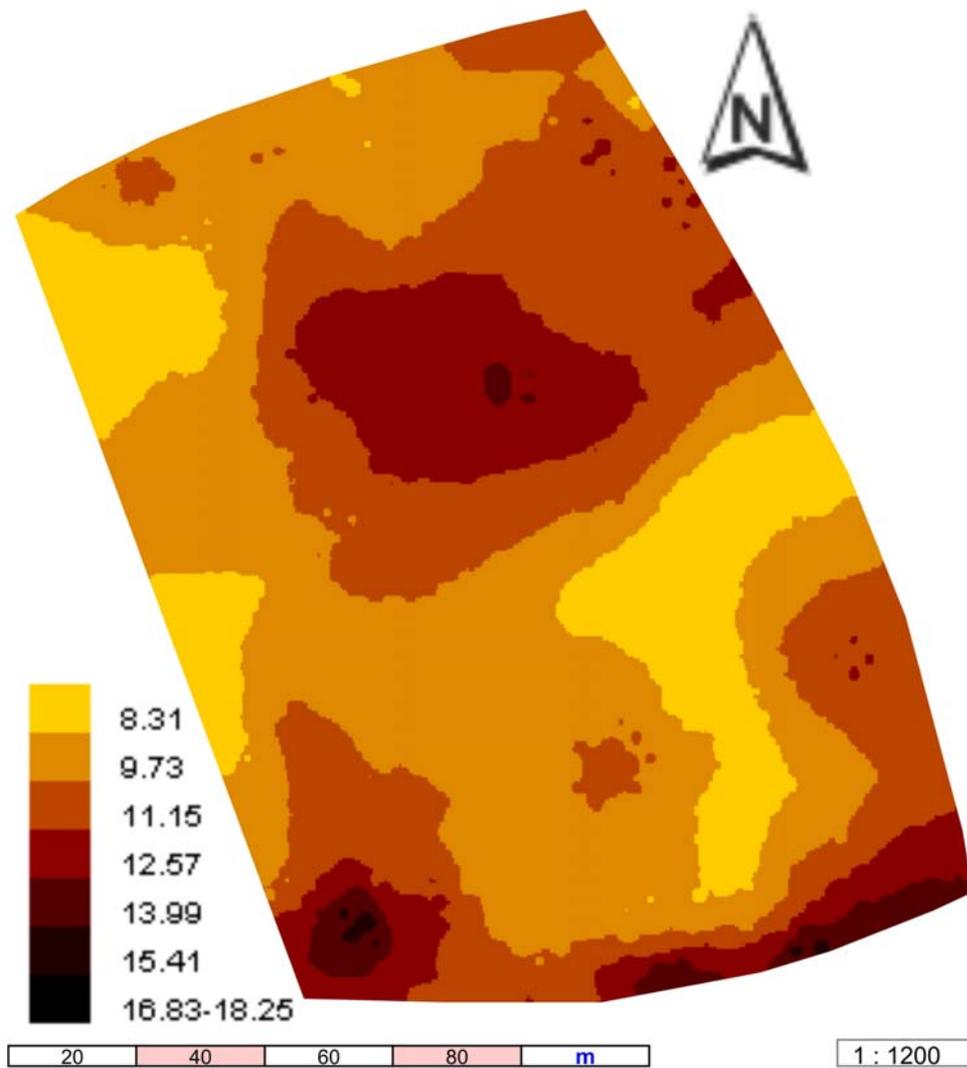


Abb. 45: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_{ver} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 19.09.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit

Messsystem: EM38, horizontaler Messmodus, Messtermin: 23.03.2006

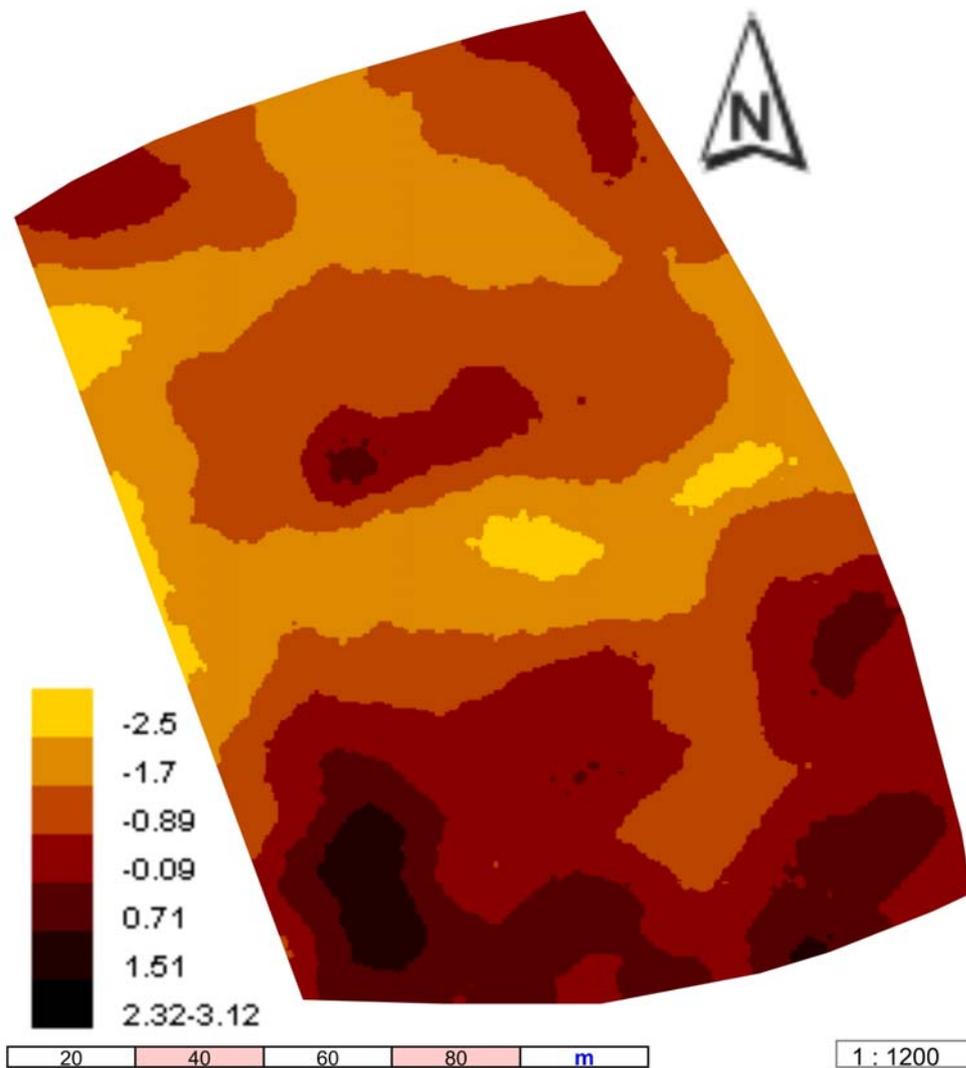


Abb. 46: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_{hor} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (horizontaler Messmodus), Messtermin: 23.03.2006, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit

Messsystem: EM38, vertikaler Messmodus, Messtermin: 23.03.2006

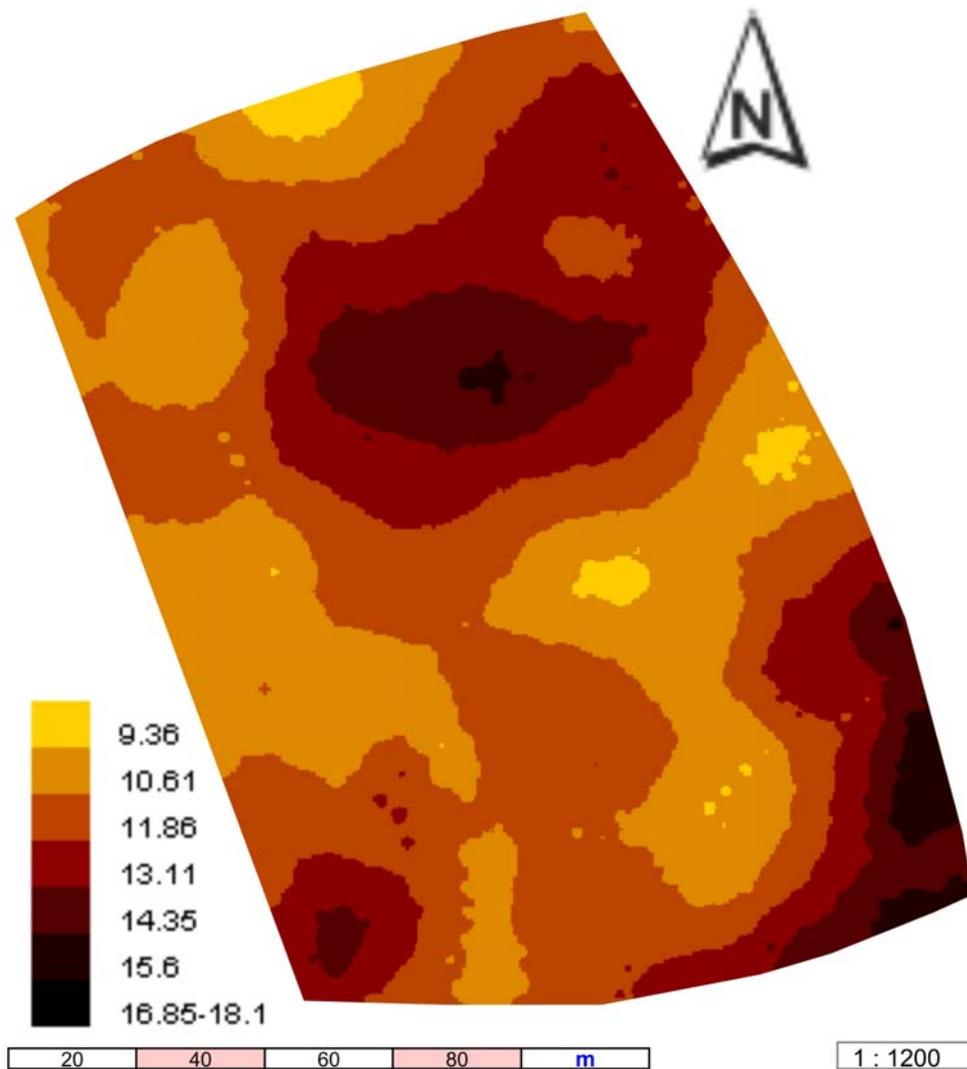


Abb. 47: Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC_{ver} / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 23.03.2006, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung der Suszeptibilität

Messsystem: EM38, vertikaler Messmodus, Messtermin: 31.08.2005

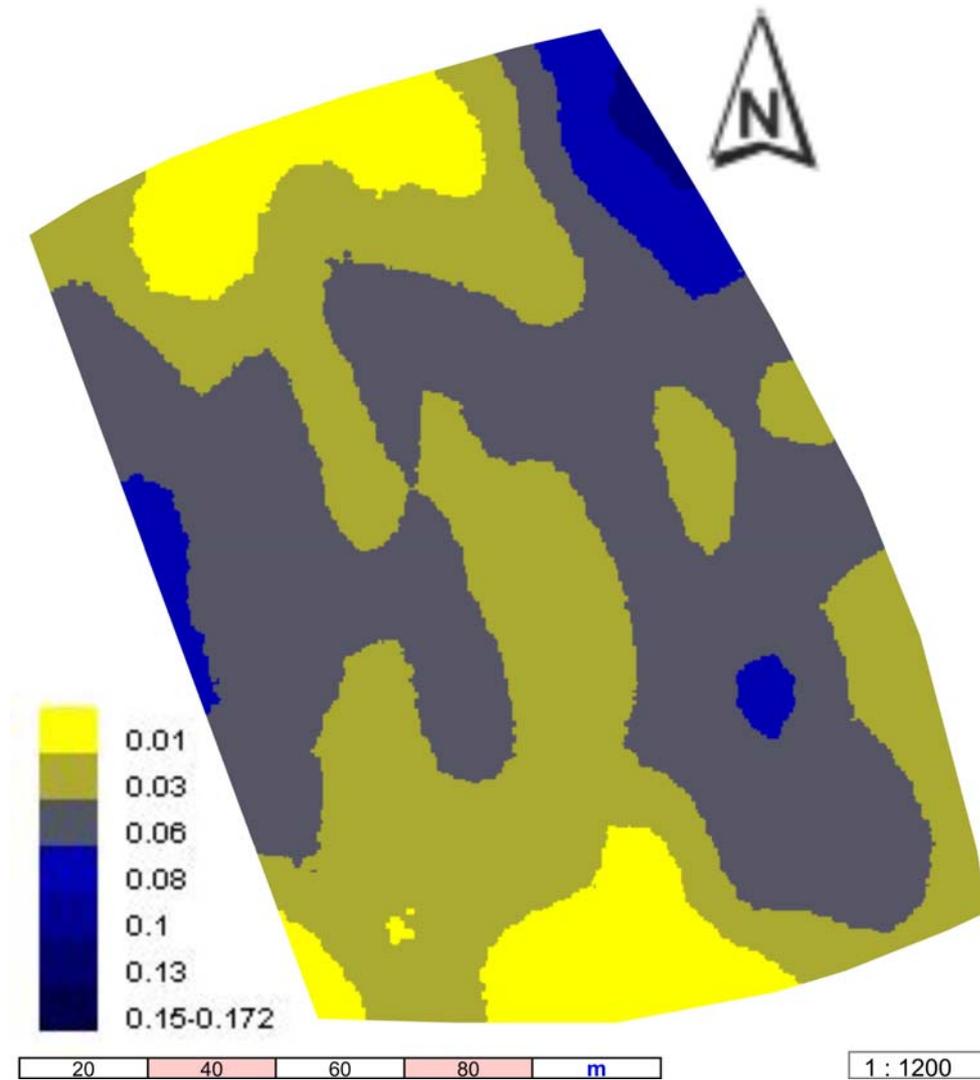


Abb. 48: Räumliche Verteilung der Suszeptibilität (Angabe dimensionlos) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 31.08.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung der Suszeptibilität

Messsystem: EM38, vertikaler Messmodus, Messtermin: 19.09.2005

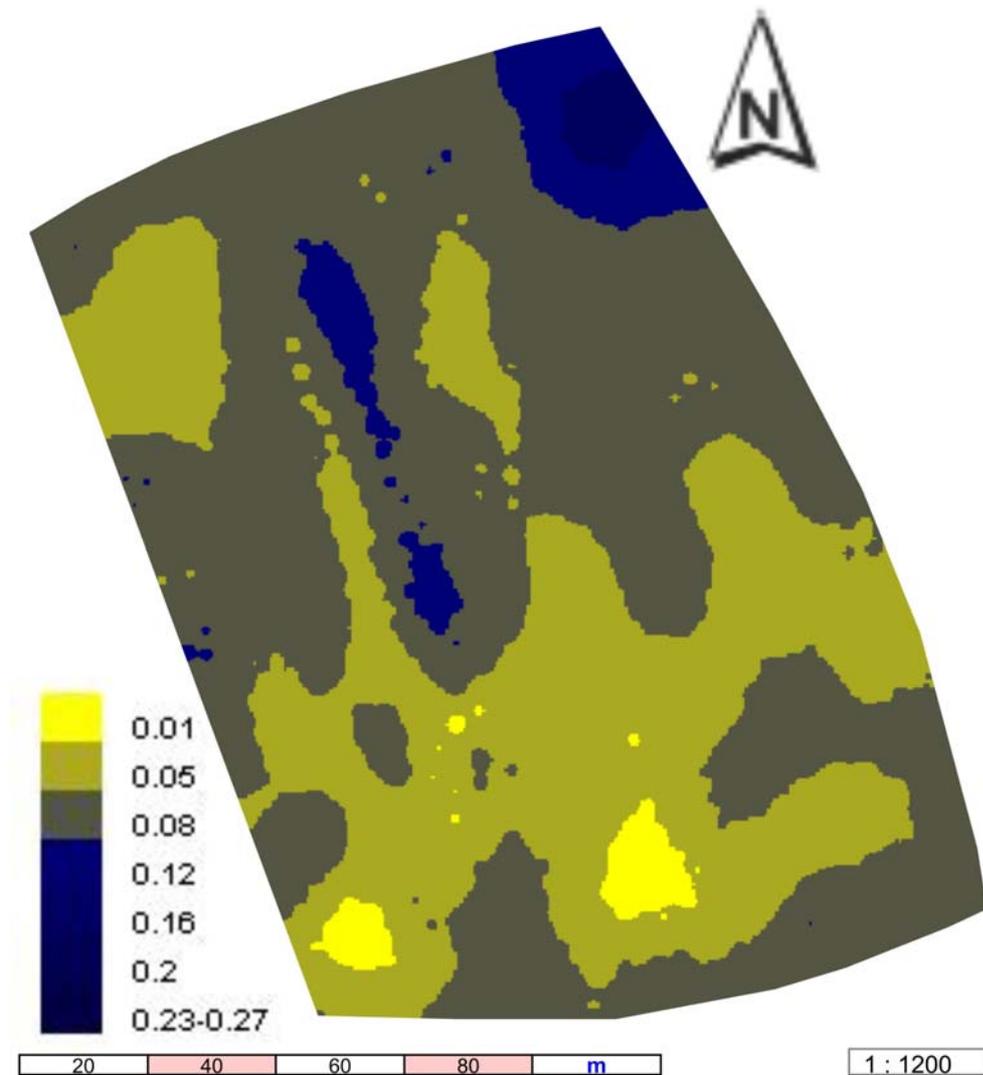


Abb. 49: Räumliche Verteilung der Suszeptibilität (Angabe dimensionlos) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 19.09.2005, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Räumliche Verteilung der Suszeptibilität

Messsystem: EM38, vertikaler Messmodus, Messtermin: 08.05.2006

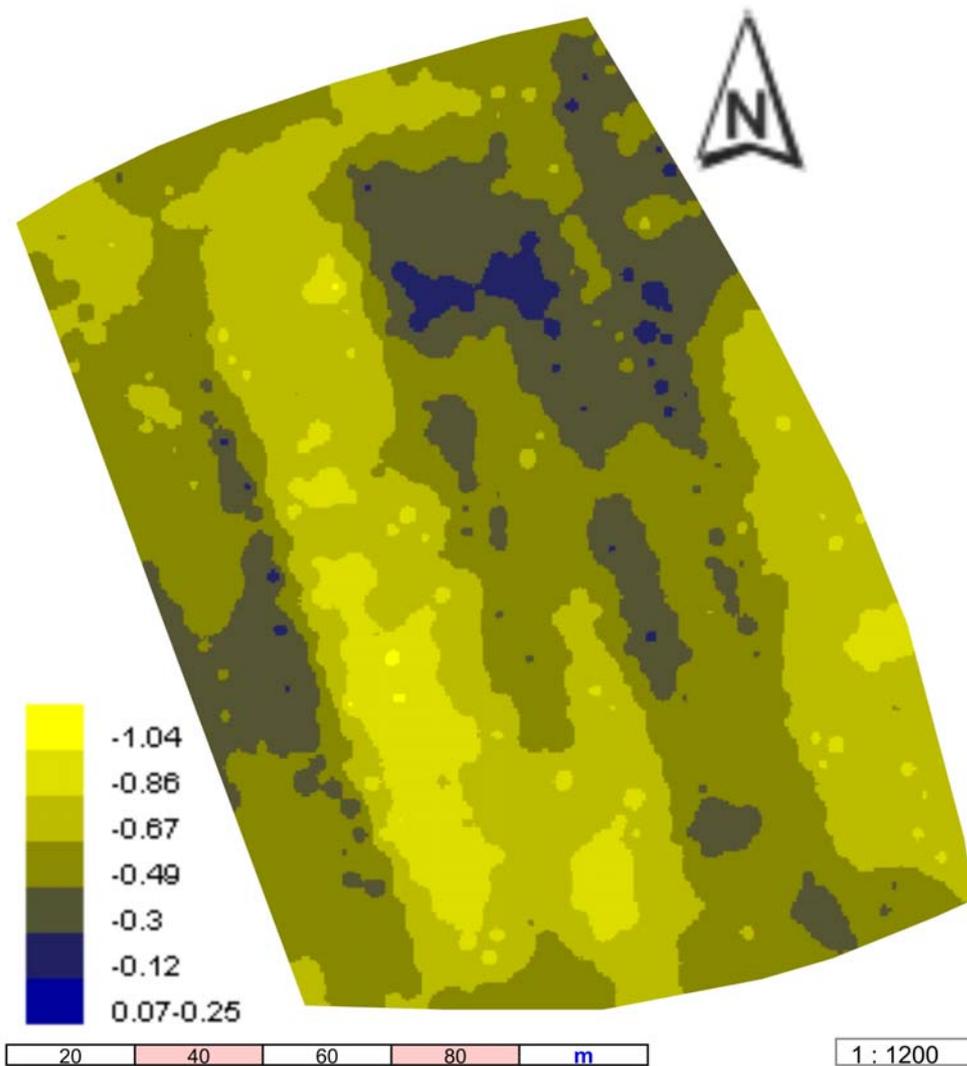


Abb. 50: Räumliche Verteilung der Suszeptibilität (Angabe dimensionlos) auf der Fläche „Wellenkamp“, Messsystem: EM38 (vertikaler Messmodus), Messtermin: 08.05.2006, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Ertrag 2001

Frucht: Winterweizen, Ertrag z-transformiert

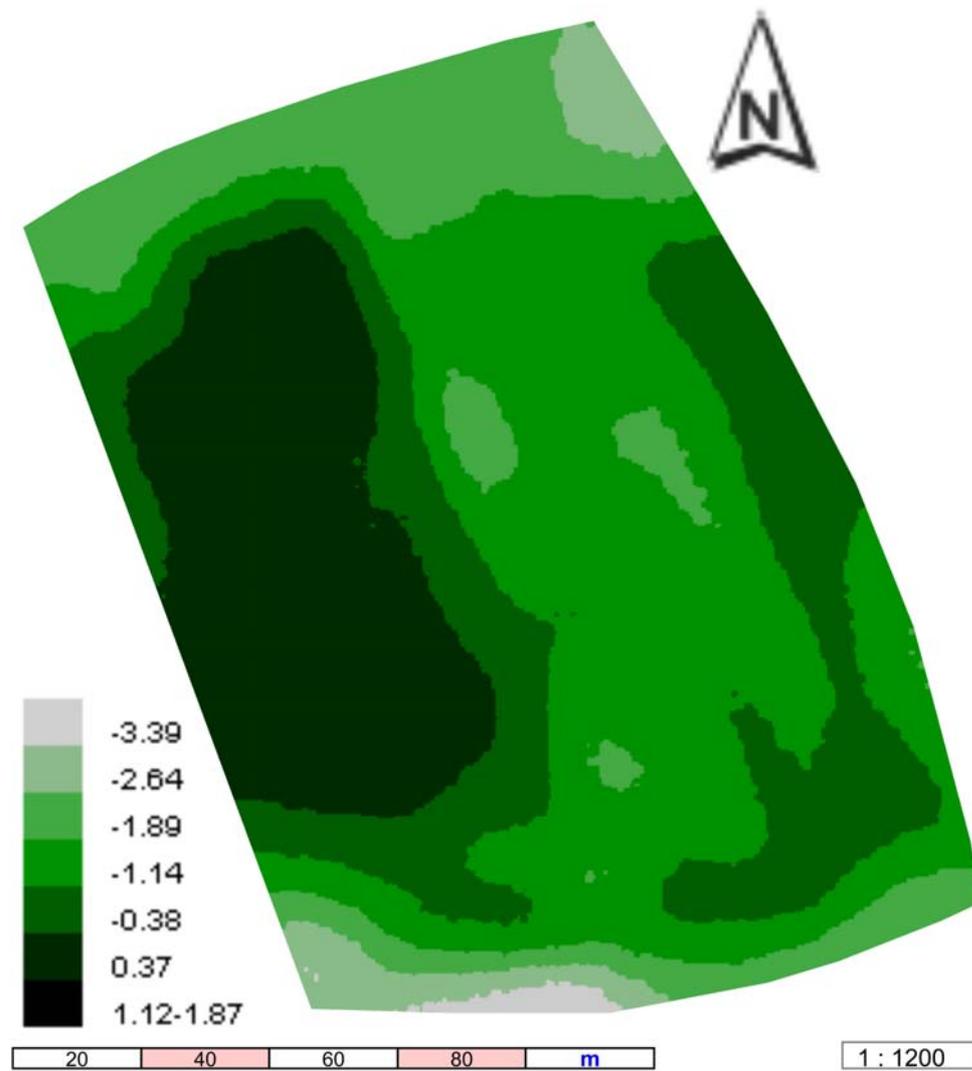


Abb. 51: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Wellenkamp“, Erntejahr 2001, Frucht: Winterweizen Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Ertrag 2002

Frucht: Winterhafer, Ertrag z-transformiert

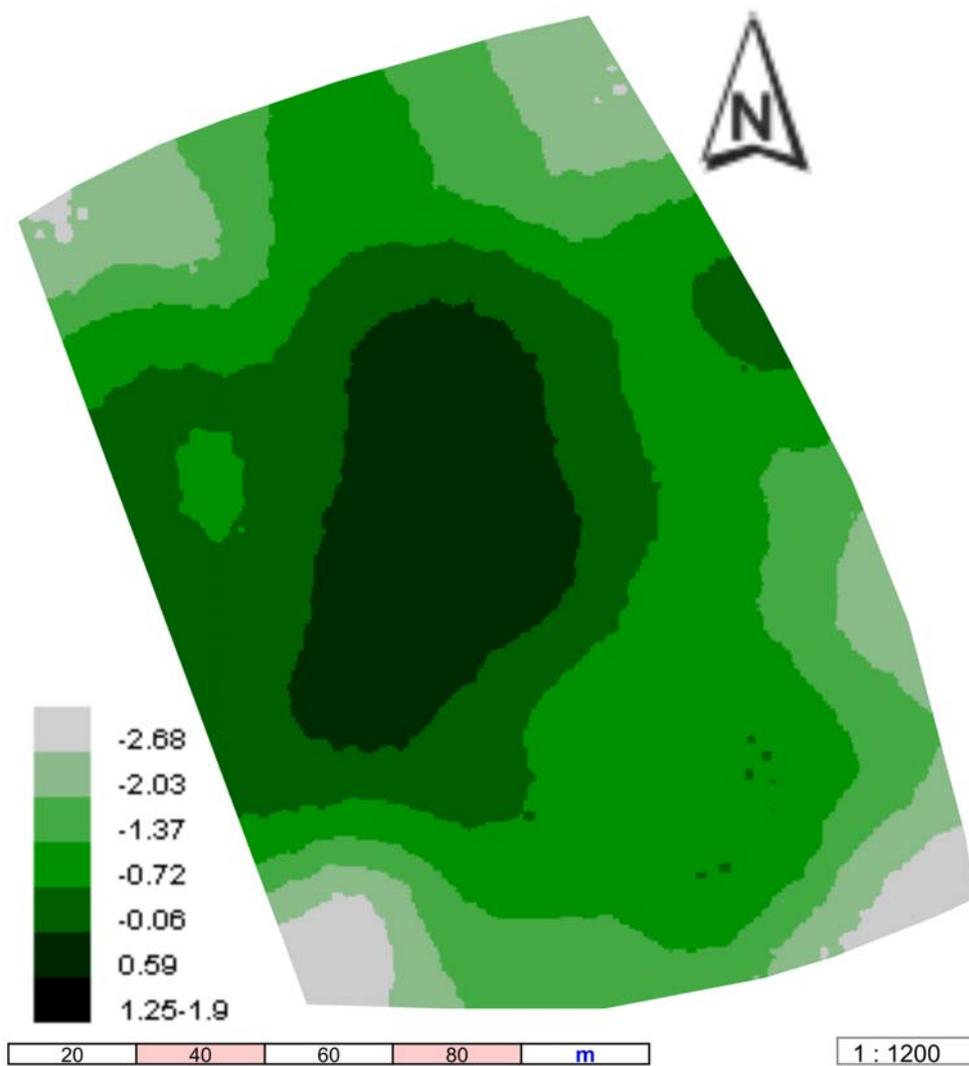


Abb. 52: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Wellenkamp“, Erntejahr 2002, Frucht: Winterhafer, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Ertrag 2003

Frucht: Winterweizen, Ertrag z-transformiert

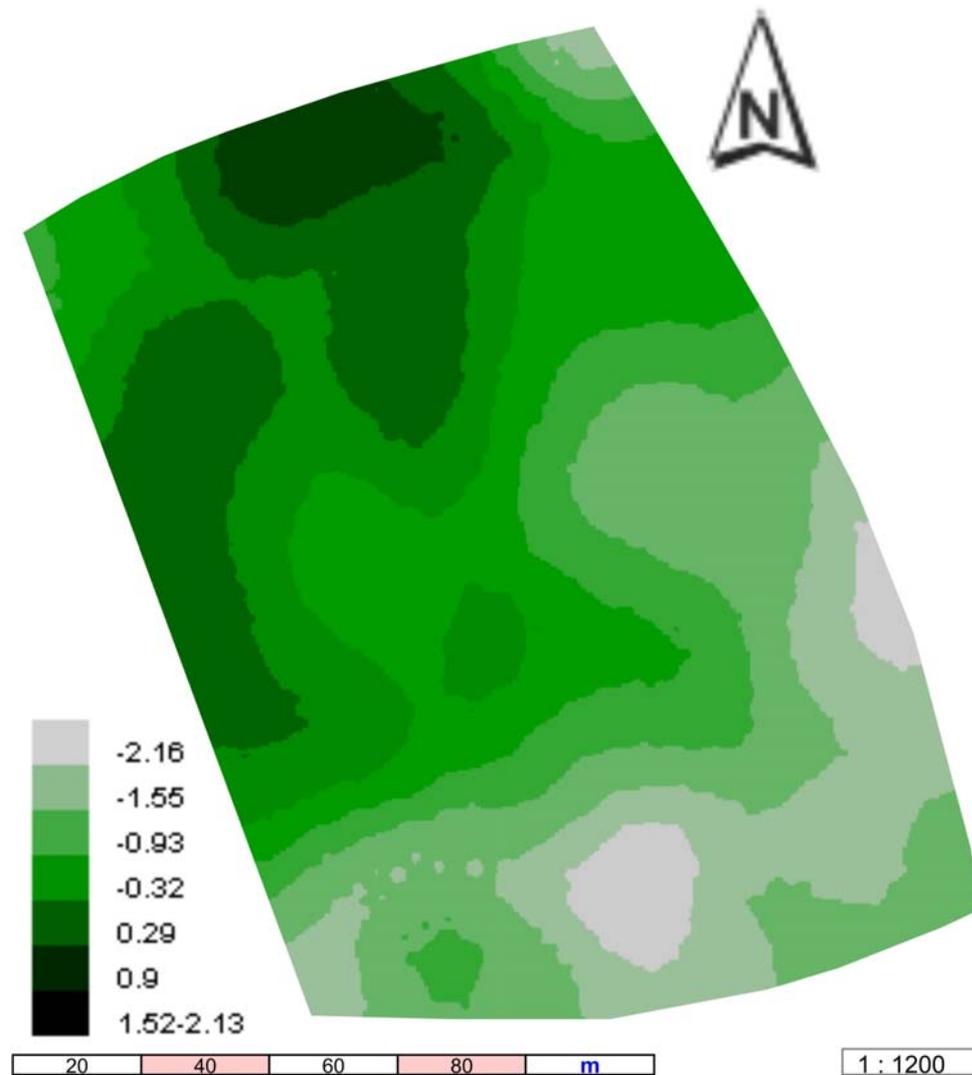


Abb. 53: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Wellenkamp“, Erntejahr 2003, Frucht: Winterweizen, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Ertrag 2004

Frucht: Triticale, Ertrag z-transformiert

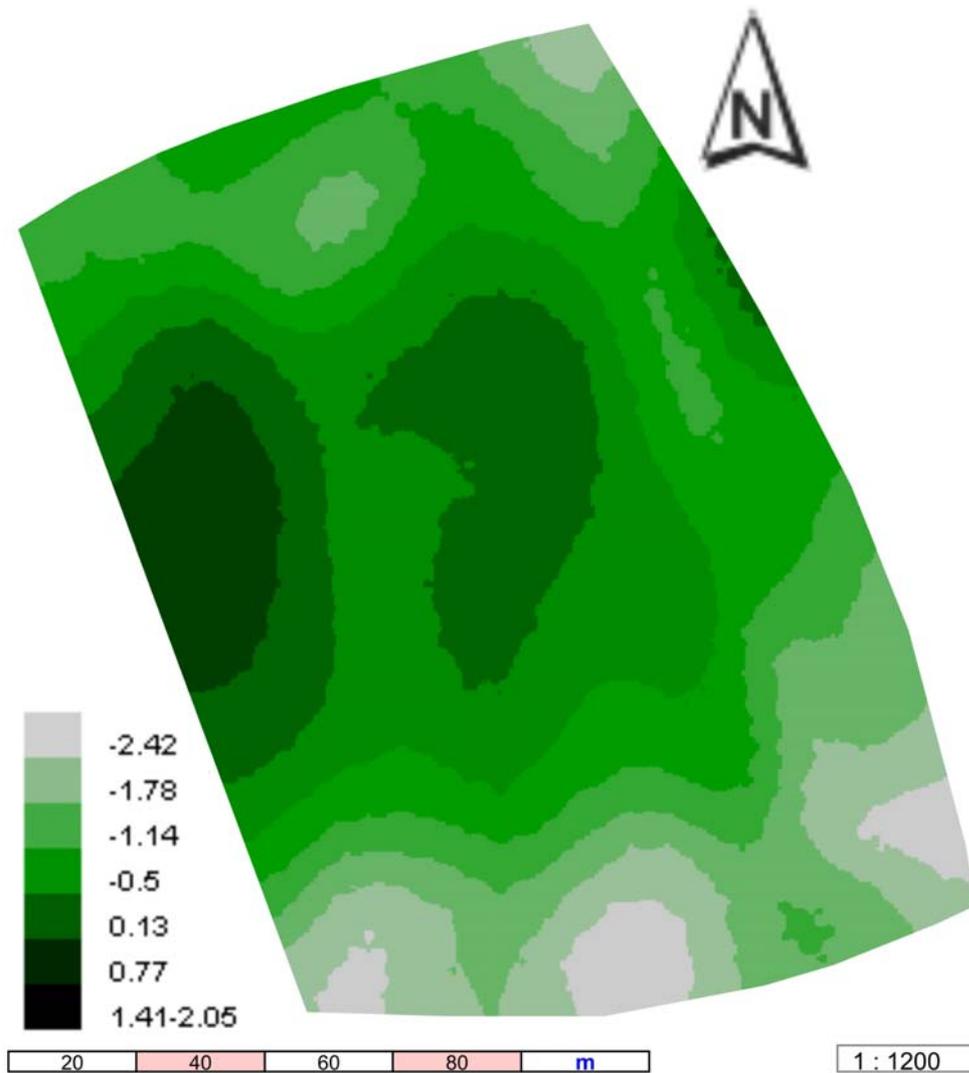


Abb. 54: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Wellenkamp“, Erntejahr 2004, Frucht: Triticale, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Ertrag 2005

Frucht: Hafer, Ertrag z-transformiert

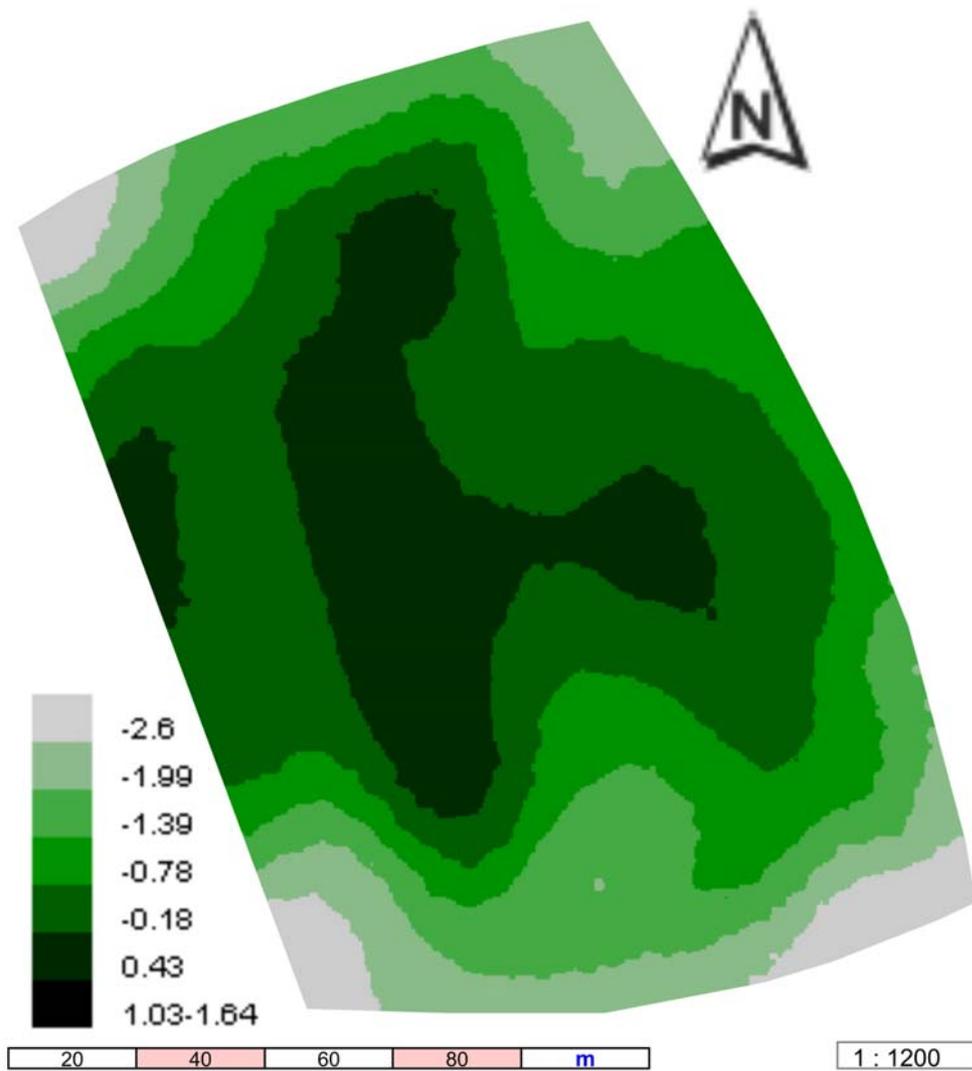


Abb. 55: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Wellenkamp“, Erntejahr 2005, Frucht: Hafer, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“

Feldkarte „Wellenkamp“

Ertrag 2006

Frucht: Wintergerste, Ertrag z-transformiert

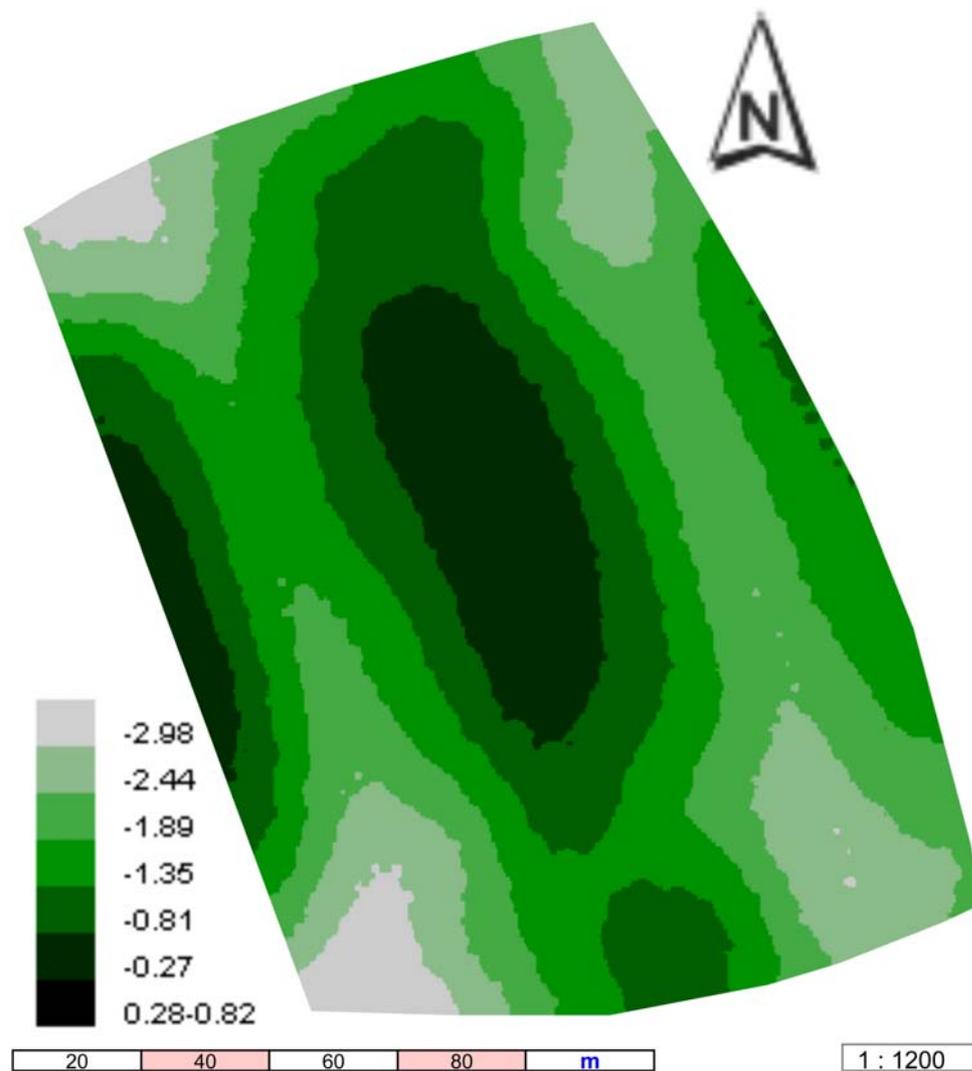


Abb. 56: Räumliche Verteilung des Ertrags auf der Fläche „Wellenkamp“, Erntejahr 2006, Frucht: Wintergerste, Ertragswerte z-transformiert und interpoliert, Interpolationsmethode „Kriging“

Klimadiagramm für Osnabrück
 Untersuchungsflächen „Im Berge“ und „Wellenkamp“

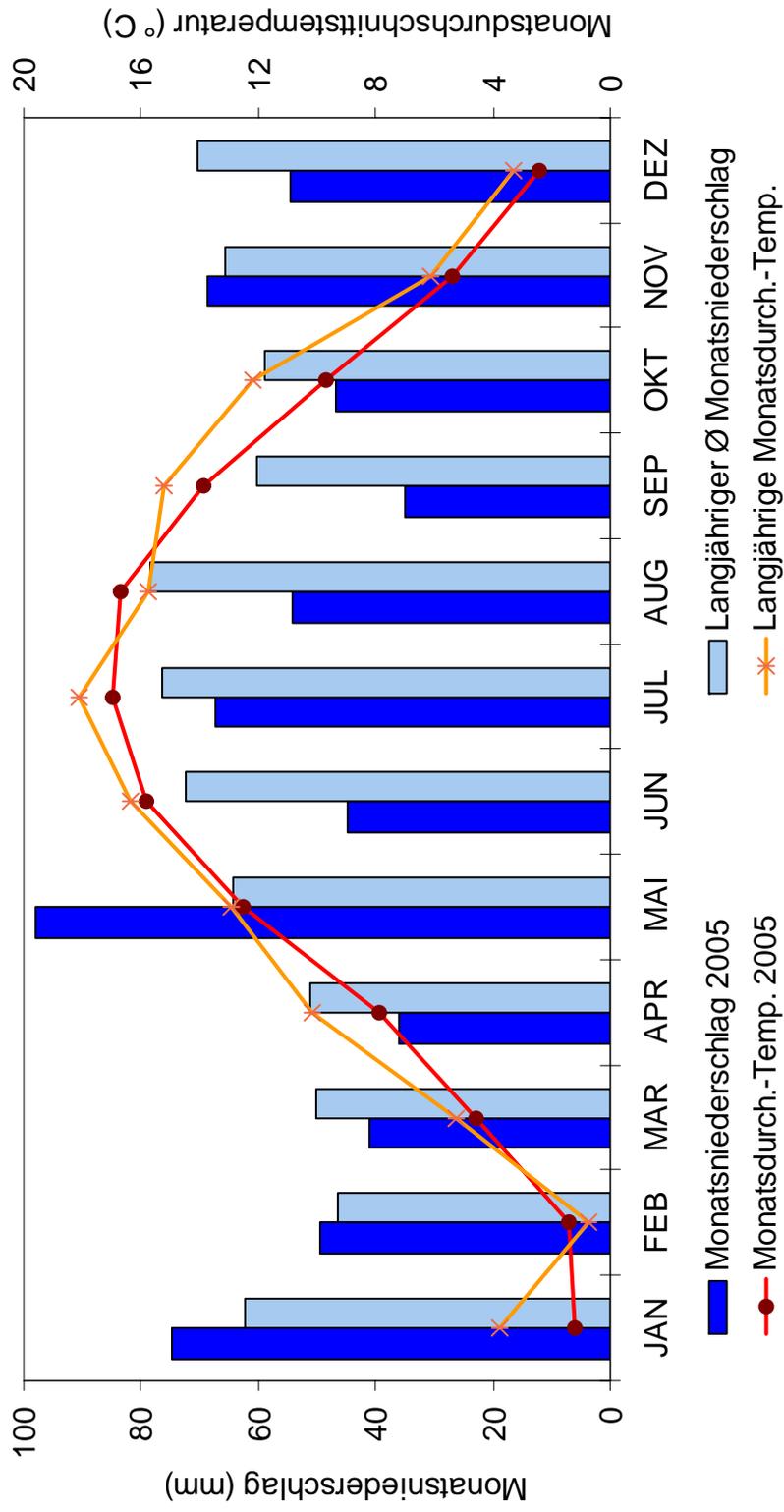


Abb. 57: Klimadaten für das Untersuchungsgebiet, Jahresdaten 2005 und das langjährige Mittel für die Monatsdurchschnitts-temperatur und Monatsniederschlagsrate

ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Osnabrück, den

Werdegang

Stefan Hinck

geboren am 08. Juni 1970 in Bremervörde, Landkreis Rotenburg/Wümme

Wissenschaftlicher Werdegang

2008 - 2009	Forschungstransfer an der Fachhochschule Osnabrück, Projekt: Managementberatung für Precision Farming
2004 - 2008	Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsschwerpunkt PIROL an der Fachhochschule Osnabrück; tätig im Teilprojekt Boden mit den Schwerpunkten: beprobungsarme Standortkartierung, Einsatz und Test von Bodensensorik Doktorand an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberge, Institut für Allgemeinen Pflanzenbau/ Ökologischen Pflanzenbau
Promotionsthema	„Ermittlung pflanzenbaulich relevanter Bodenkenndaten mit Hilfe von ausgewählter Bodensensorik“

Studium

1999 - 2003	Studium an der Fachhochschule Osnabrück, Studiengang Landwirtschaft (Vertiefung Agrarökonomie)
Diplomarbeitsthema	„Einfluss von Bearbeitungsverfahren auf ausgewählte Bodenparameter unter besonderer Berücksichtigung der Tragfähigkeit“
Abschluss 2003	Diplom Ingenieur (Dipl. Ing. FH)

Beruflicher Werdegang

Berufliche Tätigkeit

1997 - 1999	Tätig bei der CLAAS Vertriebsgesellschaft
1994 - 1995	Landwirtschaftliche Tätigkeiten in USA und Kanada
07. - 12. 1992	Landwirtschaftliches Praktikum in Kanada
1990 - 1991	Tätig als landwirtschaftlicher Betriebshelfer

Berufliche Ausbildung

1996 - 1997	Fachschule für Agrarwirtschaft in Hannover, Abschluss: Staatlich geprüfter Betriebswirt (Schwerpunkt Marketing)
1995 - 1996	Fachschule für Landwirtschaft in Hildesheim, Abschluss: Staatlich geprüfter Landwirtschaftsleiter (Fachhochschulreife)
1991 - 1992	Fachschule für Landwirtschaft in Bremervörde, Abschluss: Staatlich geprüfter Wirtschaftler
1987 - 1990	Ausbildung zum Landwirt

Bundeswehr

1993	Wehrpflichtiger Soldat im Sanitätsdienst
------	--

Schulischer Werdegang

1983 - 1987	Realschulabschluss, Bremervörde/ Niedersachsen
-------------	--