
Regionalisierung von Bodeneigenschaften unter Verwendung digitaler Geländemodelle sowie multispektraler Fernerkundungsdaten am Beispiel einer Agrarlandschaft im Jungmoränengebiet Schleswig-Holsteins

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität
zu Kiel

vorgelegt von

Karsten Krüger
aus
Hannover

Kiel, Dezember 2007

Referent: Prof. Dr. R. Duttmann

Koreferent: Prof. Dr. R. Ludwig

Tag der mündlichen Prüfung: 04.02.2008

Zum Druck genehmigt: Kiel, 07.01.2008

Der Dekan

Inhaltsverzeichnis:

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis.....	VI
Zusammenfassung.....	1
Summary	4
1 Einleitung	7
1.1 Problemstellung.....	8
1.2 Forschungsstand zur Regionalisierung von Bodeneigenschaften	10
1.3 Zielsetzung	14
2 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes.....	15
2.1 Allgemeine Lage und Abgrenzung	15
2.2 Geologie und Geomorphologie	18
2.3 Boden und Bodeneigenschaften.....	20
2.4 Klimatische Verhältnisse.....	23
2.5 Landnutzungsverhältnisse	24
3 Methodik	27
3.1 Das methodische Vorgehen in der Übersicht.....	27
3.2 Datengrundlage	28
3.2.1 Räumliche Erfassung der Bodendaten	28
3.2.2 Eingesetzte Fernerkundungsdaten.....	33
3.2.3 Die Ableitung morphometrischer Reliefparameter	36
3.3 Datenverarbeitung	38
3.4 Eingesetzte Prediktionsmethoden zur räumlich differenzierten Abbildung von Bodeneigenschaften	39
3.4.1 Einfache und multiple lineare Regression (MLR)	39
3.4.2 Inverse Distance Weighting (IDW).....	40
3.4.3 Geostatistische Verfahren	41
3.4.4 Hybride Verfahren.....	45
3.4.5 Validierung und Methodenvergleich.....	47
4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten	49
4.1 Räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften auf der Feldskala	49
4.1.1 Deskriptive Statistik der Bodeneigenschaften.....	49
4.1.2 Der Zusammenhang zwischen den Boden- und Reliefparametern	51
4.1.3 Die Beziehung zwischen den bodenhaushaltlichen Eigenschaften und den Vegetationsindizes	55
4.1.4 Ergebnisse der Interpolationsverfahren.....	62

4.1.5	Vergleich der angewendeten Regionalisierungsmethoden	69
4.1.6	Kurzfasit.....	76
4.2	Räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften auf der feldübergreifenden Skala	79
4.2.1	Deskriptive Statistik der Bodeneigenschaften.....	79
4.2.2	Der Zusammenhang zwischen den Boden- und Reliefparametern	80
4.2.3	Die Beziehung zwischen den bodenhaushaltlichen Eigenschaften und den Vegetationsindizes	83
4.2.4	Ergebnisse der Interpolationsverfahren.....	87
4.2.5	Vergleich der angewendeten Regionalisierungsmethoden	90
4.2.6	Kurzfasit.....	95
4.3	Räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala	98
4.3.1	Deskriptive Statistik der Bodeneigenschaften.....	98
4.3.2	Der Zusammenhang zwischen den Boden- und Reliefparametern	99
4.3.3	Ergebnisse der Interpolationsverfahren.....	102
4.3.4	Vergleich der angewendeten Regionalisierungsmethoden	106
4.3.5	Kurzfasit.....	107
5	Diskussion und Ausblick.....	110
5.1	Die Beziehung zwischen den Bodeneigenschaften und den Reliefinformationen.	110
5.2	Die Anwendbarkeit des Vegetationsindex NDVI als Co-Variable für die Regionalisierung komplexer Bobenhaushaltsgrößen	113
5.3	Vergleich der Regionalisierungsverfahren.....	115

Literaturverzeichnis

Anhang

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1.1: Übersicht über die gebräuchlichsten Methoden zur Regionalisierung von Bodeneigenschaften. (MCBRATNEY ET AL., 2000, S. 303, verändert)</i>	10
<i>Abbildung 2.1: Lage des Untersuchungsgebietes. Kartengrundlage: DTK 25, Blätter 1826 Bordesholm und 1827 Stolpe, ©LVermA-SH.</i>	16
<i>Abbildung 2.2: Schläge des Untersuchungsgebietes. Kartengrundlage: DTK 25 / DGM 5, Blätter 1826 Bordesholm und 1827 Stolpe, ©LVermA-SH.</i>	17
<i>Abbildung 2.3: Geomorphologische Übersichtskarte der Eisrandlagen im Süden Kiels. Quelle: FRÄNZLE 1981, S. 19, nach STEPHAN & MENKE 1977, verändert.</i>	19
<i>Abbildung 2.4: Bodenkarte des Einzugsgebietes der Drögen Eider. Kartengrundlage: Bodenkarte von Schleswig-Holstein 1:25000, Blätter 1826 Bordesholm und 1827 Stolpe, herausgegeben vom Landesamt für Natur und Umwelt (LANU) Schleswig-Holstein, 1998.</i>	22
<i>Abbildung 2.5: Klimadiagramm der Station Neumünster, Schleswig-Holstein im 30-jährigen Monatsmittel. Datengrundlage: DWD.</i>	24
<i>Abbildung 2.6: Landnutzung im Einzugsgebiet der Drögen Eider. Kartengrundlage: DTK 25 / ATKIS®Basis-DLM, ©LVermA-SH.</i>	26
<i>Abbildung 3.1: Schematische Übersicht über die methodische Vorgehensweise der Untersuchung.</i>	27
<i>Abbildung 3.2: Lage der Beprobungspunkte im Untersuchungsgebiet. Kartengrundlage: DTK 25, Blatt 1826 Bordesholm, ©LVermA-SH.</i>	29
<i>Abbildung 3.3: Reflexionsverhalten von Vegetation und unbedecktem Boden in Abhängigkeit von der Wellenlänge als Grundlage zur Entwicklung von egetationsindizes (nach JENSEN, 2007, S. 383)</i>	34
<i>Abbildung 3.4: Idealisiertes sphärisches Variogramm - Modell mit Reichweite (a), Nuggetvarianz (c_0) und Schwellenwert (c_s)</i>	42
<i>Abbildung 3.5: Fließschema des Regressions Kriging (ODEH ET AL., 1995, S. 215)</i>	46
<i>Abbildung 4.1: Bodenartendiagramm des Feinbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese.</i>	50
<i>Abbildung 4.2: Räumliche Verteilung der Reliefparameter Hangneigung (oben) und des Wetness Index mit Häufigkeitsverteilungen auf dem gesamten Schlag ($n = 4897$ Rasterzellen, jeweils oben) und aus dem Punktdatensatz (Schlag Sandkamp/Wiese, $n = 117$)</i>	52
<i>Abbildung 4.3: Räumliche Verteilung des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) der Landsat 7 ETM+ – Szene vom 11.05.2001 und der Spot 4 – Szene vom 09.05.2002 auf dem Schlag Sandkamp/Wiese</i>	57
<i>Abbildung 4.4: Monatliche Niederschlagssummen der Klimastation Neumünster über die Anbauperioden (Datenquelle: DWD)</i>	58

<i>Abbildung 4.5: Ausgewählte sphärische Variogramme der Bodeneigenschaften für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 4.6: Ausgewählte sphärische Variogramme der mittels MLR geschätzten Bodeneigenschaften für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117).....</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 4.7: Ausgewählte sphärische Variogramme der Residuen der mittels MLR geschätzten Bodeneigenschaften für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117).....</i>	<i>67</i>
<i>Abbildung 4.8: Ausgewählte sphärische Variogramme der mittels MLR mit den Reliefparametern und dem NDVI geschätzten Bodenhaushaltsparameter und deren Residuen für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117).....</i>	<i>68</i>
<i>Abbildung 4.9: Geschätzte räumliche Verteilung ausgewählter Bodeneigenschaften auf Grundlage des Regressions-Kriging Modell „B“ für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)</i>	<i>71</i>
<i>Abbildung 4.10: Streudiagramme der gemessenen gegenüber den geschätzten Werten der Bodeneigenschaften auf Grundlage des Regressions_Kriging Modell „B“ bei einem Konfidenzintervall von 98 % für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese.....</i>	<i>72</i>
<i>Abbildung 4.11: Geschätzte räumliche Verteilung ausgewählter Bodenhaushaltsparameter auf Grundlage des Regressions-Kriging Modell „B“ unter Integration des NDVI für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117).....</i>	<i>74</i>
<i>Abbildung 4.12: Streudiagramme der berechneten gegenüber den geschätzten Werten ausgewählter Bodenhaushaltsgrößen auf Grundlage des Regressions-Kriging Modell „B“ unter Integration des NDVI bei einem Konfidenzintervall von 98 % für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)</i>	<i>74</i>
<i>Abbildung 4.13: Räumliche Verteilung der C_{org}-Gehalte auf Grundlage des Regressions-Kriging Modell „A“ (oben links), der mittels Ordinary Kriging (OK) interpolierten aus der multiplen linearen Regression (MLR) mit den Reliefparametern hervorgegangenen Residuen (oben rechts), der Differenz zwischen den Ergebnissen des OK (unten links) bzw. der MLR und den Ergebnissen des RK „B“ (unten rechts)</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 4.14: Bodenartendiagramm des Feinbodens für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93).....</i>	<i>80</i>
<i>Abbildung 4.15: Räumliche Verteilung der Reliefparameter Hangneigung (oben) und Wetness Index mit Häufigkeitsverteilungen auf den Schlägen (n = 16348 Rasterzellen, jeweils oben) und aus dem Punktdatensatz (Schläge 1-6, n = 93)</i>	<i>81</i>
<i>Abbildung 4.16: Räumliche Verteilung des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) der Landsat 7 ETM+ – Szene vom 11.05.2001 und der Spot 4 – Szene vom 09.05.2002, ausgeblendete Schläge wurden bei der Korrelationsanalyse nicht berücksichtigt.....</i>	<i>86</i>
<i>Abbildung 4.17: Ausgewählte sphärische Variogramme der Bodeneigenschaften für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93)</i>	<i>87</i>
<i>Abbildung 4.18: Ausgewählte sphärische Variogramme der mittels MLR geschätzten Bodeneigenschaften für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93).....</i>	<i>89</i>

<i>Abbildung 4.19: Geschätzte räumliche Verteilung des Tongehaltes für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93)</i>	91
<i>Abbildung 4.20: Geschätzte räumliche Verteilung des organischen Kohlenstoffgehaltes (C_{org}) für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93)</i>	92
<i>Abbildung 4.21: Geschätzte räumliche Verteilung der Trockenrohddichte (dB) für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93)</i>	93
<i>Abbildung 4.22: Streudiagramme der gemessenen gegenüber den geschätzten Werten der Ton-, bzw. C_{org}-Gehalte und der Trockenrohddichte bei einem Konfidenzintervall von 98 % für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93)</i>	94
<i>Abbildung 4.23: Bodenartendiagramm des Feinbodens für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739)</i>	99
<i>Abbildung 4.24: Räumliche Verteilung der Reliefparameter Hangneigung (oben) und Wetness Index mit Häufigkeitsverteilungen im Einzugsgebiet (n = 124137 Rasterzellen, jeweils oben) und aus dem Punktdatensatz (n = 739)</i>	100
<i>Abbildung 4.25: Sphärische Variogramme der Bodeneigenschaften für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739)</i>	103
<i>Abbildung 4.26: Sphärische Variogramme der mittels MLR geschätzten Bodeneigenschaften für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739)</i>	104
<i>Abbildung 4.27: Sphärische Variogramme der Residuen der mittels MLR geschätzten Bodeneigenschaften für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739)</i>	105
<i>Abbildung 4.28: Streudiagramme der gemessenen gegenüber den mittels Regressions-Kriging Modell „C“ geschätzten Werten für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739)</i>	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Flächengröße und -bezeichnung der einzelnen Schläge im Untersuchungsgebiet.	17
Tabelle 2.2: Flächenanteile der Bodeneinheiten der BK 25 im Einzugsgebiet.....	23
Tabelle 2.3: Flächengröße und -anteile der Hauptlandnutzungen im Einzugsgebiet der Drögen Eider (nach ATKIS®Basis-DLM, 2005 und eigenen Erhebungen).....	25
Tabelle 3.1: Beprobungsdistanzen und -dichte für die Datensätze n = 117, n = 93 und n = 739.	28
Tabelle 3.2: Verwendete Satellitendaten und -systeme	33
Tabelle 3.3: Übersicht über die mit SAGA berechneten Reliefparameter	38
Tabelle 4.1: Deskriptive Statistik der Bodeneigenschaften des Oberbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)	49
Tabelle 4.2: Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Oberbodens und den Reliefparametern für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)	53
Tabelle 4.3: Parameter der schrittweisen multiplen Regression zwischen den Eigenschaften des Oberbodens und den Reliefparametern für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117).....	54
Tabelle 4.4: Zusammenhang zwischen den Bodenhaushaltsparametern und den Vegetationsindizes für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)	56
Tabelle 4.5: Zusammenhang zwischen den Reliefparametern und dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117).....	59
Tabelle 4.6: Parameter der einfachen linearen Regression zwischen den Bodenhaushaltsparametern und dem NDVI für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117).....	60
Tabelle 4.7: Parameter der schrittweisen multiplen Regression zwischen den Bodenhaushaltsparametern, den Reliefparametern und dem NDVI für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)	61
Tabelle 4.8: Gewichtungsfaktor „p“ und Ergebnisse der Kreuzvalidierung der auf Grundlage des IDW-Verfahrens interpolierten Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)	62
Tabelle 4.9: Semivariogrammparameter der Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)	64
Tabelle 4.10: Semivariogrammparameter der mittels MLR geschätzten Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117).....	66
Tabelle 4.11: Semivariogrammparameter der Residuen der mittels MLR geschätzten Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)...	66
Tabelle 4.12: Semivariogrammparameter der mittels MLR mit den Reliefparametern und dem NDVI geschätzten Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)	69

Tabelle 4.13: Semivariogrammparameter der aus der MLR mit den Reliefparametern und dem NDVI hervorgegangenen Residuen der Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz Schlag Sand-kamp/Wiese (n = 117).....	69
Tabelle 4.14: Ergebnisse der Kreuzvalidierung der Regionalisierungsmodelle mittels RMSE (root mean square error) für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117).....	70
Tabelle 4.15: Ergebnisse der Kreuzvalidierung der Regionalisierungsmodelle der Regressions-Kriging Modelle A, B und C für die Bodenhaushaltsparameter unter Integration des NDVI mittels RMSE (root mean square error) für den Datensatz Schlag Sandkamp/ Wiese (n = 117).....	73
Tabelle 4.16: Quantitativer Vergleich der Modellergebnisse aus der Kreuzvalidierung zwischen dem Ordinary Kriging und dem Regressions-Kriging Modell „B“ über den „Relative Improvement“ (RI).....	78
Tabelle 4.17: Deskriptive Statistik der Bodeneigenschaften des Oberbodens für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93).....	79
Tabelle 4.18: Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Oberbodens und den Reliefparametern für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93).....	82
Tabelle 4.19: Parameter der schrittweisen multiplen Regression zwischen den Eigenschaften des Oberbodens und den Reliefparametern für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93) 83	83
Tabelle 4.20: Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Oberbodens und dem Vegetationsindex NDVI für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93).....	84
Tabelle 4.21: Zusammenhang zwischen den Reliefparametern und dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93).....	85
Tabelle 4.22: Ergebnisse der schrittweisen multiplen Regressionen zwischen dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) und den Reliefparametern für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93).....	86
Tabelle 4.23: Güte der Interpolationsergebnisse der Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93) auf Grundlage des Inverse Distance Weighting - Verfahrens.....	87
Tabelle 4.24: Semivariogrammparameter der Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93).....	88
Tabelle 4.25: Semivariogrammparameter der aus der MLR vorhergesagten Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93).....	89
Tabelle 4.26: Ergebnisse der Kreuzvalidierung der Regionalisierungsmodelle mittels RMSE (root mean square error) für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93).....	90
Tabelle 4.27: Quantitativer Vergleich der Modellergebnisse aus der Kreuzvalidierung zwischen dem Ordinary Kriging und dem Regressions-Kriging Modell „A“ über den „Relative Improvement“ (RI).....	97
Tabelle 4.28: Deskriptive Statistik der Bodeneigenschaften des Oberbodens für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739).....	98

Tabelle 4.29: Deskriptive Statistik der Bodeneigenschaften des Oberbodens für die gemessenen Werte und den Felddatensatz der Schläge 1-6 (n = 93).....	99
Tabelle 4.30: Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Oberbodens und den Reliefparametern für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739).....	101
Tabelle 4.31: Parameter der schrittweisen multiplen Regression zwischen den Eigenschaften des Oberbodens und den Reliefparametern für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739).....	102
Tabelle 4.32: Validierungsergebnisse der mit dem IDW- Verfahren interpolierten Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739).....	102
Tabelle 4.33: Semivariogrammparameter für das Disjunktive Kriging (DK) der Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739).....	103
Tabelle 4.34: Semivariogrammparameter der aus der MLR vorhergesagten Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739).....	104
Tabelle 4.35: Semivariogrammparameter der aus der MLR hervorgegangenen Residuen der Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739).....	105
Tabelle 4.36: Ergebnisse der Kreuzvalidierung der Regionalisierungsmodelle mittels RMSE (root mean square error) für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739).....	106
Tabelle 4.37: Quantitativer Vergleich der Modellergebnisse aus der Kreuzvalidierung zwischen dem Disjunktiven Kriging und dem Regressions-Kriging Modell „C“ über den „Relative Improvement“ (RI).....	108

Zusammenfassung

Für die Untersuchung von Landschaftsprozessen und für eine nachhaltige Landnutzungsplanung werden verlässliche Informationen über die flächenhafte Verbreitung physikalischer und chemischer Bodeneigenschaften benötigt. Das spiegelt sich in einer Vielzahl von Untersuchungen zur räumlichen Variabilität und Verteilung von Bodenparametern wider. Die vorliegenden Studien beziehen sich dabei aber zumeist ausschließlich auf die Feldskala und/oder auf solche Regionen, die sich durch räumlich klar strukturierte Ausgangsbedingungen hinsichtlich der Bodenbildung auszeichnen.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich dagegen auf die Vorhersage zentraler Bodeneigenschaften sowohl auf der Feld- als auch auf der Landschaftsskala im Jungmoränengebiet des Ostholsteinischen Hügellandes, das typischerweise durch eine hohe Variabilität der Bodeneigenschaften geprägt ist. Daher wird ferner der Frage nachgegangen, ob und in welchem Ausmaß kostengünstig und flächenhaft verfügbare Sekundärinformationen, abgeleitet aus digitalen Geländemodellen und Fernerkundungsdaten, zur Verbesserung der Vorhersagegüte herangezogen werden können, um adäquate Bodeninformationen als Eingangsdaten für die Modellierung landschaftsökologischer Prozesse, z. B. Wasser- und Stofftransport, Bodenerosion oder Pflanzenwuchs, bereit zu stellen.

Zur Erfassung der Bodeneigenschaften auf der Feldskala wurden auf einem 76 ha umfassenden Schlag an 117 Standorten Oberbodenproben entnommen und laboranalytisch untersucht. Für die Untersuchung auf der feldübergreifenden Skala (255 ha) wurden fünf umliegende Schläge bei größeren Beprobungsdistanzen mit einbezogen, sodass hierfür ein Punktdatensatz von $n = 93$ zur Verfügung stand. Zusätzlich konnte für das 19 km² umfassende Einzugsgebiet der Drögen Eider auf einen klassifizierten Punktdatensatz von $n = 739$ aus der Landesaufnahme zurückgegriffen werden.

Auf der Grundlage dieser auf unterschiedlichen Skalen vorliegenden Datensätze, erfolgte die räumliche Vorhersage der ausgewählten Oberbodeneigenschaften mit Hilfe der folgenden Regionalisierungsverfahren: (i) Multiple lineare Regression, (ii) Inverse Distance Weighting, (iii) Simple Kriging, (iv) Ordinary Kriging und (v) Regressions-Kriging. Als Bodeneigenschaften standen dabei die Korngrößenfraktionen, der Gehalt an organischem Kohlenstoff und die Lagerungsdichte sowie die daraus abgeleiteten Bodenhaushaltsgrößen des Retentionsvermögens für Wasser und der Kationenaustauschkapazität im Vordergrund.

Die Korrelationsanalyse der genannten Bodenparameter mit Sekundärinformationen zeigte signifikante Zusammenhänge vor allem mit den Reliefparametern Hangneigung, Vertikalwölbung, Wetness Index und Höhe über Tiefenlinie. Der aus Fernerkundungsdaten berechnete Vegetationsindex NDVI wies lediglich auf der Feldskala signifikante Zusammenhänge mit den Bodenparametern auf. Dagegen konnte die über den NDVI zu detektierende Biomasseverteilung im Untersuchungsraum viel mehr über das Relief, als durch die Bodeneigenschaften erklärt werden.

Durch die multiple lineare Regression mit den oben genannten Reliefparametern konnten auf der Feldskala für die Trockenrohdichte 46,8 %, für den C_{org} -Gehalt 38,5 % und für den Tongehalt 30,8 % der räumlichen Variabilität erklärt werden. Die Erklärungsgehalte auf der feldübergreifenden Skala vielen dagegen für die gleichen Bodeneigenschaften mit 31,5 %, 19,6 % und 5 % wie auch auf der Landschaftsskala deutlich geringer aus.

Während die geostatistische Analyse auf der Feldskala stark strukturierte räumliche Abhängigkeiten der Bodeneigenschaften aufzeigte, wurden auf der feldübergreifenden Skala und der Landschaftsskala lediglich mittel bis schwach strukturierte räumliche Autokorrelationen festgestellt.

Der Vergleich und die Bewertung der eingesetzten Regionalisierungsverfahren zur Abbildung räumlicher Verteilungen von Bodeneigenschaften, wurden anhand ihrer jeweiligen Schätzgüte als Ergebnis der Kreuzvalidierung durchgeführt.

Auf der Feldskala waren dabei die deutlich geringsten Schätzabweichungen mit dem Regressions-Kriging Modell „B“ zu erreichen. Im Vergleich zum Ordinary Kriging liegen durchschnittlich um 50 % verbesserte Vorhersagegüten vor. Für die Bodenhaushaltsgrößen der potenziellen Kationenaustauschkapazität und dem Retentionsvermögen bei Feldkapazität konnten die Ergebnisse unter Einbindung des NDVI nochmals um 4 % verbessert werden.

Als bestes Verfahren auf der feldübergreifenden Skala erwies sich in den meisten Fällen das Regressions-Kriging Modell „A“, wobei Verbesserungen der Schätzgüte von 2,8 % für den C_{org} -Gehalt bis 7,9 % für den Schluffgehalt gegenüber den Ergebnissen des Ordinary Kriging festgestellt werden konnten.

Für die Landschaftsskala zeigte das Regressions Kriging Modell „C“ die geringsten Abweichungen von den gemessenen Werten und erzielte damit die besten Ergebnisse bei der räumlichen Schätzung der betrachteten Bodenparameter. Im Vergleich zum Ordinary Kriging konnte damit die Vorhersagegüte zwischen 10,1 % für den Sandgehalt und 16,8 % für den Tongehalt verbessert werden. Gegenüber der für das Gebiet vorliegenden konventionellen Bodenkarte konnte damit für die Korngrößenverteilung des Oberbodens ein über die Kreuzvalidierung ermittelter, um 30 % bis 40 % verbesserter Informationsgehalt erreicht werden.

Das Regressions-Kriging zeigt gegenüber den einfacheren Verfahren insbesondere dann eine verbesserte Vorhersagegüte, wenn einerseits die Korrelation der Co-Variablen mit dem entsprechenden Bodenparameter hoch ausfällt und zum anderen zusätzlich eine hohe räumliche Autokorrelation des Parameters vorliegt.

Insgesamt ergeben sich aus der vorliegenden Arbeit für die Anwendung verschiedener Regionalisierungsverfahren im Jungmoränengebiet des Ostholsteinischen Hügellandes damit folgende wesentliche Erkenntnisse:

1. Gegenüber Untersuchungsgebieten mit einer klar gegliederten räumlichen Struktur der Ausgangsfaktoren der Bodenbildung können statistische und geostatistische Zusam-

menhänge zwischen Bodenparametern und Sekundärinformationen (hier NDVI und Reliefparameter) nur mit einer deutlich reduzierten Signifikanz bzw. mit einer höheren räumlich Varianz nachgewiesen bzw. vorhergesagt werden.

2. Auch in Untersuchungsgebieten mit einer stark variablen räumlichen Struktur der Ausgangsfaktoren der Bodenbildung bzw. den sich daraus ergebenden Bodeneigenschaften, kann die Integration von Sekundärinformationen (hier Relief) die räumliche Vorhersage von Bodeneigenschaften verbessern.
3. Die auf der Grundlage von Sekundärinformationen durchgeführte Vorhersage der räumlichen Verteilung von Bodeneigenschaften kann gegenüber den verfügbaren Bodenkarten der Landesaufnahme zu einer deutlichen Verbesserung des Informationsgehaltes führen.

Vor diesem Hintergrund erscheint es möglich, die Anzahl der zu beprobenden Standorte zu reduzieren und so die Erhebung von Bodeninformationen effizienter und kostengünstiger zu gestalten.

Summary

Sustainable land use planning as well as the analysis of landscape processes requires reliable information about the spatial patterns of physical and chemical soil properties. Thus, many studies have been presented dealing with spatial variability and distribution of soil properties. Most of these investigations are either restricted to the plot scale or they are conducted in areas characterized by very clear structures and spatial patterns of factors of soil genesis. In contrast, the present study concentrates on predicting of soil properties of central importance on different spatial scales ranging from the plot scale to the landscape scale. It was conducted in the younger-moraine area (Ostholsteinisches Hügelland) of Schleswig-Holstein, which is typically characterized by its high variability soil properties. Therefore, it is investigated if and to what extent cheap and extensively available secondary information, derived from digital elevation models as well as from remote sensing data, is suitable for improving spatial predictions of soil properties. These may then be used for modelling landscape processes such as water and nutrient fluxes, soil erosion, or plant growth.

For gathering the soil properties on the plot scale, 117 samples of topsoil were taken from a parcel of 76 ha in size and were analysed in the laboratory afterwards. In order to conduct the investigations on the sub-landscape scale, additionally five circumjacent parcels had been included into the investigation area while increasing the overall sampling distance. Thus, a data set consisting of 93 topsoil samples was compiled.

Concerning the landscape scale, a data set consisting of 739 soil samples within the catchment area of the river Dröge Eider, which is 19 km² in size, was made available by the federal soil survey.

Based on the given data base of the different scales, different models of regionalization were applied for spatial predictions of distinct soil properties: (i) Multiple linear regression, (ii) inverse distance weighting, (iii) simple kriging, (iv) ordinary kriging, and (v) regression kriging. Thereby, the soil texture, the organic carbon content, and the bulk density as well as certain soil properties that are derived from the former ones, such as soil water capacity and cation exchange capacity, had been the subject of investigation.

Results of correlation analysis between the given soil parameters and secondary information show significant correlations between distinct relief parameters, such as slope, vertical curvature, wetness index, as well as elevation above nearest drainage channel and soil properties.

The vegetation index NDVI, which is derived from remote sensing data, only exhibits significant correlation with the soil properties on the plot scale. Whereas the often-described correlation between NDVI and biomass distribution was not revealed by the analysis, there was a correlation observed between NDVI and relief parameters.

The application of the multiple linear regression model with respect to soil and relief parameters accounts for 46.8 % (dry gross density), 38.5 % (organic carbon content), and 30.8 % (clay content) of the spatial variability on the plot scale. Whereas on the sub-landscape scale,

the same model only accounts for 31.5 % (dry gross density), 19.6 % (organic carbon content), and 5 % (clay content) of the spatial variability. Similar results have been obtained on the landscape scale.

While strong structured spatial autocorrelation was shown on the plot scale, only moderately to weak structured spatial autocorrelation was detected on the sub-landscape and landscape scale.

The comparison and evaluation of the different regionalization models used in the analysis was conducted by using the discrepancy between the predicted and the observed values as an indicator for the goodness of fit of the model under consideration.

The smallest discrepancies on the field scale were observed by using the regression kriging model "B". In comparison to ordinary kriging, the mean goodness of fit could be improved by 50 %. Taking into account the NDVI, these results could be further improved by 4 % with respect to the potential cation exchange capacity and the soil water capacity.

On the sub-landscape scale, in most cases, best results (i.e. smallest discrepancies) were obtained by the application of the regression kriging model "A". In comparison to ordinary kriging, improvements of the goodness of fit of 2.8 % and 7.9 % with respect to the organic carbon content and the silt content respectively, were realised.

The regression kriging model "C" performed best on the landscape scale. In comparison to ordinary kriging, the prediction of sand content and clay content distribution was improved by 10.1 % and 16.8 % respectively. Thus, the quality of information with respect to the spatial distribution of soil texture of the investigation area was improved by 30 % to 40 % compared to the available map provided by the federal soil survey.

Generally, regression kriging exhibits better goodness of fit, compared to simpler models, especially in cases if the co-variable is closely related to the parameter under investigation and further on, if the parameter shows a strong spatial autocorrelation.

Finally, the present study reveals the following considerable aspects applying different models of regionalization in the younger-moraine area (Ostholsteinisches Hügelland) of Schleswig-Holstein:

1. Compared to investigations conducted in areas characterized by a relatively clear spatial structure of factors of soil genesis, correlation and autocorrelation coefficients obtained as results from statistical and geostatistical analyses of the relation of soil properties to secondary information (here NDVI and relief parameters), exhibit generally weaker relationships.
2. The integration of secondary information for the prediction of spatial soil properties distribution may improve the goodness of fit even in areas characterized by a relatively high variability of factors of soil genesis or of soil properties respectively.

3. Based on secondary information, the prediction of the spatial soil properties distribution may be improved in terms of the goodness of fit compared to the available soil map provided by the federal soil survey.

Thus, based on the presented methods, it seems suitable to produce cheaper and improved soil maps in terms of their spatial resolution and goodness of fit despite using a smaller number of soil samples.

1 Einleitung

Für die Bewertung und Quantifizierung von Landschaftsprozessen und bodenschutzfachlichen Fragestellungen als Planungs- und Entscheidungshilfe vor allem im Umwelt- und Agrarsektor steht heute eine große Anzahl an zumeist GIS-gestützten Prognose- und Simulationsmodellen zur Verfügung. Mit dem steigenden Einsatz raumbezogener Modelle in Wissenschaft und Praxis gewinnt die Frage nach der Verfügbarkeit, Güte und Bereitstellung der auf den unterschiedlichen Raumskalen als Modelleingangsgrößen zu verwendenden Bodendaten zunehmend an Bedeutung. Vielfach können konventionelle Bodenkarten mit diskret abgebildeten Raumeinheiten diesen Ansprüchen nicht gerecht werden und liegen überdies zumeist nicht in entsprechender räumlicher Auflösung vor. Der jüngst stattgefunden Workshop der Arbeitsgruppen "Bodenschätzung und -bewertung" und "Informationssysteme in der Bodenkunde" der DBG in Zusammenarbeit mit dem ständigen Ausschuss 2 „Vorsorgender Bodenschutz“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz "Stand und Ausblick zur Nutzung digitaler Bodenschätzungsdaten" im April 2007 in Mainz unterstreicht dies und stellt einen "stetig wachsenden Bedarf an parzellenscharfen Bodenfunktionskarten bzw. -daten aus den aktuellen Bereichen Cross Compliance, EU-Bodenschutzrichtlinie, EU-Wasserrahmenrichtlinie, Potenzialabschätzungen (Bioenergie, Bodenthermie) u.a." fest.

Insbesondere in Hinblick auf die Vorhersage künftiger Veränderungen der Umweltbedingungen werden Bodendaten als Modelleingangsgrößen in entsprechender räumlicher Auflösung, Aussagequalität und -verlässlichkeit zur Interpretation benötigt. Deren Verfügbarkeit ist derzeit allerdings eingeschränkt (vgl. WENKEL & SCHULZ, 1998; DOBOS ET AL., 2006).

Da die konventionelle Bodenerhebung nahezu eingestellt und künftig nicht mit einer Ausweitung zu rechnen ist (vgl. BEHRENS & SCHOLTEN, 2006), stellen moderne, unter dem Begriff des „Digital Soil Mapping“ (DSM) zusammengefasste Regionalisierungsverfahren eine sinnvolle Alternative dar, um aus den vorhandenen punkthaften Bodendaten räumliche Verteilungen zu generieren. Die Diskussion und Verbreitung neuer Strategien und Methoden zur Erlangung räumlich hochaufgelöster Bodeninformationen bei geringerer Kostenintensität ist das primäre Anliegen der „Working Group on DSM“, die aus dem ersten globalen Workshop on DSM der International Union of Soil Sciences (IUSS) in Montpellier 2004 hervorgegangen ist (LAGACHERIE ET AL., 2006).

Eine große Bedeutung und ein hohes Potenzial bei der Regionalisierung von Bodendaten wird der Integration von Sekundärinformation aus digitalen Geländemodellen und Fernerkundungsdaten in entsprechende Modelle beigemessen. Daher liegt dieser Untersuchung die Frage zu Grunde, in welchem Maße durch die Einbindung von aus Fernerkundungsdaten und Geländemodellen abgeleiteten Co-Variablen in ein Regionalisierungsmodell eine gegenüber einfachen Interpolationsverfahren verbesserte räumliche Vorhersage von Bodeneigenschaften wie z. B. der Korngrößenverteilung und dem organischen Kohlenstoffgehalt möglich ist.

Die vorliegende Arbeit leistet dabei einen methodischen Beitrag zur Regionalisierung von Bodeneigenschaften für einen im Vergleich zum Berg- und Hügelland schwach reliefierten,

kleingegliederten und intensiv agrar genutzten Landschaftsraum des Ostholsteinischen Jungmoränengebiets hinsichtlich der Anwendbarkeit verschiedener Verfahren auf unterschiedlichen räumlichen Skalen und Raumeinheiten.

1.1 Problemstellung

Der Einsatz von GIS-gestützten Schätz-, Prognose- und Simulationsmodellen für die Bewertung und Quantifizierung von Fragestellungen in Wissenschaft und Raumplanung ist heute gängige Praxis. Bei der Umweltmodellierung werden Szenarien entwickelt, die als Entscheidungsgrundlage im Rahmen der Raum- und Umweltplanung optimale Schätzwerte und Güte für unprobte Standorte erfordern. Ungeachtet dessen hängt die Modellwahl vielfach primär von der vorhandenen Datengrundlage selbst, als von der Prognosequalität des Modells ab (vgl. WENKEL & SCHULZ, 1999). Gründe hierfür sind

- die lückenhafte oder unvollständige Verfügbarkeit von Eingangsdaten in hoher räumlicher Auflösung,
- eine meist nur unzureichende Bodendatenbasis für die landschaftsökologische Modellierung auf verschiedenen Skalenniveaus,
- mangelhafte Informationen über die Genauigkeit vorhandener Datensätze und deren Heterogenität und
- fehlende Transferfunktionen für die Extrapolation punktbezogener Bodendaten auf mittlerer Maßstabsebene.

Ein Hauptproblem beim Einsatz EDV-gestützter Modelle ist folglich nicht in den Modellen selbst zu suchen, sondern in fehlenden oder zu gering aufgelösten Modell-Eingangsdaten. Obwohl die meisten Modelle hochaufgelöste Daten benötigen ist es gängige Praxis, auf generalisierte, klassifizierte Daten diskreter Einheiten klein- oder mittelmaßstäbiger Karten zurückzugreifen. Problematisch erscheint hierbei, dass eine Quantifizierung der Unsicherheiten nach Modellanwendung nicht möglich ist, da in der Regel keine Kenntnisse über die Heterogenität der eingegangenen Daten vorliegt. Dabei hat die Varianz der Merkmalsausprägungen direkte Auswirkungen auf die Prognosequalität von beispielsweise Wasser- und Stoffflussmodellen (vgl. PARK & VLEK, 2002; ZHU & MACKAY, 2001). Bereits BORK (1991) weist in diesem Zusammenhang daraufhin, dass vielfach die Modelle an die Eingangsparameter angepasst werden und eine Erhebung von Eingangsdaten notwendiger als eine Verbesserung der Modelle erscheint. Der Informationsgehalt von Bodenkarten beschränkt sich meist auf die Beschreibung idealisierter Flächenrepräsentanzen durch Leitprofile, welche den realen räumlichen Merkmalsausprägungen in keiner Weise Rechnung tragen. Für DUTTMANN (1999) ist eine Aussage über die Heterogenität in diesem Falle entscheidender, als entsprechende Aussagen über die Modellergebnisse, da geringe Veränderungen der Eingangsdaten vielfach nichtlineare Veränderungen der modellierten Größen bewirken und nur unzureichende Aussagen über die Ergebnisqualität zulassen.

So ist die Auflösung zur Verfügung stehender Bodendaten in Form von Bodenkarten von vielen Autoren generell als inadäquat für eine bodenangepasste Landwirtschaft und Modellierung im Umweltbereich anzusehen (PETERSEN, 1991; MOORE ET AL., 1993; FOHRER ET AL., 1999; MÖLLER ET AL., 1999). WENKEL & SCHULTZ (1998) stellen eine große Diskrepanz zwischen räumlicher, zeitlicher und thematischer Auflösung angewandter Simulationsmodelle und den benötigten Eingangsdaten fest.

Generell ist hinsichtlich der Vorhaltung von Bodeninformationen ein Paradigmenwechsel gefordert. Im Gegensatz zu bestehenden klassischen Choroplethen-Bodenkarten mit diskret-qualitativ abgebildeten Einheiten genetischen Hintergrunds bedarf es vielmehr räumlich hochaufgelöster metrisch-quantitativer Bodendaten zur Modellierung landschaftsökologischer Prozesse. Zu ihrer Generierung sind quantitative Methoden zu nutzen bzw. zu entwickeln, die darüber hinaus eine Aussage über die Vorhersagegenauigkeit und Eintretenswahrscheinlichkeit einzelner Merkmalsverteilungen als Qualitätsmerkmal erlauben (vgl. HENGL & TOOMANIAN, 2006). Die Regionalisierung sollte dabei direkt für primäre, physikalische und chemische Bodeneigenschaften erfolgen und rasterbasierte, kontinuierlich abbildende und unklassifizierte Bodeneigenschaftenkarten zum Ziel haben (vgl. BOCK & KÖTHE, 2005).

Im Zentrum der Regionalisierung steht die Übertragung von standortbezogenen Bodeninformationen in flächenverfügbare Bodendaten. Mit der gesteigerten Leistungsfähigkeit von EDV-Systemen rücken seit den frühen 90er Jahren verstärkt statistische Verfahren zur Regionalisierung von Bodendaten in den Mittelpunkt. Parallel zu dieser Entwicklung ist seither eine stetig wachsende Qualität und Verfügbarkeit von räumlich hochaufgelösten Informationen in Form digitaler Geländemodelle und Fernerkundungsdaten zu verzeichnen. Auf Grundlage der von JENNY (1941) beschriebenen Bodenbildungsfunktionsgleichung wurden eine Vielzahl an Regionalisierungsmodellen entwickelt, die neben der einfachen Interpolation flächenverfügbare Sekundärinformationen, wie etwa aus digitalen Geländemodellen ableitbare morphometrische Reliefparameter als Co-Variablen integrieren und so zu einer Verbesserung der Vorhersagemöglichkeit und -genauigkeit führen (MCBRATNEY ET AL., 2002 und 2003).

Da auch in Zukunft mit einer vermehrten Nachfrage nach adäquaten Bodeninformationen zu rechnen ist, stellt sich die Frage, ob und inwiefern die Integration o.g. Sekundärinformationen in ein Vorhersagemodell für den Landschaftsraum des Ostholsteinischen Jungmoränengebiets zu einer Verbesserung der Ergebnisse gegenüber herkömmlichen Interpolationsverfahren führt. Vor allem in agrarisch intensiv genutzten Gebieten, zu dem auch das Untersuchungsgebiet zählt, kommt der Kenntnis der räumlichen Variabilität zentraler Bodeneigenschaften eine große Bedeutung hinsichtlich nachhaltiger ressourcenschonender Landnutzung zu. Die derzeit flächenhaft vorliegenden Bodeninformationen sind in diesem Raum hinsichtlich der genannten Anforderungen als unzureichend anzusehen. Ein digitales Fachinformationssystem Boden (FBIS) für das Land Schleswig Holstein ist derzeit im Aufbau.

1.2 Forschungsstand zur Regionalisierung von Bodeneigenschaften

Die Entwicklung immer leistungsfähigerer EDV-Systeme hat neben der verbesserten Verfügbarkeit hochaufgelöster digitaler Informationen aus der Fernerkundung und der Reliefanalyse und die stets steigende Nachfrage nach flächendeckenden Bodeninformationen unterschiedlicher Maßstabsebenen seit Beginn der 90er Jahre zu einer verstärkten Entwicklung von Regionalisierungsmethoden geführt.

Methoden zur Quantifizierung von Bodeneigenschaften werden etwa seit Mitte der 90er Jahre unter dem Begriff *Pedometrics* zusammengefasst (WEBSTER 1994; MCBRATNEY ET AL., 2000). Abbildung 1.1 zeigt einen Überblick über die Hauptgruppen der entwickelten Verfahren.

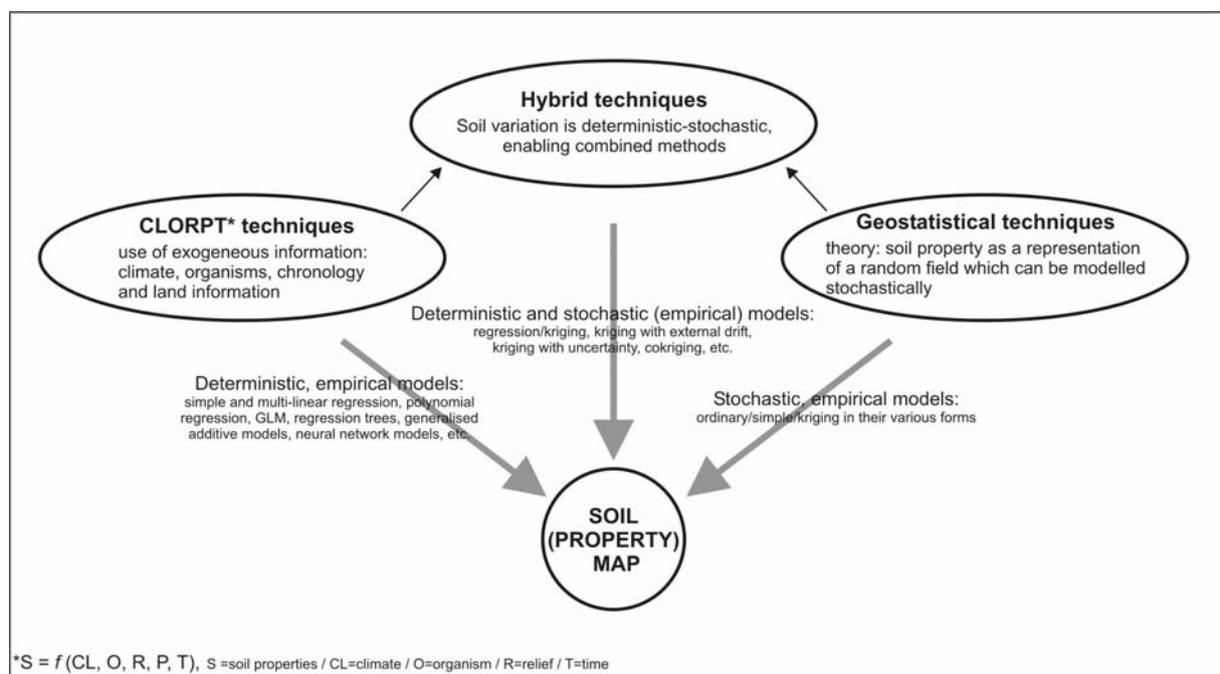


Abbildung 1.1: Übersicht über die gebräuchlichsten Methoden zur Regionalisierung von Bodeneigenschaften. (MCBRATNEY ET AL., 2000, S. 303, verändert)

Zu den klassischen und weithin genutzten Methoden gehören *geostatistische* Verfahren auf Grundlage der von KRIGE (1963) und MATHERON (1963) entwickelten Theorie der regionalisierten Variablen. Hierbei werden einzelne Bodenvariablen und ihre räumliche Beziehung zueinander quantifiziert und eine räumliche Repräsentanz der Verteilungsmuster einzelner Bodeneigenschaften wiedergegeben. Kritisiert wird bei diesem Methodenansatz die erforderliche hohe Dichte an punktbezogenen Informationen und die lediglich mathematisch-statistische Betrachtung, während funktionale Beziehungen nicht berücksichtigt werden und damit keine übertragbaren Modelle generiert werden können.

Um den in Kapitel 1.1 angesprochenen Problemen entgegen zu treten, bedarf es der Entwicklung von Methoden, die eine Übertragung von Modellen zur Extrapolation von Punktdaten auf den Feld- und Landschaftsmaßstab bei vergleichsweise geringer Punktdichte erlauben. Hierzu bietet sich die Integration unterstützender flächenverfügbarer Informationen, wie z. B.

das Relief, das Ausgangsgestein oder die Vegetationsverteilung an. Die sogenannten „CLORPT“-Techniken fußen auf der von JENNY (1941) aufgestellten Bodenfunktionsgleichung (Factors of Soil Formation) in Form deterministisch-empirischer Modelle. Die Methodenentwicklung basiert auf den die Bodeneigenschaften bedingenden Faktoren:

$$S = f(\text{CL}, \text{O}, \text{R}, \text{P}, \text{T}) \quad \text{Gl. 1.1}$$

Dabei ist S (Boden) als eine Funktion der Faktoren CL (Klima), O (Organismen), R (Relief), P (Ausgangsgestein) und T (Zeit) zu beschreiben (vgl. MCBRATNEY ET AL., 2000). Beispiele sind einfache, multiple und polynomische Regressionen, generalisierte lineare Modelle (GLM), Regressions-Bäume, generalisierte additive Modelle (GAM) und neurale Netze. Hinzu kommt eine Reihe von „hybriden“ Techniken, die aus einer Kombination von deterministisch/empirischen und stochastisch/geostatistischen Methoden hervorgehen.

Eine erweiterte Aufstellung von Untersuchungen und entwickelten Methoden zur Regionalisierung von Boden- und Bodeneigenschaften liefern MCBRATNEY ET AL. (2000), SCULL ET AL. (2003), MCBRATNEY ET AL. (2003), GRUNWALD ET AL. (2005), BEHRENS & SCHOLTEN (2006) und LAGACHERIE ET AL. (2006).

Einen vielversprechenden und seither vielfach genutzten Ansatz lieferten ODEH ET AL. (1995) mit dem von ihnen vorgestellten hybriden Verfahren des Regressions-Kriging. Unter Berücksichtigung von Boden-Relief-, wie auch von Boden-Ertragsbeziehungen (BISHOP & MCBRATNEY, 2001) basiert dieses Verfahren auf der Nutzung unterstützender Sekundärinformationen. Zu Grunde liegen aus digitalen Geländemodellen und Satellitenbildern abgeleitete Informationen, die häufig hochkorreliert sind mit physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften. Dem Ansatz liegt die Annahme zu Grunde, dass die deterministische Komponente der Zielvariablen (hier: Bodeneigenschaft) durch die multiple Regression ausgewiesen wird, während die Modelresiduen die räumliche Variabilität beschreiben. Daher sind die unerklärten Anteile der Vorhersage mit einbezogen. Ein Vorteil gegenüber herkömmlichen Verfahren ergibt sich besonders bei geringer Dichte punktbezogener Bodeninformationen durch die in die Regression eingebundenen exogenen Variablen (z. B. Landschaftsformen und Ertragsverteilungen aus Satellitenbildern), die hochaufgelöst verfügbar sind (MCBRATNEY ET AL., 2000).

ODEH ET AL. (1995) verglichen verschiedene geostatistische Methoden unter Integration von Boden-Landschaftsbeziehungen. Im Resultat zeigte sich, dass mit dem Regressions-Kriging die höchste Güte in der Vorhersage erreicht werden konnte. BISHOP & MCBRATNEY (2001) bemerken hierzu, dass selbst bei nur schwach ausgeprägten Korrelationen zwischen den Boden- und Reliefparametern auf diese Weise bessere Ergebnisse zu erzielen sind, als mit herkömmlichen generisch-statistischen Modellen. Gründe für den erfolgreichen Einsatz liegen in der Flexibilität des Regressions-Kriging mehr unterstützende Informationen (Relief, Ausgangsgestein, Ertragsverteilungen etc.) zur Verbesserung der Vorhersage von Bodeneigenschaften in das Model integrieren zu können (vgl. DOBOS ET AL., 2000). In der Konsequenz

kommen immer häufiger digitale Geländemodelle und Fernerkundungsdaten bei der Regionalisierung von Bodeneigenschaften zum Einsatz und gewinnen hierfür an Bedeutung.

Diese wie auch eine große Anzahl anderer Fragestellungen beziehen sich auf relativ kleine Räume bzw. auf die Feldskala, während Untersuchungen auf Landschafts- oder Einzugsgebietsebene seltener sind. Viele Fragestellungen und Modellanwendungen sind dagegen außerhalb einzelner Feldgrenzen auf hydrologische Einzugsgebiete fokussiert. Daher sollte die Forschung bezüglich der Zugehörigkeit von Bodeneigenschaften stärker auf das Einzugsgebiet als natürliche, abgrenzbare Raumeinheit zielen (MOORE ET AL., 1993).

Bei der Entwicklung und Anwendung von Regionalisierungsmethoden ist in den letzten Jahren eine deutliche Verbesserung der Vorhersagemöglichkeiten durch die kombinierte Integration von aus DGM abgeleiteten Reliefparametern und Fernerkundungsdaten zu verzeichnen (MCBRATNEY ET AL., 2003). Beruhend auf der Funktion des Reliefs als die den Wasserfluss steuernde Landschaftskomponente, ist es mitverantwortlich für die catenare Bodenentwicklung und räumliche Verteilung physikalischer und chemischer Bodeneigenschaften (JENNY, 1941). DGM-bezogene Modelle wurden in der Vergangenheit vielfach genutzt (MOORE ET AL., 1993; ET AL., 1995; GESSLER ET AL., 1995; FLORINSKY & KURYAKOVA, 1998, HENGL ET AL. (2004). ODEH ET AL. (1991) stellten in ihrer Untersuchung fest, dass bereits einfache Reliefparameter, wie die Hangneigung, Horizontal- und Vertikalwölbung geeignet sind, einen großen Teil der Varianz von Bodeneigenschaften auszuweisen. In weiteren Arbeiten wurden komplexe Reliefattribute wie der Wetness Index eingesetzt mit dem Ergebnis, dass sich relief folgende Bodensequenzen mit Reliefindizes erklären lassen (MOORE ET AL., 1993; GESSLER ET AL., 1995; DOBOS ET AL., 2000; WILSON & GALLANT, 2000). Eine Übersicht über verschiedene morphologische Reliefparameter und Indizes geben DIKAU & SCHMIDT (1999) und WILSON & GALLANT (2000).

MOORE ET AL. (1993) fanden signifikante Korrelationen zwischen Reliefparametern und gemessenen Bodenkennwerten. Dabei stellten sie fest, dass die Hangneigung und der Wetness Index in ihrem Untersuchungsgebiet am höchsten mit der Horizonttiefe, dem Humusgehalt, dem pH-Wert, sowie Sand-, Ton- und Schluffgehalt der Oberböden korreliert sind. Mit der Nutzung der Reliefattribute allein konnte bis zu 50 % der Variabilität genannter Bodeneigenschaften erklärt werden. Auch IQBAL ET AL. (2005) konnten in ihrer Untersuchung mit Hilfe einer schrittweisen multiplen Regression zwischen 10 % und 62 % der Variabilität von Oberbodeneigenschaften erklären und bis zu 56 % für den Wassergehalt bei verschiedenen pF-Kennwerten. GESSLER ET AL. (1995) entwickelten ein statistisch basiertes Boden-Landschaftsmodell für die Korngrößenverteilung und die Ober- bzw. Gesamtbodentiefe unter Verwendung des Wetness Index und der Horizontalwölbung. Ähnliche Ergebnisse sind den Untersuchungen z. B. von BELL ET AL. (1995), BIGGS & SLATER (1998), GESSLER ET AL. (2000), ZIADAT (2005) und CONRAD ET AL. (2006) zu entnehmen.

Neben der Aufstellung einfacher Regressionsmodelle werden Reliefattribute zunehmend als Co-Variablen in hybride Prediktionstechniken, wie dem Kriging mit externer Drift (KED), Co-Kriging (CK) oder Regressions-Kriging (RK) erfolgreich eingesetzt. Eine große Zahl me-

thodenvergleichender Untersuchungen belegt die deutliche Verbesserung der Vorhersage von Bodeneigenschaften wie z. B. der Korngrößenverteilung und dem Humusgehalt, aber auch über Pedotransferfunktionen (PTF) abgeleitete Größen unter Einbindung reliefbezogener Co-Variablen (CASTRIGNANO, 2005; HERBST ET AL., 2006). Darüber hinaus erfordern die genannten Methoden eine geringere Dichte punktbezogener Bodeninformationen (GOOVAERTS, 2000; MCBRATNEY ET AL., 2000; MUELLER & PIERCE, 2003; HENGL ET AL., 2004 und SUMFLETH & DUTTMANN, 2007).

Die aufgeführten Studien belegen, dass die räumliche Verteilung wichtiger Bodenparameter in hoher Güte allein durch die Integration der aus DGM abgeleiteten topographischen Parameter oder Indizes in entsprechende Regionalisierungsmodelle vorhergesagt werden kann, auch wenn ein mehr oder weniger hoher Anteil unerklärter Varianz bestehen bleibt. Problematisch dagegen erscheint der Einsatz von DGM in schwach reliefierten Regionen (vgl. BOCK & KÖTHE, 2005). Hier können zur Verbesserung der Vorhersage weitere Sekundärinformationen einbezogen werden.

Ein großes Potenzial bieten dabei aus Felddaten abgeleitete Ertrags- oder Wuchspotenzialkarten. Als durch verschiedene Bodeneigenschaften bestimmte Komplexgröße, weist ihre Differenzierung im Umkehrschluss auf die räumliche Differenzierung der sie bestimmenden Bodeneigenschaften hin (DOBOS ET AL., 2000 und BISHOP & MCBRATNEY, 2001). Speziell im Bereich der *Precision Agriculture* werden Methoden zur Ableitung des bodenbürtigen Ertragspotenzials aus Fernerkundungsdaten angewandt und untersucht (MCBRATNEY & PRINGLE, 1997; Werner & Jarfe, 2002; SOMMER ET AL., 2002 und PANTEN, 2002). Eine besondere Bedeutung kommt dabei den aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten Vegetationsindizes zu, wie z. B. dem häufig verwendeten *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Auf Basis des Reflektionsverhalten der Vegetation im roten und nahen infraroten Spektralbereich lässt sich die räumliche Verteilung zentraler Bestandesparameter, wie der oberirdischen Biomasse, Bestandeshöhe oder –dichte ableiten und abbilden, da sie mit o.g. Vegetationsindex hochkorreliert sind (vgl. HUETE & LIU, 1994; RONDEAUX ET AL., 1996; TAYLOR ET AL., 2000; YANG & CHEN, 2004 und PETTORELLI ET AL., 2005). Deren Verteilungen wiederum gehen zu einem gewissen Grad auf Bodeneigenschaften zurück, die für den Nährstoff- und Wasserhaushalt verantwortlich sind (REUTER, 2004; SCHMIDHALTER ET AL., 2004). Generell geben Vegetationsindizes den Status der Pflanzenbedeckung wieder und können bodenbezogene Standortunterschiede indizieren (SOMMER ET AL., 2003). Fernerkundungsdaten eignen sich demnach gut zur Integration in die Vorhersage von Bodeneigenschaften. Diskutiert und untersucht wurde dies von BISHOP & MCBRATNEY (2001); MCBRATNEY & PRINGLE (2001); SCHMIDHALTER & SELIGE (2002); WERNER ET AL. (2002) und SCHMIDHALTER ET AL. (2004).

MCKENZIE & RYAN (1999) kombinierten ausgewählte Reliefparameter mit dem aus Landsat Satellitenbildern berechneten NDVI und erreichten Erklärungsgrade für die Bodentiefe von 42 % und 78 % bzw. 54 % für den Phosphat- und Kohlenstoffgehalt. SUMFLETH & DUTTMANN (2007) nutzten den *NDVI* aus LANDSAT und ASTER-Szenen neben neun aus einem DGM berechneten Reliefparametern. Die multiplen linearen Regressionen ergaben Werte von

41 % und 29 % erklärter Varianz für den Kohlenstoff- und Schluffgehalt, wobei die Reliefparameter Wetness Index und die Höhe über der Tiefenlinie eingegangen sind. Mit dem anschließend vorgenommenen Regressions-Kriging konnte die Vorhersagegeegüte gegenüber herkömmlichen Interpolationsverfahren wie dem Simple Kriging für den Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt um 14 %, bzw. 13 %, für den Schluffgehalt um 10 % verbessert werden. Weitere Beispiele für den Einsatz von Fernerkundungsdaten und DGM zur Regionalisierung von Bodeneigenschaften zeigen Arbeiten von BELL ET AL. (2000); ODEH ET AL. (2001); HENGL ET AL. (2002) sowie REUTER (2004).

Basierend auf den vorgestellten Ansätzen von ODEH ET AL. (1995), BISHOP & MCBRATNEY (2001) und SOMMER ET AL. (2002) soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht werden, inwiefern die Vorhersage von Bodeneigenschaften für den Feld- und Landschaftsmaßstab auf Grundlage statistischer und geostatistischer Verfahren unter Anwendung von Sekundärinformationen aus der Fernerkundung und der Reliefanalyse im Ostholsteinischen Jungmoränenengebiet möglich ist.

1.3 Zielsetzung

Die Ziele der vorliegenden Arbeit ergeben sich aus den im Kapitel 1.1 vorgestellten Problematiken. Im Zentrum der Untersuchung steht die Anwendbarkeit und Überprüfung der Eignung von Regionalisierungsmodellen- und methoden zur Abbildung kontinuierlicher, flächendeckender Bodenkennwerte auf groß- bis mittelmaßstäbiger Ebene. Das gewählte Untersuchungsgebiet ist dabei beispielhaft für das Jungmoränenengebiet Schleswig-Holsteins. Der morphologisch kleinstrukturierte Landschaftsraum des Ostholsteinisches Hügellandes mit seiner vergleichsweisen geringen Reliefenergie bei gleichzeitig intensiver landwirtschaftlicher Nutzung ist diesbezüglich nur unzureichend untersucht.

Die Ziele der vorliegenden Arbeit sind wie folgt zusammenzufassen:

- Untersuchung und Beschreibung des Zusammenhanges zwischen der räumlichen Verteilung der untersuchten Bodenparameter und zentralen prozessbeeinflussenden Reliefkennwerten wie z. B. dem Wetness Index
- Untersuchung der Eignung von aus Fernerkundungsdaten berechneten Vegetationsindizes zur Vorhersage komplexer Bodenhaushaltsgrößen wie dem Retentionsvermögen für Wasser und der Kationenaustauschkapazität
- Anwendung und Überprüfung der Eignung verschiedener Verfahren zur räumlichen Interpolation von punktbezogenen Bodendaten unter Einbindung von flächenhaft verfügbaren und hochaufgelösten Sekundärinformationen als Co-Variablen
- Abbildung kontinuierlicher Variablen- und Prozessfelder
- Verbesserung der flächenhaften Verfügbarkeit mesoskaliger Bodeninformationen

2 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

2.1 Allgemeine Lage und Abgrenzung

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im östlichen Bereich des Kartenblattes 1826 der Topographischen Karte 1:25000 in Mittelholstein. Naturräumlich gehört das Gebiet dem Jungmoränengebiet des Ostholsteinischen Hügel- und Seenlandes an (MEYNEN & SCHMITTHÜSEN, 1962), dem am stärksten reliefierten Teilraum Schleswig-Holsteins. Seine Entstehung ist vor allem auf die Auswirkungen der letzten Kaltzeiten und den damit verbundenen Prozessen der Gletscher- und Schmelzwasserakkumulation und -erosion zurückzuführen. Geomorphologisch kennzeichnend für diesen Landschaftstyp sind steile Endmoränenwälle, wellige Grundmoränenkomplexe, sowie zahlreiche Seen und abflusslose Senken, die vielfach vermoort sind.

Das Blatt 1826 Bordesholm ist nach FRÄNZLE (1981, S. 32) repräsentativ für das Jungmoränengebiet Schleswig-Holsteins und die angrenzenden Teile Südjütlands anzusehen und wurde daher als beispielhaft in das Schwerpunktprogramm „Geomorphologische Detailkartierung in der Bundesrepublik Deutschland“ aufgenommen und bearbeitet. Das Gebiet weist einen durch starken Eiszerfall geprägten Formenschatz der weichselpleniglazialen Eisrandlagen auf. Der Naturraum des Moränengebietes der Oberen Eider wird südlich entlang der Linie Neumünster-Einfeld-Bornhöved durch die sich anschließende Geest begrenzt. Das eigentliche Untersuchungsgebiet ist dem Einzugsgebiet der Drögen Eider zuzuordnen (s. Abb. 2.1). Es erstreckt sich vom 15 km südlich von Kiel gelegenen Ufer des Bothkamper Sees über 7 km in südliche Richtung bei einer mittleren Ost-West Ausdehnung von 3 km und umfasst 19,40 km². Im weiteren Verlauf entwässert die Eider weite Teile Schleswig-Holsteins und mündet bei Tönning in die Nordsee. Südwestlich angrenzend erfolgt die Entwässerung über Schwale und Stör in die Unterelbe. Östlich des Einzugsgebietes verläuft in nord-südlicher Richtung die Hauptwasserscheide zwischen den in die Nord- bzw. Ostsee entwässernden Gerinnesystemen.

Die Abgrenzung des Einzugsgebietes erfolgte mit dem TOPAZ-Algorithmus (GARBRECHT & MARTZ, 1999) auf Grundlage eines DGM 5 des Landesvermessungsamtes Schleswig-Holstein und wurde der Arbeit von SCHMEHE (2007) entnommen. Bei einer durchschnittlichen Höhenlage des Gebietes um 44 m ü. NN sind maximale Höhen von 73,5 m über NN am südwestlichen Randbereich und minimale von 23,4 m über NN im nördlichen Bereich am Einlass der Drögen Eider in den Bothkamper See zu verzeichnen. Mit einer durchschnittlichen Hangneigungstärke von 2,5° ist das Gebiet als überwiegend moderat reliefiert zu bezeichnen, wobei auf etwa 30 % der Fläche Hangneigungen zwischen 4° und 8° auftreten.

Die potenzielle natürliche Vegetation für diesen Raum wird von DIERBEN (2004) als Buchenwaldgesellschaften mit Waldmeister, Perlgras und Bingelkraut als charakterisierende Arten der Krautschicht beschrieben. Feuchtere Standorte werden von Buchenmischwäldern mit zunehmenden Anteilen von Eschen dominiert, aus nassen Standorten gehen Erlenbruchwälder hervor. Das Gebiet zeigt heute eine ackerbaulich geprägte offene Kulturlandschaft, durchsetzt von kleineren Waldungen und Gehölzen, sowie den charakteristischen Knicks.

2 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

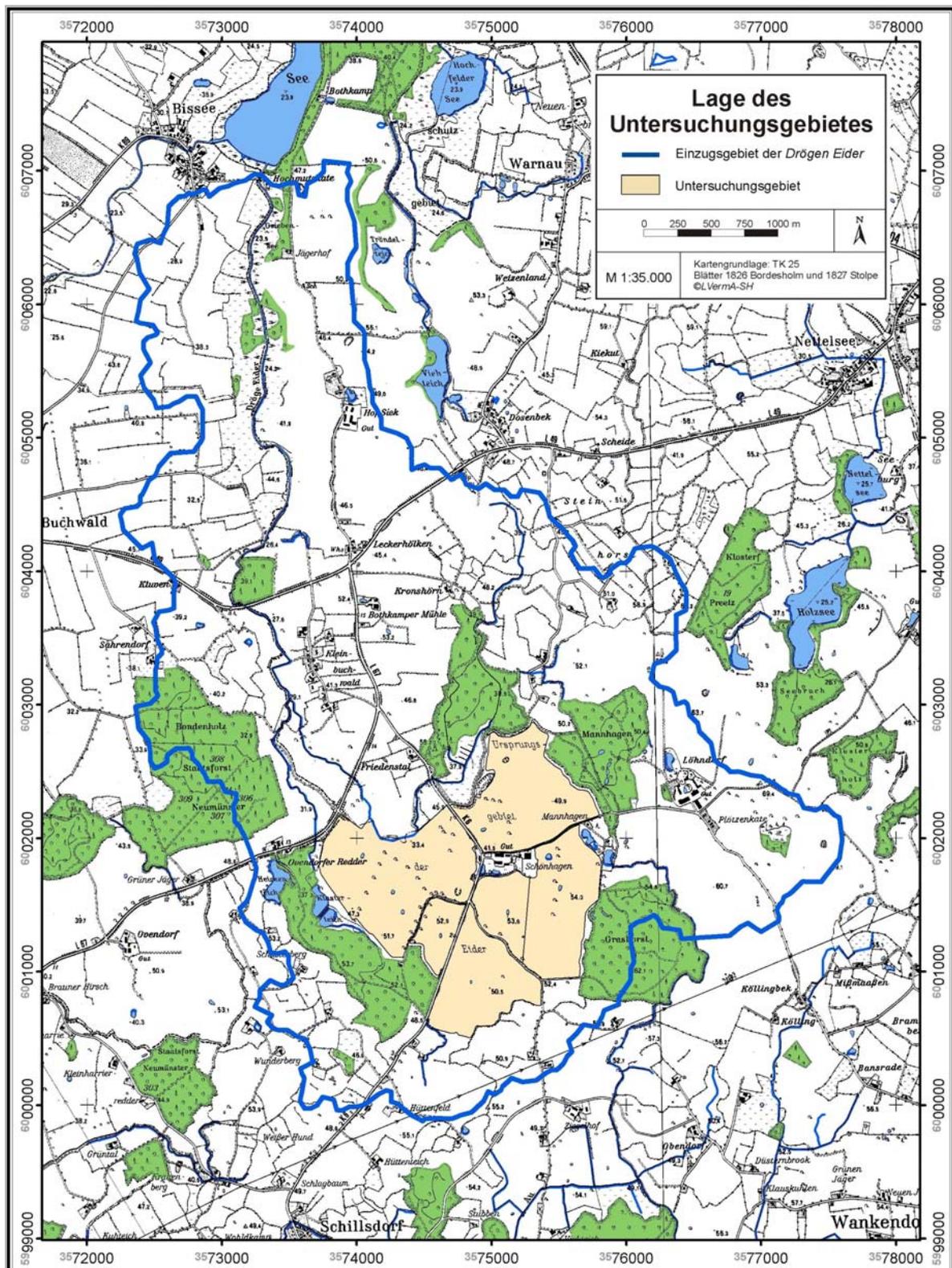


Abbildung 2.1: Lage des Untersuchungsgebietes.

Kartengrundlage: DTK 25, Blätter 1826 Bordesholm und 1827 Stolpe, ©LVermA-SH.

Als zentrales Untersuchungsgebiet wurden 6 seit langem ackerbaulich genutzte Schläge im südlich gelegenen Quellgebiet der Drögen Eider gewählt (s. Abb. 2.1 und 2.2).

2 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

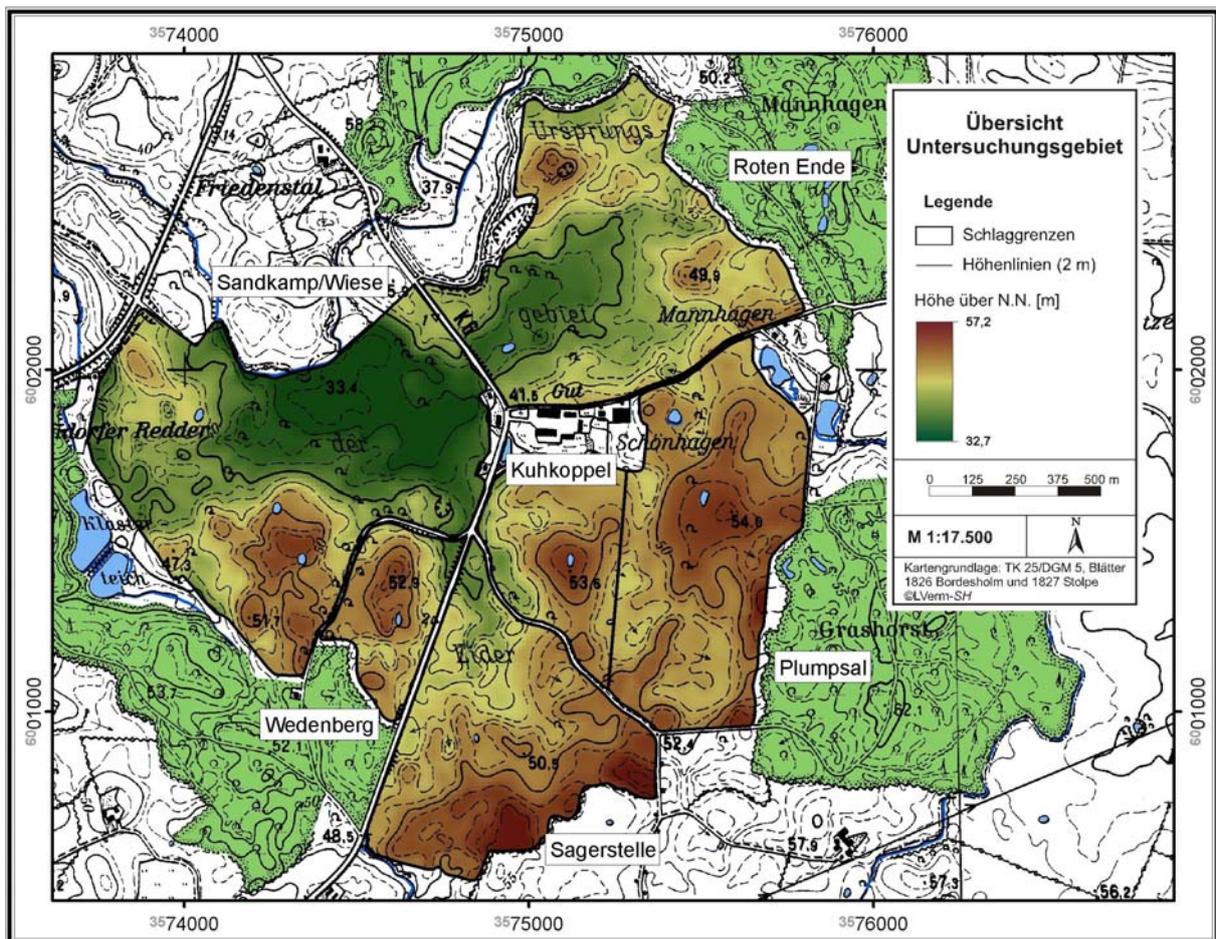


Abbildung 2.2: Schläge des Untersuchungsgebietes.

Kartengrundlage: DTK 25 / DGM 5, Blätter 1826 Bordesholm und 1827 Stolpe, ©LVermA-SH.

Sie erstrecken sich 2,3 km Nord-Süd und 2,1 km Ost-West verlaufend und umfassen eine Gesamtfläche von 255,3 ha. (s. Tab. 2.1). Das entspricht einem Flächenanteil von 13,2 % des gesamten EZG und 20,6 % der ackerbaulich genutzten Fläche.

Tabelle 2.1: Flächengröße und -bezeichnung der einzelnen Schläge im Untersuchungsgebiet.

Schlagbezeichnung	Flächengröße [ha]
Sandkamp/Wiese	76,5
Roten Ende	57,3
Plumpsal	49,9
Kuhkoppel	18,8
Sagerstelle	42,9
Wedenberg	12,8
Summe	255,3

Die Auswahl erfolgte nach der Vorgabe, möglichst große Schläge mit einer relativ großen morphologischen und damit zu erwartenden pedologischen Variabilität innerhalb der bewirtschafteten Einheiten in die Untersuchung eingehen zu lassen. Die Bewirtschaftung der Flächen erfolgt durch die BBH Landwirtschaftliche Betriebsgemeinschaft GbR in Depenau vom zentral gelegenen Gut Schönhagen aus.

2.2 Geologie und Geomorphologie

Da im Bearbeitungsgebiet keine Geologischen Karten im geeigneten Maßstab vorliegen, beziehen sich die nachfolgenden Beschreibungen im Wesentlichen auf die Erläuterungen zur Geomorphologischen Karte GMK 1:25000, Blatt 8, 1826 Bordesholm (FRÄNZLE, 1981).

Die heutige Oberfläche des Untersuchungsraumes ist ausschließlich von holozänen und pleistozänen Ablagerungen bestimmt, deren Basis in Teufen bis zu 50 m unter NN liegt. Die erste in Schleswig-Holstein nachweisbare Phase der pleistozänen Inlandvereisungen ist das Elsterglazial. Sowohl deren lockersedimentäre Ablagerungen als auch die der Saalevereisung stehen im Gebiet bis auf wenige Ausnahmen nicht oberflächennah an, da sie mehrfach von den Moränenkomplexen der jüngsten Vereisungsphase, des Weichselglazials, überfahren, um- und überlagert wurden. Das Eis der Weichselvereisung überfuhr das Gebiet erst im Hochglazial. Stratigraphisch sind drei Hauptvorstöße zu unterscheiden (s. Abb. 2.3).

Der Eisrand der Phase I erreichte das Südende des heutigen Einfelder Sees und hinterließ Moränen im Süden und Osten des Blattes. Die Rاندlage dieses Vorstoßes ist jedoch nicht genau zu lokalisieren, da sie einerseits ohnehin infolge geringer Exarationswirkung nur schwach ausgebildet war und sie andererseits durch Schmelzwässer umgelagert und überschottert wurde. Nach Phase I findet eine ausgeprägte Stagnations- und Abschmelzphase statt, in der das Moränenvorland inklusive liegendegebliebener Toteisblöcke mit Binnensandermaterial bis zu einer Mächtigkeit von 10 m überschüttet wurde.

Das zunächst nördlich liegende Eis überfuhr dann in einem weiteren Vorschub (Phase II) die von Sandern überlagerten Toteisblöcke und Moränen der Phase I. Die äußerste Ausdehnung des Moränenrückens verlief vom Berührungspunkt mit dem warthestadialen Moränenrücken bei Boostedt nach NW bis über das Stadtgebiet Neumünsters hinaus.

In Phase III wurde der markante Blumenthaler Moränenenzug aufgestaucht. Die Eisrandlage erstreckt sich vom Westensee über Blumenthal nördlich des Bothkamper Sees entlang nach Süden, wo sie den äußersten Randbereich des Einzugsgebietes der Drögen Eider bildet.

Die folgenden Eisvorstöße der Phasen IV und V erreichten das Blattgebiet nicht mehr. Stratigraphisch lassen sich die Phasen I-III den in Ostdeutschland und Polen weit auseinandergezogenen Brandenburger und Frankfurter Stadium zuweisen.

Durch das im Bölling-Interstadial beginnende und dann über Alleröd bis in das Präboreal intensivierte Tieftauen kam es zur Ausbildung steilhängiger Senken und Kesselfelder. Aufgrund der hohen Reliefenergie und des zunächst noch feuchtkalten Klimas, erreichte die Hangabtragung ein Maximum. Dabei dominierte Solifluktion in Kuppen- und Oberhangbereichen, in den mittleren und unteren Hangpartien hingegen Abspülung, wodurch die Konkavität der Kuppen ebenso zunahm, wie die Konkavität der Unterhangbereiche.

2 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

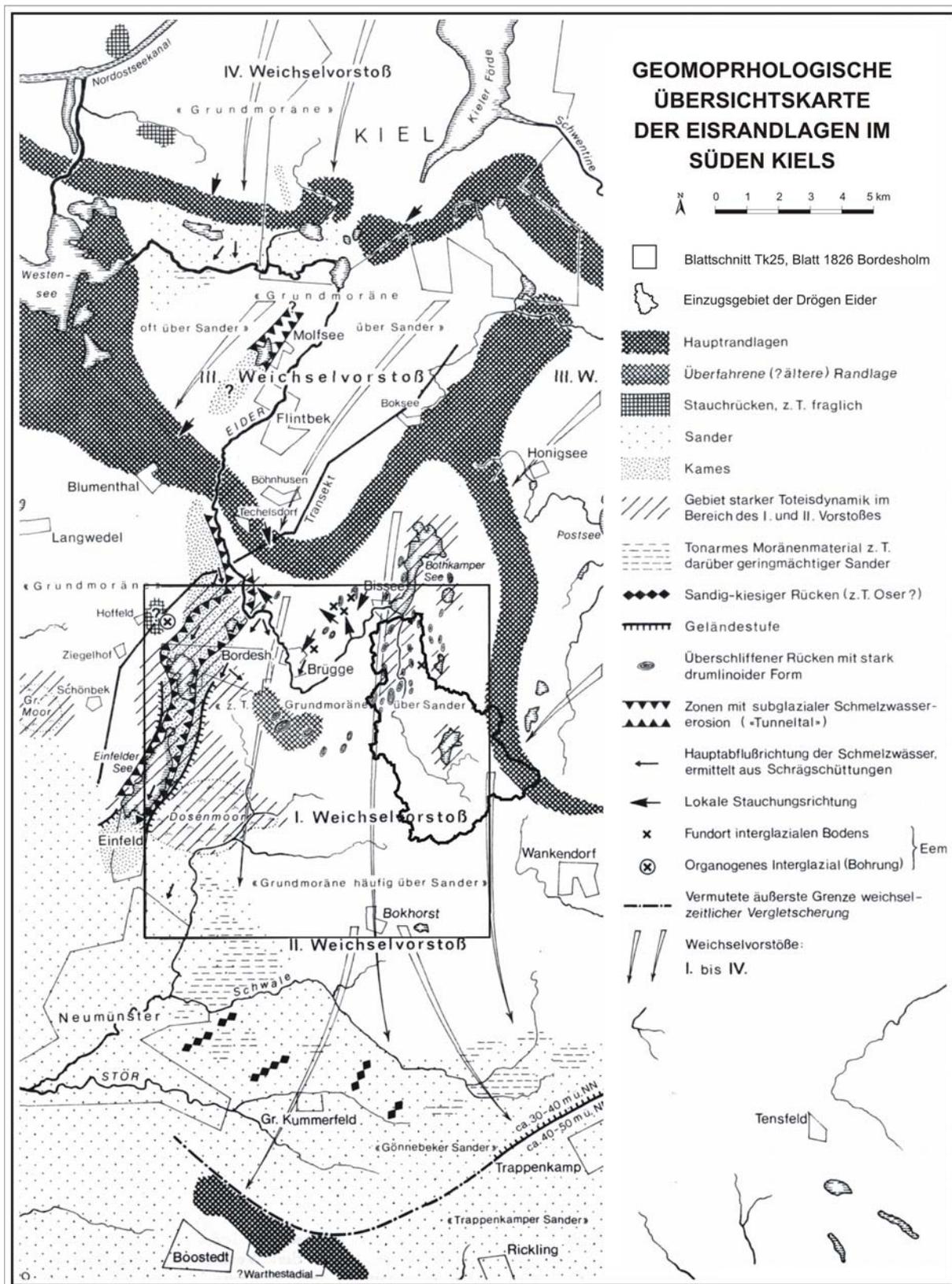


Abbildung 2.3: Geomorphologische Übersichtskarte der Eisrandlagen im Süden Kiels.

Quelle: FRÄNZLE 1981, S. 19, nach STEPHAN & MENKE 1977, verändert.

Das Boreal und das Atlantikum sind als Phasen größter Stabilität zu nennen, da die geschlossene Waldvegetation weitgehend Spülprozesse verhinderte. Desweiteren ist auch die in dieser Phase stattfindende Moorbildung in den vielen Niederungen hervorzuheben.

Im Subboreal und vor allem in der Folgezeit wird ein zweites Stabilitätsminimum erreicht, wobei die Agrarwirtschaft eine zunehmende Bedeutung erlangt. Innerhalb weniger Jahrhunderte können lokal Hangpartien um einige dm abgetragen bzw. Senken entsprechend aufgefüllt werden. Ursachen sind in der Bodenbearbeitung und Feldbestellung mit einhergehender Bodenerosion, hauptsächlich durch Flächenspülung und Abpflügen zu sehen.

Östlich der Linie Bothkamper See - Obereider - Südende Bordesholmer See - Ostufer Einfeld der See - Dosenmoor herrschen mächtige Geschiebemergelkomplexe mit nach Osten zunehmender Reliefenergie vor. Das Spektrum der Korngrößen reicht von lehmig-sandig bis lehmig-tonig bei zunehmender Tonkomponente in den höchsten Geschiebelehmkomplexen im Osten. Die weitverbreiteten Kuppen und Depressionen in den Geschiebemergelkomplexen sind größtenteils auf Toteis zurückzuführen. Die vom Einzugsgebiet aus nach SW abnehmende Reliefenergie mit zunehmend sandiger Komponente der anstehenden Lockersedimente, sind auf eine immer stärkere Ausdünnung der Moränendecke und dem Übergang zur Neumünsteraner Sanderfläche zurückzuführen.

Die hochglaziale Akkumulationswirkung des Eises und der Schmelzwässer und die dann folgenden Zertalungsprozesse und das Tieftauen des Eises im holozänen Präboreal und Boreal ließen die breite Nord-Süd-verlaufende Tiefenzone der Drögen Eider vom Ursprungs- (Untersuchungs-) gebiet bis zum Bothkamper See entstehen. Geomorphologisch sind im Einzugsgebiet zwei Bereiche zu unterscheiden. Der kleinere nördliche Bereich weist eher kuppige (drumlinisierte) Moränenkomplexe mit großen vermoorten Toteissenken und flachen Seen auf, während der südlich der L49 gelegene Teilbereich eher durch wellige Moränenkomplexe mit zahlreichen, mehrheitlich kleineren vermoorten Toteishohlformen gekennzeichnet ist.

Welliges Relief als Folge unterschiedlicher Sedimentationsbedingungen und kleinräumiger Toteissenkenbildung geben der Landschaft das Gepräge. Die glazigene Sedimentation und die sie begleitende Schmelzwasserdynamik des Weichsel-Hochglazials ließen ein vergleichsweise sanftgewelltes Primärrelief entstehen. Das kuppig bis kleinkuppig stark wechselnde, bewegte Relief, ist das Ergebnis der rezenten Oberflächenformung in einem seit über 200 Jahren intensiv genutzten Agrarraum. Umlagerung von Sedimenten und Bodenbildung dauern bis heute an. Das relativ schlecht ausgebildete Entwässerungssystem, dessen Dynamik und die stattfindenden landschaftsbildenden Prozesse, dokumentieren das noch geringe geologische Alter des betrachteten Raumes (vgl. FRÄNZLE, 1981 und LIEDTKE, 1994).

2.3 Boden und Bodeneigenschaften

Entsprechend der naturräumlichen Lage ist das Ostholsteinische Hügel- und Seenland Teil der Bodenregion der Jungmoränenlandschaften und gehört der Bodengroßlandschaft der Grund-

moränenplatten und lehmigen Endmoränen im Jungmoränengebiet Norddeutschlands an (AG BODEN, 2005).

Vorherrschend sind wellig-kuppige Moränenkomplexe, auf denen sich reliefabhängige Bodenassoziationen aus Parabraunerden, Pseudogleyen, Kolluvisolen, Braunerden, Gleyen, Anmoorgleyen und Niedermooren gebildet haben (vgl. Abb. 2.4). Die Pedogenese führte in höhergelegenen Reliefpartien unter Bewaldung zur Ausbildung vor allem von Parabraunerden und Pseudogleyen aus Geschiebelehm bzw. -mergel und Niedermoortorfen in den zahlreichen kleineren Senken und größeren Niederungen. Mit zunehmender Entkalkung und Versauerung der geologischen Ausgangssubstrate geht eine Tonverlagerung in tiefere Profilmereiche mit einer Einlagerungsverdichtung betroffener Horizonte als Kennzeichen der hier typischen Bodenklasse der Lessives einher. Ausgedehnte Niedermoore finden sich vor allem in unmittelbarer Umgebung der ausgeprägten Tiefenzonen der Drögen Eider im unteren breit ausladenden Lauf und im Quellgebiet, während Gleye meist nur sporadisch auftreten.

Mit der Intensivierung der Landwirtschaft und der Urbarmachung durch Rodung kam es zur Kappung der Bodenprofile im Oberhangbereich und zur Akkumulierung von humosem Bodenmaterial am Hangfuß. Als Folge davon entstanden in den Senken- und Hangfussbereichen ackerbaulich genutzter Flächen über das ganze Gebiet verbreitet Kolluvien. Vielfach wurden hierdurch tiefergelegene Gleye und Niedermoore überlagert. Der Abtragung durch Abspülung und Abpflügen auf Moränenhängen mittlerer Neigung kommt dabei eine erhebliche Bedeutung zu. Die Kappung des Bodenprofils auf stärker konvex geformten Hangbereichen lässt eine hellere Bodenfarbe durch geringere Humusgehalte in Erscheinung treten. Die Abtragung von Bodenmaterial schreitet hierbei schneller voran als die Bodenreubildung durch Verwitterung. Die Akkumulation in Senken bzw. flacheren Hangbereichen von humusreichem Material hat eine dunklere Färbung, vor allem konkaver Hangpartien, zur Folge. Mit der Glättung des Nanoreliefs sind in der landwirtschaftlichen Nutzung verstärkte Standort- und Ertragsunterschiede zu erwarten (FRÄNZLE, 1981). Der Prozess der Bodenerosion durch Abpflügen wird allerdings künftig in den Hintergrund treten, da hier wie auch andernorts eine zunehmend pfluglose Bodenbearbeitung zu verzeichnen ist.

Insgesamt ist von einer Flächendominanz sandig-lehmiger bis lehmig-sandiger Böden zu sprechen, die aus der Verwitterung von Geschiebemergel als Ausgangssubstrat der Bodenbildung entsprechend der geologischen und klimatischen Gegebenheiten hervorgegangen sind. Im bereits angesprochenen nördlichen Teil des Einzugsgebietes treten überwiegend Parabraunerde-Assoziationen in Erscheinung, während die südlich gelegenen Gebiete durch die Verbreitung von Pseudogleyen dominiert werden. Als Ursache hierfür dürfte die im nördlichen Bereich stärker in Erscheinung tretende Reliefierung beidseitig der Drögen Eider verantwortlich sein, die eine bessere Entwässerung bewirkt. Im anderen Fall dagegen führt das

2 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

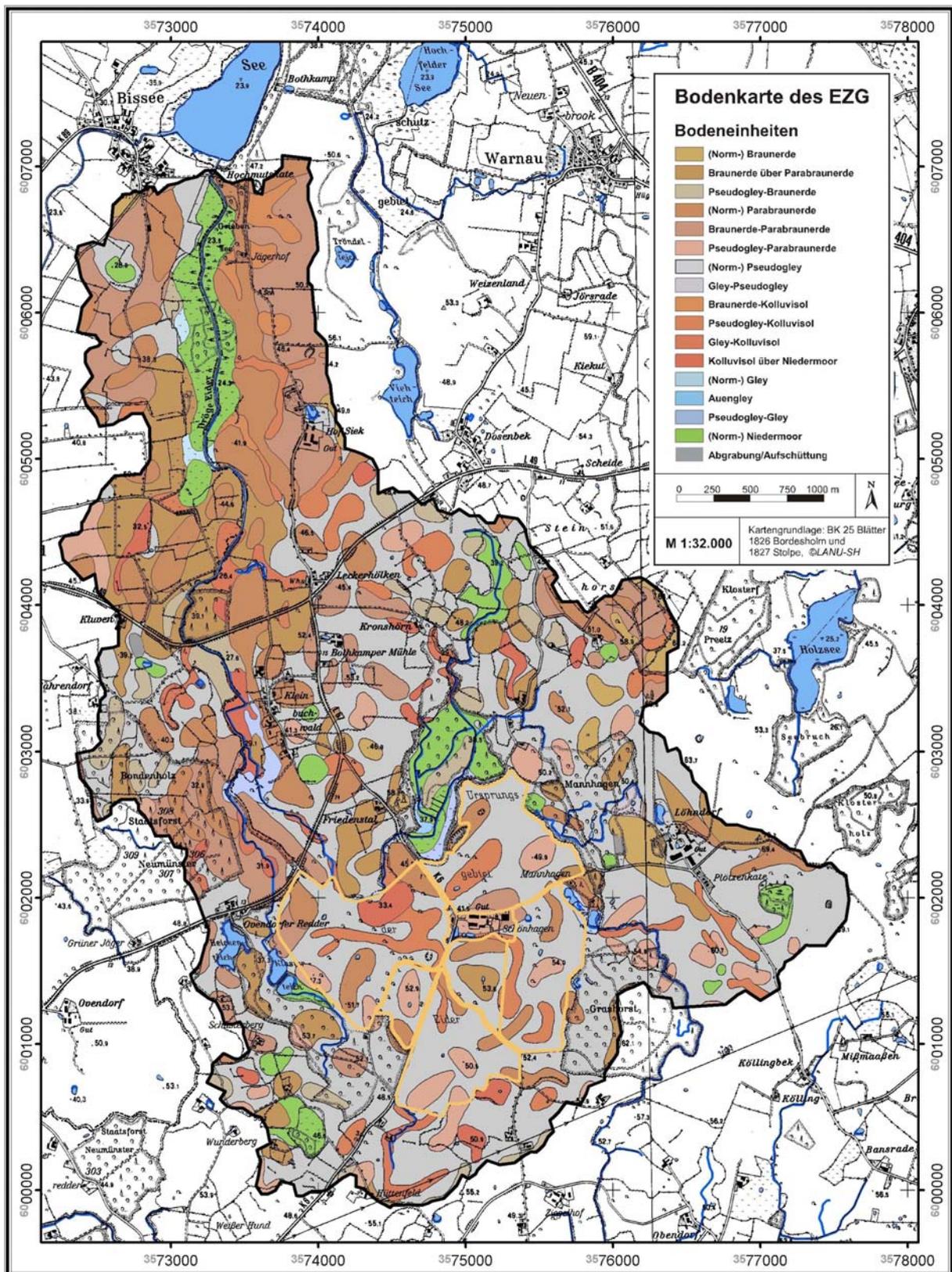


Abbildung 2.4: Bodenkarte des Einzugsgebietes der Drögen Eider.
Kartengrundlage: Bodenkarte von Schleswig-Holstein 1:25000, Blätter 1826 Bordesholm und 1827 Stolpe, herausgegeben vom Landesamt für Natur und Umwelt (LANU) Schleswig-Holstein, 1998.

überwiegend schwach-wellig reliefierte Terrain zur Pseudovergleyung, während erodierte Parabraunerden hier nur auf höhergelegenen Kuppen vorkommen. Gemeinsam nehmen sie einen Flächenanteil von über 68 % im Einzugsgebiet ein (vgl. Tab. 2.2) und zeugen damit von ihrer Dominanz.

Tabelle 2.2: Flächenanteile der Bodeneinheiten der BK 25 im Einzugsgebiet.

Bodenklasse	Bodeneinheit	Flächenanteil [%]
Braunerden	(Norm-) Braunerde	1,7
	Braunerde über Parabraunerde	10,2
	Pseudogley-Braunerde	3,0
Lessives	(Norm-) Parabraunerde	12,4
	Braunerde-Parabraunerde	10,6
	Pseudogley-Parabraunerde	4,5
Stauwasserböden	(Norm-) Pseudogley	40,4
	Gley-Pseudogley	0,2
Terrestrische anthropogene Böden	Braunerde-Kolluvisol	0,9
	Pseudogley-Kolluvisol	4,2
	Gley-Kolluvisol	2,0
	Kolluvisol über Niedermoor	2,1
Gleye	(Norm-) Gley	0,2
	Auengley	0,1
	Pseudogley-Gley	0,8
Natürliche Moore	(Norm-) Niedermoor	6,3

Die mittleren Ackerzahlen im Rahmen der Bodenschätzung variieren im Gebiet zwischen 64 und 12, bei durchschnittlichen 49 Punkten. Flächen mit Wertzahlen unter 20 sind in der Regel aus der Nutzung genommen, in extensives Grünland umgewandelt oder dem Naturschutz überführt worden.

Für die untersuchten Schläge reichen die Wertzahlen von 52 (Wedenberg) bis 58 (Sandkamp/Wiese, Plumpsal und Kuhkoppel) bei durchschnittlich 56 Bodenpunkten. Die hier auftretenden Bodentypen sind vor allem Pseudogleye (58,4 %) in schlechter entwässerten Bereichen, Parabraunerden (27 %) in Kuppenlagen, sowie Kolluvisole (14,1 %) in tieferen Lagen (vgl. Abb. 2.4). Gleye und Niedermoore sind kolluvial überlagert oder fehlen infolge mangelnden Grundwasseranschlusses.

2.4 Klimatische Verhältnisse

Schleswig-Holstein wird durch ein gemäßigt temperiertes, ozeanisch bestimmtes Klima charakterisiert. Durch die Lage zwischen Nord- und Ostsee bestimmen überwiegend zyklonale Wirbel der Westwinddrift das Wettergeschehen. Insgesamt dominieren maritime Züge, die von Nord nach Süd und West nach Ost abnehmen. Windrichtungen aus SW bis NW herrschen vor, wobei das sekundäre Maximum bei östlichen Winden liegt. Die 12,5 km südwestlich vom Untersuchungsgebiet gelegene Klimastation Neumünster weist langjährige Monats-

mittel (1976-2005) der Lufttemperatur von im Januar 1,1°C und im Juli 17,3°C auf (s. Abb. 2.5). Die mittlere Niederschlagsmenge beträgt im Winterhalbjahr 431,7 mm, im Sommerhalbjahr 415,8 mm. Die Werte der mittleren jährlichen potenziellen Verdunstung (nach PENMAN) liegen im östlichen Holstein bei 450-500 mm. Von November bis April sind dabei deutlich herabgesetzte Werte von 75-125 mm zu verzeichnen, während im Sommerhalbjahr 400-500 mm erreicht werden (FRÄNZLE, 1981).

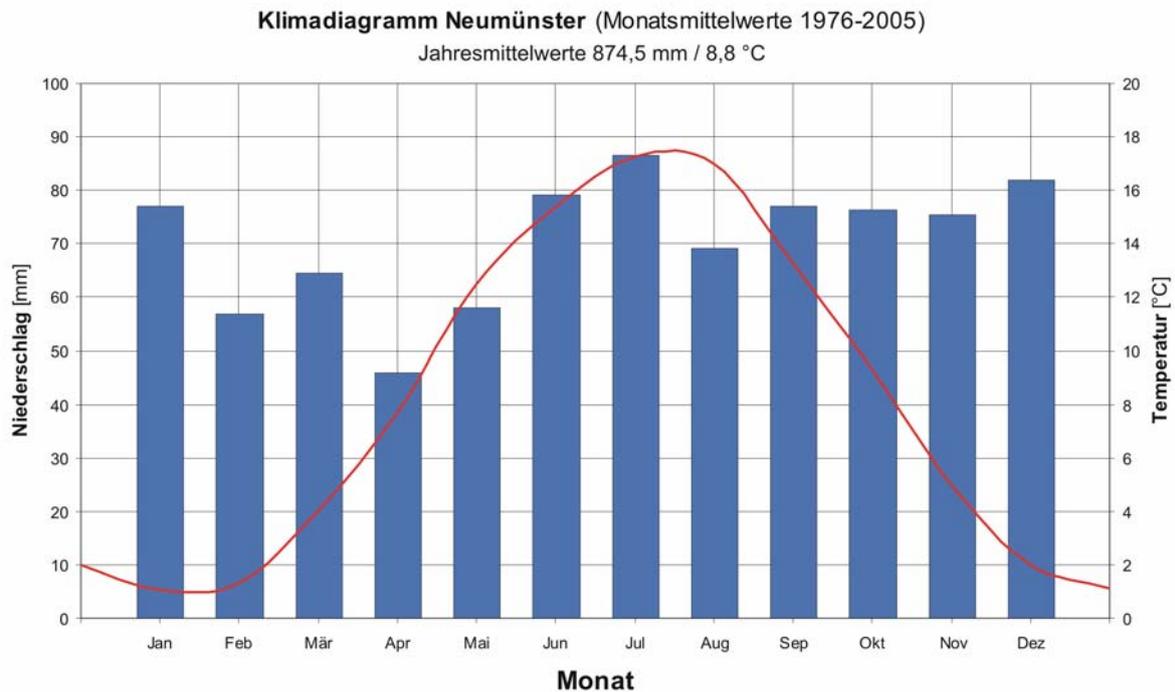


Abbildung 2.5: Klimadiagramm der Station Neumünster, Schleswig-Holstein im 30-jährigen Monatsmittel. Datengrundlage: DWD.

Die höhere Niederschlagshäufigkeit im Winter wird durch die sommerliche höhere Regenintensität überkompensiert, ausreichende und relativ gut verteilte Niederschlagsmengen stehen in der Wachstums- und Vegetationszeit zur Verfügung. Insgesamt betrachtet, beschreibt die Temperaturkurve einen relativ gemäßigten Jahresverlauf. Die lange frostfreie Zeit und die geringen Schwankungen der Niederschlagsverteilung bewirken eine relativ lange Vegetationsperiode. Trockenperioden wirken sich aufgrund der guten und hohen Wasserhaltekapazität der Lehmböden im Allgemeinen nicht ertragsmindernd aus.

2.5 Landnutzungsverhältnisse

Seit dem Neolithikum widerfährt dem Gebiet eine anthropogene Überprägung. Bedeutung gewinnt sie allerdings erst im Hochmittelalter. Seit dem 16. und 17. Jahrhundert entwickelten sich adelige Gutswirtschaften wie Siek, Ovendorf und Schönhagen mit knickarmen Großblockfluren. Die Böden weisen die höchsten Ertragsmeßzahlen im Gegensatz zu den westlich und nordwestlich gelegenen Siedlungen mit relativ hoher Knickdichte gekennzeichnete (Klein-) Block- und Streifenflur auf. Entsprechend hoch ist der Anteil am Ackerland gemes-

sen an der landwirtschaftlich genutzten Fläche (vgl. Tab. 2.3 und Abb. 2.6). Die landwirtschaftliche Nutzfläche im Gebiet beträgt etwa 80 %, wovon ca. 81 % ackerbaulich und 19 % als Grünland genutzt werden. Die Ackerzahlen liegen bei bis zu 64 bei Böden höchster Wertstufe. Der für Norddeutschland vergleichsweise hohe Waldbestand von knapp 15 % ist auf die traditionelle Nutzung als gutsherrliches Jagdrevier zurückzuführen.

Die für schleswig-holsteinische Verhältnisse große Reliefenergie sorgt für eine große Variationsbreite der Agrarwirtschaft. Sehr tief gelegene Flächen werden in Folge der Vernässungsneigung nur als Dauergrünland genutzt. Die Bewirtschaftungsform ist heute maßgeblich von der Betriebsgröße abhängig. Die Tendenz in der landwirtschaftlichen Produktion neigt wie auch andernorts zum großbetrieblichen Ackerbau, vornehmlich Getreidebau, während kleinere und mittlere Betriebe Milchviehhaltung und Schweinemast, oftmals als Familienbetrieb oder im Nebenerwerb, betreiben.

Nutzungen im weiteren Umfeld des Untersuchungsgebiets beschränken sich auf den Kiesabbau (Binnensander- und Schmelzwasserschüttungen). Torf-, Ton- und Mergelabbau fanden lediglich in der Vergangenheit statt.

Tabelle 2.3: Flächengröße und -anteile der Hauptlandnutzungen im Einzugsgebiet der Drögen Eider (nach ATKIS@Basis-DLM, 2005 und eigenen Erhebungen)

Landnutzung	Flächengröße [ha]	Flächenanteil [%]
Ackerland	1261,7	65,0
Grünland	287,8	14,8
Wald/Forst	289,5	14,9
Moor	10,9	0,6
Brache	41,2	2,1
Sonstige	50,4	2,6

Auf den ackerbaulich genutzten Flächen im Einzugsgebiet herrschen die Fruchtfolgen Winterweizen-Wintergerste-Winterraps (z.T. Zuckerrübe, aber zunehmend seltener) und Winterweizen-Winterweizen-Winterraps (z.T. auch reine Winterweizen-Mono-Kultur) vor. Seltener hingegen wird Sommergetreide oder Futtermais als Monokultur angebaut. Dauergrünlandwirtschaft wird entweder in stark reliefierten oder zur Vernässung neigenden Flächen betrieben, oder unabhängig von den Bodengegebenheiten durch die Betriebsausrichtung bestimmt.

2 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

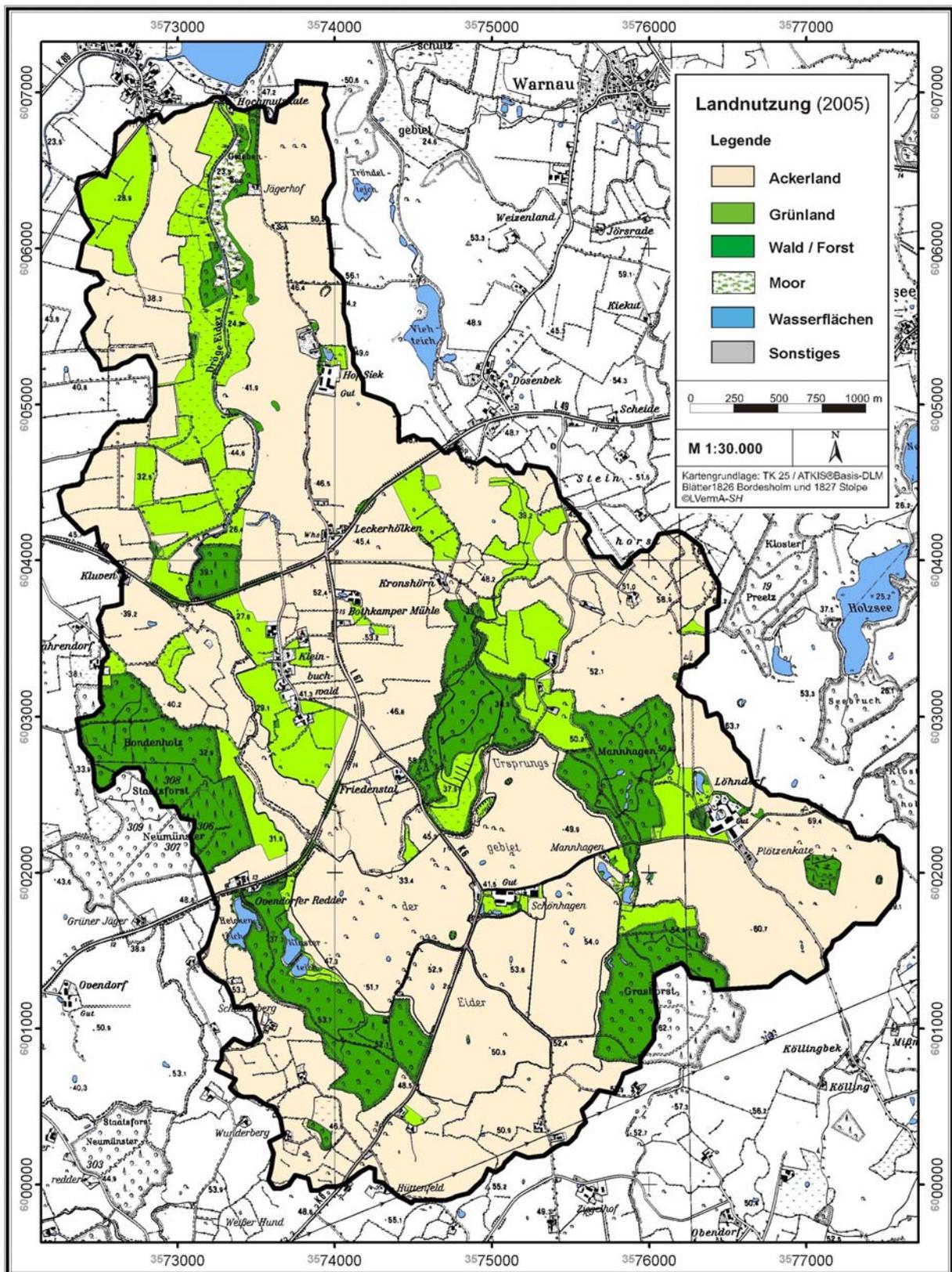


Abbildung 2.6: Landnutzung im Einzugsgebiet der Drögen Eider.
Kartengrundlage: DTK 25 / ATKIS®Basis-DLM, ©LVerMA-SH.

3 Methodik

In diesem Kapitel werden gemäß den in Kapitel 1 angesprochenen Zielen und Lösungsansätzen die der Untersuchung zu Grunde liegenden Daten und die methodische Vorgehensweise beschrieben. Eine Übersicht hierzu gibt die Abbildung 3.1.

3.1 Das methodische Vorgehen in der Übersicht

Die zentrale Informationsgrundlage stellen die im Rahmen der Untersuchung erhobenen und aus der Landesaufnahme stammenden punktbezogenen Basisparameter des Oberbodens dar. Als weitere, unterstützende Grundlage werden flächenverfügbare Sekundärinformationen aus der Fernerkundung und einem digitalem Geländemodell herangezogen. Die hieraus berechneten Vegetationsindizes und Reliefparameter werden in einem GIS an jedem Bodenprobenah-

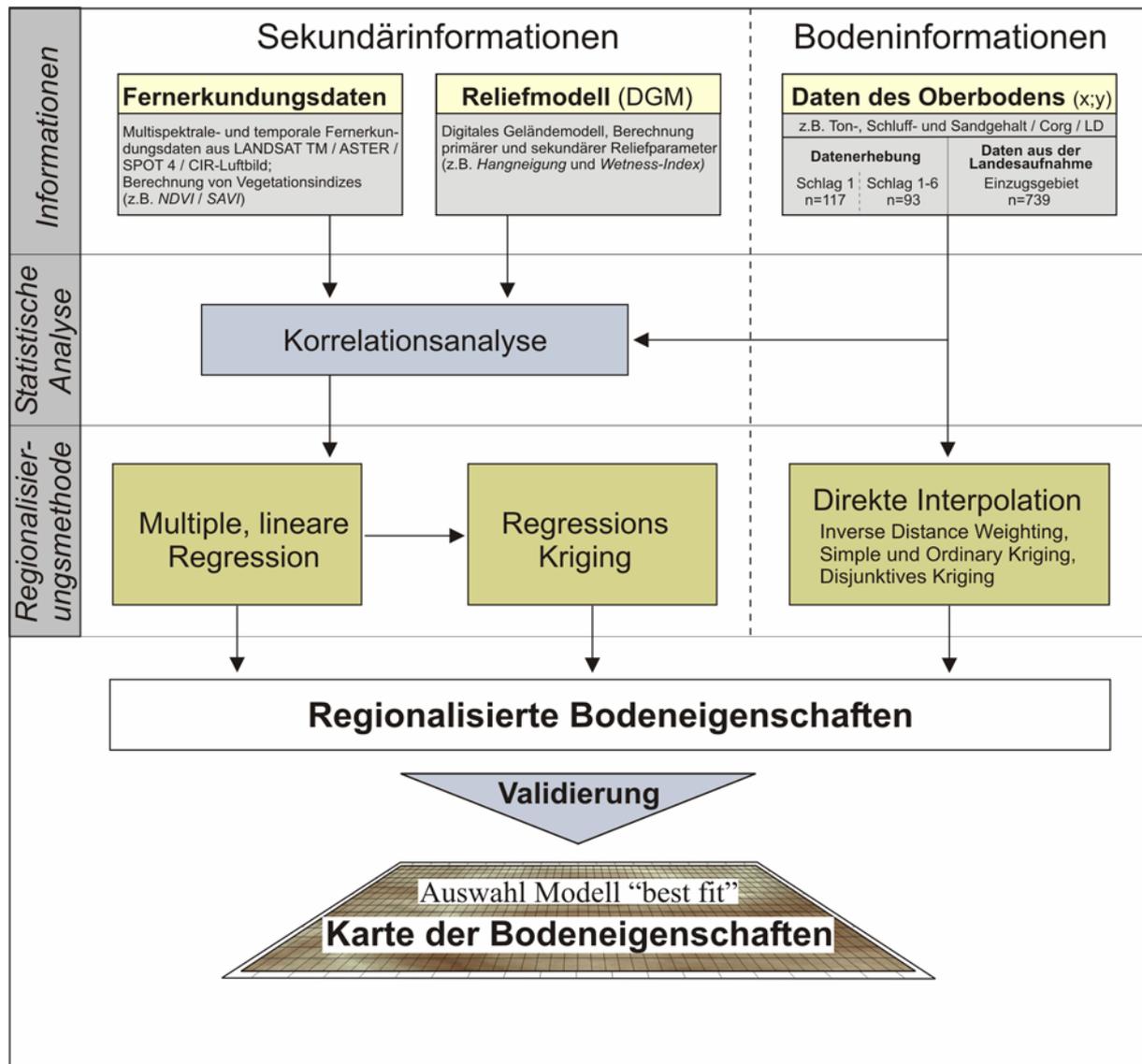


Abbildung 3.1: Schematische Übersicht über die methodische Vorgehensweise der Untersuchung.

mepunkt extrahiert und in einer Datenbanktabelle zusammengeführt. Im Anschluss an die statistische Analyse erfolgt die Regionalisierung auf Basis verschiedener Methoden. Hierbei sind die Verfahren der direkten Interpolation des Inverse Distance Weighting (*IDW*), Ordinary-, Simple- und Disjunctive Kriging (*OK*, *SK*, *DK*) ohne Einbeziehung von Sekundärinformationen von den empirischen Modellen der multiplen linearen Regression (*MLR*) sowie der hybriden Technik des Regressions- Kriging (*RK*) zu unterscheiden. Zuletzt erfolgt die Auswertung und Validierung der regionalisierten Bodendaten. Der Vergleich der Modellergebnisse für die unterschiedlichen Datensätze führt zur Auswahl des am besten geeigneten Verfahrens zur räumlichen Interpolation und Abbildung der Verteilung einzelner Bodeneigenschaften. In den folgenden Kapiteln werden die Datengrundlagen, sowie die im Einzelnen erfolgten Bearbeitungsschritte beschrieben und erläutert.

3.2 Datengrundlage

3.2.1 Räumliche Erfassung der Bodendaten

3.2.1.1 Das Untersuchungsdesign

Zur Erfassung der räumlichen Variabilität der Bodenbasisparameter Korngrößenverteilung, Humusgehalt und Lagerungsdichte wurden im Rahmen der zeitlichen und wirtschaftlichen Möglichkeiten der vorliegenden Untersuchung unregelmäßige Rasterbeprobungen auf unterschiedlichen Skalen vorgenommen. Die Erfassung der kleinräumigen Bodenheterogenität erfolgte auf der Feldskala mit einer verhältnismäßig hohen Punktdichte, während auf der feldübergreifenden Skala eine Beprobungsdichte entsprechend der Landesaufnahme im Einzugsgebiet angestrebt war (vgl. Tab. 3.1 und Abb. 3.2).

Tabelle 3.1: Beprobungsdistanzen und –dichte für die Datensätze $n = 117$, $n = 93$ und $n = 739$.

Datensatz	Punktdistanz [m]			Punktdichte [P/ha]
	Min.	Max.	Mittelw.	
$n = 117$ (Schlag 1)	21,4	100,65	55,5	1,53
$n = 93$ (Schlag 1-6)	52,8	193,7	108,9	0,36
$n = 739_{\text{LANU}}$ (EZG)	30,0	270,0	102,6	0,36

EZG = Einzugsgebiet der Drögen Eider.

Nach Untersuchungen zur räumlichen Variabilität von Bodeneigenschaften von HANEKLAUS ET AL. (1997), ARMANTO (1992) und OTTE (1988) sind im norddeutschen Jungmoränengebiet mittlere Reichweiten von 50 bis 100 m zu erwarten. Dabei können in Extremfällen innerhalb dieser Spanne bereits bis zu 50 % der Gesamtvarianz erreicht werden (OTTE, 1988). Basierend auf den ermittelten Reichweiten oben genannter Untersuchungen, wurde auf dem Schlag Sandkamp zunächst eine geschichtete, zufallsbasierte Beprobung (vgl. BURROUGH & MCDONNELL, 2000, S. 101) von $n = 75$ als Grundlagensatz erhoben. Zur Verdichtung erfolgten zusätzlich weitere 42 wissensbasierte Beprobungen im Frühjahr 2003. Die Auswahl der Standorte erfolgte hinsichtlich der Reliefsituation und der auf dem Schlag in situ beobachteten

Biomasseverteilung als Indikator des differenzierten standörtlichen Wuchspotenzials. Insgesamt gingen somit 117 Standorte auf dem Schlag in die Untersuchung ein.

Unter Anwendung des letztgenannten Verfahrens wurden die umliegenden 5 Schläge an 59 Positionen beprobt. Zuzüglich der 34 zur Wahrung der Flächenrepräsentanz zufällig ausgewählten Punkte des Schlages Sandkamp stand nun ein Satz von 93 beprobten Standorten verteilt auf 6 Schlägen, gemäß ihres Flächenanteils zur Verfügung (vgl. Abb. 3.2).

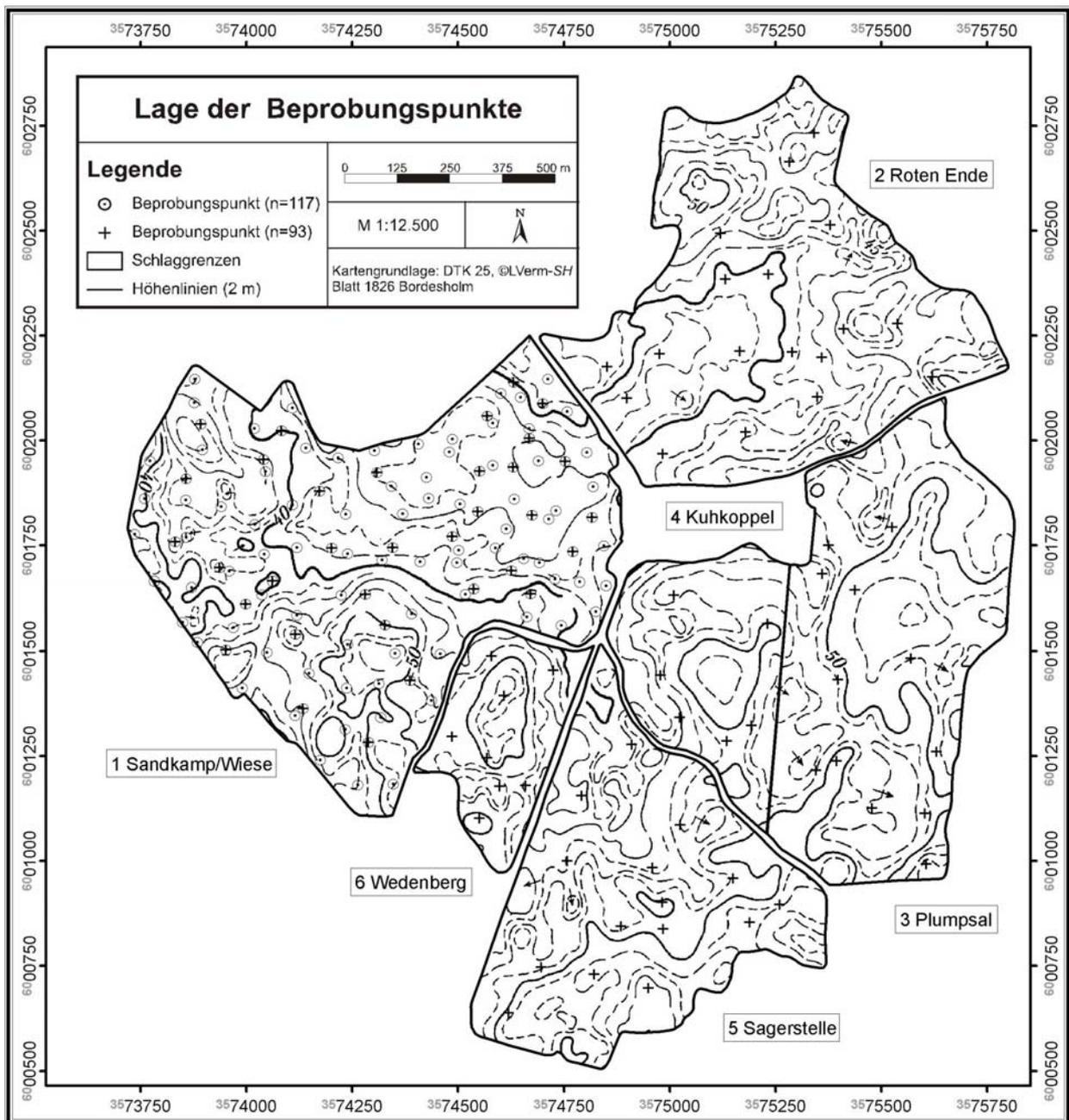


Abbildung 3.2: Lage der Beprobungspunkte im Untersuchungsgebiet.
Kartengrundlage: DTK 25, Blatt 1826 Bordesholm, ©LVerMA-SH.

Die Beprobung des Oberbodens erfolgte mit einem N_{\min} -Bohrer bis in 30 cm Tiefe, entsprechend des Ah- (rAp) Horizontes. Zur Ermittlung der Lagerungsdichte wurden je 3 Stechzylinderproben im Oberboden entnommen. Die lagemäßige Einmessung der beprobten Standorte wurde mit dem DGPS Garmin GPS 76 vorgenommen.

Neben den eigens für die Untersuchung erhobenen Daten konnte für das gesamte Einzugsgebiet ein Datensatz aus der Landesaufnahme mit 739 Feldaufnahmepunkten in die Untersuchung eingehen, die vom Landesamt für Natur und Umwelt (LANU) Schleswig-Holstein zur Verfügung gestellt wurde. Innerhalb der Untersuchung fanden nur die klassifizierte Informationen der Bodenart und des Humusgehaltes des Oberbodens Berücksichtigung. Kartiert wurde das Gebiet 1992 (TK 1827, Stolpe nach KA3) und 1994/95 (TK 1826, Bordsesholm nach KA4). Für die Anwendung o.g. Regionalisierungsmodelle war es erforderlich, die nach KA klassifizierte Bodeninformationen in metrische Daten auf Basis der jeweiligen Klassenmittelwerte umzuwandeln (vgl. BÖHNER & KÖTHE, 2003; MEER, 2005; CONRAD ET AL., 2006). Detaillierte Angaben hierzu sind dem Anhang A1 und A2 zu entnehmen. Humusgehalte der Klassen h6 und h7 wurden auf Grund der großen Spannweite von 15-30 % bzw. > 30 % aus dem Datensatz entfernt. Daneben waren einzelne Datensätze unvollständig, sodass für viele Standorte keine abgeleiteten Größen aus Pedotransferfunktionen (Kapitel 3.2.1.3) berechnet werden konnten.

3.2.1.2 Laboranalytik

Die insgesamt 176 aus dem Oberboden entnommenen Proben wurden anhand der im Folgenden beschriebenen und dokumentierten Verfahren laboranalytisch untersucht.

Korngrößenverteilung

Die Ermittlung der Korngrößenverteilung erfolgte nach dem kombinierten Sieb- und Sedimentationsverfahren (Nasssiebung der Sandfraktionen, Köhn'sche Pipetteanalyse für die Schluff- und Tonfraktion) nach DIN ISO 11277 (s. a. DIN 18123; SCHLICHTING ET AL., 1995). Zur weiteren Untersuchung wurden die Hauptfraktionen Sand, Ton und Schluff zusammengefasst.

Gesamtkohlenstoffgehalt (C_{tot})

Der Gehalt an Gesamtkohlenstoff ist mit dem EURO EA Element Analyzer der Fa. HEKATECH gaschromatographisch bestimmt worden. Um den organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) zu erhalten, war ggf. der anorganische Kohlenstoff des Carbonats zu subtrahieren.

Carbonatgehalt

Der Carbonatgehalt wurde gasvolumetrisch an der Scheiblerapparatur nach DIN 18129 ermittelt (s. a. SCHLICHTING ET AL., 1995).

pH-Wert

Die Messung des pH-Wertes erfolgte potentiometrisch in Aqua demin. und 0,01 molarer CaCl₂ - Lösung (DIN ISO 10390; DIN 19684).

Trockenrohdichte (δt)

Die Trockenrohdichte wurde gravimetrisch an 100 cm³ fassenden Stechzylindern nach ca. 24 stündiger Trocknung bei 105°C im Umlufttrockenschrank bestimmt (DIN ISO 11272; DIN 19683-11). Die Berechnung der effektiven Lagerungsdichte wurde nach folgender Gleichung vorgenommen (AG BODEN, 2005, S. 125):

$$Ld = \delta t + 0,009 * T \quad \text{Gl. 3.1}$$

Ld = Effektive Lagerungsdichte [g*cm⁻³]
 δt = Rohdichte trocken [g*cm⁻³]
T = Tongehalt [Gew.-%]

3.2.1.3 Pedotransferfunktionen (PTF)

Zur Charakterisierung der Standorte auf der Feld- und feldübergreifenden Skala hinsichtlich der Nährstoff- und Wasserversorgung wurden bodenhaushaltliche Größen, wie die potenzielle und effektive Kationenaustauschkapazität und das Retentionsvermögen für Wasser, abgeleitet aus Pedotransferfunktionen, herangezogen.

Potenzielle und effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot} , KAK_{eff})

Die potenzielle Kationenaustauschkapazität für die mineralischen Bestandteile des Bodens lässt sich wie folgt berechnen (AG BODEN, 2005, S. 369):

$$KAK_{pot} = 0,5 * T + 0,05 * U \quad \text{Gl. 3.2}$$

KAK_{pot} = potentielle Kationenaustauschkapazität [cmol_c*kg⁻¹]
T = Tongehalt [Gew.-%]
U = Schluffgehalt [Gew.-%]

Der Anteil des Humus an der potenziellen Kationenaustauschkapazität resultiert aus der Gleichung (AG BODEN, 2005, S. 369):

$$KAK_{pot} = 2,0 * OS \quad \text{Gl. 3.3}$$

OS = Organische Substanz [Gew.-%]

Der Anteil an organischer Substanz (OS) wurde zuvor durch Multiplikation des aus der Laboranalyse hervorgegangenen Gehaltes an organischem Kohlenstoff (C_{org}) mit dem Faktor 1,72 berechnet (AG BODEN, 2005, S. 111). Durch Addition der Werte aus dem mineralischen und organischen Anteil erhält man die gesamte potenzielle Kationenaustauschkapazität des Bodens.

Die effektive Kationenaustauschkapazität bei realem pH-Wert des Bodens ist durch Multiplikation der potentiellen Kationenaustauschkapazität mit dem pH-Wert abhängigen empirischen Faktor m abzuleiten (AG BODEN, 2005, S. 370):

$$KAK_{\text{eff}} = KAK_{\text{pot}} * m \quad \text{Gl. 3.4}$$

KAK_{eff} = effektive Kationenaustauschkapazität [$\text{cmol}_c * \text{kg}^{-1}$]
 m = pH-Wert abhängiger Faktor [dimensionslos]

Bodenwasserhaushaltspotenzial (Retentionsvermögen)

Das standortbezogene Bodenwasserhaushaltspotenzial wurde durch die Berechnung kennzeichnender Werte auf der pF-Kurve charakterisiert. Die Schätzung von pF-Kurven kann auf Grundlage der von VAN GENUCHTEN & NIELSEN (1985) aufgestellten Gleichung vorgenommen werden:

$$\Theta(\Psi) = \left[\Theta_r + \frac{\Theta_s - \Theta_r}{(1 + (\alpha\Psi)^n)^m} \right] \quad \text{Gl. 3.5}$$

$\Theta(\Psi)$ = Volumetrischer Wassergehalt als Funktion des Matrixpotenzials [Vol.-%]
 Ψ = Matrixpotenzial [hPa]
 Θ_s = Volumetrischer Wassergehalt bei Sättigung [Vol.-%]
 Θ_r = Volumetrischer Restwassergehalt [Vol.-%]
 m, n, α = Parameter nach VAN GENUCHTEN [dimensionslos]

Die Parametrisierung von Θ_r , Θ_s , α , n erfolgte auf den von VEREecken ET AL. (1989) mit den Bodenparametern Lagerungsdichte, Gehalt an organischem Kohlenstoff, Sand- und Tongehalt abgeleiteten Regressionsgleichungen (Gleichungen 3.6-3.9):

$$\Theta_s = 0,81 - 0,283 * d_B + 0,001 * T \quad \text{Gl. 3.6}$$

$$\Theta_r = 0,015 + 0,005 * T + 0,014 * C_{\text{org}} \quad \text{Gl. 3.7}$$

$$\log(\alpha) = -2,486 + 0,025 * S - 0,351 * C_{\text{org}} - 2,617 * d_B - 0,023 * T \quad \text{Gl. 3.8}$$

$$\log(n) = 0,053 - 0,009 * S - 0,013 * T + 0,00015 * S^2 \quad \text{Gl. 3.9}$$

d_B = Trockenrohdichte [$\text{g} * \text{cm}^{-3}$]
 C_{org} = Organischer Kohlenstoff [Gew.-%]
 T = Tongehalt [Gew.-%]
 S = Sandgehalt [Gew.-%]
 $\Theta_s, \Theta_r, m, n, \alpha$ siehe Gl. 3.5

Der volumetrische Wassergehalt wurde wie angegeben bei Feldkapazität ($FK_{pF1,8}$), nutzbarer Feldkapazität ($nFK_{pF2,5}$) und permanentem Welkepunkt ($PWP_{pF4,2}$) durch Entlogarithmieren der pF-Werte und Einsetzen in die Gleichung 3.5 für alle Standorte berechnet. Für den Parameter m ist 1 einzusetzen (BACHMANN & HARTGE, 1991).

3.2.2 Eingesetzte Fernerkundungsdaten

3.2.2.1 Satelliten- und Luftbilder

Zur Detektierung der räumlichen Verteilung von Bestandesinformationen werden Satelliten- und Luftbildinformationen herangezogen. Die Auswahl der genutzten Szenen orientiert sich einerseits an der bloßen Verfügbarkeit, andererseits an der zeitlichen und qualitativen Eignung der Aufnahmen. Nach GRENZDÖRFFER (1998) sind für Wintergetreide, Hauptbestandteil der Fruchtfolgen im Untersuchungsgebiet (vgl. Kapitel 2.5), April bis Juni geeignete Zeiträume zur Erfassung von Bestandesheterogenitäten. Eingang in die Untersuchung fanden drei Landsat-Szenen vom 15.05.2000, 11.05.2001 und 06.06.2002, eine Aster-Szene vom 22.06.2003 und eine Spot-Szene vom 09.05.2002 (vgl. Tab. 3.2).

Tabelle 3.2: Verwendete Satellitendaten und -systeme

Sensorsystem (Betreiber)	Aufnahmedatum	Spektrale Auflösung Band	[μm]	Erläuterung	Geometrische Auflösung [m]
Landsat 7 ETM+ (NASA)	15.05.2000 11.05.2001 06.06.2002	1	0,450 - 0,515	Blau	30
		2	0,525 - 0,605	Grün	
		3	0,630 - 0,690	Rot	
		4	0,750 - 0,900	Nahes Infrarot	
		5	1,550 - 1,750	Mittleres Infrarot	60 15
		6	2,090 - 2,350		
		7	10,40 - 12,50	Thermales Infrarot	
		8	0,520 - 0,900	Pan	
Aster TERRA (NASA/EOS)	22.06.2003	1	0,520 - 0,600	Grün	15
		2	0,630 - 0,690	Rot	
		3N	0,780 - 0,860	Nahes Infrarot	30 90
		3B	0,780 - 0,860		
		4-9	1,600 - 2,430	Mittleres Infrarot	
		10-14	8,125 - 11,65	Thermales Infrarot	
SPOT 4 (CNES)	09.05.2002	1	0,500 - 0,590	Grün	20
		2	0,610 - 0,680	Rot	
		3	0,790 - 0,890	Nahes Infrarot	10
		4	1,580 - 1,750	Mittleres Infrarot	
		5	0,480 - 0,710	Pan	

Eine weitergehende Beschreibung der Satellitenprogramme und -systeme ist u.a. bei LILLESAND, KIEFER & CHIPMAN (2004) und JENSEN (2007) zu entnehmen.

Anhand von 37 Ground Control Points (GCP) aus digitalen Orthophotos des LVerMA S-H (ATKIS®-DOP5) wurden die das Einzugsgebiet (EZG) weiträumig umfassenden Ausschnitte der Satellitenbilder registriert und mit einem RMS-Fehler im Subpixelbereich mit der Software ENVI (Version 4.2, © Research Systems, Inc.) georeferenziert und geometrisch entzerrt. Da sich die Oberflächenformung durch den kleinen Öffnungswinkel der Satellitensysteme nur gering auswirkt (ALBERTZ, 2001, S. 79), konnte hier auf Grund der relativ schwachen Reliefformung des Untersuchungsgebietes auf eine Orthorektifizierung verzichtet werden. Ferner wurde für die wolkenfreien Szenen keine Atmosphärenkorrektur durchgeführt, da kein direkter Vergleich angestrebt war, sondern jede Aufnahme einer Einzelbetrachtung unterlag.

Neben den Satellitendaten kam ein CIR-Luftbild vom 10.05.2001 mit einer geometrischen Auflösung von 0,4 m zum Einsatz. Das Luftbild entstand im Rahmen des Prosmart II Projek-

tes der Fa. Infoterra in Zusammenarbeit mit der DLR und der FAL. Es deckt nur z.T. die untersuchten Schläge ab und wurde bereits orthorektifiziert erhalten.

3.2.2.2 Vegetationsindizes

Auf Grundlage des Reflexionsverhaltens von photosynthetisch aktiver Biomasse im Spektralbereich des sichtbaren Lichts (*VIS*; 400–700 nm) und des nahen Infrarots (*NIR*; 700–1200 nm) wurden in der jüngeren Vergangenheit eine Vielzahl sogenannter Vegetationsindizes entwickelt. Sie beruhen zumeist auf der Quotientenbildung aus den reflektierten Spektralbanden des roten und nahen infraroten Wellenlängenbereichs. Während das sichtbare Licht zu einem großen Teil durch die Pflanzenmasse absorbiert wird, kommt es im Bereich des *NIR* zu einem steilen Anstieg der Reflexionskurve (vgl. Abb. 3.3).

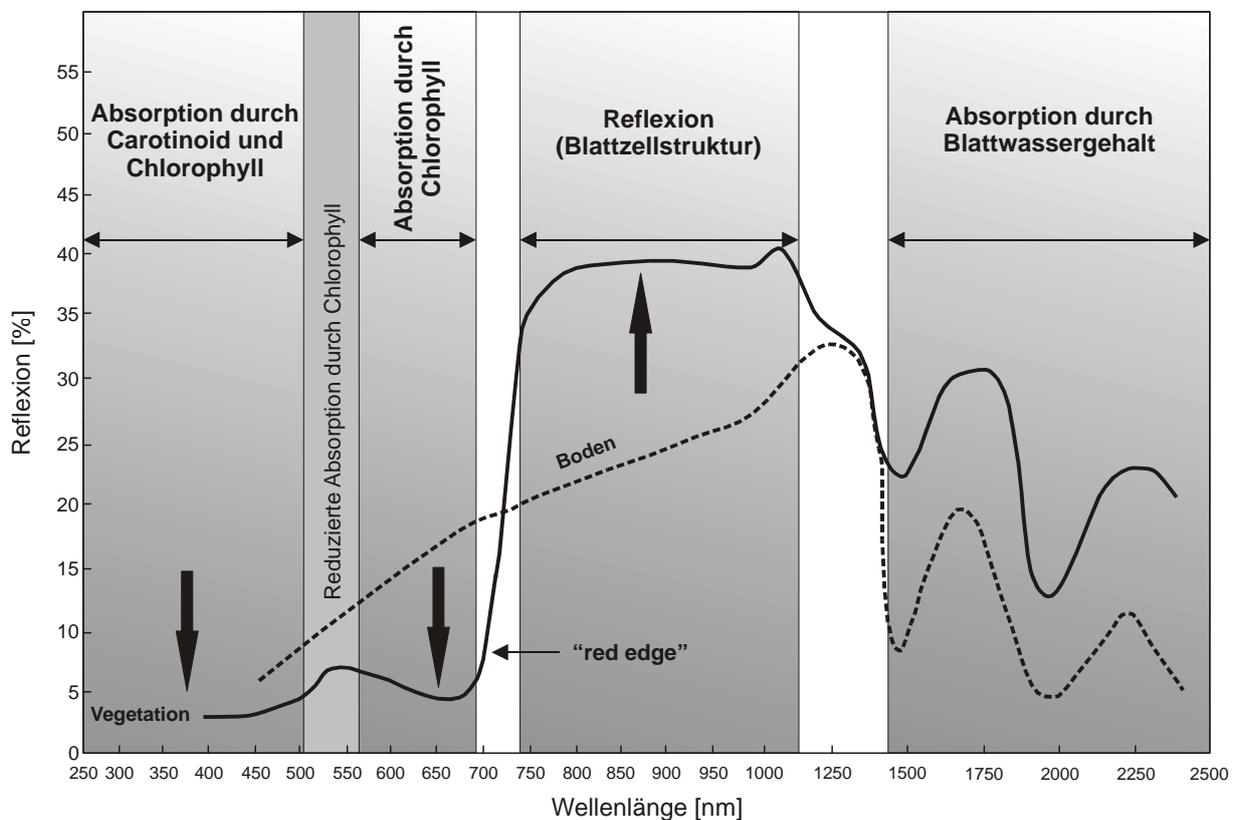


Abbildung 3.3: Reflexionsverhalten von Vegetation und unbedecktem Boden in Abhängigkeit von der Wellenlänge als Grundlage zur Entwicklung von Vegetationsindizes (nach JENSEN, 2007, S. 383)

Mit Zunahme der Blattmasse geht eine verstärkte Reflexion des *NIR* einher, während im roten Spektralbereich zunehmend absorbiert wird. Dieser als „red edge“ bezeichnete Wendepunkt der Signaturkurve wird als wichtiges diagnostisches Merkmal zur Detektierung von Pflanzenzuständen herangezogen. Eine Aufstellung von vor allem aus der Precision Agriculture stammenden Untersuchungen zu verschiedenen Vegetationsindizes bieten SCHELLBERG (1990), BANNARI ET AL. (1995) und JENSEN (2007).

Im Rahmen der Untersuchung wurden der *Simple Ratio* (*SR*, vgl. BIRTH & McVEY, 1968; COLOMBO ET AL., 2003), der *Normalized Difference Vegetation Index* (*NDVI*, vgl. ROUSE ET AL., 1974; RONDEAUX ET AL., 1996; PETTORELLI ET AL., 2005) und der *Soil Adjusted Vegetation Index* (*SAVI*, vgl. HUETE, 1988; QI ET AL., 1995, RONDEAUX ET AL., 1996) genutzt. Sie werden wie folgt berechnet:

$$\text{Simple Ratio}(SR): \quad SR = \left[\frac{\rho_{red}}{\rho_{nir}} \right] \quad \text{Gl. 3.10}$$

$$\text{Normalized Difference Vegetation Index (NDVI):} \quad NDVI = \left[\frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \right] \quad \text{Gl. 3.11}$$

$$\text{Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI):} \quad SAVI = \left[\frac{(1+L) * (\rho_{nir} - \rho_{red})}{(\rho_{nir} + \rho_{red} + L)} \right] \quad \text{Gl. 3.12}$$

ρ_{red} = Reflexion im roten Spektralbereich

ρ_{nir} = Reflexion im Spektralbereich des nahen Infrarot

Der *SR* wird bevorzugt genutzt zur Ableitung der Biomassenverteilung und des Blattflächenindex (*LAI*) bei hohen Biomasseaufkommen bei z. B. Wäldern. Der *NDVI* hingegen reagiert sensibler auf Bestandesunterschiede in relativ lichten Beständen, wie etwa bei Winterweizen (HUETE, 1989). Durch die Quotientenbildung werden viele Störungen, wie Einstrahlungsdifferenzen oder Beschattungseffekte eliminiert. Daher eignet sich dieser Index in besonderer Weise zur Beobachtung sowohl saisonaler als auch jährlicher Veränderungen unterschiedlichster Bestände und wird entsprechend häufig eingesetzt. Weniger geeignet dagegen ist er bei maximalem Biomasseaufkommen und hohem *LAI* und bei sehr lückigen Beständen, bei denen die Bodenoberfläche reflektiert. So können der Bodenhintergrund, dessen Feuchte und an der Oberfläche liegende Erntereste eine erhöhte Wertausprägung bewirken (vgl. WANG ET AL., 2005). Der *SAVI* berücksichtigt die spektrale Reflexion des Bodenhintergrundes, indem die durch die Bodenelligkeit hervorgerufenen Störungen durch die Integration einer ermittelten Bodenkennlinie oder des empirischen Faktors $L = 0,5$ (vgl. Gl. 3.12) minimiert werden kann (HUETE & LIU, 1994).

Die hier vorgenommene Auswahl an Vegetationsindizes soll gewährleisten, dass unterschiedlichste Ausprägungen auf den untersuchten Schlägen berücksichtigt werden können, da keine Bestandesinformationen für die jeweiligen Aufnahmezeitpunkte der verwendeten Fernerkundungsdaten vorliegen. Die Berechnungen der vorgestellten Vegetationsindizes wurde mit ENVI (©Research Systems, Inc.) durchgeführt.

3.2.3 Die Ableitung morphometrischer Reliefparameter

Das Relief ist z. B. über den Bodenwasserhaushalt oder den lateralen Stoff- und Materialversatz faktoriell mitverantwortlich für die Ausbildung von Bodendifferenzierungen. Zur Untersuchung der Reliefabhängigkeit der Bodenbasisparameter wurde eine Auswahl an primären und sekundären Reliefparametern als Flächendatensätze berechnet (vgl. Tab. 3.3). Die Reliefanalyse basiert auf einem digitalen Geländemodell 5 (DGM5) des Landesvermessungsamtes Schleswig-Holstein, mit einer Rasterweite von 12,5 m bei einer angegebenen Höhengenaugigkeit von $\pm 0,5$ m (ATKIS®-DGM5, LVermA-SH). Die Berechnung der Reliefparameter erfolgte mit dem System SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses, vers. 2.0, ©SAGA G.b.R., Göttingen 2005).

- **Primäre Reliefparameter**

Hierzu werden lokale oder einfache geomorphometrische Parameter gezählt, die direkt aus einem DGM ableitbar sind.

Die **Hangneigung** (β) beschreibt den Winkel zwischen Geländeoberfläche und der ebenen Horizontalen (ZEVENBERGEN & THORNE, 1987). Sie hat maßgeblichen Einfluss auf den hangabwärtsgerichteten oberirdischen wie lateralen Wasser- und Materialtransport, sowie deren Ausmaß.

Die **Exposition** (φ) wirkt mitsteuernd auf den potenziellen Strahlungsinput und die Richtung von Wasserflüssen. Sie wird beschrieben als Hangfallrichtung in Abweichung von Nord (ZEVENBERGEN & THORNE, 1987).

Mit der **vertikalen Wölbung** (C_v) wird das Maß der Änderung des potenziellen Gradienten in Hangfallrichtung zum Ausdruck gebracht. Bei vertikal, konkaver Ausprägung ist eher eine Akkumulation, bei vertikal konvexer eher ein Abtrag von Sedimenten zu erwarten. Korrespondierend dazu beschreibt die **horizontale Wölbung** (C_h) die Wölbung in Hangstreichrichtung (MOORE ET AL., 1993). Im Allgemeinen bewirkt die Wölbung eine divergente oder konvergente Wasserbewegung. Eine negative Wölbung entspricht dabei einer konkaven, eine positive einer konvexen Oberfläche, keine oder geringe Wölbung einer Ebene. Beide Parameter indizieren einen beschleunigten oder verzögerten Wasserzug und Sedimenttransport.

Zu den primären Reliefparametern werden ebenfalls die komplexen morphometrischen Parameter, wie der Konvergenz/Divergenz Index, das spezifische Einzugsgebiet und die Höhe über der Tiefenlinie gezählt.

Der **Konvergenz/Divergenz Index** (CDI) beschreibt die Konzentration ($CDI < 0$) oder Dispersion ($CDI > 0$) von Abflussprozessen. Von einer zentralen Rasterzelle ausgehend, wird das Ausmaß der Kontribution der umliegenden Rasterzellen über die Exposition berechnet und beschrieben (KÖTHER & LEHMEIER, 1996).

Das **spezifische Einzugsgebiet** (A_s) kennzeichnet die Größe des Einzugsgebietes jeder Rasterzelle. Hierbei wird für jede Rasterzelle der Fließweg hangaufwärts verfolgt und die Flächengröße über die Anzahl tributärer Rasterzellenanteile aufsummiert. Anschließend wird der

Wert durch die Länge der senkrecht zur Abflussbahn verlaufenden Höhenlinie dividiert. Der Berechnung zu Grunde gelegt wurde der Multiple Flow-Direction (MFD) Algorithmus nach FREEMAN (1991). Grundsätzlich gibt dieser Parameter Hinweise über die zu erwartende Zuflussmenge für jeden Punkt aus dem darüber liegenden zugehörigen Einzugsgebiet.

Als **Höhe über Tiefenlinie** (H_{Ch}) wird die vertikale Distanz zwischen jeder Rasterzelle und der nächstliegenden, zugehörigen entwässernden Tiefenlinie bezeichnet. Zur Berechnung muß zuvor ein Schwellenwert für die minimale Einzugsgebietsgröße und Segmentlänge definiert werden, ab wann eine Tiefenlinie als Abflusslinie wirksam wird. Der Parameter indiziert bei geringer Ausprägung eine potentielle Grundwassernähe und sedimentäre Akkumulation, bei mittlerer Ausprägung Umlagerungsprozesse am Hang. Bereiche mit vergleichsweise hohen Werten können Hinweise auf eine relativ höhere lokale Reliefenergie und rasche Entwässerung geben (vgl. BOCK & KÖTHER, 2005).

- **Sekundäre Reliefparameter**

Sie werden auch als zusammengesetzte oder komplexanalytische Parameter bezeichnet. Über die Verknüpfung geben sie z.T. physikalisch basiert räumliche Muster als Funktion von Prozessen wieder.

Der in der hydrologischen Modellierung entwickelte **Wetness Index** (w) wurde vielfach zur Identifizierung von Wasserflusscharakteristika in Landschaften genutzt. Er ist definiert als natürlicher Logarithmus des Quotienten aus der Spezifischen Einzugsgebietsgröße (A_s [$m^2 * m^{-1}$]) und des Tangens der Hangneigung ($\tan\beta$ [$^\circ$]) :

$$w = \ln \left(\frac{A_s}{\tan \beta} \right) \quad \text{Gl. 3.13}$$

Ein steigender Wert ist gleichsam bedeutend mit steigendem Wasserzuschuss und höherer Bodenfeuchte. Beschrieben wird das Verhältnis der Zuflussmenge aus dem darüberliegenden Einzugsgebiet zu der für den weiteren Transport verfügbaren Hangneigung. Der Wetness Index wurde vielfach als Indikator für die Verteilung von Bodeneigenschaften und Bodenfeuchteverhältnissen in verschiedenen Landschaftspositionen genutzt (vgl. BELL ET AL., 1995; MOORE ET AL., 1993; BEVEN & KIRKBY, 1979).

Mit dem **Streampower Index** (Ω) wird die erosive Kraft des potenziell oberflächlich abfließenden Wassers aus dem Produkt des spezifischen Einzugsgebietes und der Tangentialfunktion der Hangneigung zum Ausdruck gegeben (MOORE ET AL., 1993):

$$\Omega = A_s * \tan \beta \quad \text{Gl. 3.14}$$

Der **Hanglängenfaktor** (LS) der *USLE* (Universal Soil Loss Equation; WISCHMEIER & SMITH, 1978) eignet sich zur Identifizierung von Bereichen potenzieller, reliefbedingter Erosionsprozesse. Nach MOORE ET AL. (1993) kann er beschrieben werden als:

$$LS = \left(\frac{A_s}{22,13} \right)^m \left(\frac{\sin \beta}{0,0896} \right)^n \quad \text{Gl. 3.15}$$

wobei $m = 0,6$ und $n = 1,3$ zu setzen sind, A_s und β sind bereits beschrieben.

Somit standen insgesamt 10 Reliefparameter zur weiteren Untersuchung zur Verfügung. Die Tabelle 3.3 gibt einen zusammenfassenden Überblick.

Tabelle 3.3: Übersicht über die mit SAGA berechneten Reliefparameter

Gruppierung		Reliefparameter	Kurzzeichen	Einheit
Primäre	Einfache, lokale	Hangneigung	β	[°]
		Exposition	φ	[°]
		Wölbung, vertikal	C_v	[m ⁻¹]
		Wölbung, horizontal	C_h	[m ⁻¹]
	Komplexe	Konvergenz/Divergenz Index	CDI	[%]
		Spez Einzugsgebietsgröße	A_s	[m ² *m ⁻¹]
Höhe über Tiefenlinie		H_{Ch}	[m]	
Sekundäre	Zusammengesetzte	Wetness Index	w	[dimensionslos]
		Streampower Index	Ω	
		LS – Faktor (USLE)	LS	

Nicht gänzlich unerwähnt bleiben soll an dieser Stelle die Problematik der „abflusslosen Senken“. Für die Berechnung der Abflusswege aus dem DGM ist eine Vorprozessierung und Modifizierung des Ursprungsgeländemodells nötig, da ansonsten die Fließwege und damit der Abfluss unterbrochen würden. Das Problem wird zumeist dahingehend gelöst, dass genannte Senken „aufgefüllt“ werden, was abgesehen von der allgemeinen Humaninfluenz eine erhebliche Abweichung von den realen Verhältnissen mit sich bringt. Wirklichkeitsnah aber fungieren diese Bereiche als Zwischenspeicher, deren Abflussverhalten nicht oder nur schwer zu differenzieren ist und auch als wenig untersucht gelten muss (vgl. SCHMEHE, 2007). Speziell das Jungmoränengebiet Schleswig- Holsteins ist durchsetzt mit einer Vielzahl von abflusslosen Senken. So ist ein Flächanteil von insgesamt 23,95 % im Einzugsgebiet der Drögen Eider hiervon betroffen, was das Ausmaß der Problematik für diesen Landschaftstyp zum Ausdruck bringt. Thematisiert und diskutiert wird dies noch an anderer Stelle.

3.3 Datenverarbeitung

Die aus der Laboranalyse (Kapitel 3.2.1.2) hervorgegangen punktbezogenen Bodeninformationen wurden in eine Tabelle überführt und jedem Punktdatensatz eine eindeutige bezeichnung (ID) zugewiesen. Das Auslesen der als Rasterdatensätze vorliegenden Reliefparameter (Kapitel 3.1.2.3) für jeden Punkt erfolgte mit dem GIS ArcMap (ESRI® ArcMap™9.2). Die aus den Fernerkundungsdaten berechneten Vegetationsindizes (Kapitel 3.2.2.2) konnten unter

Einsatz eines IDL-Skripts (Version 6.2, © Research Systems, Inc.) extrahiert werden. Zur Berücksichtigung von Randpixellagen und Ungenauigkeiten bei der Einmessung der Standorte, wurden die Rasterdatensätze zunächst mit dem „nearest neighbour - Algorithmus“ resampled und die Punkte mit einem Buffer von 5 m Radius versehen. Im Gegensatz zu den Satellitenbilddatensätzen mussten im CIR-Luftbild auf Grund der hohen Bodenaufklärung Objektschatten und Bearbeitungsspuren vor dem Auslesen ausmaskiert werden. Im Anschluss an die Extraktion erfolgte die Berechnung der jeweiligen Mittelwerte und deren Übertragung in o.g. Tabelle.

Resultierend stand nun eine Access-Datenbanktabelle (Microsoft®Access 2002) für die weitere Untersuchung zur Verfügung, in der spaltenweise für jeden Beprobungspunkt eine ID, GK-Koordinaten, Bodendaten, Fernerkundungs- und Reliefinformationen aufgeführt waren. Damit konnten über Abfragen für die statistische Analyse oder zur Überführung in ein GIS neue Datensätze zusammengestellt werden. Die statistischen Analysen erfolgten mit SPSS (vers. 10 ©SPSS Inc.), raumbezogene Datenvorhaltung und Abbildung wurden mit dem GIS ArcMap umgesetzt.

3.4 Eingesetzte Prediktionsmethoden zur räumlich differenzierten Abbildung von Bodeneigenschaften

Für die Übertragung der punktbezogenen Bodeninformationen in rasterbasierte, kontinuierlich abbildende Datensätze, kamen statistische (Kapitel 3.4.1), deterministische (Kapitel 3.4.2), geostatistische (Kapitel 3.4.3) und kombinierte Methoden (Kapitel 3.4.4) zum Einsatz. Die folgenden Ausführungen beschreiben und erläutern die Grundzüge der zur Regionalisierung herangezogenen Methoden.

3.4.1 Einfache und multiple lineare Regression (MLR)

Zur Analyse räumlicher Variabilität finden vielfach einfache und multiple lineare Regressionen Anwendung. Bei der Regression handelt es sich um die Aufstellung eines mathematisch-statistischen Modells zur bestmöglichen Schätzung einer Zielvariablen z mit Hilfe einer oder mehrerer voneinander unabhängiger Prädiktorvariablen. Es wird also der Zusammenhang zwischen einer Zielvariablen z (Bodeneigenschaft) und einer oder mehrerer voneinander unabhängiger Erklärungsvariablen x_i (Reliefparameter bzw. Vegetationsindizes) beschrieben. Die Gleichung zur Abschätzung einer unabhängigen Variablen z aus einer Anzahl n untereinander unabhängiger Co- Variablen lautet:

$$z = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \varepsilon \quad \text{Gl. 3.16}$$

wobei

- z = abhängige Zielvariable
- a = Konstante (Schnittpunkt mit der y-Achse)
- n = Anzahl der Variablen
- b_i = Regressionskoeffizient

x_i = unabhängige Co- Variable
 ε = im Mittel 0 betragende Residuen

Eine einfache, lineare Regression ist wie folgt zu beschreiben:

$$y = a + bx + \varepsilon \quad \text{Gl. 3.17}$$

Als Ausschlusskriterium für den Eingang einer unabhängigen Variablen in die schrittweise multiple Regression diente ein Korrelationskoeffizient von mindestens 0,1 bei einem zweiseitigen Signifikanzniveau von $\leq 0,05$. Die Aufstellung der Regressionen erfolgten mit SPSS (vers.10, ©SPSS Inc.).

3.4.2 Inverse Distance Weighting (IDW)

Diesem deterministischen Interpolationsverfahren liegt die strikte Annahme zu Grunde, dass näher beieinander liegende Punkte sich ähnlicher sind, als weiter voneinander entfernte. Zur Vorhersage eines Wertes an einem unbekanntem Punkt werden die ihn umgebenden Punkte mit bekanntem Wert zu ihm in Beziehung gebracht. Die nächstgelegenen Punkte bekannter Ausprägung nehmen dabei einen größeren Einfluss auf die Vorhersage als Fernere. Folglich hat jeder gemessene Punkt einen lokalen Einfluss auf seine Umgebung, der mit zunehmender Entfernung abnimmt. Die Gleichung lautet:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{Gl. 3.18}$$

wobei

Z = Zielvariable für Standort (x_0)
 n = Anzahl gemessener Punkte
 λ_i = Gewichtung für jeden gemessenen Punkt
 $Z(x_i)$ = beobachteter Wert an Punkt x_i

Für die Gewichtung wird folgende Berechnung durchgeführt:

$$\lambda_i = d_{i0}^{-p} / \sum_{i=1}^n d_{i0}^{-p}; \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad \text{Gl. 3.19}$$

Dabei beschreibt d_{i0} die Distanz zwischen den Prediktionsstandorten x_0 und den bekannten Standorten x_i . Die Gewichtung wird entscheidend durch den Exponenten oder „Powerparameter“ p beeinflusst. Mit steigender Distanz zwischen x_i und x_0 sinkt der Einfluss des gemessenen Punktes auf die Gewichtung exponentiell. Das IDW-Verfahren wurde mit dem ArcGIS™ Geostatistical Analyst (ESRI®) umgesetzt. Zur Optimierung von p ist hier eine Funktion implementiert, die durch Minimierung des RMSPE („root-mean-square prediction error“) aus der Kreuzvalidierung einen optimierten Exponenten für die Gewichtung liefert (vgl. JOHNSTON ET AL., 2001).

3.4.3 Geostatistische Verfahren

Geostatistische Verfahren beruhen im Allgemeinen auf der von MATHERON (1963) vorgestellten Theorie der regionalisierten Variablen. Die Grundlagen der Geostatistik können hier nur in groben Zügen skizziert werden. Ausführliche Darstellungen sind bei DEUTSCH & JOURNAL (1989), HEINRICH (1994), WACKERNAGEL (2003) und WEBSTER & OLIVER (2004) zu entnehmen.

Unter einer regionalisierten Variablen wird eine Variable $Z(x)$ verstanden, die die Werte einer Eigenschaft in Abhängigkeit vom Ort x beschreibt. Hierbei liegt die Annahme zu Grunde, dass die einem betrachteten Punkt nahe gelegenen Punkte ihm ähnlicher sind, als fernere. Angesprochene regionalisierte oder ortsabhängige Variablen weisen an jedem Ort eine andere Ausprägung auf, deren Veränderung im Raum kontinuierlich, unstetig oder aber chaotisch sein kann. Die Variabilität ist in ihrer Gesamtheit weder statistisch im vollen Ausmaß zu erfassen, noch mathematisch-deterministisch sicher zu fixieren. Dennoch kann beobachtet werden, dass sie vielfach eine strukturierte, nicht zufällige Komponente aufweist.

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen statistischen und deterministischen Methoden beruhen geostatistische Verfahren auf der räumlichen Autokorrelation von Variablen. Dabei wird angenommen, dass regionalisierte Variablen aus einer deterministisch-faktoriellen, einer autokorrelativen und einer zufälligen, nicht erklärbaren Komponente zusammengesetzt sind. Entsprechend wird eine beobachtete regionalisierte Variable x als eine mögliche Realisation einer Zufallsvariablen $Z(x)$ betrachtet. Die Menge aller Zufallsvariablen über eine Beobachtungsreihe ist eine Realisation dieser Zufallsfunktion.

Geostatistischen Verfahren liegen zwei Annahmen zu Grunde, die der Stationarität 2. Ordnung einer Zufallsfunktion und der Intrinsischen Hypothese. Als stationär wird eine Variable bezeichnet, deren Erwartungswert E existiert, nicht von der Lage des Ortes x abhängt und dass die Kovarianz für jedes Punktepaar von Zufallsvariablen existiert und nur von deren Abstandvektor h , also der Distanz zwischen den Punkten, abhängt. Die Intrinsische Hypothese dagegen geht von einer Stationarität der Wertedifferenz zweier Punkte aus, also nicht von deren Distanz zueinander. Das heißt, dass ein Erwartungswert existiert und nicht von der Lage eines Punktes x abhängig ist, sondern von deren Wertedifferenz und eine endliche Varianz aufweist. Die als Semivarianz bezeichnete Funktion $\gamma(h)$ bringt dies zum Ausdruck:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(Z(x+h) - Z(x))^2] \quad \text{Gl. 3.20}$$

Die Schätzung der räumlichen Autokorrelation oder Semivarianz der bekannten, gemessenen Punkte kann nun über die folgende Gleichung vorgenommen werden:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad \text{Gl. 3.21}$$

wobei

$m(h)$ = Anzahl der Wertepaare für jede Distanz

x_i = bekannter Punkt

h = Abstandsvektor

$Z(x_i)-Z(x_i+h)$ = Werte Z einer Variablen an zwei Punkten (Werte- und Distanzpaar)

Trägt man die mittlere Varianz aller Messwerte auf der Ordinate und die Entfernungsklasse auf der Abszisse ab, so erhält man ein die Semivarianz abbildendes experimentelles Variogramm, als zentrales Instrument zur Schätzung von räumlichen Strukturen und Erhaltungseigenschaften. Das Variogramm lässt sich durch die drei Kennwerte Nuggetvarianz oder -effekt, Schwellenwert (sill) und Reichweite oder Aussageweite (range) beschreiben (vgl. Abb. 3.4).

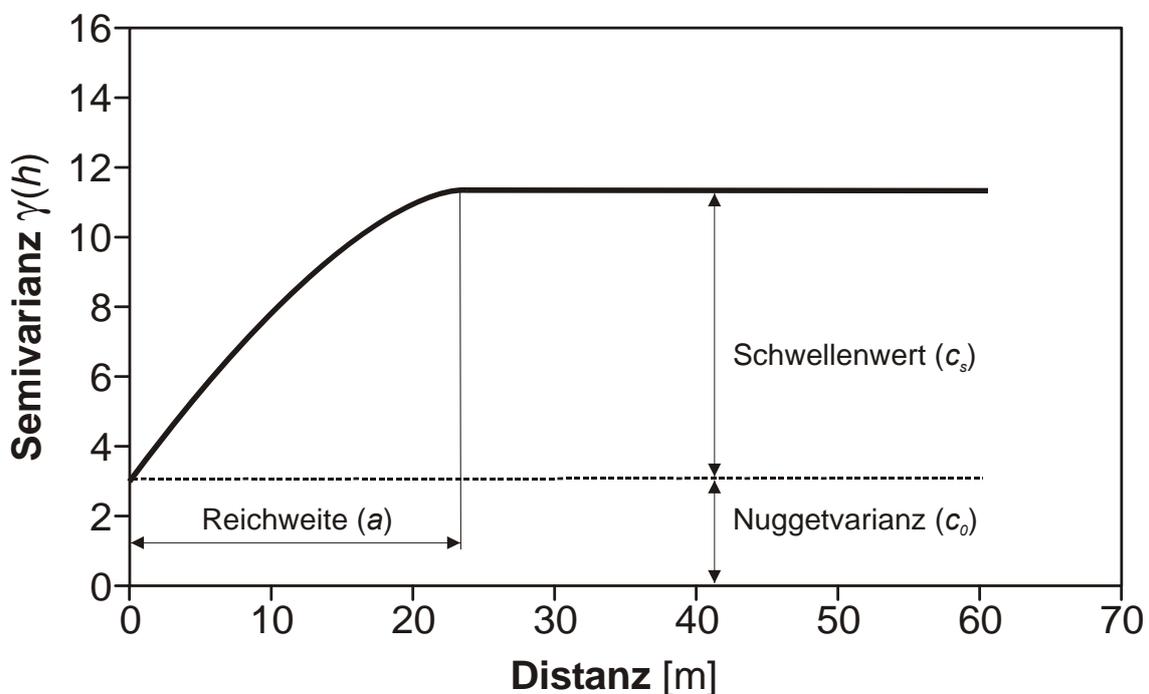


Abbildung 3.4: Idealisiertes sphärisches Variogramm - Modell mit Reichweite (a), Nuggetvarianz (c_0) und Schwellenwert (c_s)

Der Nuggeteffekt (c_0) kennzeichnet die Semivarianz für den Abstandsvektor $h=0$ und entspricht dem Schnittpunkt der extrapolierten Variogrammkurve mit der Ordinate oberhalb des Ursprungs. Er ist als Folge von Messfehlern und nicht erfasster kleinräumiger (Mikro-) Variabilität zu interpretieren. Ein hoher oder reiner Nuggeteffekt lässt auf eine geringe oder nicht vorhandene strukturelle Korrelation der Stichproben schließen. In den meisten Fällen räumlicher Unabhängigkeit sind die Beprobungsdistanzen zu groß gewählt, sodass ein Skalenproblem vorliegt (TRANGMAR ET AL., 1985).

Der Anstieg der Variogrammkurve gibt den Bereich räumlicher Korrelation zwischen den Messwerten wieder. Im weiteren Verlauf ist mit zunehmender Distanz eine zunehmende Semivarianz zu verzeichnen. Bei ausreichendem Betrachtungsraum ist die Varianz endlich, das

heißt der Schwellenwert (c_s) ist erreicht und kein weiterer Anstieg der Reichweite (räumlicher Beziehung) zu beobachten. Die Entfernung, bei der das Variogramm sich asymptotisch dem Schwellenwert nähert, wird als Aussage- oder Reichweite bezeichnet und ist als Radius der Erhaltungsneigung zu verstehen. Nach HEINRICH (1994) sollten bei der Variogrammmodellierung mindestens 30-50 Wertepaare eingehen und die Reichweite des Variogramms die halbe Distanz des Untersuchungsraumes nicht überschreiten.

Um ein für alle Distanzen gültiges Variogramm für die Kriging Interpolation zu erhalten, wird eine Modellanpassung vorgenommen. Die Anpassung erfolgt auf mathematischer Grundlage mit dem Ergebnis eines theoretischen Variogramms (vgl. Abb. 3.4 und Gl. 3.22). Eine mögliche Form hierfür ist als sphärisches Modell mit folgender Gleichung beschrieben:

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c_s \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{für } h \leq a \\ c_0 + c_s & \text{für } h > a \end{cases} \quad \text{Gl. 3.22}$$

wobei

- $\gamma(h)$ = Semivarianz in Abhängigkeit vom Abstand h
- c_0 = Nuggetvarianz mit der Distanz 0
- c_s = Schwellenwert der Semivarianz
- h = Abstand
- a = Reichweite

Der Grad der räumlichen Korrelation kann durch einen Quotienten aus Nuggetvarianz (c_0) und Gesamtvarianz ($c_0 + c_s$) zum Ausdruck gebracht werden und berechnet sich wie folgt (TRANGMAR ET AL., 1985):

$$NSR[\%] = \left[\frac{c_0}{c_0 + c_s} \right] * 100 \quad \text{Gl. 3.23}$$

Der Quotient beschreibt die stochastische Komponente, die der räumlichen Variabilität einer Bodeneigenschaft zu Grunde liegt und ist als Maß für ihre räumliche Abhängigkeit zu betrachten (vgl. LÓPEZ-GRANADOS ET AL., 2005). Nach CAMBARDELLA ET AL. (1994) kennzeichnen Quotienten von 0 bis 25 % eine stark strukturierte räumliche Abhängigkeit, 25 % bis 75 % eine mittlere und >75 % eine geringe räumliche Abhängigkeit mit einem hohen Grad unerklärter Varianz.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden nur sphärische, omnidirektionale Variogramme genutzt. Die Ermittlung der Variogrammparameter beruht dabei auf der besten Anpassung des Kurvenverlaufs durch die kleinsten Abweichungsquadrate mit dem „indicative Goodness of Fit“ (PANNATIER, 1996). Die Variogrammmodellierung für die im Folgenden beschriebenen Krigingverfahren wurde mit Variowin (vers. 2.2, ©Pannatier, 1993-1998), die Interpolation und Griderstellung mit dem ArcGIS™ Geostatistical Analyst (ESRI®) realisiert.

Ordinary Kriging (OK)

Beim OK handelt es sich um ein lokales Schätzverfahren, das mit gewichteten räumlichen Mittelwerten unter Berücksichtigung des Variogramms interpoliert. Die Gewichtung wird dabei derart optimiert, dass die Varianz der geschätzten Werte minimiert und die Schätzwerte erwartungstreu sind, also im Mittel die Abweichung zwischen wahren und geschätzten Werten Null ergibt. Der lineare Schätzer beruht auf der räumlichen Autokorrelation der Zielvariablen Z am Punkt x in Abhängigkeit von den umgebenen Werten der Punkte x_i . Er ist zu beschreiben als:

$$Z_{OK}(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z(x_i) \quad \text{Gl. 3.24}$$

Dabei muß die Summe der Gewichte λ_i eins betragen ($\sum \lambda_i = 1$) während die Gewichtung für jeden Punkt x so zu berechnen ist, dass der gemittelte Schätzfehler 0 und die Varianz des Schätzfehlers minimiert ist. Zur Minimierung des Schätzfehlers wird der Multiplikator μ nach dem Lagrange-Prinzip herangezogen:

$$\gamma(h) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_j - x_i) + \mu = \gamma(x_j - x) & j = 1, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad \text{Gl. 3.25}$$

Die minimale Schätz- oder Krigevarianz berechnet sich aus:

$$\sigma_{OK}^2(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x) + \mu \quad \text{Gl. 3.26}$$

Simple Kriging (SK)

Dem Simple Kriging liegt die Annahme eines bekannten, konstant über den gesamten Untersuchungsraum geltenden Mittelwertes (Stationarität 2. Ordnung) zu Grunde. Das heißt, der Erwartungswert E ist an jedem Punkt gleich und die Kovarianz nicht unveränderlich, sondern von h abhängig. Im Gegensatz zum OK werden die Gewichte λ_i gemittelt und als allgemein über den Raum geltender Trend angenommen:

$$Z_{SK}(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z(x_i) + \left\{ 1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \right\} \mu \quad \text{Gl. 3.27}$$

Wobei die Summe der Gewichte λ_i entspricht, aber nicht mehr 1 ergeben muss.

Das Gleichungssystem für das Simple Kriging lautet:

$$\gamma(h) = \sum_{n=1}^n \lambda_i \gamma(x_j - x_i) \quad \text{für } j = 1, \dots, n \quad \text{Gl. 3.28}$$

Die Krige-Varianz errechnet sich aus:

$$\sigma_{SK}^2(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x) \quad \text{Gl. 3.29}$$

Disjunktives Kriging (DK)

Da für den in metrische Bodendaten überführten Felddatensatz aus der Landesaufnahme (vgl. Kapitel 3.2.1) über herkömmliche Transformationen keine Normalverteilung zu erreichen war, wurde anstelle des Ordinary und Simple Kriging das nichtlineare Verfahren des Disjunktiven Kriging herangezogen. Die nichtlineare Schätzung erfordert Stationarität und uni- und bivariate Gleichverteilung. Diese kann über eine *normal-score*-Transformation nach der Gaußschen Verteilung erfolgen. Der Schätzer ist beschrieben als:

$$Z(x_0) = \sum_x g_x Z(x) \quad \text{Gl. 3.30}$$

wobei $g_x(Z(x))$ eine Funktion der Variablen $Z(x)$ ist. Das Vorhersagemodell besteht aus folgender Gleichung:

$$Z_{DK}(x_0) = f_0 + \sum_{k>0} f_k H_k Y(x_0) \quad \text{Gl. 3.31}$$

mit

$$H_k(Y(x_0)) = \sum_{i=1}^n \lambda_{ki} H_k Y(x_i) \quad \text{Gl. 3.32}$$

f_i und λ_{ki} beschreiben dabei funktionale Koeffizienten und $H_k(Y(x_i))$ Hermite Polynome einer linearen Differentialgleichung 2. Ordnung, die eine bivariate Normalverteilung von $Y(x_i)$ und $Y(x_j)$ über eine geeignete Normierung und Multiplikation mit der Gaußschen Normalverteilung sicherstellen. Weitergehende Ausführungen zu Theorie und Anwendung des DK sind bei RIVOIRAD (1994) zu entnehmen. Das DK wurde mit dem ArcGIS™ Geostatistical Analyst (ESRI®) umgesetzt.

3.4.4 Hybride Verfahren

Für die Integration von Sekundärinformationen als Co-Variable für die Vorhersage von Bodeneigenschaften als Zielvariable wurde der Ansatz des Regressions-Kriging (RK) verwendet. Hierbei handelt es sich um ein hybrides Verfahren, das aus der Kombination der statistischen Methode der multiplen linearen Regression (MLR) mit einer oder mehreren erklärenden, unabhängigen Variablen und dem geostatistischen Verfahren des Ordinary Kriging (OK) zusammengesetzt ist. Das RK basiert auf dem Gedanken, dass die funktional-deterministische Komponente einer Zielvariablen durch das Regressionsmodell erklärt wird, während die hieraus

hervorgehenden Residuen die zugehörige räumliche Variabilität beschreiben (BISHOP ET AL., 2001). Darauf aufbauend wurden drei Modelle entwickelt, die als Regressions-Kriging-Modell „A“ (RKA), „B“ (RKB) und „C“ (RKC) beschrieben werden (vgl. AHMEND & DEMARSILY, 1987; KNOTTERS ET AL., 1992 und 1995 und ODEH ET AL., 1995). Die Abbildung 3.5 gibt einen schematischen Überblick hierzu.

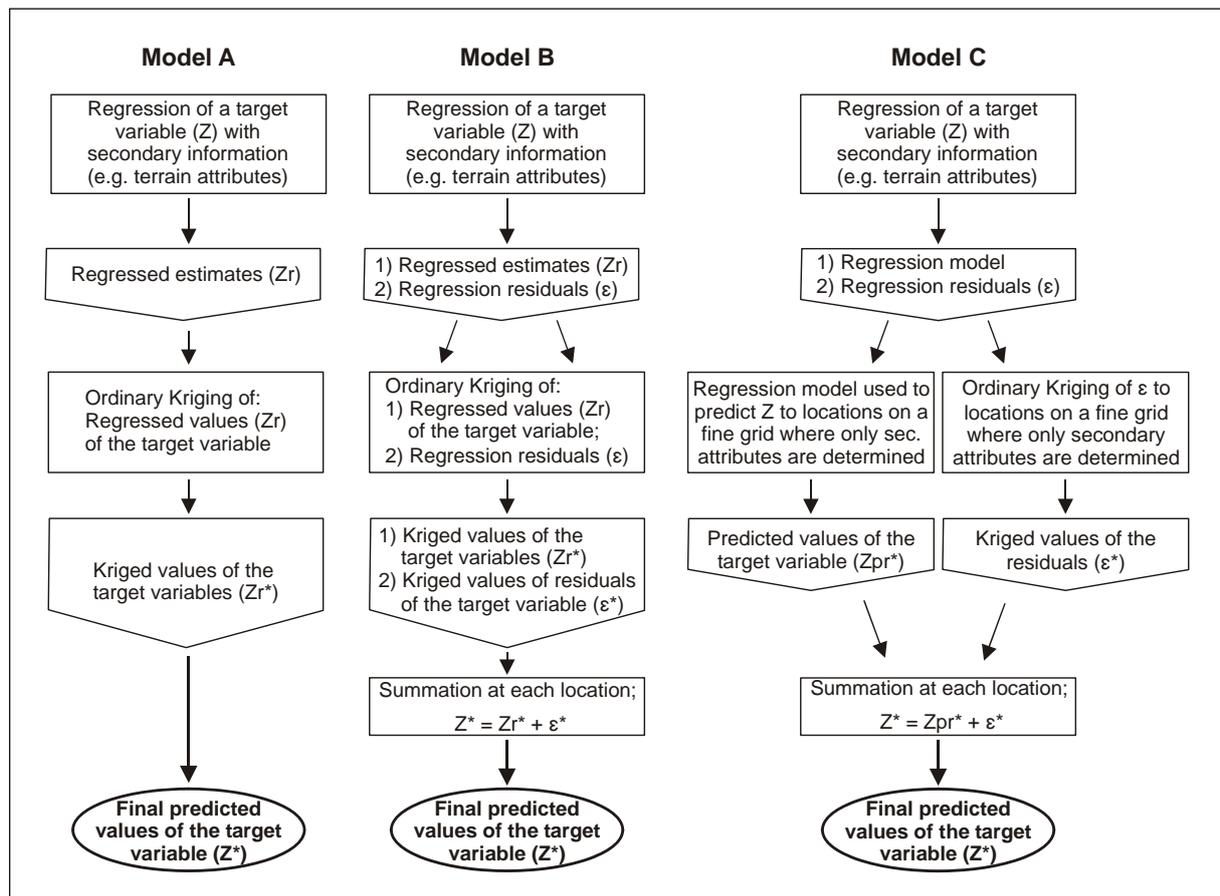


Abbildung 3.5: Fließschema des Regressions Kriging (ODEH ET AL., 1995, S. 215, verändert)

Einen ausreichenden Zusammenhang zwischen der Zielvariablen Z und einer oder mehrerer erklärenden, unabhängigen Co- Variable vorausgesetzt, wird zunächst über eine MLR für jeden bekannten Punkt ein neuer Wert Z_r geschätzt. Beim RKA werden diese anschließend durch OK räumlich interpoliert, man erhält für jeden Ort einen Wert Z^* für eine Variable:

$$Z_{RKA}^* = Z_r^* \tag{Gl. 3.33}$$

Bei Modell B und C hingegen werden die Residuen ε aus der Regression für jeden Punkt berücksichtigt. Sie beschreiben die Abweichung zwischen den gemessenen und den aus der Regression hervorgegangenen geschätzten Werte und sind wie folgt zu berechnen:

$$\varepsilon(x) = Z(x) - Z_r(x) \tag{Gl. 3.34}$$

Für die Abbildung der räumlichen Verteilung der Schätzabweichung des Regressionsmodells ε^* wird die Variogrammanalyse mit anschließendem OK herangezogen. Beim RKB erfolgt dann eine Aufsummierung des Ergebnisses aus Modell RKA (Z_r^*) mit (ε^*). Für Modell RKB gilt:

$$Z_{RKB}^* = Z_r^* + \varepsilon^* \quad \text{Gl. 3.35}$$

Für das RKC werden zunächst auf Basis der Regressionsgleichung die Zielvariablen räumlich geschätzt (Z_{pr}^*). Anschließend erfolgt die Summation der aus der Regression hervorgegangenen räumlich vorhergesagten Bodeninformationen (Z_{pr}^*) mit den durch OK interpolierten Residuen (ε^*) an jedem Ort. Für Modell RKC gilt:

$$Z_{RKC}^* = Z_{pr}^* + \varepsilon^* \quad \text{Gl. 3.36}$$

Eine tiefergehende Beschreibung zur Theorie und Anwendung des Regressions-Kriging ist bei ODEH ET AL. (1995), MCBRATNEY ET AL. (2000, 2003) und HENGL ET AL. (2004) zu finden. Die Umsetzung im Einzelnen erfolgte wie in den vorigen Kapiteln beschrieben.

3.4.5 Validierung und Methodenvergleich

Zur Überprüfung der Modellergebnisse wird optimaler Weise ein unabhängiger Datensatz verwendet. Nach MCBRATNEY ET AL. (2003) sollten hierfür 25 – 33 % des zur Verfügung stehenden Datensatzes vorgehalten werden.

Da der im Rahmen dieser Untersuchung vorliegende Datensatz für diese Vorgehensweise zu klein ist, wurde die Methode der Kreuzvalidierung herangezogen, bei der für jeden Punkt die Abweichung zwischen gemessenen und geschätzten Werten berechnet wird (WACKERNAGEL, 2003; WEBSTER & OLIVER, 2004). Kritisch zu beurteilen ist hierbei allerdings, dass die Punkte zuvor in die Modellierung eingegangen sind und so Einfluss auf das Modell selbst und damit auf das Ergebnis nehmen. Bei der Anzahl der eingegangenen Punkte ist der hierauf beruhende Fehler jedoch als vernachlässigbar und unerheblich einzuschätzen.

Ein häufig genutztes Maß zur Überprüfung der Vorhersagegüte von Prediktionsverfahren ist der mittlere absolute Fehler oder „*mean absolute error*“ (MAE), der sich wie folgt berechnen lässt:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M - S|_i \quad \text{Gl. 3.37}$$

wobei n = die Anzahl der Messpunkte M und Schätzwerte S .

Eine weitere vielfach genutzte Größe für die Quantifizierung der Vorhersagequalität ist die Wurzel des mittleren Abweichungsquadrates oder „*root mean square error*“ (RMSE). Durch die Quadrierung reagiert dieser gegenüber dem MAE sensibler auf Abweichungen:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M - S)^2} \quad \text{Gl. 3.38}$$

Beide werden hier für die Bewertung und den Vergleich der genutzten Vorhersagemodelle herangezogen. Zur Quantifizierung der methodenvergleichenden, relativen Verbesserung wird der *Relative Improvement (RI)* genutzt, der wie folgt zu beschreiben ist:

$$RI(\%) = \frac{RMSE_{SIM_a} - RMSE_{SIM_b}}{RMSE_{SIM_a}} * 100 \quad \text{Gl. 3.39}$$

Wobei $RMSE_{SIM_a}$ den RMSE des Vorhersagemodells a und $RMSE_{SIM_b}$ den des Modells b entspricht. Vorgestellte Maße erlauben einen überschaubaren Vergleich der Ergebnisse und werden zur Bewertung der Modelle herangezogen.

4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Regionalisierung im Einzelnen vorgestellt, untereinander verglichen und im Anschluss in einem Kurzfazit zusammengetragen. Die Untergliederung richtet sich nach den drei räumlichen Skalen, die auf Grundlage des jeweiligen Datensatzes (vgl. Kapitel 3.2) berücksichtigt wurden. Abschließend werden in diesem Kapitel die Regionalisierungsmodelle und -ergebnisse auf den verschiedenen räumlichen Skalen zu einer vergleichenden Bewertung herangezogen.

4.1 Räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften auf der Feldskala

4.1.1 Deskriptive Statistik der Bodeneigenschaften

Für die Untersuchung der kleinräumigen Bodenheterogenität auf der Feldskala, also innerhalb einer Bewirtschaftungseinheit, wurde ein Datensatz punktbezogener zentraler Bodenbasisparameter und abgeleiteter bodenhaushaltlicher Größen von $n = 117$ gewonnen (vgl. Kapitel 3.2.1). Die Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über statistische Kennwerte der Bodeneigenschaften auf dem Schlag Sandkamp/Wiese.

Tabelle 4.1: Deskriptive Statistik der Bodeneigenschaften des Oberbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese ($n = 117$)

Bodenparameter	Statistische Kennwerte ($n = 117$)				
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stabw.	CV (%)
Tongehalt [Gew.-%]	8,8	47,5	22,5	7,6	33,8
Schluffgehalt [Gew.-%]	24,4	55,9	32,3	4,7	14,6
Sandgehalt [Gew.-%]	17,8	62,8	45,2	9,8	21,7
C_{org} -Gehalt [Gew.-%]	0,84	9,15	1,88	1,43	76,1
Rohdichte, trocken [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	0,76	1,70	1,46	0,18	12,3
L_{eff} [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1,15	1,87	1,66	0,14	8,4
KAK_{pot} [$\text{cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$]	11,3	61,6	20,4	8,97	44,0
KAK_{eff} [$\text{cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$]	8,0	36,0	15,6	5,42	34,7
Ret. pF_{FK} [Vol.-%]	31,1	60,2	37,4	5,81	15,5
Ret. pF_{nFK} [Vol.-%]	22,5	56,8	31,2	6,63	21,2
Ret. pF_{PWP} [Vol.-%]	8,50	46,1	17,7	6,84	38,6

CV = Variationskoeffizient, C_{org} = organischer Kohlenstoff, L_{eff} = effektive Lagerungsdichte, $KAK_{\text{pot/eff}}$ = potenzielle und effektive Kationenaustauschkapazität, $\text{Ret.}pF_{\text{FK/nFK/PWP}}$ = Retentionsvermögen bei Feldkapazität, nutzbarer Feldkapazität und permanentem Welkepunkt.

Entsprechend der mittleren Anteile der Ton- und Schlufffraktionen von ca. 23 %, bzw. 32 % am gesamten Feinboden, sind die am häufigsten auftretenden Bodenarten im Korngrößendia-gramm mittel bis stark sandiger Lehm (Ls3-Ls4, vgl. Abb. 4.1). Dabei ist bei den Tongehalten im Gegensatz zu den Sand- und Schluffgehalten ein wesentlich höherer Variationskoeffizient von 33,8 % zu verzeichnen. Die geringste Variabilität weist der Schluffgehalt mit einem

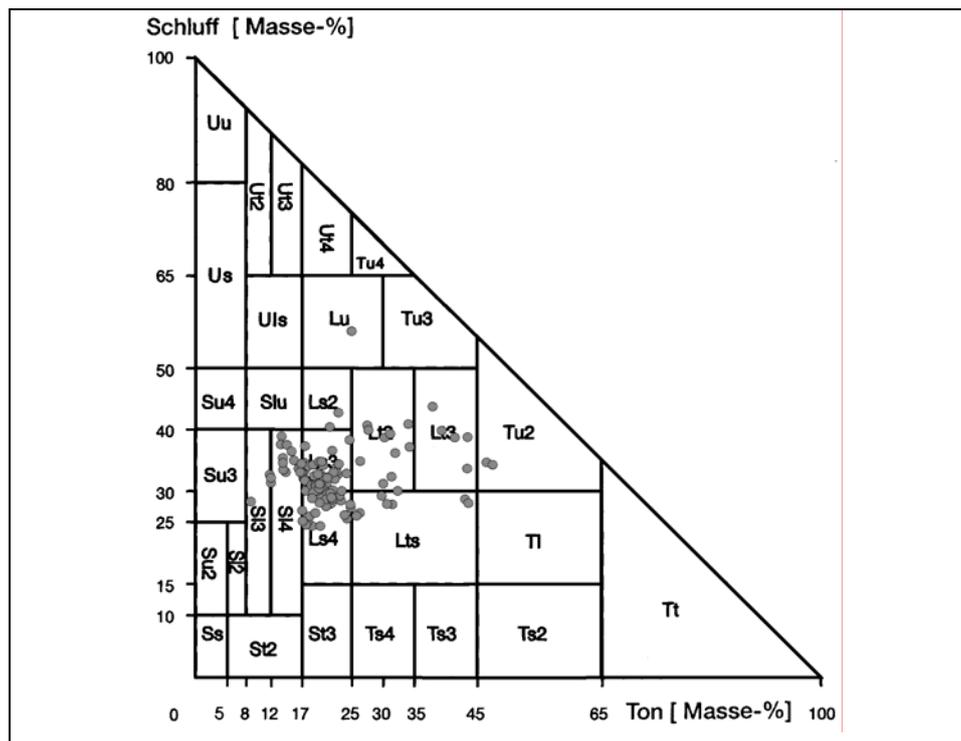


Abbildung 4.1: Bodenartendiagramm des Feinbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)

Variationskoeffizienten von 14,6 % und einer Standardabweichung von 4,7 auf. Bereiche höherer Tongehalte sind auf dem Schlag vor allem in größeren Geländesenken und auf den Kuppen und den sich anschließenden Oberhangbereichen auszumachen. Für letztgenannte Standorte ist anzunehmen, dass dies durch Zutagetreten des Bt-Horizontes der hier auftretenden erodierten Parabraunerden hervorgerufen wird. Ein Beleg hierfür ist die zu beobachtende hellere Färbung des Oberbodens in Folge des Bodenabtrags und der damit einhergehenden Humusverarmung. Die Schluff- und Sandgehalte variieren dagegen weniger, wobei höhere Sandgehalte zumeist dort zu verzeichnen sind, wo die Tongehalte zurückgehen. Dies betrifft vor allem den höhergelegenen und weniger reliefierten westlichen Teil des Schlages. Möglicherweise ist dies die Folge weniger intensiv stattfindender Umlagerungsprozesse und einer damit verbundenen abgeschwächten Korngrößensortierung.

Die C_{org} - Gehalte reichen von 0,84 bis 9,15 Gew.-% bei einem ausgesprochen hohen Variationskoeffizienten von 76 %, wobei knapp 55 % der Werte im Bereich von 1,17 % bis 2,30 % liegen und damit als „mittel humos“ einzustufen sind (der Humusgehalt wird durch Multiplikation der C_{org} - Gehalte mit dem Faktor 1,72 erhalten, vgl. AG BODEN, 2005). Weitere 25 % sind als „schwach humos“ zu bezeichnen. Höhere C_{org} - Gehalte treten in Senken und weniger geneigten Hangverflachungen auf, geringere dagegen in Kuppen- und Hanglagen.

Hierzu korrespondierend sind die Verteilungen der Lagerungsdichte (Rohdichte trocken) ausgeprägt. Zwischen der Lagerungsdichte und den C_{org} -Gehalten ist ein negativer linearer Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,81$ zu verzeichnen. Mit 67 % liegen

Lagerungsdichten von $1,45 - 1,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ („mittel“) und 14 % von $<1,25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ („sehr gering“) vor. Der Rest entfällt auf die Stufe „gering“ (vgl. AG BODEN, 2005). Werte geringster Ausprägung sind im größeren Senkenbereich am nordöstlichen Teil des Schlages (Kolluvisol über Niedermoor) vorzufinden. Höhere Werte in Kuppen- und Hanglagen geben einen weiteren Hinweis auf den hier stattgefundenen Prozess der Bodendegradierung durch Erosion (s.o.).

Die Verteilung der aus Pedotransferfunktionen abgeleiteten Bodenhaushaltsparameter folgt den der Berechnung zu Grunde liegenden Boden-Basisparametern. Grundsätzlich sind sowohl die durchschnittlichen Werte der Parameter Kationenaustauschkapazität als auch des Retentionsvermögens für Wasser als mittel bis gut zu bewerten. Nahezu optimale pH-Werte des Oberbodens von etwa 6-7 werden durch das landwirtschaftliche Management erreicht, weshalb dieser Parameter bei der weiteren Untersuchung ausgeschlossen wurde und lediglich bei der Berechnung der effektiven Kationenaustauschkapazität Eingang findet (vgl. Kapitel 3.2.1.2).

Insgesamt ergibt sich ein relativ gutes standörtliches Ertragspotenzial, was durch die im Rahmen der Bodenschätzung ausgewiesene Ackerzahl von 58 zum Ausdruck kommt. Allerdings bleibt anzumerken, dass besonders in Hinsicht auf die Nutzung der Vegetationsindizes innerhalb der Untersuchung lediglich der Oberboden berücksichtigt wurde. Die obersten 30 cm spielen aber bezüglich der Versorgung der Pflanzen mit Wasser und Nährstoffen eine bedeutende Rolle. So werden 50-60 % des Wasserbedarfs von z. B. Winterweizen hieraus entnommen. In frühen Wachstumsphasen wird der Bedarf ausschließlich aus dem Oberboden gedeckt, während in der Reifephase das Wurzelwerk bis zu 2 m Tiefe reicht (DEMIRCAN, 1995). Die Einbeziehung des Unterbodens in die Untersuchung hätte einen erheblichen Mehraufwand mit sich gezogen, der im Rahmen dieser Arbeit nicht zu bewältigen war.

4.1.2 Der Zusammenhang zwischen den Boden- und Reliefparametern

Auf Grundlage regressionsstatistischer Ansätze wurde die Beziehung zwischen dem Relief und verschiedenen Bodeneigenschaften in zahlreichen Arbeiten untersucht und zur Regionalisierung genutzt (vgl. Kapitel 1.2). Dies ist insbesondere in Landschaften vielversprechend, in denen die Bodenbildungsprozesse maßgeblich durch das Relief beeinflusst werden, wie das im Untersuchungsgebiet der Fall ist (s. Kapitel 2.3). Den Untersuchungen liegen zumeist Punktdatensätze in Verbindung mit aus DGM abgeleiteten Reliefparametern zu Grunde (s. Kapitel 3.3.2). Neben der einfachen statistischen Analyse der Relief - Bodenbeziehung wird vielfach die Abbildung von Prozessfeldern der Bodenbildung als Ziel verfolgt (vgl. BÖHNER & KÖTHE, 2003).

Im Bezug auf das Relief nehmen hierfür hydrologische Modelle eine zentrale Stellung ein, da die Richtung und das Ausmaß von Wasserflüssen verantwortlich sind für Erosions- und Akkumulationsprozesse. Grundsätzlich aber ist kein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen Bodeneigenschaften und einem oder mehreren Reliefparametern abzuleiten, da dies von der räumlichen Betrachtungsskala und dem Landschaftsgefüge abhängt. In der vorliegenden Arbeit wurden 10 Reliefparameter (vgl. Kapitel 3.2.3) mit den Zielvariablen (Bodeneigenschaf-

ten) korreliert. Zur Überprüfung der Repräsentativität der an den Punkten erfassten Relief-eigenschaften für den Schlag, erfolgte zunächst ein Vergleich der Häufigkeitsverteilung über ein Histogramm. Anhand der Beispiele der Hangneigung und des Wetness Indexes wird in Abbildung 4.2 die morphologische Struktur des Schlages, sowie die Häufigkeitsverteilungen

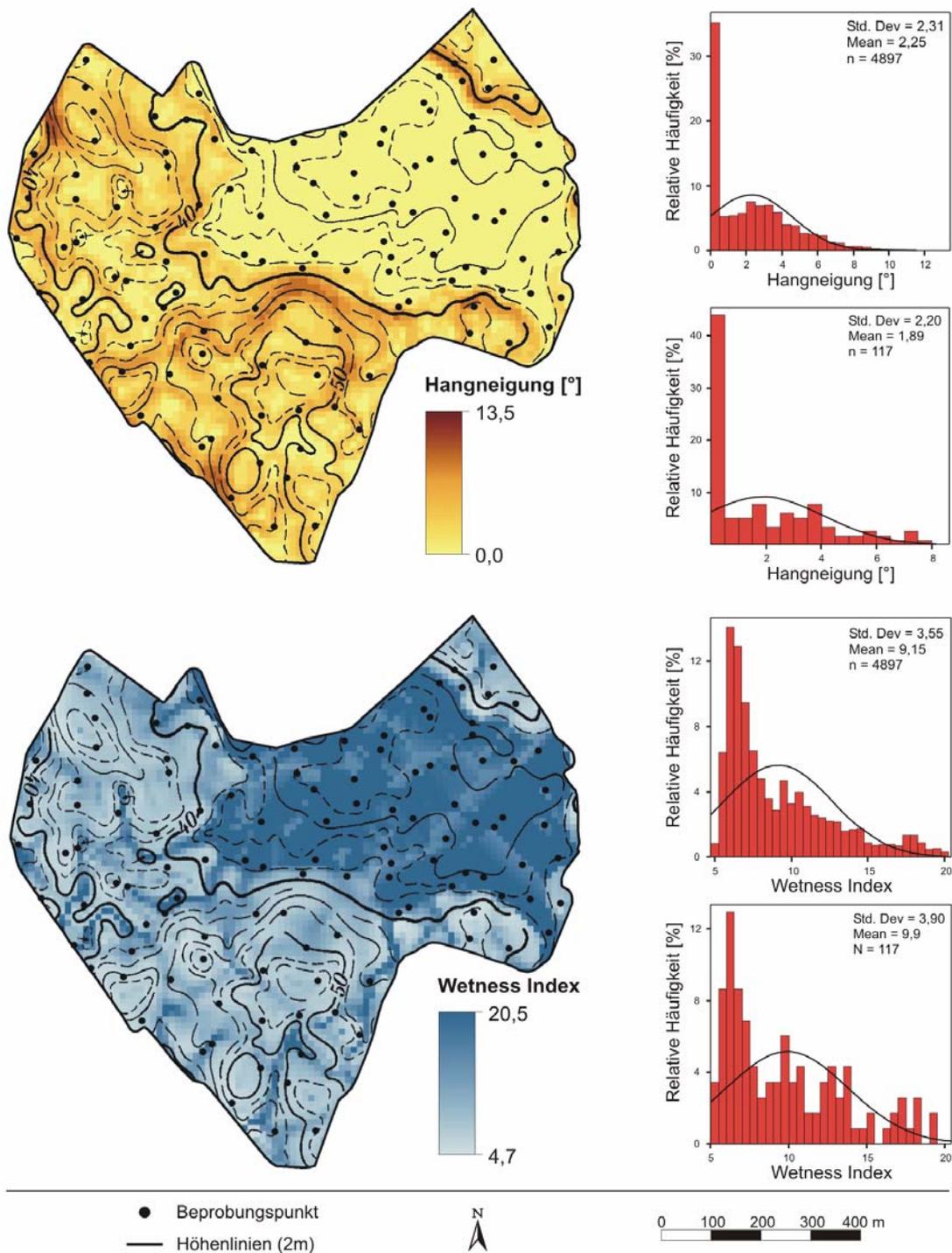


Abbildung 4.2: Räumliche Verteilung der Reliefparameter Hangneigung (oben) und des Wetness Index mit Häufigkeitsverteilungen auf dem gesamten Schlag (n = 4897 Rasterzellen, jeweils oben) und aus dem Punktdatensatz (Schlag Sandkamp/Wiese, n = 117)

4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten

der Parameter auf dem Schlag ($n = 4897$ Rasterzellen) und aus dem Punktdatensatz ($n = 117$) wiedergegeben. Aus dem Vergleich der Histogramme geht hervor, dass die Verteilung der Reliefparameter auf dem Schlag relativ gut erfasst wurde, stärker reliefierte Bereiche allerdings etwas unterrepräsentiert sind. Zur Untersuchung der reliefabhängigen Verteilung der Bodenparameter erfolgte zunächst eine Korrelationsanalyse, um lineare Zusammenhänge für die dann folgende Regression zu ermitteln. Im Ergebnis weisen die meisten Reliefparameter nur schwache bis mäßige Korrelationen zu den Bodeneigenschaften auf (vgl. Tab. 4.2).

Tabelle 4.2: Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Oberbodens und den Reliefparametern für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese ($n = 117$)

Bodenparameter	Reliefparameter									
	H	β	C_v	C_h	CDI	A_s	H_{Ch}	w	Ω	LS
T [Gew.-%]	-0,324**	-0,276**	0,006	-0,084	-0,055	-0,106	-0,373**	0,338**	0,065	-0,213*
U [Gew.-%]	0,006	-0,149	0,185*	-0,030	-0,059	-0,069	-0,105	0,149	0,065	-0,116
S [Gew.-%]	0,250**	0,280**	-0,123	0,075	0,052	0,091	0,345**	-0,318**	-0,031	0,234*
C_{org} [Gew.-%]	-0,582**	-0,669**	-0,180	-0,277**	-0,337**	-0,275**	-0,640**	0,699**	-0,003	-0,591**
dB [$g \cdot cm^{-3}$]	0,538**	0,611**	0,185*	0,237**	0,355**	0,334**	0,584**	-0,674**	-0,242**	0,520**
$L_{d,eff}$ [$g \cdot cm^{-3}$]	0,516**	0,578**	0,195*	0,219*	0,393**	0,348**	0,537**	-0,640**	0,168	0,487**
KAK_{pot} [$cmol_c \cdot kg^{-1}$]	-0,460**	-0,474**	-0,038	0,219*	-0,191*	-0,142	-0,523**	0,517**	0,164	-0,406**
KAK_{eff} [$cmol_c \cdot kg^{-1}$]	-0,382**	-0,370**	0,006	-0,175	-0,127	-0,096	-0,430**	0,417**	-0,097	-0,302**
Ret. pF_{FK} [Vol.-%]	-0,498**	-0,579**	0,131	-0,110	-0,301**	-0,265**	-0,567**	0,639**	-0,007	-0,488**
Ret. pF_{nFK} [Vol.-%]	-0,422**	-0,449**	-0,014	-0,224*	-0,172	-0,136	-0,493**	0,492**	-0,134	-0,381**
Ret. pF_{PWP} [Vol.-%]	-0,378**	-0,367**	0,019	-0,155	-0,113	-0,096	-0,433**	0,407**	-0,078	-0,306**

Korrelationskoeffizienten nach SPEARMAN; **zweiseitiges Signifikanzniveau von 99%, * von 95%, H = Höhe über NN, β = Hangneigung, C_v = vertikale Wölbung, C_h = horizontale Wölbung, CDI = Konvergenz/Divergenz-Index, A_s = spezifisches Einzugsgebiet, H_{Ch} = Höhe über Tiefenlinie, w = Wetness Index, Ω = Streampower Index, LS = LS-Faktor.

Wie Tabelle 4.2 zu entnehmen ist, weisen der organische Kohlenstoffgehalt (C_{org}) und die Trockenrohdichte (dB) vergleichsweise hohe signifikante Korrelationen mit der Höhe über NN (H ; $r = -0,582$, bzw. $0,538$), der Hangneigung (β ; $r = -0,669$, bzw. $0,611$), der Höhe über der Tiefenlinie (H_{Ch} ; $r = -0,640$, bzw. $0,584$), dem Wetness Index (w ; $0,699$, bzw. $-0,674$) und dem LS-Faktor (LS ; $-0,591$, bzw. $0,520$) auf. Wobei die negativen Korrelationen zwischen dem C_{org} -Gehalt und genannten Reliefparametern auf geringere Gehalte in höher gelegenen Bereichen, bzw. höhere in Hangfußpositionen und feuchteren Senken schließen lassen. Der Zusammenhang der Trockenrohdichte stellt sich dagegen in umgekehrter Weise dar, auf dessen hohen Zusammenhang mit dem C_{org} -Gehalt wurde bereits im vorigen Kapitel hingewiesen.

Die Korrelationskoeffizienten zwischen den Korngrößen und den Reliefparametern fallen dagegen deutlich geringer aus. So sind für den Ton- und den Sandgehalt nur schwache signifikante Korrelationen mit der Höhe über NN (H ; $r = -0,324$, bzw. $0,250$), der Hangneigung (β ; $r = -0,276$, bzw. $0,280$), der Höhe über der Tiefenlinie (H_{Ch} ; $r = -0,373$, bzw. $0,345$) und dem Wetness Index (w ; $r = 0,338$, bzw. $-0,318$) zu verzeichnen. Dabei deuten die negativen Korrelationen zwischen dem Tongehalt und den Reliefparametern auf höhere Tonanteile in schwach geneigten und tiefergelegenen Bereichen hin, während höhere Sandgehalte allerdings mit schwächeren Korrelationskoeffizienten in höher gelegenen, stärker geneigten Re-

lieflpositionen verbreitet sind. Das gegenläufige Verhältnis der Ton- und Sandgehalte zu den Reliefparametern ist möglicherweise als Resultat erosiver Umlagerungsprozesse zu deuten, wobei die Bestandteile der Sandfraktion in Folge nicht ausreichender Transportkraft des oberflächlich abfließenden Wassers respektiv am Standort angereichert werden, während das Feinmaterial hangabwärts verlagert wird (vgl. LI und LINDSTRÖM, 2001). Andererseits führt der Abtrag an Parabraunerde tragenden Hängen dazu, dass der mit Ton angereicherte Bt-Horizont an die Oberfläche gelangt und sich damit gegensätzlich auf den Zusammenhang mit den Reliefparametern auswirkt. Für die Schlufffraktion ergeben sich mit Ausnahme der Vertikalwölbung (C_v ; $r = 0,185$) keine signifikanten Korrelationen. Die ohnehin geringe Variabilität des Schluffgehaltes (vgl. Kapitel 4.1.1) lässt fast keine Abhängigkeit vom Relief erkennen.

Für die Bodenhaushaltsparameter sind die höchsten Korrelationen mit den Reliefparametern Höhe über NN (H), der Hangneigung (β), der Höhe über der Tiefenlinie (H_{Ch}) und dem Wetness Index zu verzeichnen. Sie folgen den jeweils zu Grunde liegenden Eingangsparametern. Die sinkenden Korrelationskoeffizienten des Retentionsvermögens bei zunehmender Saugspannung sind auf die zunehmende Einflussnahme der Tongehalte zurückzuführen, deren Zusammenhang mit dem Relief schwächer ausgeprägt ist, als der der ebenfalls in die Berechnung eingehenden Parameter organischer Kohlenstoff (C_{org}) und der Trockenrohdichte (dB).

Insgesamt sind vor allem die über die Abflusswege berechneten sekundären Reliefparameter wie die Höhe über der Tiefenlinie (H_{Ch}) und der Wetness Index (w) hervorzuheben. Wenn Zusammenhänge zwischen den Bodeneigenschaften und den Reliefattributen in Erscheinung treten, sind mit ihnen die höchsten Korrelationskoeffizienten zu verzeichnen. Ähnliche Ergebnisse gehen aus Untersuchungen von SUMFLETH & DUTTMANN (2007), IQBAL ET AL. (2005), GESSLER ET AL. (1995 und 2000) und MOORE ET AL. (1993) hervor.

Bei den anschließend durch schrittweise multiple Regressionen aufgestellten Modellgleichungen geht zumeist der Wetness Index als alleinige erklärende unabhängige Variable ein (vgl. Tab. 4.3). Ausnahmen ergeben sich lediglich für den Ton- und Schluffgehalt, bei denen der

Tabelle 4.3: Parameter der schrittweisen multiplen Regression zwischen den Eigenschaften des Oberbodens und den Reliefparametern für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese ($n = 117$)

Bodenparameter	b (Reliefparameter)			Gleichungsparameter	
	C_v	CDI	w	a	R^2
Tongehalt [Gew.-%]	-	0,060	1,243	10,313	0,308
Schluffgehalt [Gew.-%]	429,829	-	-	32,327	0,039
Sandgehalt [Gew.-%]	-	-	-1,210	57,128	0,234
C_{org} -Gehalt [Gew.-%]	-	-	0,228	-0,377	0,385
Rohdichte, tro. [$g \cdot cm^{-3}$]	-	-	-0,032	1,772	0,468
Ld_{eff} [$g \cdot cm^{-3}$]	-	-	-0,023	1,884	0,427
KAK_{pot} [$cmol_c \cdot kg^{-1}$]	-	-	1,440	6,129	0,393
KAK_{eff} [$cmol_c \cdot kg^{-1}$]	-	-	0,830	7,391	0,358
Ret. pF_{FK} [Vol.-%]	-	-	0,991	27,575	0,444
Ret. pF_{nFK} [Vol.-%]	-	-	1,069	20,629	0,397
Ret. pF_{PWP} [Vol.-%]	-	-	1,045	7,391	0,356

C_v = vertikale Wölbung, CDI = Konvergenz/Divergenz-Index, w = Wetness Index, a = Achsenabschnitt, R^2 = Bestimmtheitsmaß der Regression.

Konvergenz/Divergenz Index (*CDI*), bzw. die vertikale Wölbung (C_v) Eingang finden. Der höchste Anteil erklärter Varianz ergibt sich für die Trockenrohddichte (*dB*) mit 46,8 %, gefolgt vom Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) mit 38,5 %. Geringere Erklärungsgehalte ergeben sich für die Korngrößen mit 30,8 % für den Ton- und 23,4 % für den Sandgehalt. Die Schlufffraktion zeigt dagegen mit dem geringsten Bestimmtheitsmaß der Regression von $R^2 = 0,039$ keinen oder einen nur sehr geringen Zusammenhang mit dem Relief. Gemäß den vorliegenden Ergebnissen ist ein Teil der räumlichen Variabilität der Bodeneigenschaften auf dem Schlag allein mit genannten Reliefparametern, vor allem dem Wetness Index, zu erklären. Damit eignen sie sich in bevorzugter Weise als Co-Variablen für die Regionalisierung der Bodeneigenschaften im Untersuchungsraum.

4.1.3 Die Beziehung zwischen den bodenhaushaltlichen Eigenschaften und den Vegetationsindizes

Neben der Nutzung von Reliefinformationen wurden vielfach aus Fernerkundungsdaten abgeleitete Vegetationsindizes als weitere Sekundärinformation in Regionalisierungsmodelle zur Vorhersage von Bodeneigenschaften eingebunden (vgl. DOBOS ET AL., 2000 und BISHOP & MCBRATNEY, 2001, SCHMIDHALTER & SELIGE, 2002 SCHMIDHALTER ET AL., 2004 und SUMFLETH & DUTTMANN, 2007). Prinzipiell kann durch Fernerkundungsinformationen die räumlich differenzierte Verteilung der biotischen Wuchsleistung erfasst werden, welche zu einem gewissen Grad auf die nährstoff- und wasserhaushaltlichen Eigenschaften des Bodens zurückgehen (vgl. REUTER, 2004 und SCHMIDHALTER, SELIGE & BOBERT, 2004). Entsprechend werden in der vorliegenden Untersuchung nicht einzelne Bodenbasisparameter, sondern die über Pedotransferfunktionen abgeleiteten Bodenhaushaltsgrößen der potenziellen und effektiven Kationenaustauschkapazität, sowie dem Retentionsvermögen bei Feldkapazität, nutzbarer Feldkapazität und dem permanenten Welkepunkt (vgl. Kapitel 3.2.1.3) in Beziehung zu den Vegetationsindizes gesetzt.

Im Verlauf des betrachteten Zeitraumes wies der Schlag in den Jahren 2002 und 2003 keine einheitliche Bewirtschaftung auf, sodass die betreffenden Fernerkundungsinformationen getrennt zu betrachten sind, da unterschiedliche feldfruchtspezifische Entwicklungsstadien und Biomasseaufkommen keinen direkten Vergleich erlauben. Folglich gehören 66 Standorte dem größeren westlichen Teil des Schlages an, auf dem in der Anbauperiode 2001/2002 Triticale und 2002/2003 Winterraps angebaut wurde. Die restlichen 51 Punkte entfallen auf den östlichen Bereich des Schlages, der weiterhin mit Winterweizen bestellt war. Gründe für die veränderte Fruchtfolge liegen in der nachlassenden Ertragsleistung nach 5-jähriger Winterweizen-Monokultur. Aufgrund der Vernässungsneigung des tiefer gelegenen östlichen Teilbereichs wurde hier dagegen die Winterweizen-Monokultur fortgeführt, da Winterweizen toleranter auf hohe Bodenfeuchte reagiert und damit das Anbaurisiko gegenüber den sonst üblichen Feldfrüchten geringer ist (mündliche Mitteilung von Wolfgang Kniep, Betriebsleiter der BBH Landwirtschaftliche Betriebsgemeinschaft GbR am Gut Schönhagen am 22.01.2007).

4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten

Zur Quantifizierung des linearen Zusammenhanges zwischen den Bodenhaushaltsparametern und den Vegetationsindizes wurden anhand der Punktdatensätze zunächst Korrelationskoeffizienten nach SPEARMAN berechnet. Im Ergebnis liegen durchweg nur schwache bis mittlere Korrelationskoeffizienten vor (vgl. Tab. 4.4). Im Vergleich der Vegetationsindizes sind gleiche Tendenzen und nur marginale Unterschiede im Promille-Bereich bei den Korrelationskoeffizienten zu verzeichnen, weshalb bei der weiteren Betrachtung lediglich der NDVI Berücksichtigung findet. Ein gleicher Befund geht aus Untersuchungen der GAF (1999) hervor, bei denen u.a. die hier verwendeten Vegetationsindizes zur Ableitung der räumlichen Variabilität von Bestandesparametern zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Bestandesentwicklung genutzt wurden. Der Erwartung, dass steigende Werte der bodenhaushaltlichen Kennwerte positive Auswirkungen auf den Pflanzenwuchs durch einen positiven linearen Zusammenhang mit dem NDVI und dem SAVI (beim SR einen negativen) zum Ausdruck kommen, wird nur in den Szenen der Jahre 2000 und 2001 entsprochen. Die höchsten Korrelationen sind zwischen dem NDVI der Landsat-Szene vom 11.05.2001 und der potenziellen Kationenaustauschkapazität ($r = 0,446$) und dem Retentionsvermögen bei Feldkapazität ($r = 0,493$) zu verzeichnen. Für die Szenen der Jahre 2002 und 2003 stellt sich der beschriebene Zusammenhang in umgekehrter Weise mit einem linearen negativen Zusammenhang und überwie-

Tabelle 4.4: Zusammenhang zwischen den Bodenhaushaltsparametern und den Vegetationsindizes für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese ($n = 117$)

Fernerkundungssystem	Aufnahmedatum	Anzahl n; Feldfrucht	Vegetationsindex	Bodenhaushaltsparameter				
				KAK _{pot} [cmol _c ·kg ⁻¹]	KAK _{eff} [cmol _c ·kg ⁻¹]	Retentionsvermögen [Vol.-%] bei FK	nFK	PWP
Landsat 7 ETM+	15.05.2000	n = 117; WW	SR	-0,338**	-0,309**	-0,383**	-0,335**	-0,299**
			NDVI	0,344**	0,315**	0,389**	0,342**	0,305**
			SAVI	0,343**	0,314**	0,388**	0,341**	0,304**
CIR-Luftbild	10.05.2001	n = 117; WW	SR	-0,300**	-0,297*	-0,340**	-0,304**	-0,286**
			NDVI	0,325**	0,324**	0,361**	0,329**	0,312**
			SAVI	0,324**	0,323**	0,361**	0,329**	0,312**
Landsat 7 ETM+	11.05.2001	n = 117; WW	SR	-0,419**	-0,401**	-0,464**	-0,420**	-0,393**
			NDVI	0,446**	0,429**	0,493**	0,450**	0,421**
			SAVI	0,445**	0,429**	0,493**	0,449**	0,421**
Spot 4	09.05.2002	n = 66; Tri n = 51; WW	SR	0,306*	0,367**	0,191	-0,365**	0,349**
			NDVI	-0,307*	-0,369**	-0,187	-0,365**	-0,352**
			SAVI	-0,307*	-0,369**	-0,187	-0,364**	-0,352**
Landsat 7 ETM+	06.06.2002	n = 66; Tri n = 51; WW	SR	0,311*	0,341**	0,201	0,357**	0,343**
			NDVI	-0,310*	-0,340**	-0,198	-0,355**	-0,343**
			SAVI	-0,311*	-0,341**	-0,198	-0,356**	-0,343**
Aster TERRA	22.06.2003	n = 66; WR n = 51; WW	SR	0,245*	0,287*	0,187	0,284*	0,298*
			NDVI	-0,241	-0,282*	-0,186	-0,280*	-0,293*
			SAVI	-0,241	-0,282*	-0,186	-0,280*	-0,292*
				-0,369**	-0,305*	-0,283*	-0,329*	0,346*

Korrelationskoeffizienten nach SPEARMAN ; **zweiseitiges Signifikanzniveau von 99%, * von 95%, SR = Simple Ratio, NDVI = Normalized Difference Vegetation Index, SAVI = Soil Adjusted Vegetation Index, WW = Winterweizen, Tri = Triticale, WR = Winterraps.

gend geringeren Korrelationskoeffizienten dar. Verdeutlicht werden kann dies durch einen beispielhaften visuellen Vergleich der Landsat-Szene vom 11.05.2001 mit der Spot-Szene vom 09.05.2002 (Abb. 4.3). Während in der linken Darstellung hohe NDVI-Werte in niederen Lagen und wenig geneigten Flächen auszumachen sind,

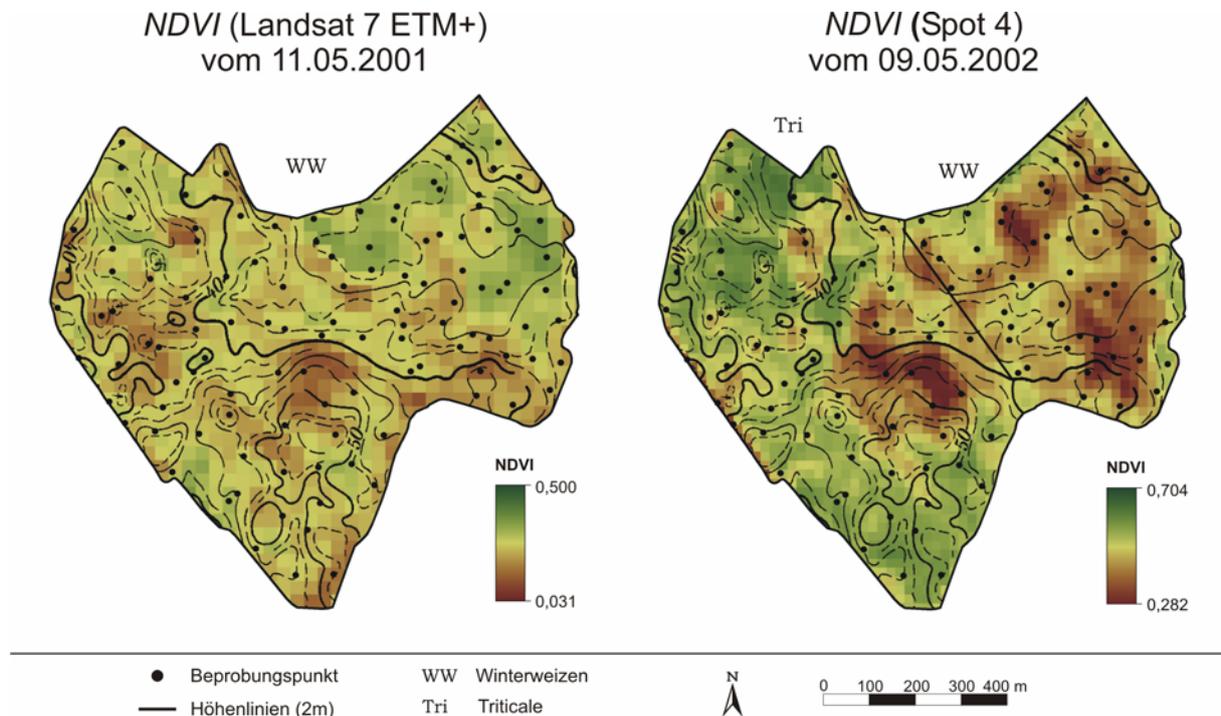


Abbildung 4.3: Räumliche Verteilung des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) der Landsat 7 ETM+ – Szene vom 11.05.2001 und der Spot 4 – Szene vom 09.05.2002 auf dem Schlag Sandkamp/Wiese

weisen die gleichen Bereiche in der Spotszene vor allem im östlichen Teil innerhalb der mit Winterweizen bestellten Fläche relativ geringere Werte auf. Im Gegensatz dazu treten in beiden Szenen stärker reliefierte Hang- und Kuppenlagen deutlich und konstant mit niedrigerem NDVI hervor, was bei allen eingehenden Szenen zu beobachten ist.

Die Szenen der Jahre 2000/2001 und 2002/2003 zeigen also eine deutlich voneinander abweichende Verteilung des NDVI, was sich in den Korrelationen widerspiegelt. Als Ursache hierfür sind witterungsbedingte Ausfälle in den zur Vernässung neigenden abflusslosen Senken und Tiefenbereichen in den Anbauperioden 2001/2002 und 2002/2003 zu nennen. Die mit 262 mm überdurchschnittlich hohen Niederschläge (133,9 mm im 30 jährigen Mittel, DWD) in den Monaten Januar und Februar des Jahres 2002 (vgl. Abb. 4.4) führten zu massiven Ausfällen der im Überwinterungszustand befindlichen Bestände. Die darauffolgenden Satellitenbildaufnahmen im Mai (Spot 4) und im Juni (Landsat) indizieren, dass die schlechten, extrem nassen winterlichen Bedingungen in der Folgezeit nicht kompensiert werden konnten.

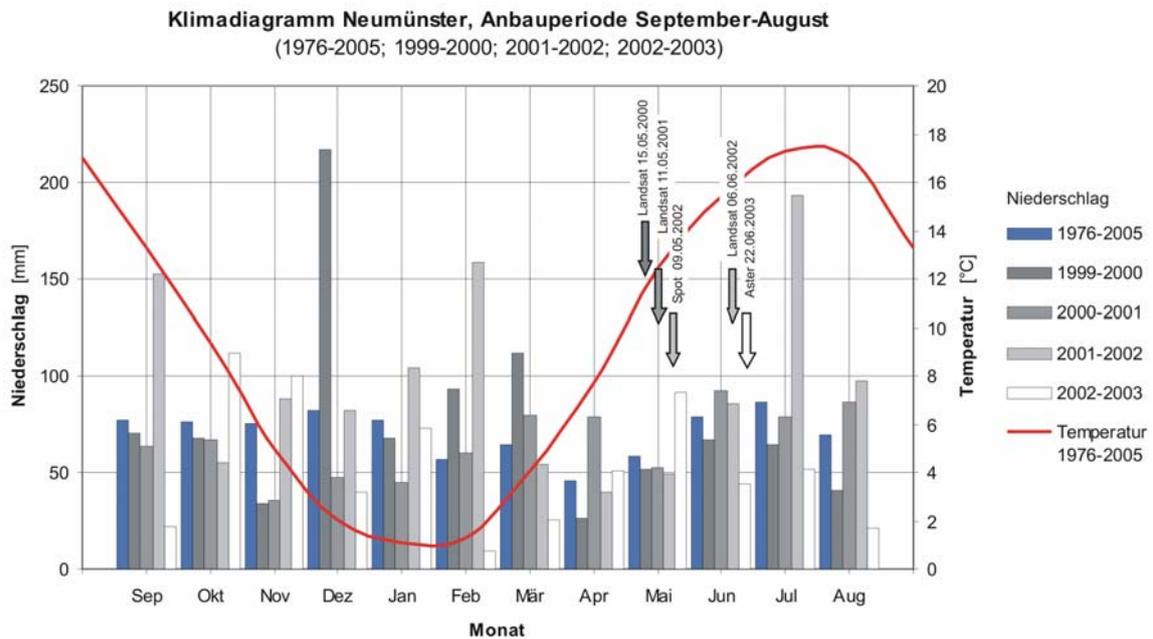


Abbildung 4.4: Monatliche Niederschlagssummen der Klimastation Neumünster über die Anbauperioden (Datenquelle: DWD)

Die in gleicherweise auffallende NDVI- Verteilung der Aster-Szene vom 22.06.2003 ist auf ein Niederschlagsereignis im November 2002 zurückzuführen, bei dem in wenigen Tagen 80 mm Niederschlag fielen. In dessen Folge kam es erneut zu einem geringeren Aufkommen des Pflanzenwachstums durch Vernässung der Senkenbereiche (mündliche Mitteilung von Wolfgang Kniep). Ähnliche Beobachtungen machten PILESJÖ ET AL. (2000) und KRAVCHENKO ET AL. (2000). Sie untersuchten den Zusammenhang zwischen dem Relief und der Ertragsverteilung von Winterweizen zur Ableitung landwirtschaftlicher Managementzonen und kamen zu dem Schluss, dass schwach geneigte und tiefergelegene Bereiche in ihrem Untersuchungsgebiet in der Regel höhere Erträge aufweisen, wohingegen in feuchteren Jahren in gleichen Positionen reduzierte Erträge festzustellen sind.

Zur Überprüfung des Zusammenhanges zwischen dem NDVI der Szenen und den Reliefparametern wurden Korrelationskoeffizienten nach SPEARMAN berechnet. Im Ergebnis zeigen die Koeffizienten der Szenen aus den Jahren 2000 und 2001 schwache bis mittlere Koeffizienten (vgl. Tab.4.5). Höchste signifikante Zusammenhänge werden mit den Reliefparametern der Höhe über NN (H ; $r = -0,514$), der Hangneigung (β ; $r = -0,490$), der Höhe über der Tiefenlinie (H_{Ch} ; $r = -0,521$) und dem Wetness Index (w ; $r = 0,546$) erreicht. Daraus geht hervor, dass höhere NDVI-Werte in tiefergelegenen, wenig geneigten Bereichen zu verzeichnen sind, geringere hingegen in stärker reliefierten. Dabei tritt der westliche Teil ($n = 66$) mit häufig schwächeren signifikanten Korrelationskoeffizienten gegenüber dem östlichen Teil ($n = 51$) in Erscheinung.

4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten

Tabelle 4.5: Zusammenhang zwischen den Reliefparametern und dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)

NDVI	Reliefparameter									
	<i>H</i>	β	<i>C_v</i>	<i>C_h</i>	<i>CDI</i>	<i>A_s</i>	<i>H_{ch}</i>	<i>w</i>	Ω	<i>LS</i>
Landsat 7 ETM+ 15.05.2000 n = 117 / 66 / 51	-0,514*	-0,490**	-0,167	-0,100	-0,245**	-0,292**	-0,521**	0,546**	-0,107	-0,387**
	-0,326**	-0,238	-0,168	-0,171	-0,221	-0,141	-0,291*	0,326**	0,005	-0,152
	-0,344**	-0,278*	-0,379**	0,037	-0,254	-0,358**	-0,358**	0,409**	0,170	0,033
CIR-Luftbild 10.05.2001 n = 117 / 66 / 51	-0,235**	-0,258**	-0,210*	-0,265**	-0,267**	-0,298**	-0,305**	0,408**	0,081	-0,157
	-0,034	-0,111	-0,242	-0,275*	-0,429**	-0,303**	-0,109	0,375**	0,087	0,000
	-0,017	-0,060	-0,337*	-0,350*	-0,075	-0,175	-0,207	0,207	0,295*	0,153
Landsat 7 ETM+ 11.05.2001 n = 117 / 66 / 51	-0,336**	-0,328**	-0,129	-0,066	-0,186*	-0,209*	-0,352**	0,405**	0,005	-0,221*
	-0,141	-0,133	-0,006	-0,004	-0,171	-0,131	-0,143	0,221	-0,016	-0,038
	-0,354**	-0,268	-0,366**	-0,187	-0,150	-0,229	-0,309*	0,383**	0,223	0,075
Spot 4 09.05.2002 n = 66 / 51	0,155	0,018	-0,087	-0,058	-0,110	0,113	0,154	0,016	0,076	0,066
	-0,108	0,068	-0,099	0,089	-0,152	-0,052	0,080	-0,033	0,063	0,132
Landsat 7 ETM+ 06.06.2002 n = 66 / 51	0,218	-0,011	-0,032	0,041	-0,055	0,113	0,239	0,045	0,000	0,010
	-0,354*	-0,226	-0,187	-0,010	-0,102	-0,176	-0,205	0,177	-0,096	-0,193
Aster TERRA 22.06.2003 n = 66 / 51	0,089	0,039	-0,038	0,113	0,092	0,161	0,141	-0,110	-0,005	0,004
	0,188	-0,013	-0,175	-0,233	0,073	-0,017	-0,094	-0,058	-0,135	-0,079

Korrelationskoeffizienten nach SPEARMAN; **zweiseitiges Signifikanzniveau von 99%, * von 95%, *H* = Höhe über NN, β = Hangneigung, *C_v* = vertikale Wölbung, *C_h* = horizontale Wölbung, *CDI* = Konvergenz/Divergenz Index, *A_s* = spezifisches Einzugsgebiet, *H_{ch}* = Höhe über Tiefenlinie, *w* = Wetness Index, Ω = Streampower Index, *LS* = LS-Faktor.

Die Begründung hierfür liegt in der dort kleinräumig stärker variierenden Reliefstruktur (vgl. Abb. 4.2), wohingegen die geometrische Auflösung von 30 m der Landsat-Szenen eine Glättung der real kleinräumigeren Variabilität der Biomassenverteilung nach sich zieht. Der Vergleich der nahezu zum gleichen Zeitpunkt aufgenommenen Landsat-Szene (11.05.2001) mit dem höchstauflösenden CIR-Luftbild (10.05.2001) verdeutlicht dies. Während zwischen dem NDVI des CIR-Luftbildes und den lokalen Reliefparametern Konvergenz/Divergenz Index (vor allem im westlichen Teilbereich des Schlages) und der horizontalen Wölbung schwache bis mittlere Korrelationskoeffizienten auftreten, ergeben sich für die Landsat-Szene so gut wie keine signifikanten Korrelationen. Im Gegensatz zum Satellitenbild werden durch das digitale Geländemodell mit einer Auflösung von 12,5 m auch kleinere Senken abgebildet. Die durch die kleinräumig variierende Reliefstruktur hervorgerufene Variabilität der Bestandeseigenschaften kann mit dem Luftbild erfasst werden. Folglich gehen auch aus den Korrelationen mit genannten lokalen Reliefparametern signifikante Beziehungen hervor.

Die gesamtheitlich gegenüber denen der Bodeneigenschaften (vgl. Tab. 4.4) höher ausfallenden Zusammenhänge legen den Schluss nahe, dass die räumliche Verteilung des NDVI zu den betrachteten Zeitpunkten stärker durch das Relief, als durch die Bodeneigenschaften bestimmt wird. In Jahren witterungsbedingter Vernässung abflussloser und tiefergelegener Bereiche wirkt das Relief noch bestimmender. Statistisch äußert sich dies darin, dass mit einer Ausnahme keine signifikanten Korrelationskoeffizienten für die Szenen der Jahre 2002/2003 auftreten, wohingegen die Bodenparameter gar negative Korrelationen aufweisen. Die Ursache hierfür liegt in der Überlagerung zweier Effekte. Einerseits sorgen die grundsätzlich für das Pflanzenwachstum schlechteren, durch Erosion geprägten und schneller entwässernden

Standorte in stärker geneigten Hang- und Kuppenlagen (vgl. Kapitel 4.1.2) für ein konstant geringeres Wachstum über die gesamte Anbauperiode hinweg, während andererseits kurzzeitige Überstauungen in Geländesenken und schwach geneigten Bereichen durch hohe saisonale Niederschläge zu reduziertem, in der Folgezeit nicht zu kompensierenden Wachstumshemmungen führen.

Da wie gezeigt das Relief für die NDVI-Verteilungen der Szenen der Jahre 2002 und 2003 als hauptverantwortlich zu zeichnen ist, wurden sie bei der folgenden Aufstellung der Regressionsmodelle nicht berücksichtigt. Überdies ging bezüglich genannter Satellitenbild-Szenen ein negativer linearer Zusammenhang aus der Korrelation zwischen dem NDVI mit den bodenhaushaltlichen Parametern hervor, der in keiner Weise als plausibel oder begründbar zu bewerten ist.

Die Ergebnisse der einfachen linearen Regression zwischen dem NDVI und den Bodenhaus-haltsparemtern zeigen mit höchsten Bestimmtheitsmaßen von $R^2 = 0,199$ für die potenzielle Kationenaustauschkapazität und $R^2 = 0,243$ für das Retentionsvermögen bei Feldkapazität nur vergleichsweise geringe Erklärungsanteile an der Varianz (vgl. Tab. 4.6). Die durchweg höchsten Bestimmtheitsmaße gehen aus der Regression mit dem NDVI der Landsat-Szene vom 11.05.2001 hervor.

Tabelle 4.6: Parameter der einfachen linearen Regression zwischen den Bodenhaus-haltsparemtern und dem NDVI für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)

Bodenparameter	Landsat TM	CIR-Luftbild	Landsat TM	Gleichungs-	
	15.05.2000	10.05.2001	11.05.2001	parameter	
	<i>b</i> (NDVI)			<i>a</i>	R^2
KAK _{pot} [cmol _c *kg ⁻¹]	83,669	-	-	-16,683	0,118
	-	15,032	-	8,086	0,105
KAK _{eff} [cmol _c *kg ⁻¹]	46,283	-	46,756	6,590	0,199
	-	9,045	-	-4,997	0,099
Ret. pF _{FK} [Vol.-%]	61,255	-	27,150	8,207	0,105
	-	10,822	-	7,597	0,184
Ret. pF _{nFK} [Vol.-%]	61,495	-	-	10,113	0,151
	-	11,244	-	28,527	0,130
Ret. pF _{PWP} [Vol.-%]	56,535	-	33,467	27,508	0,243
	-	11,013	-	3,841	0,117
	-	-	34,836	22,017	0,108
	-	-	-	20,939	0,202
	-	-	-	-7,435	0,093
	-	-	-	8,722	0,097
	-	-	33,650	7,805	0,177

NDVI = Normalized Difference Vegetation Index, *b* = Regressionskoeffizient, *a* = Achsenabschnitt, R^2 = Bestimmtheitsmaß der Regression.

Die anschließend durchgeführte schrittweise multiple Regression zwischen den Bodenhaus-haltsparemtern und den Reliefparametern unter Hinzufügen des NDVI als weitere erklärende Co-Variable führt nur zu geringen Verbesserungen der Erklärungsgehalte für die Zielvariablen (vgl. Tab. 4.3 und 4.7). Mit einer erklärten Varianz von 42,7 % für die potenzielle Kationenaustauschkapazität und 49,2 % für das Retentionsvermögen bei Feldkapazität sind unter Integration des NDVI der Landsat-Szene vom 11.05.2001 Verbesserungen von 3,4 % bzw.

4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten

Tabelle 4.7: Parameter der schrittweisen multiplen Regression zwischen den Bodenhaushaltsparametern, den Reliefparametern und dem NDVI für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)

Bodenparameter	Reliefparameter	Landsat TM 15.05.2000	CIR-Luftbild 10.05.2001	Landsat TM 11.05.2001	Gleichungsparameter	
	<i>b</i> (<i>w</i>)	<i>b</i> (NDVI)			<i>a</i>	<i>R</i> ²
KAK _{pot} [cmol _c *kg ⁻¹]	1,427	2,646	-	-	5,084	0,393
	1,355	-	4,378	-	3,387	0,400
	1,227	-	-	21,866	1,788	0,427
KAK _{eff} [cmol _c *kg ⁻¹]	0,836	-1,199	-	-	7,864	0,358
	0,772	-	2,973	-	5,528	0,368
	0,705	-	-	12,854	4,839	0,391
Ret. pF _{FK} [Vol.-%]	0,955	7,015	-	-	24,804	0,445
	0,921	-	3,580	-	25,333	0,456
	0,828	-	-	16,667	24,266	0,492
Ret. pF _{nFK} [Vol.-%]	1,064	1,057	-	-	20,211	0,397
	1,005	-	3,346	-	18,533	0,405
	0,910	-	-	16,377	17,377	0,433
Ret. pF _{PWP} [Vol.-%]	1,064	-3,924	-	-	8,941	0,356
	0,981	-	3,304	-	5,322	0,363
	0,893	-	-	15,53	4,308	0,386

w = Wetness Index, NDVI = Normalized Differenz Vegetation Index, *b* = Regressionskoeffizient, *a* = Achsenabschnitt, *R*² = Bestimmtheitsmaß der Regression.

4,8 % zu verzeichnen. Der Einsatz der Szene aus dem Jahr 2000 führt dagegen zu keiner Erhöhung der Bestimmtheitsmaße der Regression, mit dem CIR-Luftbild liegen geringere Verbesserungen vor.

Damit konnte gezeigt werden, dass die Variabilität der aus Pedotransferfunktionen abgeleiteten Bodenhaushaltsparameter durch den Einsatz von aus Fernerkundungsdaten berechneten NDVI ergänzend zu den Reliefparametern zu einem erhöhten Grad erklärt werden kann. Gültigkeit besitzt diese Aussage allerdings nur für die Aufnahmen aus dem Jahr 2001 innerhalb der in die Untersuchung einbezogenen Fernerkundungsdaten von vier Jahren. Die berechneten Bodenhaushaltsparameter kommen evtl. erst zu einem späteren Zeitpunkt der Bestandesentwicklung zum Tragen, etwa in der sommerlichen Reifephase, da dann die Vegetation bei höheren Evapotranspirationsraten verstärkt auf den Bodenwasserspeicher, insbesondere in trockenen Jahren, zugreift. JÜRSCHIK (1999) stellt in diesem Zusammenhang heraus, dass die räumliche Variabilität der Ertragsleistung bereits in frühen Phasen der Bestandesentwicklung über Fernerkundungsinformationen zu detektieren ist. Selbstverständlich sind z. B. witterungsbedingte Extremereignisse oder starker Schädlingsbefall auszuschließen. Grundsätzlich konnte über ein „state-space-model“ (WENDROTH ET AL. 1992 und 1997) mit hoher Sicherheit eine räumliche Abhängigkeit und Kohärenz von Ertrag und NDVI innerhalb eines Schlages festgestellt werden.

Wie dargestellt, kann dies innerhalb der vorliegenden Untersuchung nur für Teilbereiche des Schlages gelten. Die hier verwendeten Fernerkundungsinformationen sind nicht ausreichend, um sichere durchschnittliche Verteilungsmuster des Wuchspotenzials zu identifizieren. Neben Informationen zum Management und der Bestandesentwicklung bedarf es zeitlich höher aufgelöster und lückenloser Fernerkundungsinformationen, um „normale“, durchschnittliche Be-

standesentwicklungen abzuleiten. Nur so ist ein sicherer räumlicher Bezug zu den vergleichsweise langsam veränderlichen Boden- und Reliefeigenschaften zu quantifizieren.

4.1.4 Ergebnisse der Interpolationsverfahren

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der auf Grundlage des vorliegenden Punktdatensatzes von $n = 117$ erfolgten räumlichen Interpolationsverfahren vorgestellt (vgl. Kapitel 3.4.2 – 3.4.4).

Das deterministische **Inverse Distance Weighting** Verfahren (IDW) basiert auf der Annahme, dass jeder gemessene Punkt einen lokalen, statistischen Einfluss auf seine Umgebung hat, der mit zunehmender Entfernung abnimmt. Entscheidend beeinflusst wird das Interpolationsergebnis durch den Gewichtung- oder Powerfaktor „ p “ (vgl. Kapitel 3.4.2). Die optimierten Gewichtungsfaktoren für die einzelnen interpolierten Bodenparameter sind neben dem aus der Kreuzvalidierung berechneten „mean absolute error“ (MAE) und dem „root mean square error“ (RMSE) für den später folgenden Vergleich der Modellergebnisse auf Grundlage der angewandten Methoden der Tabelle 4.8 zu entnehmen. Der Gewichtungsparameter „ p “ variiert zwischen 1,51 für den Schluffgehalt und 3,00 für die Trockenrohdichte. Höhere Gewichtungsfaktoren implizieren dabei eine räumlich weiter reichende Ähnlichkeit der Werteausprägung als geringere. Die durchschnittliche absolute Abweichung zwischen den gemessenen und ge-

Tabelle 4.8: Gewichtungsfaktor „ p “ und Ergebnisse der Kreuzvalidierung der auf Grundlage des IDW-Verfahrens interpolierten Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese ($n = 117$)

	Bodenparameter										
	T [Gew.-%]	U [Gew.-%]	S [Gew.-%]	C _{org} [Gew.-%]	dB [g*cm ⁻³]	Ld _{eff} [g*cm ⁻³]	KAK _{pot} [cmol _c *kg ⁻¹]	KAK _{eff} [cmol _c *kg ⁻¹]	Ret.verm. [Vol.-%] bei FK	nFK	PWP
Power p	1,95	1,51	2,12	2,73	3,00	2,62	2,70	2,50	2,99	2,79	2,47
MAE	3,77	3,49	5,16	0,44	0,08	0,07	2,97	2,14	2,00	2,32	2,62
RMSE	5,25	4,80	7,31	0,78	0,10	0,09	4,69	3,13	2,88	3,41	3,93

MAE = mean absolute error, RMSE = root mean square error.

geschätzten Werten für die Korngrößenklassen liegen zwischen 5,16 % für den Sand- und 3,49 % für den Schluffgehalt. Die Interpolationsergebnisse des organischen Kohlenstoffgehaltes und der Trockenrohdichte ergeben mittlere Abweichungen von 0,44 %, bzw. 0,08 %. Der geringere MAE der effektiven gegenüber der potenziellen Kationenaustauschkapazität ist überwiegend auf die entsprechend geringeren absoluten mittleren Werte zurückzuführen. Die zunehmende mittlere Schätzabweichung des Retentionsvermögens bei höherer Saugspannung hingegen, lässt auf eine Zunahme der Schätzvarianz schließen, da zugleich die absoluten mittleren Werte sinken (vgl. Tab. 4.1 und 4.8).

Geostatistische Verfahren beruhen auf der Quantifizierung räumlicher Autokorrelationen der Variablen. Deren Ermittlung erfolgt durch die Erstellung eines experimentellen Semivariogramms, das zum Einsatz für die Kriginginterpolation an ein theoretisches Variogramm anzupassen ist (Kapitel 3.4.3). Da die Erstellung eines optimalen Schätzers eine Normalverteilung der Eingangsvariablen voraussetzt (vgl. HEINRICH, 1994, WACKERNAGEL, 2003 und

WEBSTER & OLIVER, 2004), wurde zunächst der Kolmogorov-Smirnov Test auf Normalverteilung durchgeführt. Falls eine erhebliche Abweichung der Verteilung von der Normalverteilung vorlag, erfolgte eine entsprechende Transformation. In vielen Fällen herrschte eine „Linksschiefe“ der Normalverteilungskurve vor, die durch Logarithmieren der entsprechenden Variablen zur Basis 10 (lg) beseitigt werden konnte. Ansonsten lagen die Daten annähernd normalverteilt vor, eine Mehrgipfeligkeit, die eine Auftrennung des vorliegenden Datensatzes erfordert hätte, war nicht zu verzeichnen. Die Ergebnisse der Variogrammanalyse sind in der Abbildung 4.5 dargestellt. Zur Anpassung der experimentellen Variogramme wurden für alle Variablen sphärische Modelle gewählt. Die Anpassung des Kurvenverlaufs erfolgte über die kleinsten Abweichungsquadrate mit dem „Indicative Goodness of Fit“ (PANNATIER, 1996). Im Hinblick auf die Güte der räumlichen Autokorrelationen der Variablen sollte die

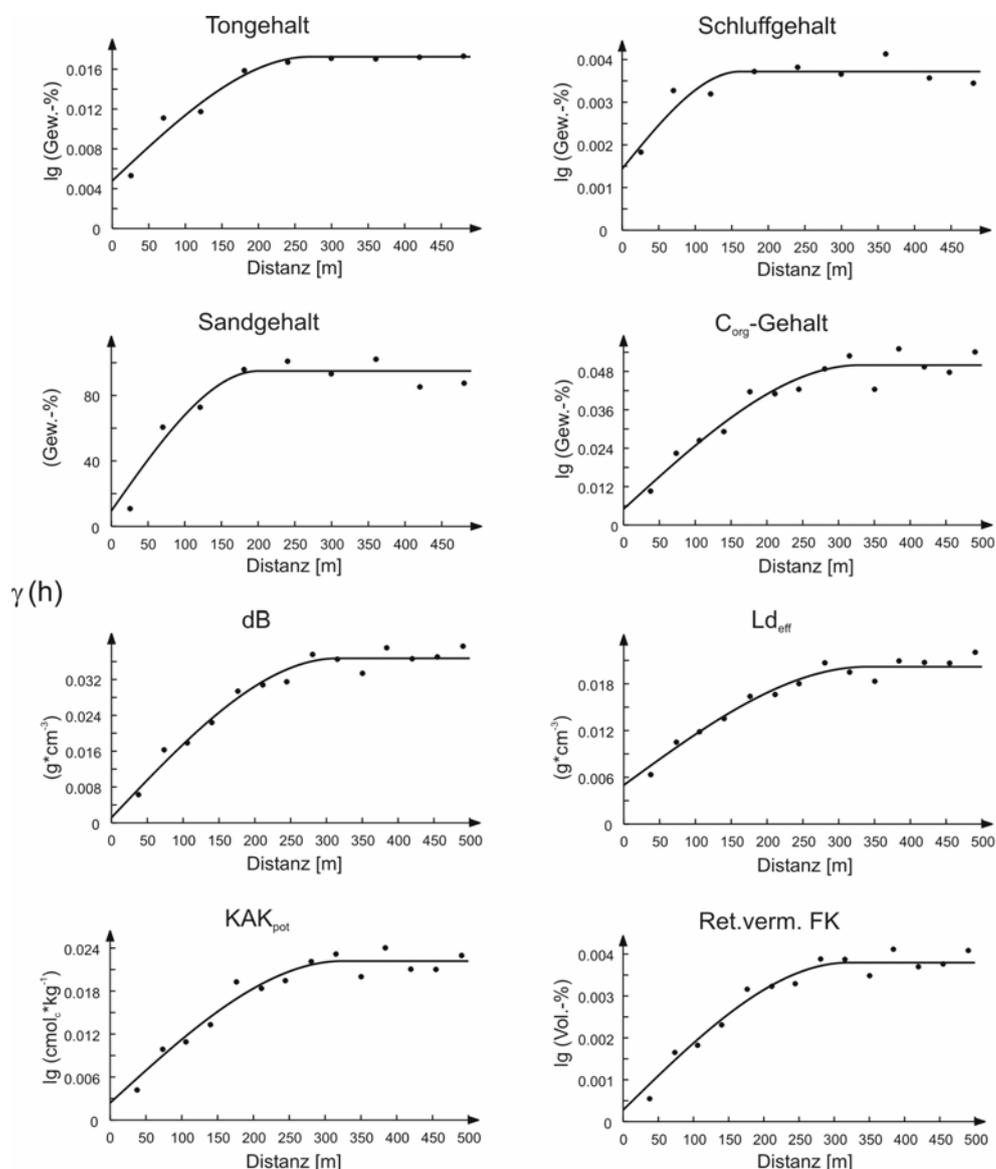


Abbildung 4.5: Ausgewählte sphärische Variogramme der Bodeneigenschaften für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese ($n = 117$)

Nuggetvarianz des Variogramms deutlich geringer sein als der Schwellenwert. Ist dies nicht der Fall, ist die räumlich unabhängige und zufällige Varianz als größer zu interpretieren und in der Konsequenz die Kriginginterpolation als ungeeignetes Verfahren zu erachten.

Bei Betrachtung der Semivariogramme, kann dies für keine der vorliegenden Variablen gelten (vgl. Abb. 4.5). Ausnahmslos liegt ein steiler Anstieg des Kurvenverlaufs vor, der eine hohe räumliche Autokorrelation indiziert. Mit Reichweiten zwischen 161,7 m für den Schluffgehalt und maximalen 340,0 m für die effektive Lagerungsdichte (vgl. Tab. 4.9) liegt die Erhaltungsnähe der Bodenparameter deutlich unterhalb der von HEINRICH (1994) angesetzten maximalen Distanz von 50 % des gesamten Untersuchungsraumes, der hier 1040 m umfasst (vgl. Kapitel 3.4.3). Der Grad der räumlichen Autokorrelation kann nach CAMBARDELLA ET AL. (1994) durch einen Ratio aus der Nuggetvarianz und der Gesamtvarianz (vgl. Kapitel 3.4.3) quantifiziert werden (NSR, s. Tab. 4.9). In den meisten Fällen liegen stark strukturierte räumliche Abhängigkeiten (0-25 %) vor. Ausnahmen stellen die Trockenrohdichte und der Schluffgehalt mit einem mittleren Grad (25-75 %) dar.

Tabelle 4.9: Semivariogrammparameter der Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)

Zielvariable	Transformation	Nuggetvarianz C_0	Schwellenwert C_s	Reichweite a [m]	NSR [%]
Tongehalt [Gew.-%]	lg	0,0048	0,012	270,6	27,8
Schluffgehalt [Gew.-%]	lg	0,0014	0,002	161,7	38,7
Sandgehalt [Gew.-%]	-	9,4968	85,50	200,9	10,0
C_{org} -Gehalt [Gew.-%]	lg	0,0050	0,045	330,0	10,0
Rohdichte, tro. [$g \cdot cm^{-3}$]	-	0,0012	0,036	315,7	43,2
L_{eff} [$g \cdot cm^{-3}$]	-	0,0050	0,015	340,0	24,8
KAK_{pot} [$cmol_c \cdot kg^{-1}$]	lg	0,0024	0,020	325,0	10,8
KAK_{eff} [$cmol_c \cdot kg^{-1}$]	lg	0,0030	0,013	300,0	18,6
Ret. pF_{FK} [Vol.-%]	lg	0,0003	0,004	320,2	7,4
Ret. pF_{nFK} [Vol.-%]	lg	0,0004	0,006	299,8	5,3
Ret. pF_{PWP} [Vol.-%]	lg	0,0020	0,017	190,1	10,7

Alle Variogrammmodelle sphärisch, NSR = Nugget to Sill Ratio.

In Anbetracht der allgemein relativ hohen räumlichen Autokorrelationen, konnten in einem weiteren Schritt die Punktinterpolationsverfahren des Ordinary und Simple Kriging auf Grundlage der erstellten theoretischen Variogramme durchgeführt werden. Auf die Abbildung der rasterbasierten räumlichen Verteilung der Bodeneigenschaften wurde an dieser Stelle verzichtet. Die Ergebnisse der Kreuzvalidierung werden in Kapitel 4.1.5 einem Vergleich mit anderen Verfahren unterzogen.

Nachdem gemäß den Ergebnissen in Kapitel 4.1.2 und 4.1.3 die Reliefparameter bzw. der Normalized Difference Vegetation Index als teilweise erklärende Co-Variable für die räumliche Verteilung der Bodeneigenschaften ausgemacht werden konnten, besteht die Möglichkeit der Anwendung des **hybriden Regionalisierungsverfahren** des Regressions-Kriging.

Der Grundgedanke des Regressions-Kriging besteht darin, dass ein Teil der Varianz der Bodeneigenschaften durch die Regression mit den Sekundärinformationen erklärt wird, während die hieraus resultierenden Residuen den unerklärten Anteil beschreiben (s. Kapitel 3.4.4). Darauf aufbauend werden sowohl die aus den Regressionen hervorgegangenen geschätzten Werte als auch die Residuen mit dem Verfahren des Ordinary Kriging interpoliert. Während das Regressions-Kriging Modell „A“ lediglich auf die interpolierten Variablen aus der Regression zurückgreift, werden in Modell „B“ und „C“ die Residuen berücksichtigt. Dies erfolgt durch Summation der interpolierten Residuen mit den mittels MLR geschätzten Werten (Modell „C“) und den interpolierten, mittels MLR geschätzten Werten (Modell „B“). Für die Bodenhaushaltsparameter ist zu überprüfen, inwiefern die Integration des NDVI als weitere Co-Variable neben den Reliefparametern eine Verbesserung der Modellergebnisse liefert.

Die Semivariogramme der mittels MLR mit den Reliefparametern geschätzten Werte sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Die durchschnittlichen Reichweiten liegen bei ca. 470 m, minimale Erhaltungsneigungen von 432,2 m sind für den Sandgehalt und die Parameter der Bodendichte zu verzeichnen. Die Reichweiten sind damit wesentlich höher als zuvor, (vgl. Tab. 4.9 und

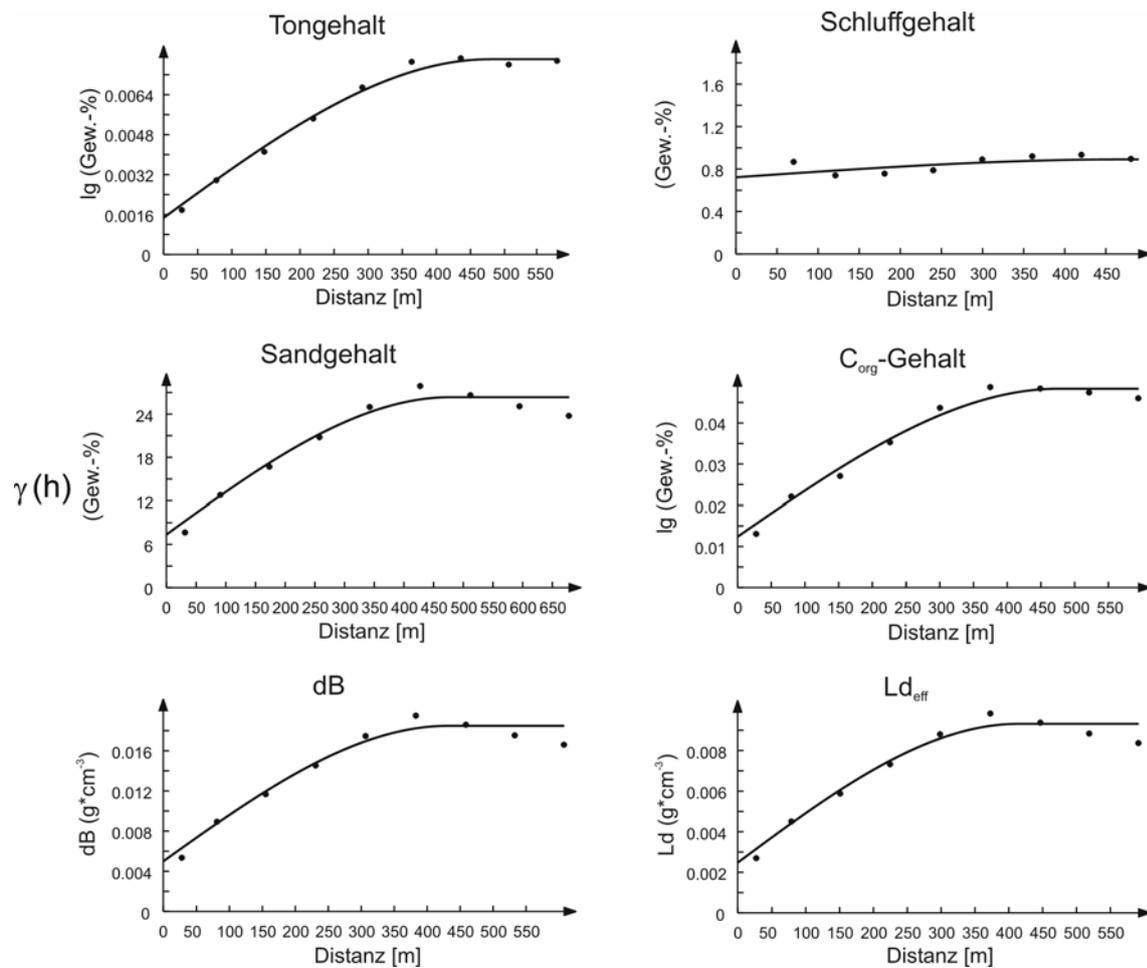


Abbildung 4.6: Ausgewählte sphärische Variogramme der mittels MLR geschätzten Bodeneigenschaften für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese ($n = 117$)

4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten

4.10), liegen aber noch knapp unterhalb der tolerierbaren 520 m (s.o.). Der „Nugget to Sill Ratio“ (NSR) weist in den meisten Fällen Prozentwerte im Grenzbereich zwischen einer star-

Tabelle 4.10: Semivariogrammparameter der mittels MLR geschätzten Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)

Zielvariable	Co-Variablen	R ²	Transformation	Nugget-varianz C ₀	Schwellenwert C _s	Reichweite a [m]	NSR [%]
Tongehalt [Gew.-%]	CDI, w	0,308	lg	0,0015	0,0064	468,6	18,8
Schluffgehalt [Gew.-%]	C _v	0,039	-	0,7238	0,1684	474,3	81,1
Sandgehalt [Gew.-%]	w	0,234	-	7,3592	19,0011	432,2	27,9
C _{org} -Gehalt [Gew.-%]	w	0,385	lg	0,0124	0,0360	474,3	25,6
Rohdichte, tro. [g*cm ⁻³]	w	0,468	-	0,0050	0,0135	432,2	27,0
Ld _{eff} [g*cm ⁻³]	w	0,427	-	0,0025	0,0068	432,2	26,6
KAK _{pot} [cmol _c *kg ⁻¹]	w	0,393	lg	0,0038	0,0119	474,3	24,2
KAK _{eff} [cmol _c *kg ⁻¹]	w	0,358	lg	0,0022	0,0066	474,3	24,6
Ret. pF _{FK} [Vol.-%]	w	0,444	lg	0,0006	0,0016	457,3	27,7
Ret. pF _{nFK} [Vol.-%]	w	0,397	lg	0,0010	0,0028	464,1	26,6
Ret. pF _{PWP} [Vol.-%]	w	0,356	lg	0,0025	0,0083	474,3	23,4

Alle Variogrammodelle sphärisch, C_v = vertikale Wölbung, CDI = Konvergenz/Divergenz-Index, w = Wetness Index, NSR = Nugget to Sill Ratio.

ken und mittleren strukturierten räumlichen Abhängigkeit auf. Lediglich der Schluffgehalt fällt mit einem großen NSR von 81,1 % und damit einem hohen Grad unerklärter Varianz aus dem Rahmen. Dies ist die Folge des geringen Erklärungsgehaltes der Regression mit den Reliefparametern (R² = 0,039) und dem glättenden Effekt des Ordinary Krigings (vgl. DEUTSCH & JOURNAL, 1998) bei einer ohnehin relativ geringen Variabilität der Schluffgehalte.

Aus den Semivariogrammen der Residuen gehen durchschnittliche Reichweiten um 200 m hervor (vgl. Abb. 4.7 und Tab. 4.11). Abweichungen hiervon sind bei den Residuen der Ton- und Sandgehalte mit geringeren Reichweiten von 176,9 m, bzw. 153,6 m und den deutlich höheren der Schluffgehalte mit 231,4 m zu verzeichnen. Grundsätzlich sind auch hier die Reichweiten innerhalb der tolerierbaren Grenze, der Kurvenverlauf aller Variogramme zeigt einen deutlichen Anstieg und lässt damit ein hohes Maß räumlicher Strukturiertheit erkennen.

Tabelle 4.11: Semivariogrammparameter der Residuen der mittels MLR geschätzten Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)

Zielvariable	Co-Variablen	R ²	Nugget-varianz C ₀	Schwellenwert C _s	Reichweite a [m]	NSR [%]
Tongehalt [Gew.-%]	CDI, w	0,308	12,299	33,114	176,9	27,1
Schluffgehalt [Gew.-%]	C _v	0,039	11,340	11,550	231,4	49,5
Sandgehalt [Gew.-%]	w	0,234	10,218	69,180	153,6	12,9
C _{org} -Gehalt [Gew.-%]	w	0,385	0,273	1,283	210,7	17,5
Rohdichte, tro. [g*cm ⁻³]	w	0,468	0,003	0,017	215,6	16,8
Ld _{eff} [g*cm ⁻³]	w	0,427	0,003	0,009	196,0	23,1
KAK _{pot} [cmol _c *kg ⁻¹]	w	0,393	12,590	46,173	210,7	21,4
KAK _{eff} [cmol _c *kg ⁻¹]	w	0,358	3,419	18,620	196,0	15,5
Ret. pF _{FK} [Vol.-%]	w	0,444	3,230	18,809	215,6	14,7
Ret. pF _{nFK} [Vol.-%]	w	0,397	4,860	26,190	205,8	15,7
Ret. pF _{PWP} [Vol.-%]	w	0,356	5,700	29,700	198,3	16,1

Alle Variogrammodelle sphärisch, C_v = vertikale Wölbung, CDI = Konvergenz/Divergenz-Index, w = Wetness Index, NSR = Nugget to Sill Ratio.

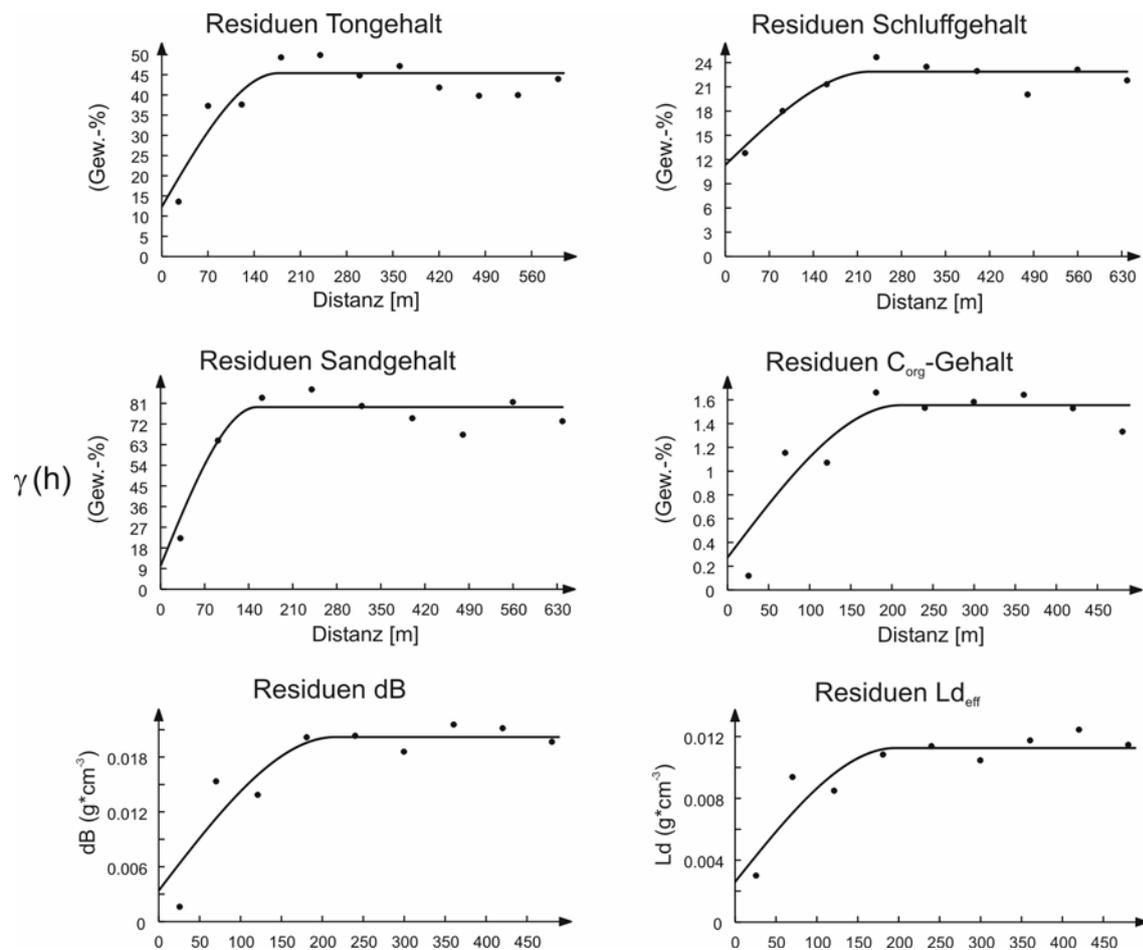


Abbildung 4.7: Ausgewählte sphärische Variogramme der Residuen der mittels MLR geschätzten Bodeneigenschaften für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese ($n = 117$)

Der durch den NSR (s. Tab. 4.11) zum Ausdruck kommende Grad der räumlichen Autokorrelation der Residuen zeigt im Allgemeinen eine starke Strukturiertheit (NSR < 25 %, s.o.) an. Lediglich der Tongehalt liegt mit 27,1 % knapp darüber, während bei den Residuen der Schluffgehalte mit 49,5 % ein deutlich höheres Maß zu verzeichnen ist.

Bei einem variablenspezifischen Vergleich der Variogramme ist zu verzeichnen, dass der Anteil der Residuen an der Summe der Schwellenwerte der mittels MLR geschätzten Werte und zugehörigen Residuen vom Grad der durch das Relief erklärten Variabilität abhängt. Je höher das Bestimmtheitsmaß der Regression ausfällt, desto kleiner wird der Anteil der Residuen, da ein entsprechend höherer Anteil der Varianz durch die Reliefparameter erklärt wird. Exemplarisch kann dies anhand der nicht transformierten Bodendichteparameter (Trockenrohddichte, δB und effektive Lagerungsdichte, Ld_{eff}) nachvollzogen werden. Während der Anteil des Schwellenwertes der Residuen der Trockenrohddichte ($R^2 = 0,468$) 55 % beträgt, ist für die effektive Lagerungsdichte bei einem geringeren Bestimmtheitsmaß ($R^2 = 0,427$) ein höherer Anteil von 57 % zu verzeichnen. Die geschilderte Beobachtung folgt damit dem eingangs erwähnten theoretischen Grundgedanken des Regressions-Kriging.

Auf Grundlage der in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Regressionsmodelle konnte mit dem aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten NDVI neben den Reliefparametern eine weitere erklärende Co-Variable für die Bodenhaushaltsparameter Verwendung finden. Da das höchste Maß erklärter Varianz für die Bodenhaushaltsparameter aus der Regression mit den Co-Variablen Wetness Index und dem NDVI der Landsat-Szene vom 11.05.2001 hervorgegangen ist (vgl. Tab. 4.7), sind die daraus resultierenden geschätzten Werte und Residuen ausgewählt und für das Regressions-Kriging verwendet worden. Die Semivariogramme lassen einen relativ hohen Grad räumlicher Autokorrelation erkennen (vgl. Abb. 4.8).

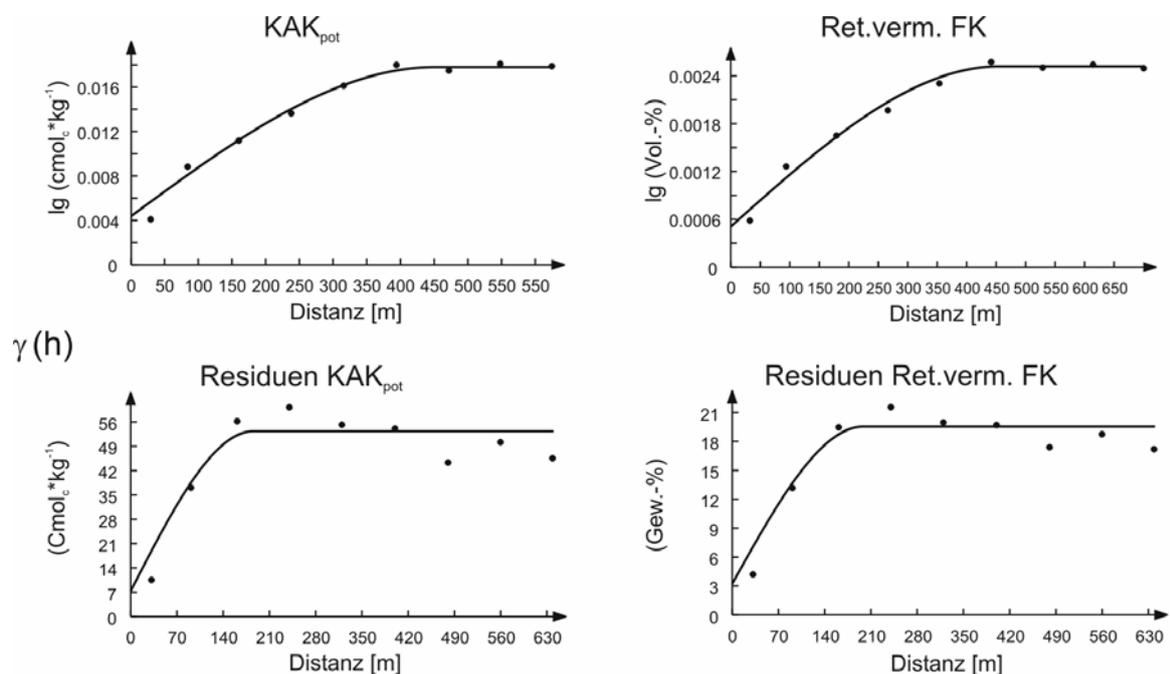


Abbildung 4.8: Ausgewählte sphärische Variogramme der mittels MLR mit den Reliefparametern und dem NDVI geschätzten Bodenhaushaltsparameter und deren Residuen für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese ($n = 117$)

Der NSR für die geschätzten Werte liegt im Grenzbereich zwischen stark und mittel strukturierter räumlicher Abhängigkeit, während die Residuen mit minimalen 13,8 % für die potenzielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) und maximalen 22,1 % für das Retentionsvermögen beim permanenten Welkepunkt ($Ret. pF_{pWP}$) deutlich darunter liegen (vgl. Tab. 4.12 und 4.13). Dabei ist in der Relation keine deutliche Veränderung des NSR gegenüber den ohne Berücksichtigung des NDVI erstellten Variogrammen zu verzeichnen (Tab. 4.10 und 4.11). Sowohl die Reichweiten der geschätzten Werte von 437,4 m bis 450,6 m als auch der NSR liegen im Mittel etwas niedriger als zuvor, während der Schwellenwert aufgrund des durchweg höheren Bestimmtheitsmaßes der Regression leicht erhöht ist. Folgerichtig sind die der Residuen dagegen entsprechend geringer (vgl. Tab. 4.12 und 4.13).

Tabelle 4.12: Semivariogrammparameter der mittels MLR mit den Reliefparametern und dem NDVI geschätzten Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)

Zielvariable	Co-Variablen der MLR _{Rel+FE}	R ²	Transformation	Nugget-varianz C ₀	Schwellenwert C _s	Reichweite a [m]	NSR [%]
KAK _{pot} [cmol _c *kg ⁻¹]	w, NDVI	0,427	lg	0,00440	0,01340	450,6	24,7
KAK _{eff} [cmol _c *kg ⁻¹]	w, NDVI	0,391	lg	0,00252	0,00747	446,5	25,2
Ret. pF _{FK} [Vol.-%]	w, NDVI	0,492	lg	0,00051	0,00201	437,4	20,2
Ret. pF _{nFK} [Vol.-%]	w, NDVI	0,433	lg	0,00096	0,00316	443,9	23,3
Ret. pF _{PWP} [Vol.-%]	w, NDVI	0,386	lg	0,00300	0,00920	450,1	24,6

Alle Variogrammodelle sphärisch, MLR_{Rel+NDVI} = Multiple lineare Regression mit Reliefparametern und Vegetationsindizes, w = Wetness Index, NDVI = Normalized Difference Vegetation Index, NSR = Nugget to Sill Ratio, .

Im Bezug auf die zuvor ermittelten Semivariogramme sind beispielsweise die Schwellenwerte der Residuen der effektiven Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) und dem Retentionsvermögen beim permanenten Welkepunkt (Ret. pF_{PWP}) nochmals um 2,06 cmol_c, bzw. 4,18 Vol.-% gesenkt (vgl. Tab. 4.11 und 4.13).

Tabelle 4.13: Semivariogrammparameter der aus der MLR mit den Reliefparametern und dem NDVI hervorgegangenen Residuen der Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)

Zielvariable	Co-Variablen der MLR _{Rel+NDVI}	R ²	Nugget-varianz C ₀	Schwellenwert C _s	Reichweite a [m]	NSR [%]
KAK _{pot} [cmol _c *kg ⁻¹]	w, NDVI	0,427	7,355	46,000	185,6	13,8
KAK _{eff} [cmol _c *kg ⁻¹]	w, NDVI	0,391	3,779	16,559	185,6	18,6
Ret. pF _{FK} [Vol.-%]	w, NDVI	0,492	3,229	16,319	198,4	16,5
Ret. pF _{nFK} [Vol.-%]	w, NDVI	0,433	5,500	23,000	192,0	19,3
Ret. pF _{PWP} [Vol.-%]	w, NDVI	0,386	7,248	25,519	185,6	22,1

Alle Variogrammodelle sphärisch/omnidirektiona, MLR_{Rel+NDVI} = Multiple lineare Regression mit den Reliefparametern und dem NDVI, w = Wetness Index, NDVI = Normalized Difference Vegetation Index, NSR = Nugget to sill Ratio.

Auch hier wurde auf die Darstellung einzelner Ergebnisse in Form gridbasierter Karten verzichtet. Die Modellergebnisse werden auf Grundlage der Kreuzvalidierung im folgenden Kapitel einem Vergleich unterzogen und auszugsweise dargestellt.

4.1.5 Vergleich der angewendeten Regionalisierungsmethoden

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der hier angewendeten Verfahren zur Regionalisierung von Bodeneigenschaften auf der Feldskala gegenübergestellt und einem Vergleich unterzogen. Auf Basis der vorgestellten Regionalisierungsmodelle wurden im GIS ArcMap rasterbasierte Verteilungen der Bodenvariablen auf dem Schlag Sandkamp/Wiese berechnet, die Ergebnisse anschließend an allen Punkten extrahiert und den gemessenen Werten gegenübergestellt (vgl. Kapitel 3.4.5). Zur Quantifizierung der Vorhersagegüte wurde auf den „root mean square error“ (RMSE) zurückgegriffen, dessen für und wider bereits in Kapitel 3.4.5 behandelt wurde. Grundsätzlich erlaubt dieses Maß zum Einen einen relativen Vergleich der Modellergebnisse untereinander, zum Anderen ist ein direkter Schluss auf die mittlere Abweichung der geschätzten Variablen möglich, da die verwendeten Einheiten denen der Eingangsvariablen entsprechen. Mit dem ebenfalls berechneten „mean absolute error“ (MAE)

4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten

waren grundsätzlich die gleichen Relationen im Modellvergleich zu verzeichnen, die absoluten Werte fielen allerdings stets geringer aus, da der RMSE durch die Quadrierung sensibler auf Abweichungen reagiert (vgl. HERBST, 2001). Daher konnte auf die Darstellung des MAE hier verzichtet werden.

Die Ergebnisse der Modellvalidierung sind der Tabelle 4.14 zu entnehmen. Die deutlich geringsten mittleren Abweichungen zwischen den gemessenen und den geschätzten Variablen sind bei der Regionalisierungsmethode des Regressions-Kriging „B“ zu verzeichnen. Lediglich für die Schluffgehalte liegt mit dem Regressions-Kriging „C“ ein nur wenig besseres Resultat

Tabelle 4.14: Ergebnisse der Kreuzvalidierung der Regionalisierungsmodelle mittels RMSE (root mean square error) für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)

Bodenparameter	Mittelwert	Regionalisierungsmethode								
		<i>MLR_{Rel}</i>	<i>LR_{NDVI}</i>	<i>MLR_{Rel+NDVI}</i>	<i>IDW</i>	<i>SK</i>	<i>OK</i>	<i>RK_A</i>	<i>RK_B</i>	<i>RK_C</i>
RMSE										
T [Gew.-%]	22,50	8,471	-	-	5,253	5,215	5,328	6,074	2,261	6,922
U [Gew.-%]	32,35	4,580	-	-	4,820	4,620	4,725	4,654	2,881	2,737
S [Gew.-%]	45,15	8,547	-	-	7,313	7,410	7,352	8,316	2,399	9,468
C _{org} [Gew.-%]	1,88	1,126	-	-	0,777	0,843	0,841	1,093	0,450	1,472
dB [g*cm ⁻³]	1,46	0,133	-	-	0,100	0,103	0,102	0,130	0,056	0,171
L _{eff} [g*cm ⁻³]	1,66	0,103	-	-	0,091	0,093	0,093	0,103	0,046	0,129
KAK _{pot} [cmol _c *kg ⁻¹]	20,38	6,994	9,909	6,790	4,687	4,891	4,940	6,718	2,709	3,967
KAK _{eff} [cmol _c *kg ⁻¹]	15,60	4,339	5,936	4,226	3,128	3,106	3,158	4,133	1,531	5,071
Ret. _{FK} [Vol.-%]	37,38	4,330	6,516	4,137	2,879	2,948	2,962	4,173	1,731	5,503
Ret. _{nFK} [Vol.-%]	31,21	5,147	7,355	4,991	3,414	3,522	3,525	4,920	1,889	6,302
Ret. _{PWP} [Vol.-%]	17,73	5,488	7,501	5,358	3,929	3,989	4,061	5,244	1,951	6,567

MLR_{Rel} = Multiple lineare Regression mit den Reliefparametern, *LR_{NDVI}* = Lineare Regression mit dem NDVI, *MLR_{Rel+NDVI}* = Multiple lineare Regression mit den Reliefparametern und dem NDVI, *IDW* = Inverse Distance Weighting, *SK* = Simple Kriging, *OK* = Ordinary Kriging, *RK_{A/B/C}* = Regressions-Kriging Modell A, B und C.

vor. Bis auf diese Ausnahme ist daneben zu verzeichnen, dass der RMSE des Regressions-Kriging „A“ und „C“ höher als bei den einfachen Interpolationsverfahren des Inverse Distance Weighting (IDW), Simple Kriging (SK) und des Ordinary Kriging (OK) ausfällt. Darunter sind mit Ausnahme für die Schluff- und Tongehalte beste Ergebnisse bei dem IDW-Verfahren zu verzeichnen, wobei generell nur sehr geringe Unterschiede zum SK und OK festzustellen sind. Die Regressionsmodelle zeigen sich insgesamt deutlich unterlegen, da der durch die Reliefparameter zu erklärende Anteil an der Variabilität der Bodeneigenschaften in allen Fällen als zu gering erachtet werden muss. Eine Verbesserung der Schätzung ist aber bereits durch die Interpolation der mittels MLR vorhergesagten Werte mit dem OK (RK „A“) zu verzeichnen. Die Summation der mit OK interpolierten Residuen und geschätzten Werte aus der Regression (RK „C“) führt hingegen zu erhöhten Fehlermaßen. Höchste Vorhersagegüten sind mit dem Regressions-Kriging „B“ zu erreichen. In Abbildung 4.9 sind räumliche Verteilungen ausgewählter Bodeneigenschaften auf Grundlage des RK „B“ dargestellt. Bei allen Abbildungen treten deutlich die ausgedehnten Senken im nordöstlichen Teil des Schla-

4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten

ges und die zentral gelegene größere Kuppe mit dem sich anschließenden nördlich verlaufenden Hang hervor. Je nach Bodenparameter sind in diesen Positionen überdurchschnittlich hohe, bzw. geringe Werteausprägungen zu verzeichnen. Bei den Ton- und Schluffgehalten sind dazwischen deutlich „Fahnen“ mit höheren Werten auszumachen, die einen Hinweis auf hier vor-

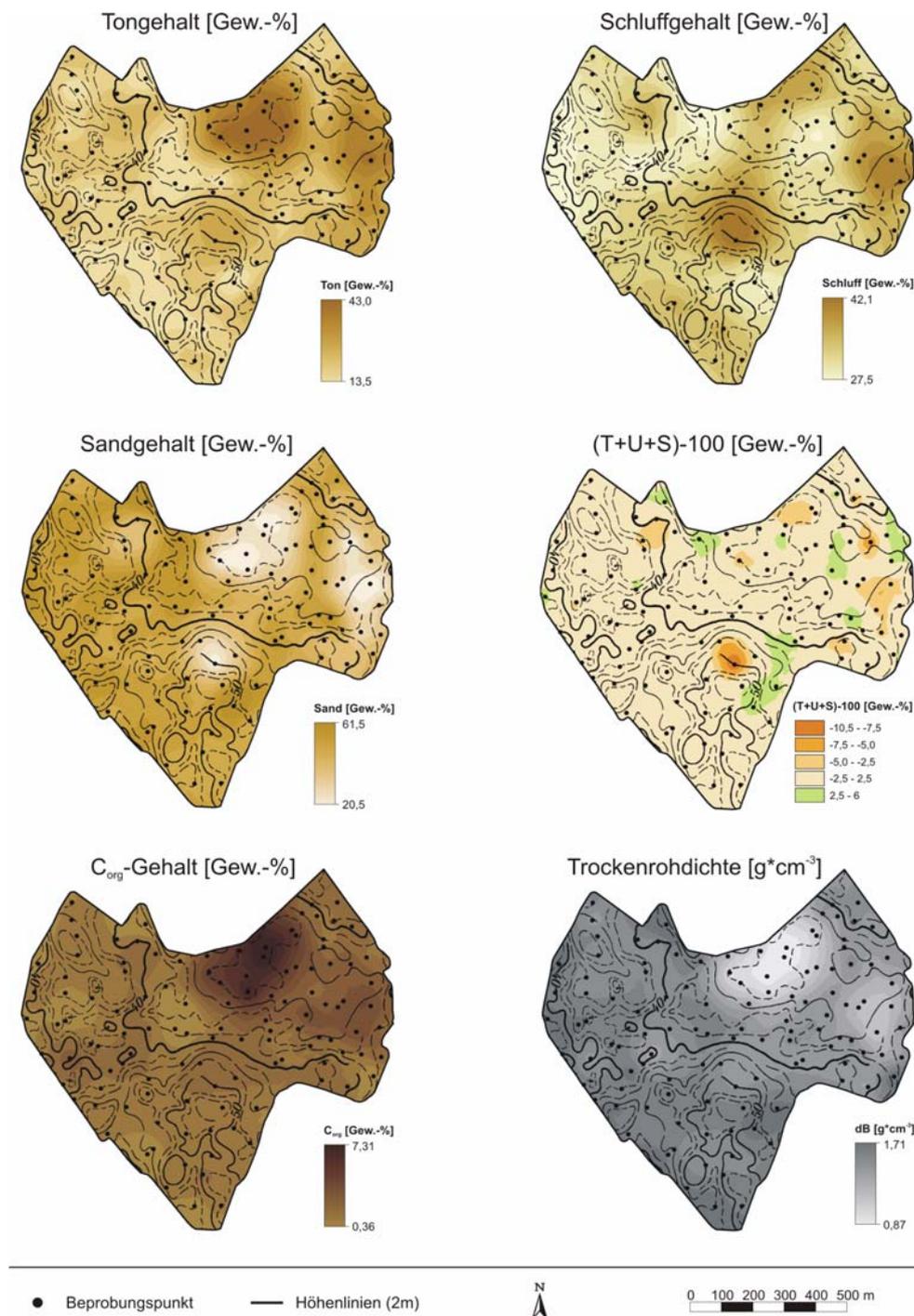


Abbildung 4.9: Geschätzte räumliche Verteilung ausgewählter Bodeneigenschaften auf Grundlage des Regressions-Kriging Modell „B“ für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)

nehmlich stattfindende Umlagerungsprozesse geben. Höhere Tongehalte treten ansonsten in Bereichen von Hangverflachungen in Erscheinung, höhere Sandgehalte dagegen auf den Kuppen und in höheren Lagen. Die Summe der regionalisierten Kornfraktionen sollte idealerweise 100 % betragen, was für den überwiegenden Teil des Schlages mit Abweichungen von $\pm 2,5$ % annähernd erfüllt ist (vgl. Abb. 4.9, mitte/rechts). Lediglich in wenigen Bereichen sind höhere Differenzen vorhanden, die im Extremfall bis zu -10,5 % betragen. Allerdings beschränken sie sich nur auf das unmittelbare Umfeld einzelner Punkte. Insgesamt ergibt sich ein recht geschlossenes Bild, dass eine relativ hohe Vorhersagegüte der einzelnen Kornfraktionen zum Ausdruck bringt. Das Erscheinungsbild der Verteilung des organischen Kohlenstoffs folgt in wesentlichen Zügen dem der Tongehalte, wobei mittlere Gehalte auch auf kleineren Kuppen im westlichen Teil des Schlages zu verzeichnen sind. Der bereits in Kapitel 4.1.1 beschriebene enge, negative Zusammenhang zwischen der Trockenrohdichte und dem C_{org} -Gehalt spiegelt sich auch hier wieder.

Die Streudiagramme der Abbildung 4.10 geben die Relation zwischen den gemessenen und den auf Grundlage des Regressions-Kriging „B“ geschätzten Bodeneigenschaften wieder.

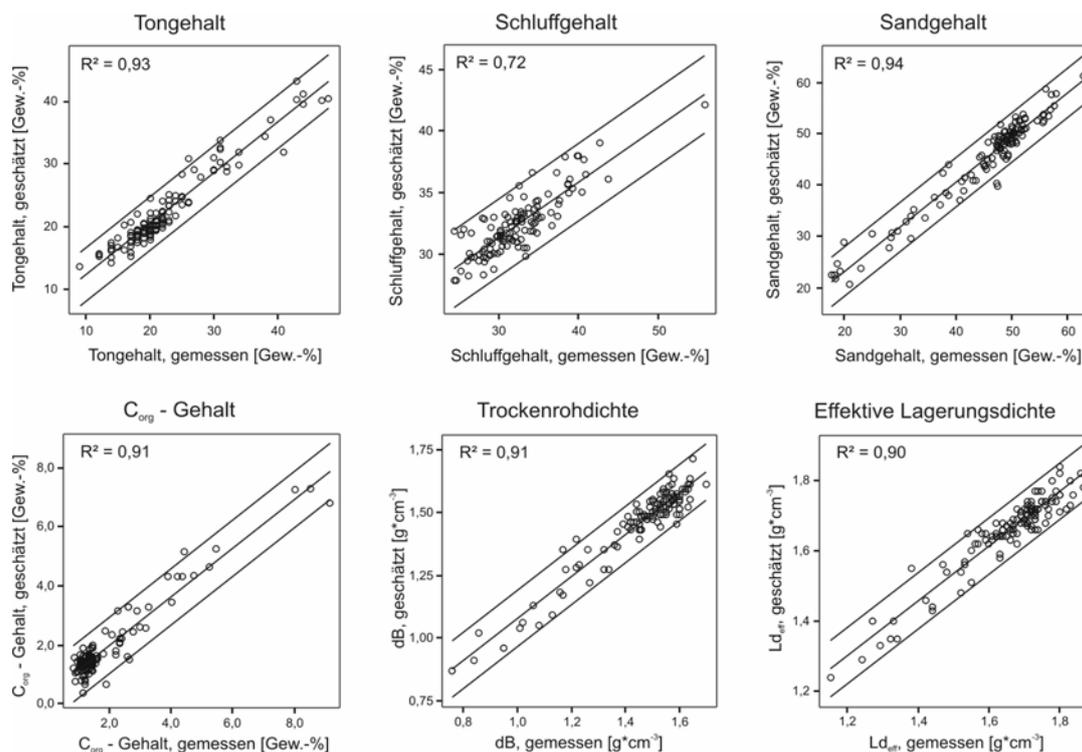


Abbildung 4.10: Streudiagramme der gemessenen gegenüber den geschätzten Werten der Bodeneigenschaften auf Grundlage des Regressions-Kriging Modell „B“ bei einem Konfidenzintervall von 98 % für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese ($n = 117$)

Mit Bestimmtheitsmaßen zwischen $R^2 = 0,90$ für die effektive Lagerungsdichte und $R^2 = 0,94$ für den Sandgehalt liegen bei einem Konfidenzintervall von 98 % relativ hohe Vorhersagegüten für betreffende Bodeneigenschaften vor. Lediglich die der Schluffgehalte liegen mit einem R^2 von 0,72 deutlich darunter. Die hohen Bestimmtheitsmaße resultieren allerdings aus der Häufung der Werte je nach Parameter bei relativ hohen oder geringen Werten, wohingegen

hiervon entfernte Punkte im Diagramm eine stärkere Streuung um die Regressionsgeraden aufweisen. Daraus kann gefolgert werden, dass der Schätzfehler für die entsprechenden Werte in Folge der Abweichung von der Normalverteilung höher ist als im Mittel.

Bezüglich der Bodenhaushaltsparameter ist eine geringe Verbesserung der Schätzgenauigkeit durch Hinzuziehen des NDVI in das Regressionsmodell als weitere erklärende Variable zu erreichen (vgl. Tab. 4.15). Durch die Einbindung der aus der MLR hervorgegangenen Werte und Residuen in das Regressions-Kriging, konnte der mittlere Schätzfehler (*RMSE*) für die Bodenhaushaltsparameter mit dem RK „B“ z. B. für die potenzielle Kationenaustauschkapazität um $0,199 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ und $0,11 \text{ Vol.-%}$ für das Retentionsvermögen bei Feldkapazität reduziert werden (vgl. Tab. 4.14 und Tab. 4.15).

Tabelle 4.15: Ergebnisse der Kreuzvalidierung der Regionalisierungsmodelle der Regressions-Kriging Modelle A, B und C für die Bodenhaushaltsparameter unter Integration des NDVI mittels *RMSE* (root mean square error) für den Datensatz Schlag Sandkamp/ Wiese ($n = 117$)

Bodenparameter	Mittelwert	Regionalisierungsmethode		
		<i>RK_A</i>	<i>RK_B</i>	<i>RK_C</i>
<i>RMSE</i>				
$KAK_{pot} [\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}]$	20,38	6,52	2,51	3,97
$KAK_{eff} [\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}]$	15,60	4,03	1,46	4,87
Ret. $_{FK} [\text{Vol.-%}]$	37,38	3,99	1,62	5,18
Ret. $_{nFK} [\text{Vol.-%}]$	31,21	4,77	1,78	5,98
Ret. $_{PWP} [\text{Vol.-%}]$	17,73	5,12	1,91	6,27

RK_{A/B/C} = Regressions-Kriging Modell A, B und C.

Damit ist durch die Integration des NDVI als weitere Co-Variable neben den Reliefparametern eine wenn auch nur geringfügige Verbesserung der Schätzgenauigkeit zu verzeichnen. Die räumliche Verteilung der Bodenhaushaltsparameter auf Grundlage des Regressions-Kriging Modell „B“ unter Einbindung des NDVI ist exemplarisch anhand der potenziellen Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}) und des Retentionsvermögen bei Feldkapazität (FK) in Abbildung 4.11 dargestellt.

Auch hier treten deutlich die ausgedehnten Senken im östlichen Teil des Schlages und die zentral gelegene größere Kuppe mit für beide Parameter geltenden höheren Werten in Erscheinung. Die Verteilungen folgen den der Berechnung zu Grunde liegenden Eingangsgrößen. Für die KAK_{pot} sind besonders hohe Werte dort zu verzeichnen, wo hohe Ton-, C_{org} - und untergeordnet hohe Schluffgehalte aufeinander treffen. Dementsprechend werden maximale Werte um $52 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ in der ausgedehnten, am nördlichen Rand des Schlages gelegenen Senke erreicht, geringste um $10,6 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ in Hang- und Kuppenlagen. Die räumliche Variabilität des Retentionsvermögens bei Feldkapazität zeigt ein ähnliches Bild. Sehr hohe Werte um 57 Vol.-% sind ebenfalls im größten Senkenbereich auszumachen. Neben den eben be-

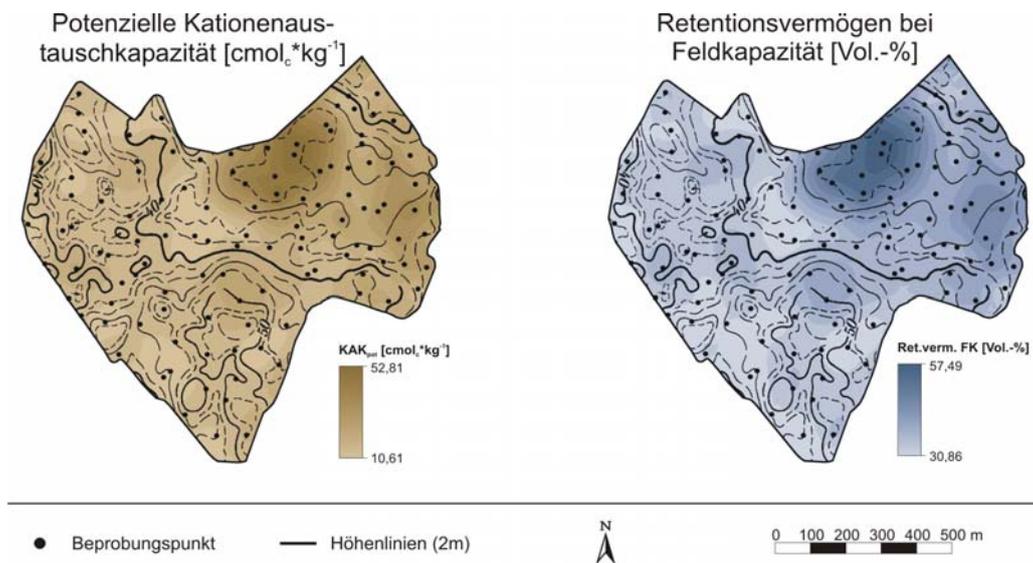


Abbildung 4.11: Geschätzte räumliche Verteilung ausgewählter Bodenhaushaltsparameter auf Grundlage des Regressions-Kriging Modell „B“ unter Integration des NDVI für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)

reits erwähnten Eingangsgrößen kommt hier zu den hohen Ton- und C_{org} - Gehalten die sehr geringe Trockenrohdichte mit Werten unter $1g*cm^{-3}$ zum Tragen.

Aus den Streudiagrammen der Abbildung 4.12 gehen Bestimmtheitsmaße der Regression von $R^2 = 0,93$ zwischen geschätzten und berechneten Werten der Bodenhaushaltsgrößen hervor, wobei ein deutlicher Schwerpunkt der Häufigkeitsverteilung bei geringer Ausprägung auszumachen ist. Damit ist auch für die Bodenhaushaltsgrößen mit dem Regressions-Kriging „B“ eine vergleichsweise hohe Schätzgenauigkeit zu erreichen.

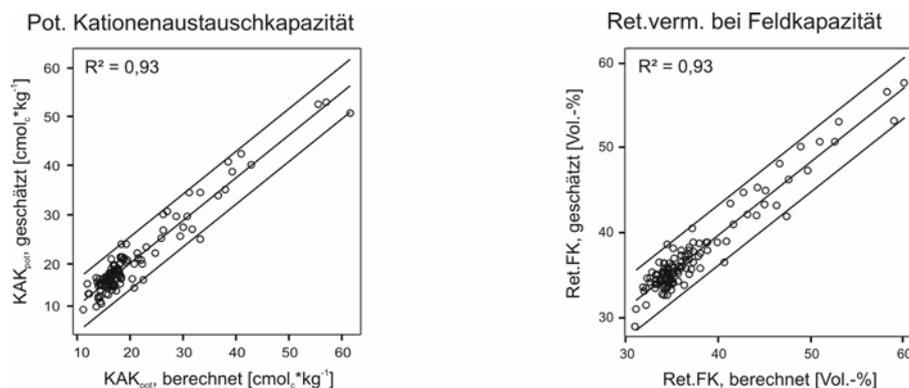


Abbildung 4.12: Streudiagramme der berechneten gegenüber den geschätzten Werten ausgewählter Bodenhaushaltsgrößen auf Grundlage des Regressions-Kriging Modell „B“ unter Integration des NDVI bei einem Konfidenzintervall von 98 % für den Datensatz Schlag Sandkamp/Wiese (n = 117)

Eine Begründung für das deutlich bessere Abschneiden des Regressionskriging Modell „B“ kann am Beispiel des organischen Kohlenstoffgehaltes gegeben werden. Aus der MLR der Reliefattribute und der C_{org} -Gehalte gehen nicht normalverteilte Werte hervor, das heißt die mehrheitlich auftretenden geringen Werte werden über-, hohe dagegen deutlich unterschätzt (vgl. Abb. 4.13, unten rechts). Die Residuen der Regression hingegen weisen eine Normalver-

teilung auf. Folglich ist im Ergebnis des Regressions-Kriging „C“ eine vergleichsweise hohe Schätzabweichung zu verzeichnen. Für das OK der mittels MLR geschätzten Werte (RK „A“, in Abb. 4.13 oben links) erfolgte eine Transformation, da hierfür eine Normalverteilung vorausgesetzt ist. Die hierdurch beseitigte Schiefe in der Verteilungskurve der Variablen ist damit mitverantwortlich für die geringere mittlere Schätzabweichung der Ergebnisse des Regressions-Kriging Modell „B“ zu zeichnen. Hieraus ist auch der geringere RMSE mit dem Regressions-Kriging „C“ für die Schluffgehalte zu erklären, da die mittels MLR geschätzten Werte hier eine Normalverteilung aufweisen. Das Resultat des Ordinary Kriging weist im Vergleich zum Regressions-Kkriging „B“ bei der räumlichen Verteilung eine relativ ausgeglichene Über- und Unterschätzung der Werte auf (vgl. Abb 4.13, unten links). Hervorgerufen wird dies durch den bereits angesprochenen glättenden Effekt des OK, wohingegen beim Re-

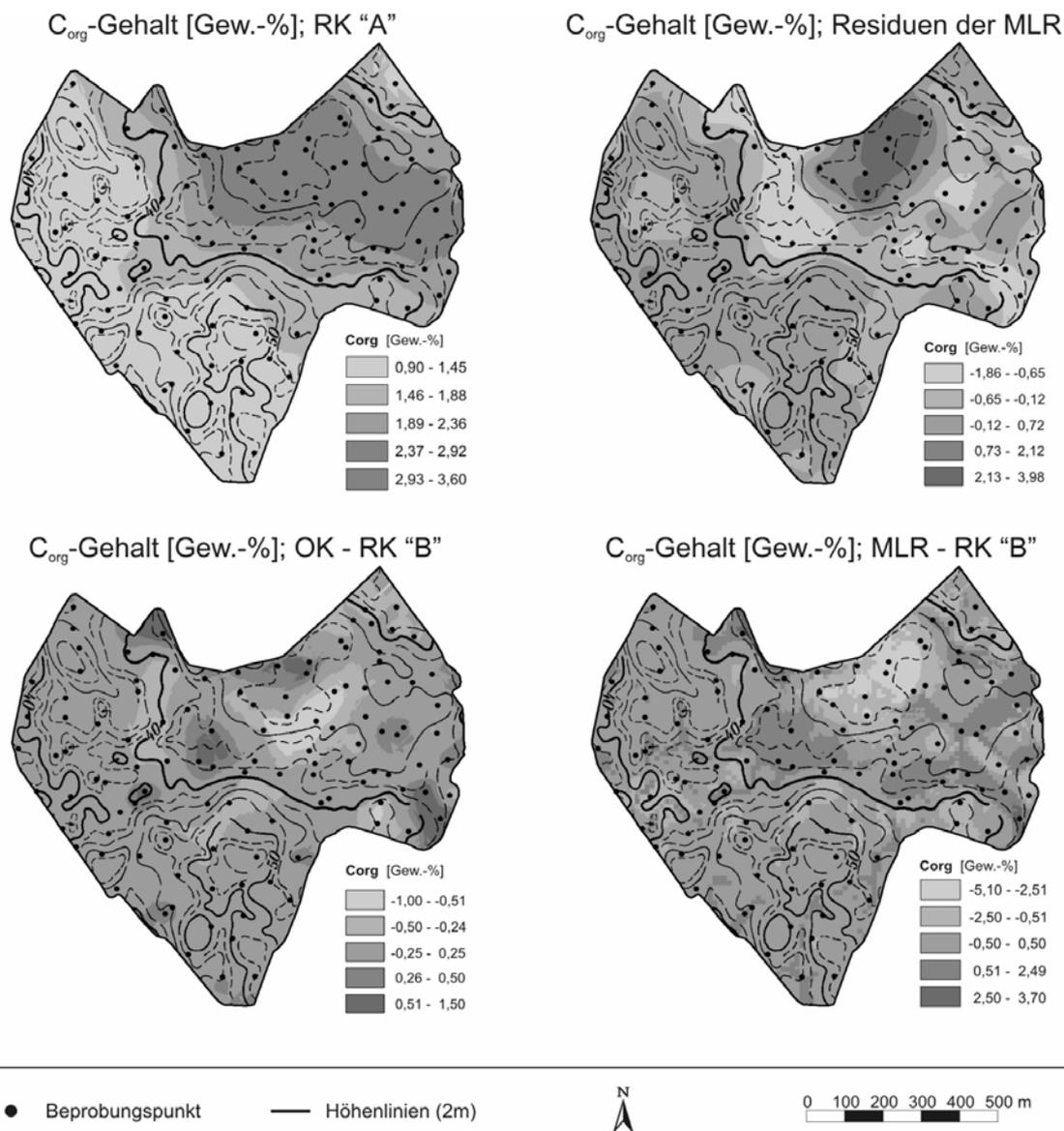


Abbildung 4.13: Räumliche Verteilung der C_{org} -Gehalte auf Grundlage des Regressions-Kriging Modell „A“ (oben links), der mittels Ordinary Kriging (OK) interpolierten aus der multiplen linearen Regression (MLR) mit den Reliefparametern hervorgegangenen Residuen (oben rechts), der Differenz zwischen den Ergebnissen des OK (unten links) bzw. der MLR und den Ergebnissen des RK „B“ (unten rechts)

gressionskriging „B“ der durch die Reliefparameter eingebrachte erklärende Anteil an der Variabilität und der resultierenden Residuen die Differenzierung der Werte im stärkeren Maße erhalten bleibt. Gesamtheitlich ist damit unter den gegebenen Verhältnissen auf dem Schlag eine deutliche Verbesserung der Schätzgenauigkeit durch die Integration von Sekundärinformationen in ein entsprechendes Vorhersagemodell festzustellen.

4.1.6 Kurzfazit

Gemäß den vorgestellten Ergebnissen ist ein Teil der räumlichen Variabilität der Bodeneigenschaften auf dem Schlag allein mit den aus einem digitalen Geländemodell berechneten Reliefparametern zu erklären. Neben den primären Reliefattributen der Höhe über NN (H) und der Hangneigung (β) sind höchste Zusammenhänge vor allem mit den sekundären, das Abflussgeschehen beschreibenden Reliefparametern der Höhe über der Tiefenlinie (H_{Ch}) und dem Wetness Index (w) zu verzeichnen. Aus der multiplen linearen Regression zwischen den Boden- und Reliefparametern gehen Erklärungsgehalte von 30,8 % für den Tongehalt, 38,5 % für den Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) und 46,8 % für die Trockenrohdichte (dB) hervor. Der Anteil erklärter Varianz für die Bodenhausaltparameter liegt für die potenzielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}) bei 39,3 %, und 44,4 % für das Retentionsvermögen bei Feldkapazität (FK). Für den Sandgehalt (23 %) und vor allem für den Schluffgehalt (4 %) liegen dagegen deutlich geringere Werte vor. Damit zeigte sich, dass die räumliche Variabilität der hier untersuchten Bodeneigenschaften zu einem gewissen Grad auf das Relief zurückzuführen ist und die Reliefparameter als geeignete Co-Variablen für die Regionalisierung auf dem untersuchten Schlag identifiziert werden konnten.

Als weitere Co-Variable für die Bodenhausaltparameter wurden die aus den Fernerkundungsdaten berechneten Vegetationsindizes in Betracht gezogen. Höchste Korrelationskoeffizienten sind zwischen dem Normalized Difference Vegetation Index ($NDVI$) und der potenziellen Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}) von $r = 0,446$, bzw. zwischen dem $NDVI$ und dem Retentionsvermögen bei Feldkapazität (FK) von $r = 0,493$ bei einem Signifikanzniveau von 99 % zu verzeichnen. Mit den Vegetationsindizes „Simple Ratio“ (SR) und „Soil Adjusted Vegetation Index“ ($SAVI$) konnten keine signifikant höheren Korrelationen festgestellt werden, weshalb sie von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen werden konnten. Die aus der Regression hervorgegangenen höchsten Erklärungsgehalte betragen 19,9 % für die KAK_{pot} und 24,3 % für das Retentionsvermögen bei FK . Allerdings beruhen die Ergebnisse lediglich auf der Landsat-Szene vom 11.05.2001. Aus dem Satellitenbild des Vorjahres gehen deutlich geringere Erklärungsgehalte hervor, während die Szenen der Jahre 2002 und 2003 keine plausiblen Zusammenhänge zu den Bodenhausaltparametern aufweisen, da die Bestandesentwicklung des Schlages in den Anbauperioden 2001/2002 und 2002/2003 witterungsbedingt entscheidend und nachhaltig gestört war. Ferner ist festzustellen, dass die Verteilung der Wuchsleistung hier vielmehr durch das Relief, als durch die Bodeneigenschaften bestimmt wird. Dies geht besonders aus den Szenen der Jahre 2002 und 2003 hervor, in denen ein geringer $NDVI$ an den permanent in Erscheinung tretenden Hang- und Kuppenlagen neben den zur Vernässung neigenden Senken zu verzeichnen ist. Grundsätzlich aber zeigen die Ergeb-

nisse, dass der Einsatz des aus Fernerkundungsdaten berechneten *NDVI* ergänzend zu den Reliefparametern eine verbesserte räumliche Vorhersage für genannte Bodenhaushaltsparameter ermöglicht. Gültigkeit besitzt diese Aussage allerdings nur für die Aufnahmen aus dem Jahr 2001 innerhalb der in die Untersuchung einbezogenen Fernerkundungsdaten von vier Jahren.

Aus der Semivariogrammanalyse der Bodenvariablen gehen Reichweiten der Erhaltungsneigung von minimalen 161,7 m für den Schluffgehalt und maximalen 340,0 m für die effektive Lagerungsdichte hervor. Der durch den „Nugget to Sill Ratio“ (*NSR*) zu beschreibende Grad der räumlichen Autokorrelation weist in den meisten Fällen stark strukturierte räumliche Abhängigkeiten ($NSR < 25\%$) aus. Ausnahmen hiervon stellen die Trockenrohdichte und der Schluffgehalt mit einem mittleren Grad ($NSR = 25-75\%$) räumlicher Autokorrelation dar.

Die Ergebnisse der auf Grundlage der mit den Co-Variablen aufgestellten Regressionsmodelle konnten für das hybride Verfahren des Regressions-Kriging angewendet werden. Für die mittels multipler linearer Regressionen (*MLR*) geschätzten Werte der Bodeneigenschaften als auch die hieraus hervorgegangenen Residuen wurden theoretische Variogramme für das anschließende Ordinary Kriging (*OK*) erstellt. Die mittleren Reichweiten der geschätzten Werte von etwa 470 m liegen deutlich höher als zuvor beschrieben, minimale Erhaltungsneigungen von 432,2 m sind für den Sandgehalt und die Parameter der Bodendichte zu verzeichnen. Der durch den *NSR* zu beschreibende Grad der räumlichen Autokorrelation weist in den meisten Fällen Prozentwerte im Grenzbereich zwischen einer starken und mittel strukturierten räumlichen Abhängigkeit auf. Lediglich der Schluffgehalt fällt mit einem großen *NSR* von 81,1 % und damit einem hohen Grad unerklärter Varianz aus dem Rahmen. Aus den Semivariogrammen der Residuen gehen durchschnittliche Reichweiten um 200 m hervor. Abweichungen hiervon sind bei den Residuen der Ton- und Sandgehalte mit geringeren Reichweiten von 176,9 m, bzw. 153,6 m und den deutlich höheren der Schluffgehalte mit 231,4 m zu verzeichnen. Für die Residuen ist im Allgemeinen eine starke räumliche Strukturiertheit zu quantifizieren. Lediglich die Residuen der Tongehalte liegen mit 27,1 % knapp darüber, während die der Schluffgehalte mit 49,5 % einen deutlich höheren Quotienten aufweisen.

Aus dem Vergleich der Modellergebnisse über den „*root mean square error*“ (*RMSE*) der Kreuzvalidierung geht das hybride Verfahren des Regressions-Kriging „B“ mit den deutlich geringsten Schätzabweichungen für fast alle Bodeneigenschaften hervor. Lediglich für den Schluffgehalt liegt mit dem Regressionskriging „C“ bei einem *RMSE* von 2,88 Gew.-% ein nur unwesentlich besseres Resultat vor. Für die Ton- und Sandgehalte beträgt die mittlere Schätzabweichung 2,26 und 2,40 Gew.-%, für die des organischen Kohlenstoff (*C_{org}*) 0,45 Gew.-%. Bei den Parametern der Bodendichte ist ein *RMSE* von 0,046 für die effektive Lagerungsdichte (*Ld_{eff}*) und 0,056 für die Trockenrohdichte (*dB*) zu verzeichnen. Unter den einfachen Interpolationsverfahren geht die höchste Schätzgüte zumeist aus den Ergebnissen des „*Inverse Distance Weighting*“ (*IDW*) - Verfahren hervor, wobei kein großer Unterschied zu den geostatistischen Verfahren des Simple und Ordinary Krigings besteht. Die Regressionsmodelle zei-

gen sich insgesamt deutlich unterlegen, da der durch die Reliefparameter zu erklärende Anteil an der Variabilität der Bodeneigenschaften in allen Fällen als zu gering erachtet werden muss.

Die relative Verbesserung der Schätzgüte zwischen den Ergebnissen der Regionalisierungsverfahren ist mit dem „Relative Improvement“ (*RI*) zu quantifizieren (vgl. Kapitel 3.4.5). Mit dem Regressions-Kriging Modell „B“ ist eine Verringerung der mittleren Schätzabweichung (*RMSE*) gegenüber den einfachen Interpolationsverfahren von 39,0 % für den Schluff-, bzw. bis zu 67,4 % für den Sandgehalt zu verzeichnen. Mehrheitlich liegt der *RI* um 50 % (vgl. Tab. 4.16).

Tabelle 4.16: Quantitativer Vergleich der Modellergebnisse aus der Kreuzvalidierung zwischen dem Ordinary Kriging und dem Regressions-Kriging Modell „B“ über den „Relative Improvement“ (*RI*)

	Bodenparameter										
	T [Gew.-%]	U [Gew.-%]	S [Gew.-%]	C _{org} [Gew.-%]	dB [g·cm ⁻³]	L _{d_{eff}} [g·cm ⁻³]	KAK _{pot} [cmol _c ·kg ⁻¹]	KAK _{eff} [cmol _c ·kg ⁻¹]	Ret.verm. [Vol.-%] bei		
									FK	nFK	PWP
RI_(Rel) [%]	57,56	39,03	67,37	46,49	44,97	49,77	45,16	51,53	41,55	46,41	51,97
RI_(Rel+NDVI) [%]	-	-	-	-	-	-	49,29	53,70	45,31	49,62	52,87

RI_(Rel) = Relative Improvement unter Integration der Reliefparameter in das Regressions-Kriging Modell „B“, *RI_(Rel+NDVI)* = Relative Improvement unter Integration der Reliefparameter und des NDVI in das Regressions Kriging Modell „B“ für die Bodenhaushaltsparameter.

Durch die Integration des NDVI als weitere Co-Variable ist der *RI* für die Bodenhaushaltsparameter z. B. bei der *KAK_{pot}* nochmals 4,13 %, bzw. 3,76 % beim Retentionsvermögen bei *FK* höher. Die hohe Vorhersagegüte beruht auf den Zusammenhang zwischen den Bodenparametern und den erklärenden Co-Variablen. Je höher deren Erklärungsgehalt ausfällt und je stärker die räumliche Strukturiertheit der über den Raum variierenden Primärvariablen ist, desto besser eignet sich das Regressions-Kriging für die Regionalisierung. Damit konnte gezeigt werden, dass auf dem untersuchten Schlag die Integration von flächenverfügbaren Sekundärinformationen in ein entsprechendes Regionalisierungsmodell eine gegenüber herkömmlichen Interpolationsverfahren deutlich verbesserte räumliche Vorhersage der Bodeneigenschaften ermöglicht.

4.2 Räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften auf der feldübergreifenden Skala

4.2.1 Deskriptive Statistik der Bodeneigenschaften

Zur Charakterisierung der Bodenverhältnisse auf kleinerer Maßstabsebene wurden in einem Landschaftsausschnitt des Ursprungsgebiets der Drögen Eider ausgewählte Bodeneigenschaften an 93 Positionen, verteilt auf 6 insgesamt 255 ha umfassende, zusammenliegende Schläge, erhoben. Mit der gegenüber der Feldskala deutlich größeren durchschnittlichen Beprobungsdistanz von 108,9 m soll hier überprüft werden, inwiefern sich dies auf die Anwendbarkeit und Aussagequalität der verwendeten Regionalisierungsmethoden auswirkt (vgl. Kapitel 3.2.1).

Aus der Tabelle 4.17 wird ersichtlich, dass im Vergleich zur Feldskala etwas geringere Mittelwerte der Ton-, dagegen leicht erhöhte Schluff- und Sandgehalte vorliegen. Im Bodenartendiagramm des Feinbodens (Abb. 4.14) macht sich dies in einer Verschiebung des Schwerpunktes zum stark lehmigen Sand (Sl4) bis mittel sandigen Lehm (Ls3) bemerkbar. Daneben ist für alle Korngrößenfraktionen der Variationskoeffizient (CV) um 1-2 % reduziert, ihre Variabilität also geringer. Die durchschnittlichen C_{org} -Gehalte betragen 1,59 %, wobei anteilig 18,3 % als „schwach“, 71,0 % als „mittel“ und der Rest als „stark humos“ einzustufen sind (vgl. AG BODEN, 2005). Bei der Trockenrohddichte liegen mit 66 % mittlere, 16,1 % geringe, 5,3 % sehr geringe und für die verbleibenden 12,6 % hohe Bodendichten vor. Gesamtheitlich weisen alle betrachteten Bodeneigenschaften eine geringere Variabilität als auf dem kleinräumig untersuchten Schlag auf. Vorausgesetzt, die ausgewählten Standorte der hinzugenommenen Schläge bilden die gesammte Spannweite der hier auftretenden Bodeneigenschaften-

Tabelle 4.17: Deskriptive Statistik der Bodeneigenschaften des Oberbodens für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93)

Bodenparameter	Statistische Kennwerte (n = 93)				
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stabw.	CV (%)
Tongehalt [Gew.-%]	8,8	43,1	18,8	6,0	31,9
Schluffgehalt [Gew.-%]	20,9	55,9	35,3	4,8	13,6
Sandgehalt [Gew.-%]	18,4	68,9	45,9	8,7	19,0
C_{org} -Gehalt [Gew.-%]	0,81	5,25	1,59	0,77	48,4
Rohddichte, trocken [$g \cdot cm^{-3}$]	1,06	1,70	1,51	0,12	7,9
Ld_{eff} [$g \cdot cm^{-3}$]	1,32	1,87	1,68	0,10	6,0
KAK_{pot} [$cmol_c \cdot kg^{-1}$]	11,06	38,56	17,52	5,37	30,7
KAK_{eff} [$cmol_c \cdot kg^{-1}$]	7,73	29,23	13,55	3,81	28,1
Ret. pF_{FK} [Vol.-%]	31,10	49,70	35,60	3,61	10,1
Ret. pF_{nFK} [Vol.-%]	20,50	45,10	28,99	4,42	15,2
Ret. pF_{PWP} [Vol.-%]	8,50	33,60	15,12	4,54	30,0

C_{org} = Gehalt an organischem Kohlenstoff, Ld_{eff} = effektive Lagerungsdichte, $KAK_{pot/eff}$ = potentielle und effektive Kationenaustauschkapazität, Ret. $pF_{FK/nFK/PWP}$ = Retentionsvermögen bei Feldkapazität, nutzbarer Feldkapazität und permanenten Welkepunkt.

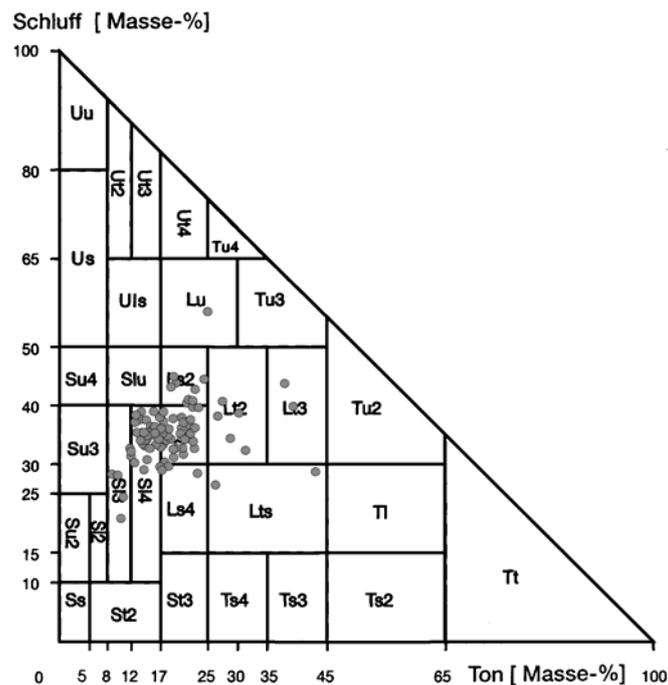


Abbildung 4.14: Bodenartendiagramm des Feinbodens für den Datensatz der Schläge 1-6 ($n = 93$).

ten ab, kann der Schlag Sandkamp/Wiese diesbezüglich als höchstvariabel gelten. Sowohl geringste als auch höchste Werte aller Bodeneigenschaften treten hier auf, obwohl nur 34 (zufällig ausgewählte) Punkte dem Datensatz für die feldübergreifende Skala zugeführt wurden. Bei der punktbezogenen Betrachtung der Bodenparameterverteilung fallen nur noch größere Senkenbereiche, wie schon beschrieben, auf. Ansonsten kann visuell aufgrund der vergleichsweise großen Beprobungsdistanzen keine räumliche Kohärenz zwischen den Bodenausprägungen ausgemacht oder beschrieben werden.

4.2.2 Der Zusammenhang zwischen den Boden- und Reliefparametern

Gemäß Kapitel 4.1.2 wurden auch für diesen Datensatz Korrelationen zwischen den Relief- und den Bodenparametern ermittelt. Die Abbildung 4.15 gibt anhand der Beispiele der Hangneigung und des Wetness Index die Reliefverhältnisse auf den untersuchten Flächen wieder. Bei der Betrachtung der Abb. 4.15 (unten) wird deutlich, dass die durch den Wetness Index beschriebene Entwässerung der Schläge über die zentral gelegene Senke und dem sich nördlich anschließenden Vorfluter erfolgt, hier also ein großer reliefinduzierter Zuschuss an Wasser zu erwarten ist. Im Zuge anthropogener Einwirkung sind die Abflusswege jedoch heutzutage durch Straßen- und Siedlungsbau unterbrochen und kanalisiert. Vermutlich ist genannter Senkenbereich erst durch Meliorationsmaßnahmen ackerbaulich nutzbar geworden, was einerseits aus der Schlagbezeichnung (Sandkamp/Wiese) hervorgeht, andererseits hier ein Kolluvisol über Niedermoor beschrieben ist und von einem damit einhergegangenen veränderten Prozessgeschehen bezüglich der Bodenbildung zeugt. Zur Überprüfung der Repräsentativität der mit dem Punktdatensatz erfassten Reliefsituationen wurden die Häufigkeitsverteilungen

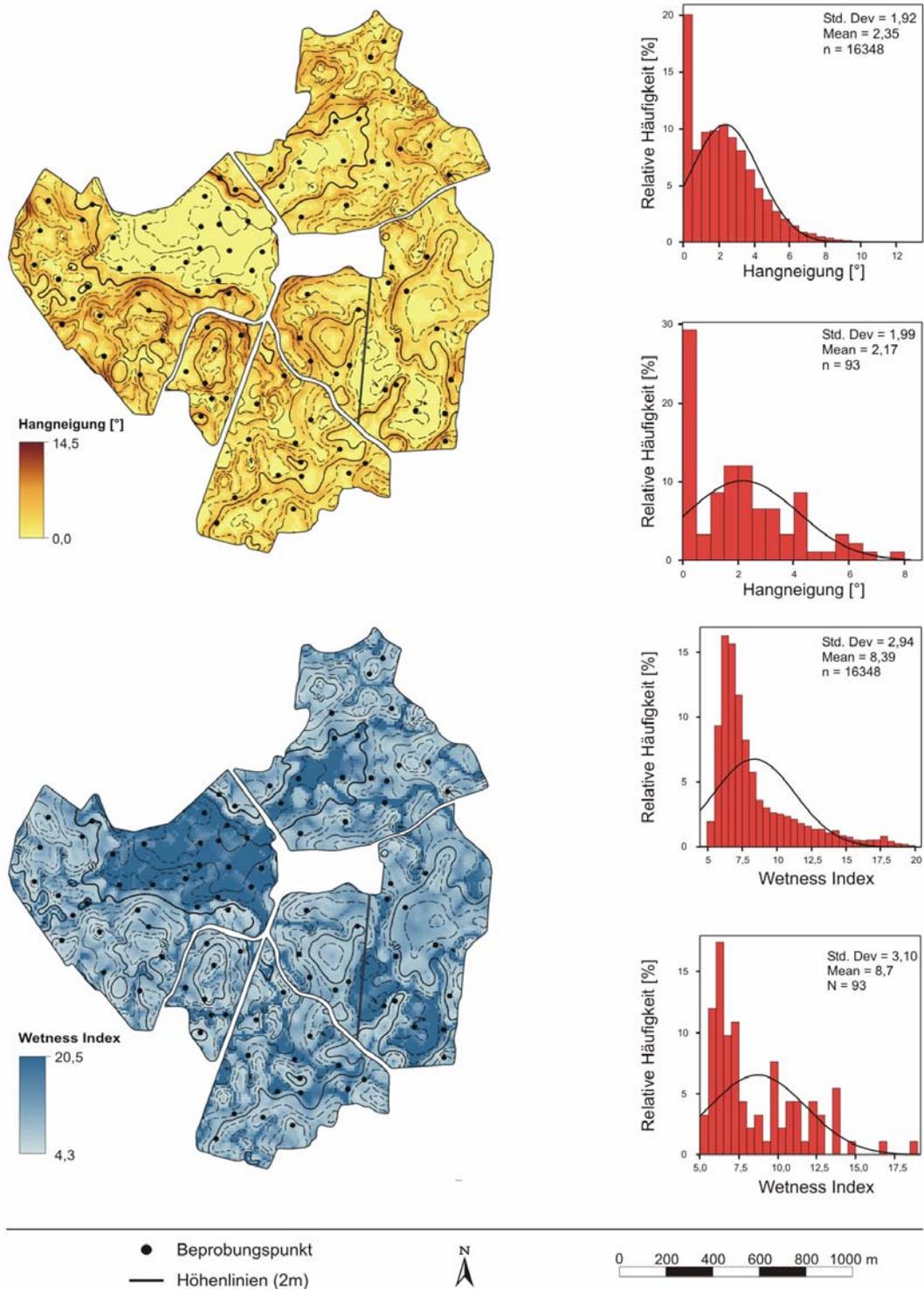


Abbildung 4.15: Räumliche Verteilung der Reliefparameter Hangneigung (oben) und Wetness Index mit Häufigkeitsverteilungen auf den Schlägen ($n = 16348$ Rasterzellen, jeweils oben) und aus dem Punktdatensatz (Schläge 1-6, $n = 93$)

über ein Histogramm ermittelt und dargestellt. Im Vergleich zwischen der gesamten Fläche ($n = 16348$ Rasterzellen) und dem Punktdatensatz ($n = 93$) ist für beide Reliefparameter ein

ähnlicher Kurvenverlauf der Normalverteilung festzustellen. Neben dem Maximum der Hangneigungsverteilung bei 0° wurde auch das sekundäre Maximum der Hangneigung um 2° mit dem Punktdatensatz erfasst. Beim Wetness Index sind mittlere Bereiche um 8-9 etwas unterrepräsentiert, wie auch höchste Werte für beide Reliefattribute. Insgesamt betrachtet folgen die Normalverteilungskurven des Punktdatensatzes denen der gesamten Fläche. In Anbetracht von nur 93 Punkten auf einer Fläche von 255 ha kann die Erfassung der Reliefsituation als repräsentativ angesehen werden. Die Standardabweichung der Hangneigung und des Wetness Index sind sowohl für den Punktdatensatz als auch flächenbezogen deutlich geringer, die Varianz der Reliefeigenschaften auf dem Schlag Sandkamp/Wiese folglich als höher zu erachten.

Aus der Korrelationsanalyse gehen für die meisten Bodeneigenschaften keine oder nur sehr schwach signifikante Zusammenhänge mit den Reliefparametern hervor (vgl. Tab. 4.18). Lediglich der Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) und die Trockenrohdichte (dB) weisen vergleichsweise hohe Koeffizienten mit der Hangneigung (β ; $r = -0,561$, bzw. $0,531$), der Höhe über der Tiefenlinie (H_{Ch} ; $r = -0,479$, bzw. $0,493$), dem LS-Faktor (LS ; $-0,440$, bzw. $0,486$) und vor allem dem Wetness Index (w ; $0,646$, bzw. $-0,570$) auf. Für die effektive Lagerungsdichte (Ld_{eff}) sind im Gegensatz zur Trockenrohdichte höhere Zusammenhänge mit den Wölbungsparametern (C_v und C_h), dem Konvergenz/Divergenz Index (CDI) und der spezifischen Einzugsgebietsgröße (A_s) zu verzeichnen, was auf den Einfluss des Tongehaltes bei der Berechnung zurückzuführen ist. Für diese Parameter ergeben sich ähnliche Zusammenhänge wie zuvor auf dem Schlag, die Koeffizienten fallen jedoch etwas schwächer aus. Für die Korngrößenfraktionen sind dagegen fast keine signifikanten Zusammenhänge zu verzeichnen. Lediglich für den Tongehalt ergeben sich Koeffizienten von $r = -0,254$ mit dem Stream Power Index (Ω) und dem Hanglängenfaktor (LS) von $r = 0,247$ bei einem Signifikanzniveau von 95 %. Für die Bodenhaushaltsparameter liegen im Allgemeinen nur schwache Korrelationen mit den Reliefparametern vor. Sie basieren vor allem auf dem Zusammenhang mit dem C_{org} -Gehalt (KAK_{pot} und Retentionsvermögen) und der Trockenrohdichte (Retentionsvermögen)

Tabelle 4.18: Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Oberbodens und den Reliefparametern für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93)

Bodenparameter	Reliefparameter									
	H	β	C_v	C_h	CDI	A_s	H_{Ch}	w	Ω	LS
T [Gew.-%]	-0,122	-0,194	0,102	0,097	0,110	-0,101	-0,156	0,093	-0,254*	-0,247*
U [Gew.-%]	0,058	0,076	0,019	-0,085	-0,085	0,107	0,068	0,000	0,154	0,088
S [Gew.-%]	0,075	0,094	-0,088	-0,010	-0,010	0,001	0,088	-0,077	0,092	0,132
C_{org} [Gew.-%]	-0,308**	-0,561**	-0,476**	-0,410**	-0,422**	0,392**	-0,479**	0,646**	-0,148	-0,440**
dB [$g \cdot cm^{-3}$]	0,396**	0,531**	0,303**	0,221*	0,386**	-0,386**	0,493**	-0,570**	0,234*	0,486**
Ld_{eff} [$g \cdot cm^{-3}$]	0,382**	0,489**	0,365**	0,293**	0,460**	-0,436**	0,465**	-0,576**	0,139	0,415**
KAK_{pot} [$cmol_c \cdot kg^{-1}$]	-0,208*	-0,350**	-0,078	-0,061	-0,084	0,051	-0,277**	0,294**	-0,265*	-0,348**
KAK_{eff} [$cmol_c \cdot kg^{-1}$]	-0,162	-0,266**	0,006	0,011	-0,013	-0,014	-0,201	0,199	-0,241*	-0,288**
Ret. pF_{FK} [Vol.-%]	-0,320**	-0,460**	-0,226*	-0,182	-0,309**	0,286**	-0,403**	0,478**	-0,244*	-0,441**
Ret. pF_{nFK} [Vol.-%]	-0,202	-0,319**	-0,051	-0,047	-0,081	0,052	-0,255*	0,269**	-0,250*	-0,332**
Ret. pF_{PWP} [Vol.-%]	-0,144	-0,259*	0,021	0,031	0,024	-0,048	-0,187	0,173	-0,262*	-0,292**

Korrelationskoeffizienten nach SPEARMAN; **zweiseitiges Signifikanzniveau von 99 %, * von 95 %, H = Höhe über NN, β = Hangneigung, C_v = vertikale Wölbung, C_h = horizontale Wölbung, CDI = Konvergenz/Divergenz-Index, A_s = spezifisches Einzugsgebiet, H_{Ch} = Höhe über Tiefenlinie, w = Wetness Index, Ω = Streampower Index, LS = LS-Faktor.

als Eingangsparameter für deren Berechnung. Die zumeist sinkende Tendenz des Zusammenhangs mit dem Retentionsvermögen bei zunehmender Saugspannung ist folgerichtig und mit der verstärkten Einflussnahme der Tongehalte zu erklären.

Bei den anschließend durch schrittweise multiple Regressionen aufgestellten Modellgleichungen geht zumeist die Hangneigung als erklärende unabhängige Variable ein (vgl. Tab. 4.19). Ausnahmen ergeben sich lediglich für die Bodendichteparameter, bei denen der LS-Faktor (LS) und der Wetness Index (w) Eingang finden. Höchste Anteile erklärter Varianz ergeben sich für die Trockenrohdichte (dB) mit 31,5 %, die effektive Lagerungsdichte (Ld_{eff}) mit 30,2 % und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) mit 19,6 %. Deutlich geringer fallen dagegen die Erklärungsgehalte für die Korngrößenfraktionen mit 4,8 % für den Ton-, 0,9 % für den Schluff- und 1,9 % für den Sandgehalt aus. Die Bestimmtheitsmaße der Regression sind damit deutlich geringer als auf der Feldskala, wobei die Relationen zwischen den Bodenvariablen gleich geblieben sind.

Tabelle 4.19: Parameter der schrittweisen multiplen Regression zwischen den Eigenschaften des Oberbodens und den Reliefparametern für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93)

Bodenparameter	b (Reliefparameter)				Gleichungsparameter	
	β	LS	Ω	w	a	R^2
Tongehalt [Gew.-%]	-0,654	-	-	-	20,215	0,048
Schluffgehalt [Gew.-%]	0,194	-	-0,001	-	34,930	0,007
Sandgehalt [Gew.-%]	0,125	0,939	-	-	44,749	0,019
C_{org} -Gehalt [Gew.-%]	-0,171	-	-	-	1,960	0,196
Rohdichte, tro. [$g \cdot cm^{-3}$]	-	0,033	-	0,0173	1,626	0,315
Ld_{eff} [$g \cdot cm^{-3}$]	-	0,023	-	0,0154	1,788	0,302
KAK_{pot} [$cmol_c \cdot kg^{-1}$]	-1,002	-	-	-	19,696	0,138
KAK_{eff} [$cmol_c \cdot kg^{-1}$]	-0,561	-	-	-	14,766	0,086
Ret. pF_{FK} [Vol.-%]	-0,766	-	-	-	37,264	0,179
Ret. pF_{nFK} [Vol.-%]	-0,717	-	-	-	30,553	0,105
Ret. pF_{PWP} [Vol.-%]	-0,663	-	-	-	16,563	0,085

β = Hangneigung, w = Wetness Index, LS = LS-Faktor, Ω = Streampower Index, a = Achsenabschnitt, R^2 = Bestimmtheitsmaß der Regression.

Gemäß den vorliegenden Ergebnissen ist auf der feldübergreifenden Skala die räumliche Variabilität zu erhöhten Anteilen nur für die Bodeneigenschaften der Bodendichte und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff mit den Reliefparametern zu erklären. Die Verteilung der Korngrößen außerhalb einer Bearbeitungseinheit ist in erfolgter Art und Weise offensichtlich nicht oder nur zu einem sehr geringen Teil über das Relief zu erklären.

4.2.3 Die Beziehung zwischen den bodenhaushaltlichen Eigenschaften und den Vegetationsindizes

Für die Untersuchung der Beziehung zwischen dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) und den Bodenhaushaltsparametern auf der feldübergreifenden Skala kamen jeweils nur die beprobten Standorte in Frage, die bei der jeweiligen betrachteten Szene die gleiche Feldfrucht aufweisen (vgl. Kapitel 4.1.3).

Durch den Fruchtfolgewechsel ergibt sich hieraus für jedes Jahr ein unterschiedlicher Stichprobenumfang (vgl. Tab. 4.20). Zu größten Anteilen wurde in allen betrachteten Jahren Winterweizen angebaut, sodass sich die im Folgenden dargestellten Ergebnisse nur hierauf beziehen.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zeigen für die Jahre 2000 und 2001 keine signifikanten Zusammenhänge zwischen dem NDVI und den Bodenhaushaltsparametern, wohingegen die der Jahre 2002 und 2003 negative, größtenteils signifikante Koeffizienten aufweisen (vgl. Tab. 4.20). Damit zeichnen sich die in Kapitel 4.1.1.3 bereits beschriebenen Verhältnisse für

Tabelle 4.20: Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Oberbodens und dem Vegetationsindex NDVI für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93)

System	Aufnahmedatum	Anzahl n	Bodenhaushaltsparameter				
			KAK _{pot} [cmol _c *kg ⁻¹]	KAK _{eff} [cmol _c *kg ⁻¹]	Retentionsvermögen [Vol.-%] bei		
					FK	nFK	PWP
Landsat 7 ETM+	15.05.2000	93	-0,064	-0,079	-0,057	-0,093	-0,089
CIR-Luftbild	10.05.2001	66	0,033	-0,034	0,049	-0,010	-0,049
Landsat 7 ETM+	11.05.2001	66	0,066	-0,009	0,086	0,023	-0,018
Spot 4	09.05.2002	74	-0,426**	-0,481**	-0,430**	-0,468**	-0,491**
Landsat 7 ETM+	06.06.2002	74	-0,268*	-0,308**	-0,270*	-0,299**	-0,327**
Aster TERRA	22.06.2003	62	-0,207	-0,224	-0,150	-0,225	-0,260*

Korrelationskoeffizienten nach SPEARMAN; **zweiseitiges Signifikanzniveau von 99 %, * von 95 %, n = 93; Schläge 1-6, n = 66; ohne Schlag 3 und 5 (Plumpstal, Sagerstelle), n = 74; ohne Schlag 1a (Sandkamp), n = 62; ohne Schlag 1a und 3 (Sandkamp, Plumpstal).

die gesamtheitlich betrachteten Schläge nach. Allerdings geht aus der Korrelationsanalyse für keine Szene ein zu erwartender positiver Zusammenhang hervor, sodass der NDVI der hier verwendeten Fernerkundungsdaten nicht als Co-Variable für die Regionalisierung der Bodenhaushaltsparameter auf der feldübergreifenden Skala in Betracht gezogen werden kann.

Es ist anzunehmen, dass weniger die Bodeneigenschaften für die räumliche Verteilung der biotischen Wuchsleistung als vielmehr das Relief als bestimmender Faktor hierfür in Erscheinung tritt (vgl. Kapitel 4.1.3.). Um dieser Frage nachzugehen, wurde auch der Zusammenhang zwischen dem NDVI und dem Relief durch eine Korrelationsanalyse ermittelt. Im Ergebnis zeigt die Korrelationsanalyse der Szenen aus den Jahren 2000, 2001 und 2003 schwache bis mittlere Koeffizienten (vgl. Tab.4.21). Höchste signifikante Zusammenhänge werden mit den Reliefparametern der Vertikalwölbung (C_v ; $r = -0,576$), dem Konvergenz/Divergenz Index (CDI ; $r = -0,535$), dem spezifischen Einzugsgebiet (A_s ; $r = 0,534$) und dem Wetness Index (w ; $r = 0,523$) erreicht. Daraus geht hervor, dass höhere NDVI-Werte in Bereichen mit einem reliefinduzierten Zuschuss von Wasser zu verzeichnen sind, geringere hingegen in höhergelegenen, divergenten Reliefsituationen. Deutlich geringere Koeffizienten treten hingegen bei der Spot- und Landsat-Szene aus dem Jahre 2002 auf. Dies ist als Folge der bereits in Kapitel

4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten

Tabelle 4.21: Zusammenhang zwischen den Reliefparametern und dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93)

NDVI	Reliefparameter									
	<i>H</i>	β	C_v	C_h	<i>CDI</i>	A_s	H_{Ch}	<i>w</i>	Ω	<i>LS</i>
Landsat 7 ETM+ 15.05.2000 n = 93 / 66 / 74 / 62	0,200	0,039	-0,361**	-0,238*	-0,279**	0,351**	-0,338**	0,231*	0,367**	0,202
	-0,089	-0,160	-0,466**	-0,257*	-0,400**	0,292*	-0,402**	0,327**	0,240	0,134
	0,202	0,150	-0,236*	0,223	-0,275*	0,322**	-0,147	0,138	0,445**	0,314**
	0,096	0,094	-0,263*	-0,241	-0,340**	0,376**	-0,149	0,206	0,472**	0,253*
CIR-Luftbild 10.05.2001 n = 66	-0,071	-0,292*	-0,576**	-0,373**	-0,378**	0,162	-0,310**	0,358**	0,177	0,017
Landsat 7 ETM+ 11.05.2001 n = 66	-0,315*	-0,341**	-0,566**	-0,273*	-0,445**	0,215	-0,513**	0,419**	0,248*	-0,012
Spot 4 09.05.2002 n = 74 / 62	0,336**	0,102	-0,216	-0,178	-0,214	0,227	0,000	0,067	0,301**	0,170
	0,370**	0,149	-0,202	-0,168	-0,204	0,193	0,043	0,018	0,303*	0,183
Landsat 7 ETM+ 06.06.2002 n = 74 / 62	0,258*	0,084	-0,192	-0,056	-0,127	0,135	0,080	0,029	0,240*	0,172
	0,280*	0,254	0,119	0,869	-0,110	0,094	0,108	-0,030	0,264*	0,203
Aster TERRA 22.06.2003 n = 62	-0,253*	-0,301*	-0,397**	-0,441**	-0,535**	0,534**	-0,380**	0,523**	0,333**	-0,047

Korrelationskoeffizienten nach SPEARMAN; **zweiseitiges Signifikanzniveau von 99 %, * von 95 %, *H* = Höhe über NN, β = Hangneigung, C_v = vertikale Wölbung, C_h = horizontale Wölbung, *CDI* = Konvergenz/Divergenz Index, A_s = spezifisches Einzugsgebiet, H_{Ch} = Höhe über Tiefenlinie, *w* = Wetness Index, Ω = Streampower Index, *LS* = LS-Faktor, n = 93; Schläge 1-6, n = 66; ohne Schlag 3 und 5 (Plumpsal, Sagerstelle), n = 74; ohne Schlag 1a (Sandkamp), n = 62; ohne Schlag 1a und 3 (Sandkamp, Plumpsal).

4.1.3 erwähnten intensiven Niederschläge im Winter zu sehen, die sich offensichtlich auch auf die hier einbezogenen Schläge ausgewirkt haben. Im Gegensatz dazu folgen die mit dem NDVI der Aster-Szene aus dem Jahre 2003 berechneten Koeffizienten den Tendenzen der Szenen aus den Jahren 2000 und 2001, während für den Schlag Sandkamp/Wiese keine signifikanten Zusammenhänge festgestellt werden konnten (vgl. Kapitel 4.1.3). Vermutlich liegt die Ursache darin, dass ein Großteil der Entwässerung der umgebenen Schläge über den zentralen Senkenbereich des Schlages Sandkamp/Wiese erfolgt (s. Abb. 4.15). Durch entsprechend hohe Niederschläge werden tiefstgelegene Bereiche mit großem Einzugsgebiet ver- nässt, während höhergelegene nicht oder nur in geringem Ausmaß hiervon betroffen sein können.

Die Auswirkungen der reliefabhängigen Vernässungsneigung geht deutlich aus der Abbildung 4.16 hervor. Während in der Landsat-Szene vom 11.05.2001 vor allem stärker reliefierte Standorte mit geringem NDVI auf den betrachteten Schlägen hervortreten, kommen in der Spot-Szene vom 09.05.2002 auch tiefergelegene Bereiche, sowie abflusslose Senken hinzu. Daher gehen aus der Korrelationsanalyse mit dem NDVI der Szenen aus den betroffenen Jahren und den Reliefparametern keine signifikanten Koeffizienten hervor. Aus der multiplen linearen Regression zwischen den Reliefparametern und dem NDVI gehen Erklärungsgehalte von 47,3 % für die Landsat-Szene aus dem Jahr 2000, bzw. 40,8 % für die des Jahres 2001

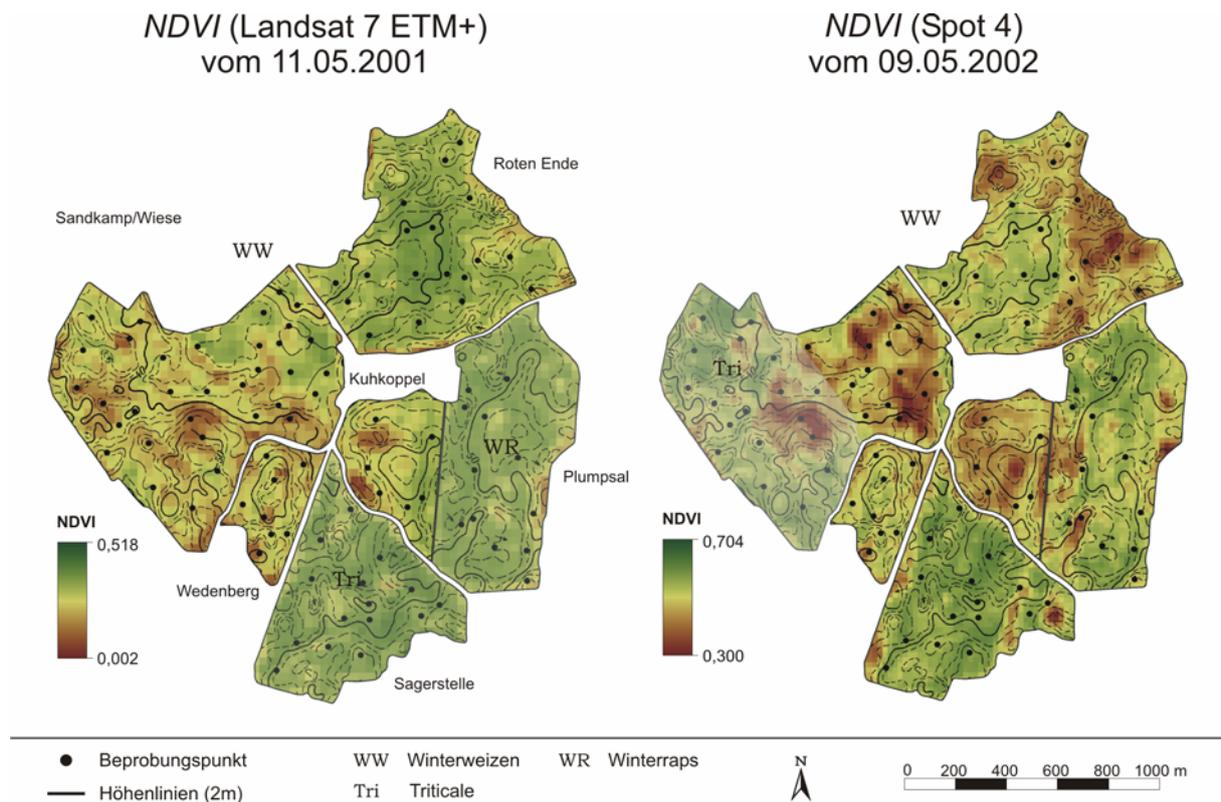


Abbildung 4.16: Räumliche Verteilung des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) der Landsat 7 ETM+ – Szene vom 11.05.2001 und der Spot 4 – Szene vom 09.05.2002, ausgeblendete Schläge wurden bei der Korrelationsanalyse nicht berücksichtigt.

hervor (vgl. Tab. 4.22). Das Bestimmtheitsmaß der Regression mit dem NDVI der Aster-Szene fällt dagegen mit einem R^2 von 0,183 geringer aus. Finden jedoch die Punkte des Schlags Sandkamp/Wiese keine Berücksichtigung, steigt der Anteil erklärter Varianz auf 45,4 % bei einem Stichprobenumfang von dann nur noch 47 Punkten.

Tabelle 4.22: Ergebnisse der schrittweisen multiplen Regressionen zwischen dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) und den Reliefparametern für den Datensatz der Schläge 1-6 ($n = 93$)

NDVI	Datum	n	In die MLR eingegangene Reliefparameter	R^2
Landsat 7 ETM+	15.05.2000	93	H, C_v , A_s , H_{Ch}	0,473
Landsat 7 ETM+	11.05.2001	66	C_v , H_{Ch}	0,408
Aster TERRA	22.06.2003	62	CDI	0,183

H = Höhe über NN, C_v = vertikale Wölbung, A_s = spezifisches Einzugsgebiet, H_{Ch} = Höhe über Tiefenlinie, CDI = Konvergenz/Divergenz Index, LS = LS-Faktor, R^2 = Bestimmtheitsmaß der Regression, $n = 93$; Schläge 1-6, $n = 66$; ohne Schlag 3 und 5 (Plumpsal, Sagerstelle), $n = 62$; ohne Schlag 1a und 3 (Sandkamp, Plumpsal).

Damit konnte gezeigt werden, dass die Verteilung des NDVI auf den untersuchten Schlägen zu einem großen Teil durch die Reliefparameter erklärt werden kann, wohingegen mit den Bodenhaushaltsparametern keine signifikanten Abhängigkeiten zu verzeichnen sind. Folglich ist der NDVI der vorliegenden Szenen nicht geeignet, als Co-Variable für die Regionalisierung der Bodenhaushaltsparameter genutzt zu werden.

4.2.4 Ergebnisse der Interpolationsverfahren

Die Ergebnisse der Kreuzvalidierung der mit dem **Inverse Distance Weighting** - Verfahren (IDW) interpolierten Werte für die feldübergreifende Skala sind der Tabelle 4.23 zu entnehmen. Die über den *MAE* zu beschreibende durchschnittliche absolute Abweichung zwischen

Tabelle 4.23: Güte der Interpolationsergebnisse der Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93) auf Grundlage des Inverse Distance Weighting -Verfahrens

	Bodenparameter										
	T [Gew.-%]	U [Gew.-%]	S [Gew.-%]	C _{org} [Gew.-%]	dB [g*cm ⁻³]	Ld _{eff} [g*cm ⁻³]	KAK _{pot} [cmol _c *kg ⁻¹]	KAK _{eff} [cmol _c *kg ⁻¹]	Ret.vermögen [Vol.-%] bei		
									FK	nFK	PWP
Power <i>p</i>	1,44	1,82	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
MAE	4,05	3,48	6,58	0,47	0,04	0,09	3,62	2,63	2,37	3,02	3,14
RMSE	5,33	5,03	8,80	0,75	0,06	0,11	4,89	3,46	3,18	4,02	4,09

MAE = mean absolute error, *RMSE* = root mean square error.

den gemessenen und geschätzten Werten beträgt für die Korngrößenfraktionen zwischen 6,58 % für den Sand- und 3,48 % für den Schluffgehalt. Die Interpolationsergebnisse des organischen Kohlenstoffgehaltes und der Trockenrohdichte ergeben mittlere Abweichungen von 0,47 %, bzw. 0,04 %. Im Gegensatz zur Feldskala ist mit Ausnahme für die Ton- und Schluffgehalte ein deutlich geringerer Gewichtungsfaktor von $p = 1$ bei gleichzeitig erhöhter Schätzvarianz zu verzeichnen, was auf eine räumlich kürzer reichende Ähnlichkeit der Werte schließen lässt.

Für die Anwendung der **geostatistischen Verfahren** des Ordinary und Simple Kriging (*OK*, bzw. *SK*) wurde für alle Bodenparameter eine Variogrammanalyse mit anschließender Modellanpassung durchgeführt. Ausgewählte Variogramme sind in der Abbildung 4.17 darge-

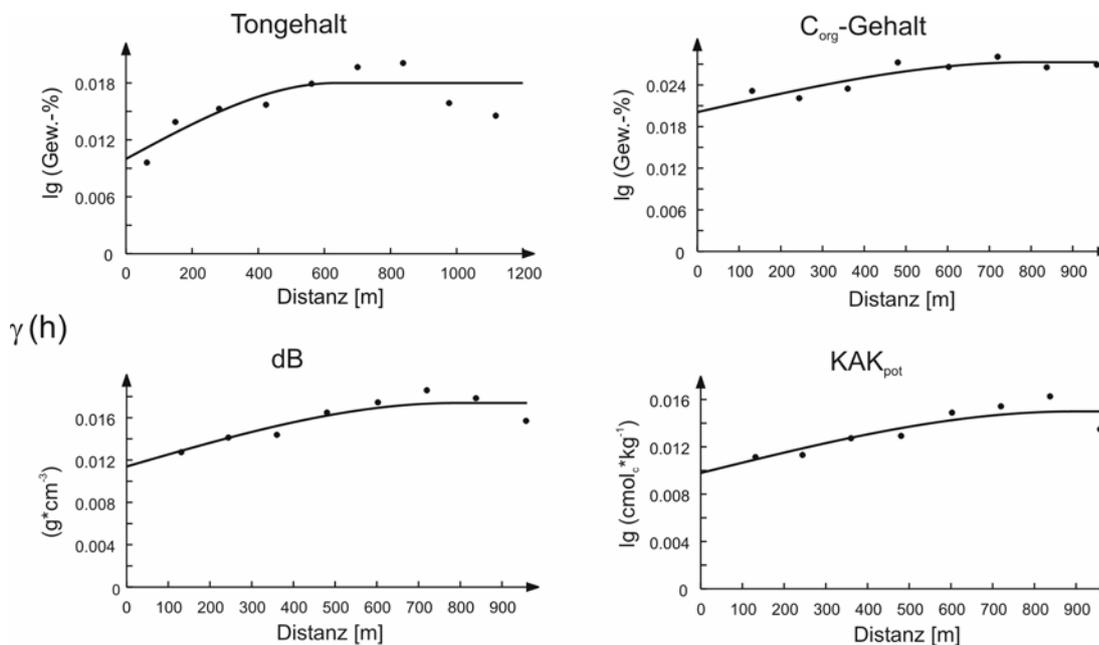


Abbildung 4.17: Ausgewählte sphärische Variogramme der Bodeneigenschaften für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93)

stellt. Bei Betrachtung der Kurvenverläufe ist allgemein ein flacher Anstieg zu verzeichnen, der eine nur schwach ausgeprägte räumliche Autokorrelation erkennen lässt. Mit Reichweiten zwischen 172,0 m für den Schluffgehalt und maximalen 931,2 m für die effektive Kationenaustauschkapazität (vgl. Tab. 4.24) liegt die Erhaltungsneigung aller Bodenparameter unterhalb der von HEINRICH (1994) angesetzten maximalen Distanz von 50 % des gesamten Untersuchungsraumes, der hier 1947 m umfasst (vgl. Kapitel 3.4.3). Durch den „Nugget to Sill Ratio“ (NSR) werden in den meisten Fällen mittel bis gering strukturierte räumliche Abhängigkeiten (26,1 % - 73,6 %) beschrieben. Ausnahmen stellen das Retentionsvermögen beim permanenten Welkepunkt (*PWP*) und der Schluffgehalt mit einem eindeutig geringen Grad (75,0 %, bzw. 84,3 %) räumlicher Kovarianz dar (vgl. Tab. 4.24).

Tabelle 4.24: Semivariogrammparameter der Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93)

Zielvariable	Transformation	Nugget-varianz C_0	Schwellenwert C_s	Reichweite a [m]	NSR [%]
Tongehalt [Gew.-%]	lg	0,010	0,008	636,0	55,6
Schluffgehalt [Gew.-%]	-	19,780	3,680	172,0	84,3
Sandgehalt [Gew.-%]	-	49,400	31,920	221,0	60,7
C_{org} -Gehalt [Gew.-%]	lg	0,020	0,007	796,8	73,6
Rohdichte, tro. [$g \cdot cm^{-3}$]	-	0,011	0,006	787,2	65,5
$L_{d_{eff}}$ [$g \cdot cm^{-3}$]	-	0,010	0,004	880,0	73,9
KAK_{pot} [$cmol_c \cdot kg^{-1}$]	lg	0,010	0,005	892,8	65,3
KAK_{eff} [$cmol_c \cdot kg^{-1}$]	lg	0,004	0,010	931,2	26,1
Ret. pF_{FK} [Vol.-%]	lg	0,001	0,001	864,0	61,0
Ret. pF_{nFK} [Vol.-%]	lg	0,003	0,001	892,8	66,7
Ret. pF_{PWP} [Vol.-%]	lg	0,011	0,004	858,0	75,0

Alle Variogrammmodelle sphärisch, NSR =Nugget to Sill Ratio

Damit liegen auf dieser Skala vergleichsweise hohe Reichweiten bei einem deutlich geringeren Grad räumlicher Autokorrelation im Vergleich zur Feldskala vor. Die relativ hohe Nuggetvarianz deutet auf einen großen Teil nicht erfasster räumlicher Variabilität hin.

Für das **hybride Regionalisierungsverfahren** des Regressions-Kriging kamen gemäß den Ergebnissen in Kapitel 4.2.2 die Reliefparameter, als wenn auch nur in geringem Maße die räumliche Verteilung der Bodeneigenschaften erklärende Co-Variablen, zum Einsatz. Mit dem NDVI konnten dagegen keine signifikanten Zusammenhänge ermittelt werden, weshalb sie nicht in das Regressions-Kriging eingebunden werden konnten (vgl. Kapitel 4.2.3).

Die Semivariogramme der mittels MLR mit den Reliefparametern geschätzten Werte sind auszugsweise in Abbildung 4.18 dargestellt. Auch hier zeigen die Kurvenverläufe einen flachen Anstieg bei relativ hoher Nuggetvarianz. Die Reichweiten liegen meistens zwischen 595,2 m (Sandgehalt) und 691,2 m (Schluffgehalt), maximale Erhaltungsneigungen von 940,8 m und 950,4 m sind für die Trockenrohndichte, bzw. effektive Lagerungsdichte zu verzeichnen (vgl. Tab. 4.25). Der „Nugget to Sill Ratio“ (NSR) weist in den meisten Fällen Prozentwerte im Grenzbereich zwischen einer mittleren und schwach strukturierten räumlichen Abhängigkeit auf. Lediglich der Schluffgehalt und die Parameter der Bodendichte fallen mit

4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten

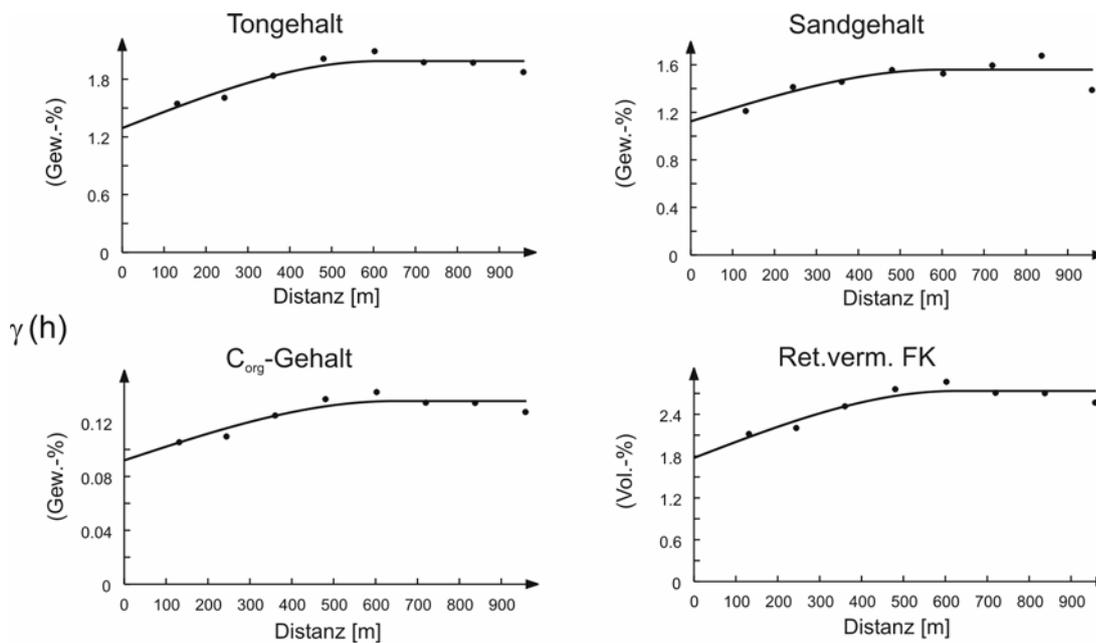


Abbildung 4.18: Ausgewählte sphärische Variogramme der mittels MLR geschätzten Bodeneigenschaften für den Datensatz der Schläge 1-6 ($n = 93$).

einem größeren NSR von über 75 % und damit einem hohen Grad unerklärter Varianz aus dem Rahmen.

Für die aus der MLR mit den Reliefparametern hervorgegangenen Residuen war in der Modellanpassung des experimentellen Variogramms für alle Bodenvariablen die Nuggetvarianz gleich dem Schwellenwert. Folglich ist die räumlich unabhängige und zufällige Varianz als größer zu interpretieren und in der Konsequenz die Kriginginterpolation als ungeeignetes Verfahren zu erachten. Damit kann für den Datensatz der feldübergreifenden Skala unter den hybriden Verfahren lediglich das Regressions-Kriging Modell „A“ angewendet werden.

Tabelle 4.25: Semivariogrammparameter der aus der MLR vorhergesagten Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz der Schläge 1-6 ($n = 93$)

Zielvariable	Co-Variablen	R ²	Nugget-varianz C ₀	Schwellenwert C _s	Reichweite a [m]	NSR [%]
Tongehalt [Gew.-%]	β	0,048	1,292	0,697	614,4	65,0
Schluffgehalt [Gew.-%]	β, Ω	0,007	0,144	0,046	691,2	75,8
Sandgehalt [Gew.-%]	β, LS	0,019	1,125	0,435	595,2	72,1
C _{org} -Gehalt [Gew.-%]	β	0,196	0,092	0,044	643,2	67,6
Rohdichte, tro. [g*cm ⁻³]	w, LS	0,315	0,005	0,001	940,8	83,9
Ld _{eff} [g*cm ⁻³]	w, LS	0,302	0,004	0,001	950,4	80,2
KAK _{pot} [cmol _c *kg ⁻¹]	β	0,138	3,040	1,640	624,0	65,0
KAK _{eff} [cmol _c *kg ⁻¹]	β	0,086	0,975	0,494	633,6	66,4
Ret. pF _{FK} [Vol.-%]	β	0,179	1,776	0,960	624,0	64,9
Ret. pF _{nFK} [Vol.-%]	β	0,105	1,554	0,840	614,4	64,9
Ret. pF _{PWP} [Vol.-%]	β	0,085	1,350	0,702	633,6	65,8

Alle Variogrammodelle sphärisch, β = Hangneigung, w = Wetness Index, LS = LS-Faktor, Ω = Streampower Index, NSR = Nugget to Sill Ratio

4.2.5 Vergleich der angewendeten Regionalisierungsmethoden

Der Vergleich der angewendeten Methoden zur Regionalisierung erfolgt auch hier über den aus der Kreuzvalidierung berechneten „*root mean square error*“ (RMSE). Die Ergebnisse der Modellvalidierung sind der Tabelle 4.26 zu entnehmen. Die geringsten mittleren Abweichungen zwischen den gemessenen und den geschätzten Variablen sind für die meisten Bodenbasisparameter aus der multiplen linearen Regression (MLR) mit den Reliefparametern hervorgegangen. Unter den Punktinterpolationsverfahren zeigt das Regressions-Krigingmodell „A“ die besten Ergebnisse und zeugt damit von einer verbesserten Schätzgenauigkeit gegenüber den einfachen Interpolationsverfahren, durch die hierbei integrierten Co-Variablen. Dabei ist die durch den RMSE beschriebene Schätzabweichung nur unwesentlich höher als bei den Ergebnissen aus der MLR. Für den Tongehalt und die Bodenhaushaltsparameter sind die geringsten Schätzabweichungen hingegen mit dem Inverse Distance Weighting Verfahren (IDW) zu verzeichnen. Daraus geht hervor, dass die Verteilung der Tongehalte weder über die

Tabelle 4.26: Ergebnisse der Kreuzvalidierung der Regionalisierungsmodelle mittels RMSE (root mean square error) für den Datensatz der Schläge 1-6 (n = 93)

Bodenparameter	Mittelwert	Regionalisierungsmethode				
		<i>MLR_{Rel}</i>	<i>IDW</i>	<i>SK</i>	<i>OK</i>	<i>RK_A</i>
RMSE						
T [Gew.-%]	18,79	5,810	5,332	5,467	5,478	5,794
U [Gew.-%]	35,33	4,761	5,029	4,882	5,181	4,770
S [Gew.-%]	45,88	8,646	8,801	8,658	9,070	8,655
C _{org} [Gew.-%]	1,59	0,690	0,749	0,747	0,748	0,727
dB [g*cm ⁻³]	1,51	0,102	0,112	0,113	0,116	0,110
Ld _{eff} [g*cm ⁻³]	1,68	0,087	0,105	0,104	0,105	0,096
KAK _{pot} [cmol _c *kg ⁻¹]	17,52	4,990	4,885	4,952	4,949	5,096
KAK _{eff} [cmol _c *kg ⁻¹]	13,55	3,638	3,464	3,538	3,528	3,661
Ret. pF _{FK} [Vol.-%]	35,60	3,269	3,181	3,228	3,254	3,359
Ret. pF _{nFK} [Vol.-%]	28,99	4,154	4,022	4,085	4,101	4,226
Ret. pF _{PWP} [Vol.-%]	15,12	4,320	4,094	4,182	4,188	4,370

MLR_{Rel} = Multiple lineare Regression mit den Reliefparametern, *IDW* = Inverse Distance Weighting, *SK* = Simple Kriging, *OK* = Ordinary Kriging, *RK_A* = Regressions-Kriging Modell A.

räumliche autokorrelative Komponente noch über das Relief in ausreichendem Maße erklärt werden kann. Bei den Bodenhaushaltsparametern verhält es sich ebenso, da sie zu einem großen Teil durch den Tongehalt bestimmt werden.

Die beschriebenen Verhältnisse können beispielhaft anhand der vorhergesagten räumlichen Verteilungen nachvollzogen werden. Bei der durch die MLR geschätzten Tongehalte auf Basis der Hangneigung als einzige erklärende unabhängige Variable ($R^2 = 0,048$) ist deutlich zu verzeichnen, dass gemessene höchste Tongehalte von bis zu 43,1 Gew.-% stark unterschätzt wiedergegeben werden (vgl. Abb. 4.19, oben links). Beim IDW treten Spots oder „*bull-eyes*“ auf, die den eher lokalen Charakter des IDW-Verfahrens wiedergeben, wobei die Spannweite der gemessenen Werte erhalten bleibt, deren Verteilung allerdings wenig plausibel oder er-

Tongehalt, geschätzt [Gew.-%]

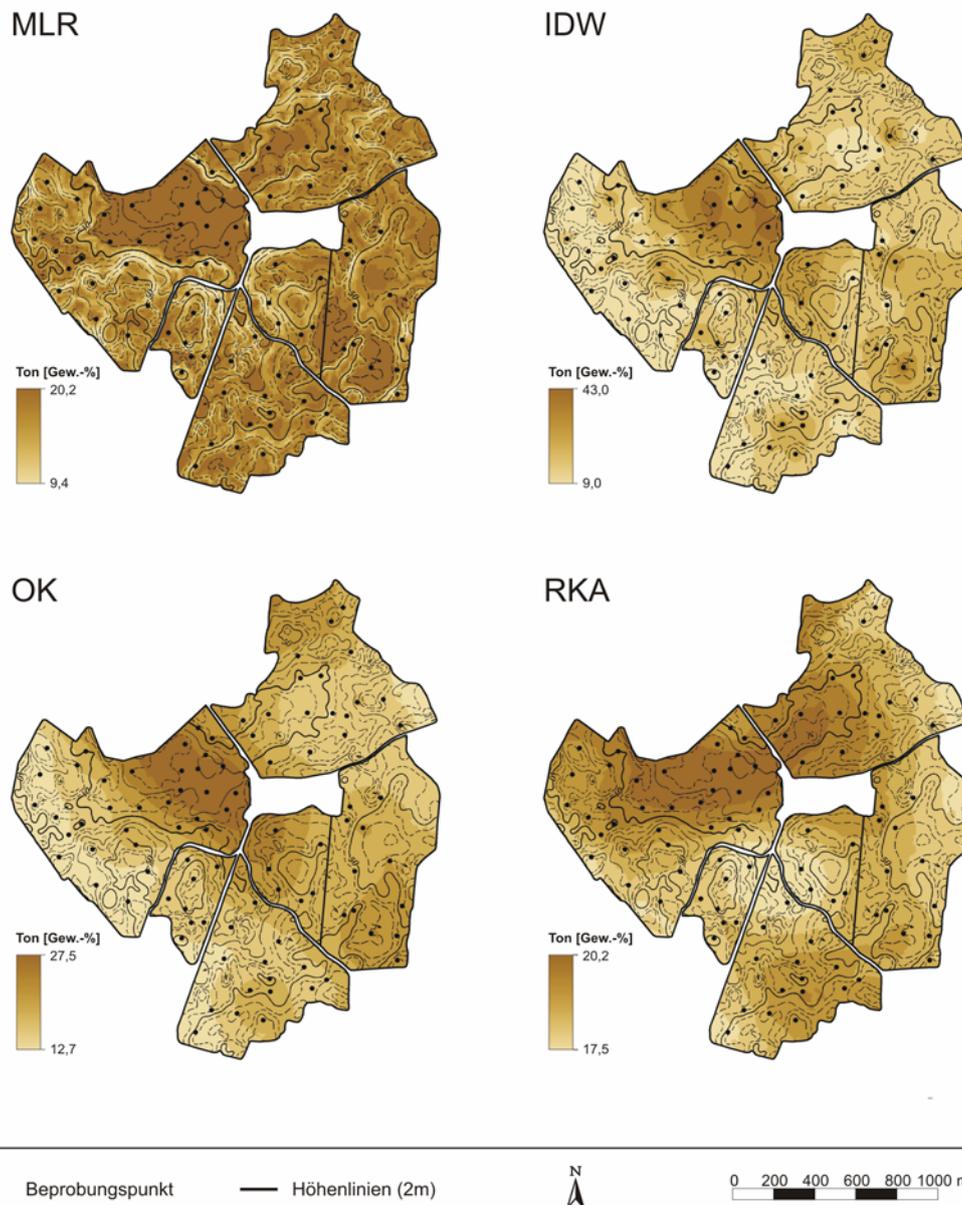


Abbildung 4.19: Geschätzte räumliche Verteilung des Tongehaltes für den Datensatz der Schläge 1-6 ($n = 93$)

klärbar erscheint. Durch das OK erfolgt eine Glättung der Werte, wodurch die Spannweite der Ausprägungen reduziert wird. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn nur eine mittlere oder schwache räumliche Autokorrelation, wie hier, vorliegt. Die durch das RKA ermittelten Verteilungen zeigen eine noch geringere Differenziertheit der geschätzten Werte, die Spannweite beträgt nur noch 2,7 Gew.-%. Anders verhält sich dies hingegen für die Verteilung der C_{org} -Gehalte. Zwar werden auch hier durch die lineare Regression mit der Hangneigung die Werte deutlich über- oder unterschätzt (vgl. Abb. 4.20), aber durch den gegenüber dem Tongehalt höheren Grad erklärter Variabilität von 19,6 % ist die durch den RMSE beschriebene Schätz-

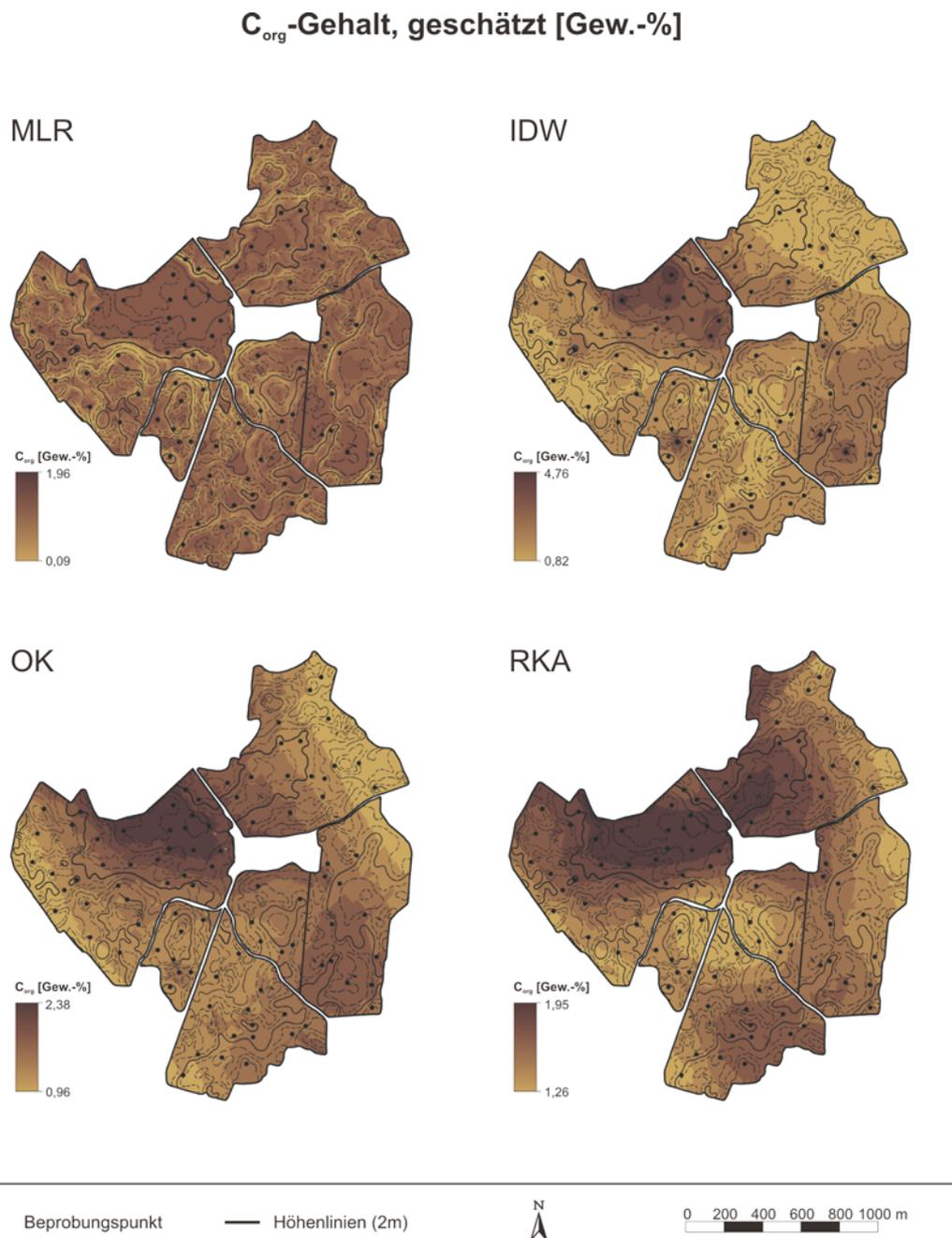


Abbildung 4.20: Geschätzte räumliche Verteilung des organischen Kohlenstoffgehaltes (C_{org}) für den Datensatz der Schläge 1-6 ($n = 93$)

abweichung der MLR und des RKA geringer, als die der anderen angewendeten Verfahren. Aus der Regionalisierung mittels MLR treten allerdings Werte gegen Null an stark geneigten Hängen auf, die in der Regression mit dem Punktdatensatz nicht erfasst wurden (s. Abb. 4.20), wohingegen in den Senkenbereichen bei allen Verfahren zu geringe C_{org} -Gehalte ausgewiesen werden. Neben den genannten Bereichen tritt ansonsten keine erkennbare räumliche Differenzierung der C_{org} -Gehalte hervor. In ähnlicher Weise sind die Ergebnisse für die Trockenrohdichte zu beschreiben, wobei ein höheres Bestimmtheitsmaß der Regression von $R^2 = 0,315$ vorliegt. Auch hier zeigt sich die MLR als beste Methode, es werden jedoch viel

Trockenrohdichte, geschätzt [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]

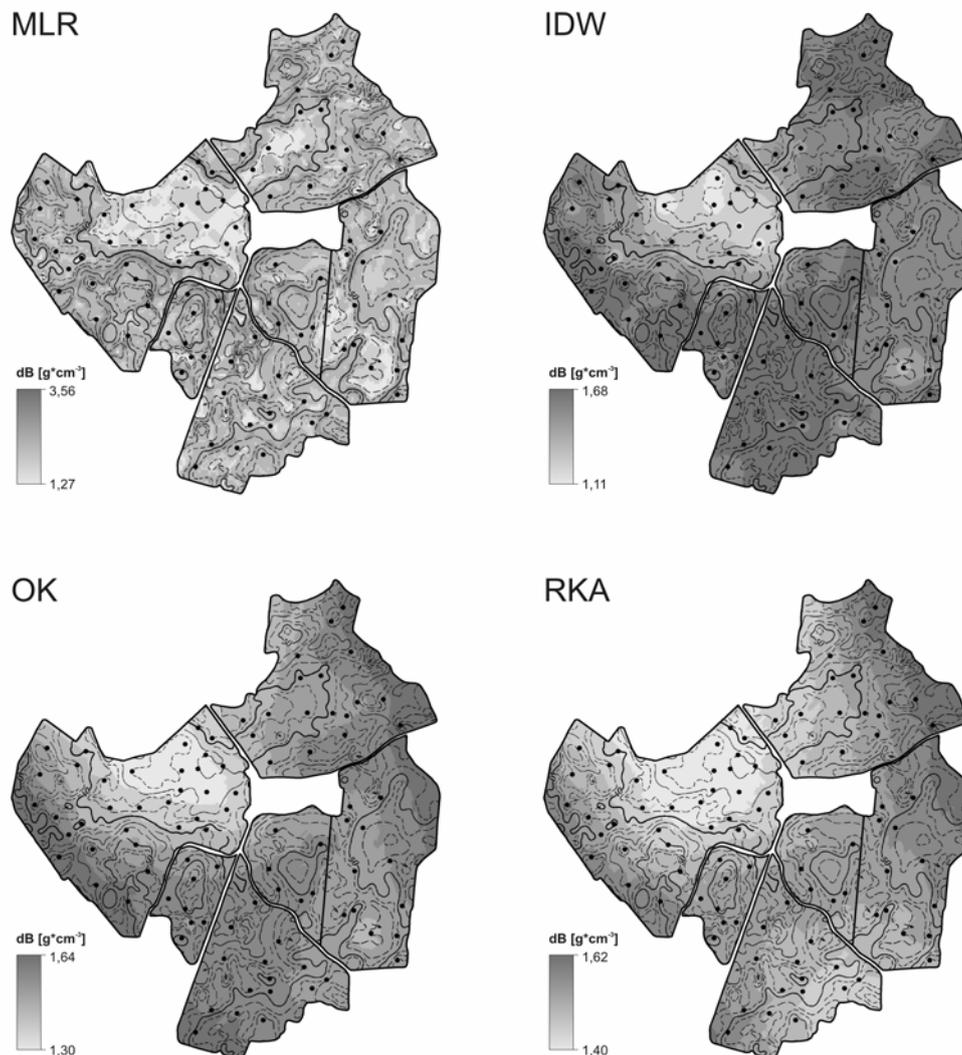


Abbildung 4.21: Geschätzte räumliche Verteilung der Trockenrohdichte (dB) für den Datensatz der Schläge 1-6 ($n = 93$)

zu hohe Dichten ausgewiesen, während geringste Werte von gemessenen $1,06 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ nicht mehr auftreten (vgl. Abb. 4.21).

Die Streudiagramme der Abbildung 4.22 geben die Relation zwischen den gemessenen und den geschätzten Werten vorgestellter Bodenparameter wieder. Für die Tongehalte kann eine starke Häufung der gemessenen Werte im unteren Bereich festgestellt werden. Bei einer allgemein starken Streuung um die Regressionsgeraden werden hohe Werte durch alle Modelle deutlich überschätzt, geringe hingegen unterschätzt. Mit Bestimmtheitsmaßen von 0,05 bis

4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten

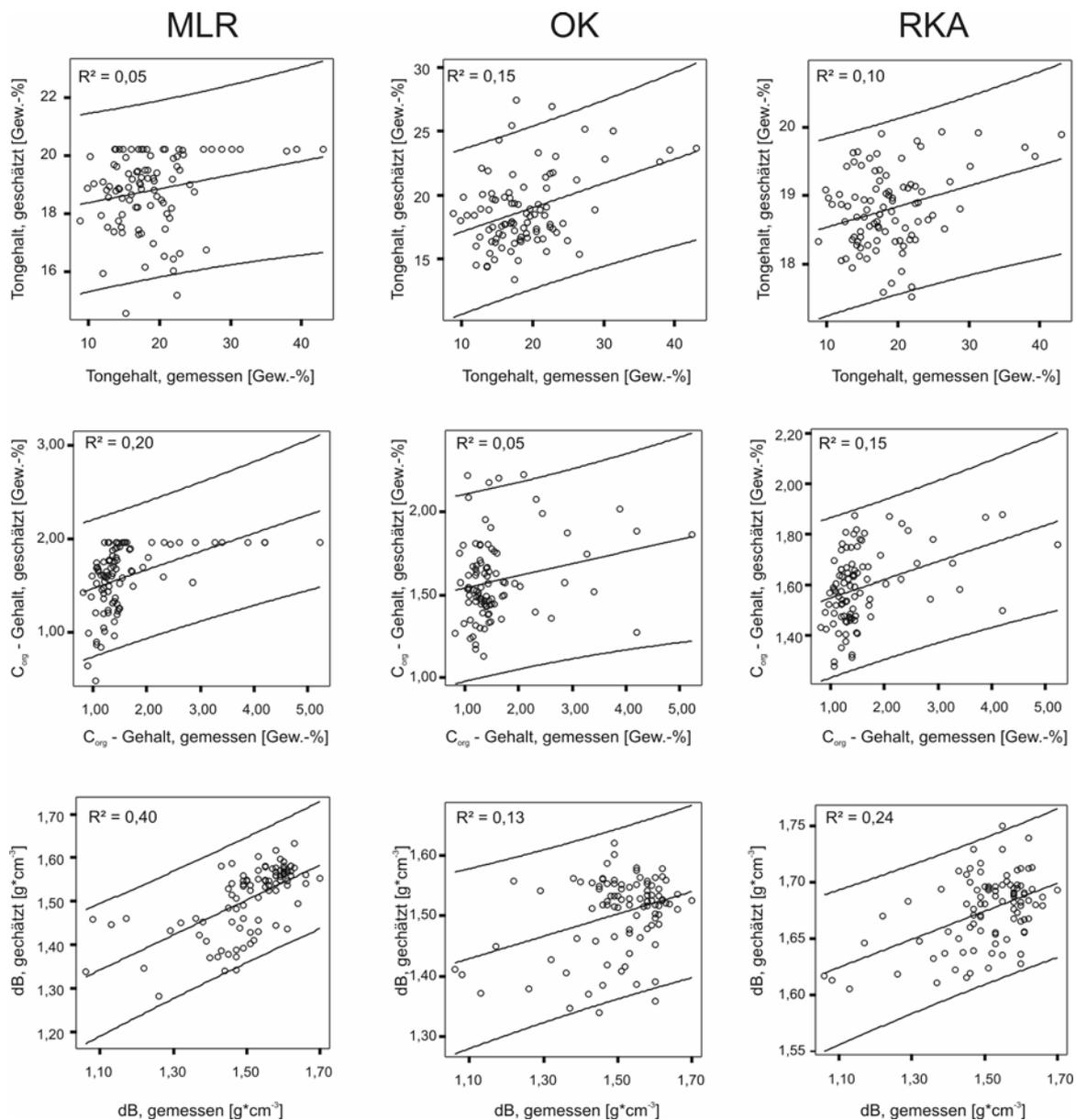


Abbildung 4.22: Streuungsdiagramme der gemessenen gegenüber den geschätzten Werten der Ton-, bzw. C_{org} -Gehalte und der Trockenrohdichte bei einem Konfidenzintervall von 98 % für den Datensatz der Schläge 1-6 ($n = 93$)

0,15 liegen bei einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 98 % sehr geringe Vorhersagegüten vor, das Ergebnis ist damit als schwach zu bezeichnen. Bei den anderen Bodenparametern treten hingegen höhere Bestimmtheitsmaße der MLR auf. Dies stützt sich allerdings auf das lineare Verhältnis zwischen den erfassten Boden- und Reliefparametern, was bei extremen, durch die Beprobungspunkte z.T. nicht erfassten Reliefausprägungen und starken Schwerpunkten der Häufigkeitsverteilungen zu einer deutlichen Über- oder Unterschätzung führt. Auch wenn bei der Kreuzvalidierung die Ergebnisse der MLR besser erscheinen, ist das Regressions-Kriging Modell „A“ zu bevorzugen, da neben der über das Relief zu erklärenden Variabilität die räumliche Abhängigkeit der Bodenparameter mit einbezogen wird. Wenn ein auch nur vergleichsweise geringer Anteil der Variabilität über die Reliefparameter zu erklären ist, tritt das Regressions-Kriging als das bessere Interpolationsverfahren hervor. Dennoch sind auch für

die C_{org} -Gehalte und die Trockenrohdichte starke Streuungen um die Regressionsgeraden zu verzeichnen, was mit Erklärungsgehalten von nur 15 %, bzw. 24 % bei einer Eintretenswahrscheinlichkeit von 98 % für das RKA zum Ausdruck kommt.

4.2.6 Kurzfazit

Die räumliche Variabilität der untersuchten Bodeneigenschaften ist auf der feldübergreifenden Skala zu einem deutlich geringeren Teil mit den hier verwendeten Reliefparametern zu erklären. Höchste Korrelationskoeffizienten ergeben sich wie auch schon auf der Feldskala mit der Hangneigung (β), der Höhe über der Tiefenlinie (H_{Ch}), dem LS-Faktor (LS) und vor allem dem Wetness Index (w). Die höchsten Bestimmtheitsmaße der multiplen Regression von $R^2 = 0,315$ und $0,196$ ergeben sich für die Trockenrohdichte (dB), bzw. den Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}). Für die Korngrößenfraktionen sind ausgesprochen schwache Erklärungsgehalten von 4,8 % für den Ton-, 0,7 % für den Schluff- und 1,9 % für den Sandgehalt zu verzeichnen. Der Anteil erklärter Varianz für die Bodenhaushaltsparameter liegt für die potenzielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}) bei 13,8 %, und 17,9 % für das Retentionsvermögen bei Feldkapazität (FK). Im Gegensatz zur Feldskala, ist die räumliche Variabilität nur für wenige der hier untersuchten Bodeneigenschaften zu einem gewissen Grad auf das Relief zurückzuführen. Der Anteil der durch die Reliefparameter zu erklärenden Variabilität fällt hier deutlich geringer aus. Daher sind sie nur teilweise als Co-Variablen für die Regionalisierung auf der feldübergreifenden Skala sinnvoll einzusetzen.

Bezüglich der Nutzbarkeit des aus Fernerkundungsdaten berechneten Vegetationsindex NDVI als Co-Variable für die Regionalisierung der Bodenhaushaltsparameter konnten keine positiven signifikanten Zusammenhänge ermittelt werden. Damit war der NDVI für das Regressions-Kriging auf der feldübergreifenden Skala auszuschließen. Dagegen stellte sich heraus, dass die Verteilung des NDVI der Szenen aus den Jahren 2000 und 2001 vielmehr durch das Relief mit einem Bestimmtheitsmaß bis zu $R^2 = 0,47$ zu erklären ist. Dies geht besonders aus den Szenen der Jahre 2002 und 2003 hervor, in denen ein geringer NDVI an den permanent in Erscheinung tretenden, für das Wachstum schlechteren Hang- und Kuppenlagen neben den durch intensive winterliche Niederschläge vernässten Senken zu verzeichnen ist. Hinzu kommt das generelle Problem, dass durch die Fruchtfolgewirtschaft nur in wenigen Jahren auf allen Flächen ein direkter Vergleich innerhalb einer Fernerkundungsszene erfolgen kann.

Die über das Semivariogramm ermittelten Reichweiten der Erhaltungsneigung der Bodeneigenschaften betragen minimale 172 m für den Schluffgehalt und maximale 931,2 m für die effektive Kationenaustauschkapazität. Der Grad der räumlichen Autokorrelation weist in den meisten Fällen mittlere bis schwache strukturierte räumliche Abhängigkeiten (NSR zwischen 26,1 % und 73,6 %) auf. Ein deutlich geringerer NSR ist für das Retentionsvermögen beim permanenten Welkepunkt (PWP) und für den Schluffgehalt zu verzeichnen. Grundsätzlich weisen alle Variogramme eine relativ hohe Nuggetvarianz auf, was auf einen großen Anteil nicht erfasster Variabilität schließen lässt.

Die mittels MLR geschätzten Bodenvariablen weisen mit Reichweiten zwischen 595 m bis 643 m erheblich geringere Differenzen untereinander auf. Lediglich die Bodendichteparameter fallen mit deutlich höheren Reichweiten von 940 m bis 950 m aus dem Rahmen. Mit einem NSR von 65-72 % ist der Grad der räumlichen Co-Varianz größtenteils als mittel einzustufen. Ausnahmen hiervon sind für den Schluffgehalt (75,8 %) und die Bodendichteparameter (um 80 %) festzustellen, mit einem höheren Anteil unerklärter räumlicher Varianz.

Für die aus der MLR mit den Reliefparametern hervorgegangenen Residuen konnte keine räumliche Autokorrelation durch das Variogramm festgestellt werden, wodurch das Kriginginterpolationsverfahren als nicht sinnvoll zu erachten ist. Damit konnte für den Datensatz der feldübergreifenden Skala unter den hybriden Verfahren lediglich auf das Regressions-Kriging Modell „A“ zurückgegriffen werden.

Der Vergleich der angewendeten Regionalisierungsmethoden erfolgt auch hier über den aus der Kreuzvalidierung berechneten „*root mean square error*“ (RMSE). Die geringsten mittleren Abweichungen zwischen den gemessenen und den geschätzten Variablen sind für die meisten Bodenbasisparameter aus der multiplen linearen Regression (MLR) mit den Reliefparametern hervorgegangen. Der RMSE beträgt für den Schluff- und Sandgehalt 4,76 Gew.-%, bzw. 8,65 Gew.-%, für den C_{org} - Gehalt 0,69 Gew.-% und für die Trockenroh- und Lagerungsdichte $0,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, bzw. $0,09 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Allerdings zeigen sich bei der Übertragung in die Fläche extrem über- oder unterschätzte Werte an Standorten höchster Reliefparameterausprägung, da diese über den Punktdatensatz nicht erfasst wurden. Hier besitzt das aufgestellte lineare Modell folglich keine Gültigkeit. Unter den Interpolationsverfahren zeigt das Regressions-Kriging Modell „A“ die geringsten Schätzabweichungen, die nur unwesentlich geringer als bei der MLR ausfallen. Für die Tongehalte und folglich auch für die Bodenhaushaltsparameter hingegen sind die höchsten Gütemaße mit den direkten Punktinterpolationsverfahren, vor allem mit dem IDW, erreicht worden. die Verteilung der Tongehalte ist weder über die räumliche Autokorrelation noch über das Relief in ausreichendem Maße zu erklären, sodass die geringste Schätzabweichung aus der Kreuzvalidierung mit dem IDW-Verfahren vorliegt.

Über den „*Relative Improvement*“ (RI) ist mit dem Regressions-Kriging Modell „A“ gegenüber dem Ordinary Kriging eine Verringerung der mittleren Schätzabweichung zwischen 2,79 % (C_{org}) und 8,02 % (L_{eff}) zu quantifizieren (vgl. Tab. 4.27). Für die nicht in der Tabelle aufgeführten Bodenparameter ist keine Verbesserung zu verzeichnen, da neben dem geringen Grad räumlicher Autokorrelation die Erklärungsgehalte der Regression mit den Reliefparametern zu schwach ausfallen.

4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten

Tabelle 4.27: Quantitativer Vergleich der Modellergebnisse aus der Kreuzvalidierung zwischen dem Ordinary Kriging und dem Regressions-Kriging Modell „A“ über den „Relative Improvement“ (RI)

	Bodenparameter				
	U [Gew.-%]	S [Gew.-%]	C _{org} [Gew.-%]	dB [g·cm ⁻³]	L _{d_{eff}} [g·cm ⁻³]
RI [%]	7,93	4,58	2,79	4,62	8,02

Damit konnte gezeigt werden, dass auf der hier untersuchten feldübergreifenden Skala für die meisten Bodeneigenschaften eine geringfügige Verbesserung der Schätzgüte durch die Berücksichtigung flächenverfügbarer Sekundärinformationen zu erreichen ist. Auch wenn bei der Kreuzvalidierung die Ergebnisse der MLR besser erscheinen, ist das Regressions-Kriging Modell „A“ dennoch zu bevorzugen, da neben der über das Relief nur schwach zu erklärenden Variabilität die räumliche Abhängigkeit der Bodenparameter einbezogen wird. Dennoch zeugen selbst die besten Ergebnisse des Regressions Kriging Modell „A“, mit Erklärungsgehalten von 15 % (C_{org}-Gehalt), bzw. 24 % (Trockenrohdichte) bei einer Eintretenswahrscheinlichkeit von 98 % von einem sehr geringen Niveau der Vorhersagegüte.

Insgesamt betrachtet, sind die Ergebnisse der Regionalisierung auf Grundlage des vorliegenden Datensatzes der feldübergreifenden Skala, als schwach zu beurteilen. Sowohl die räumliche Co-Varianz als auch der durch die Reliefparameter zu erklärende Anteil der Variabilität aller Bodeneigenschaften ist deutlich geringer als auf der Feldskala.

4.3 Räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala

4.3.1 Deskriptive Statistik der Bodeneigenschaften

Als Datengrundlage für die Regionalisierung auf der Landschaftsskala konnte auf ein im Rahmen der Landesaufnahme durch das Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein erhobenen Punktdatensatz zurückgegriffen werden. Berücksichtigt wurden die Bodenart und der Humusgehalt des Oberbodens, andere Bodenparameter wie die Lagerungsdichte lagen nicht für den gesamten Datensatz von $n = 739$ im Einzugsgebiet der Drögen Eider vor. Für die angewendeten parametrischen Verfahren war es erforderlich, die klassifizierten Daten in metrische Daten zu überführen (vgl. Kapitel 3.2.1 und Anhang A1, bzw. A2). In Tabelle 4.28 sind statistische Kennwerte der Bodeneigenschaften im Einzugsgebiet der Drögen Eider aufgeführt.

Tabelle 4.28: Deskriptive Statistik der Bodeneigenschaften des Oberbodens für den Datensatz des Einzugsgebietes ($n = 739$)

Bodenparameter	Statistische Kennwerte				
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stabw.	CV (%)
Tongehalt [Gew.-%]	2,5	40,0	14,2	7,73	54,44
Schluffgehalt [Gew.-%]	5,0	75,0	49,2	19,73	40,10
Sandgehalt [Gew.-%]	10,0	92,5	36,6	22,11	60,41
C _{org} -Gehalt [Gew.-%]	0,29	6,69	1,47	0,97	65,99

Als häufigste Bodenart tritt mit 21 % mittel toniger Schluff (Ut3), gefolgt von mittel schluffigen Sand (Su3, 17,7 %) und mittel sandiger Lehm (Ls3, 14,7 %) im Gebiet auf. Der Rest ist überwiegend als sandig-lehmig, bzw. lehmig-sandig klassifiziert (vgl. Abb. 4.23). Die Humusgehalte sind 53 % als schwach, 37 % als mittel und 7,5 % als stark humos eingestuft (vgl. AG BODEN, 1994). Entsprechend der stark variierenden Bodenbildungsbedingungen im Jungmoränengebiet und der Größe des betrachteten Raumes weisen die Bodeneigenschaften eine erwartungsgemäß hohe Streuung um den Mittelwert auf.

Für einen Vergleich zwischen den laboranalytisch erfassten Bodeneigenschaften des Oberbodens und den Felddaten konnten jeweils 93 Standorte auf den 6 untersuchten Schlägen herangezogen und gegenüber gestellt werden (Tab. 4.29). Hieraus geht hervor, dass in Anbetracht der Möglichkeiten bei der Geländeaufnahme die Ton- und Humusgehalte relativ gut erfasst wurden und vergleichbar sind. Sowohl der Mittelwert als auch die Standardabweichung liegen dicht beieinander. Deutliche Abweichungen dagegen zeichnen sich für den Schluff- und Sandgehalt ab. Der mittlere Schluffgehalt wurde zu Lasten des Sandgehaltes deutlich höher eingeschätzt. Für beide Parameter sind sehr viel höhere Standardabweichungen und Variationskoeffizienten zu verzeichnen.

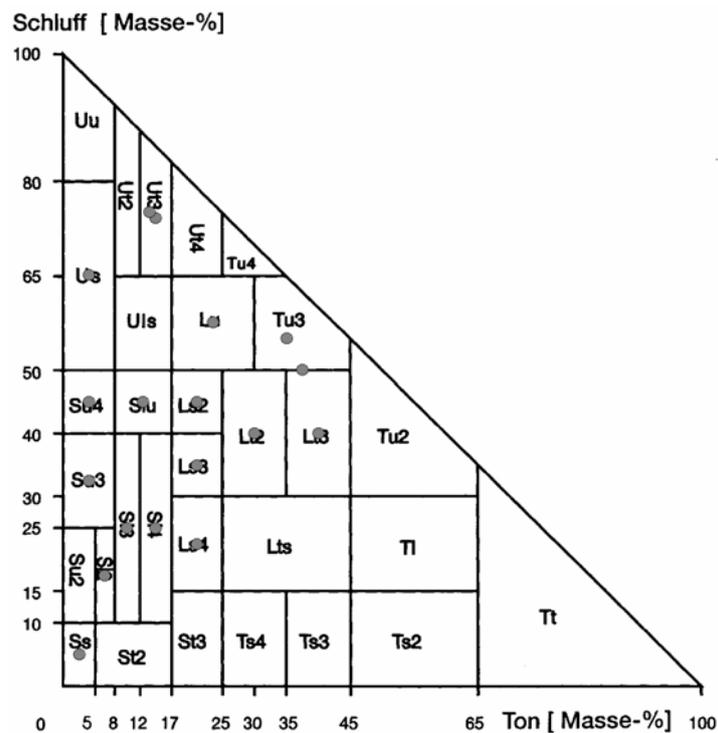


Abbildung 4.23: Bodenartendiagramm des Feinbodens für den Datensatz des Einzugsgebiets (n=739)

Dies soll an dieser Stelle lediglich aufzeigen, wie groß die Diskrepanz zwischen gemessenen und im Gelände aufgenommenen Daten ausfallen kann. Die Problematik der Vergleichbarkeit ist hinlänglich bekannt und soll hier nicht weiter diskutiert werden.

Tabelle 4.29: Deskriptive Statistik der Bodeneigenschaften des Oberbodens für die gemessenen Werte und den Felddatensatz der Schläge 1-6 (n = 93)

Bodenparameter	gemessene Werte, n = 93			Felddaten LANU, n = 93		
	Mittelwert	Stabw.	CV (%)	Mittelwert	Stabw.	CV (%)
Tongehalt [Gew.-%]	18,8	6,0	31,9	19,0	7,87	41,4
Schluffgehalt [Gew.-%]	35,3	4,8	13,6	52,2	17,43	33,4
Sandgehalt [Gew.-%]	45,9	8,7	19,0	28,8	17,30	60,1
C _{org} -Gehalt [Gew.-%]	1,59	0,77	48,4	1,13	0,51	45,1

4.3.2 Der Zusammenhang zwischen den Boden- und Reliefparametern

Der Frage nach der Repräsentativität der beprobten Standorte bzgl. der hiermit erfassten Reliefverhältnisse, wurde anhand der Häufigkeitsverteilungen der Hangneigung und des Wetnessindex nachgegangen. Die Abbildung 4.24 gibt einen Überblick über die Reliefverhältnisse im Einzugsgebiet der Drögen Eider. Besonders deutlich treten bei beiden die vornehmlich im Norden liegenden ausgeprägten Tiefenzonen mit den seitlich begrenzenden Flanken hervor. Hangneigungen um Null Grad und stark geneigte Flächen werden durch den Punktdatensatz unterrepräsentiert, da die Aufnahme lediglich auf landwirtschaftlich genutzten Flächen vorgenommen wurde und damit die Niederungen der Fließgewässer und stark geneigte, z.T.

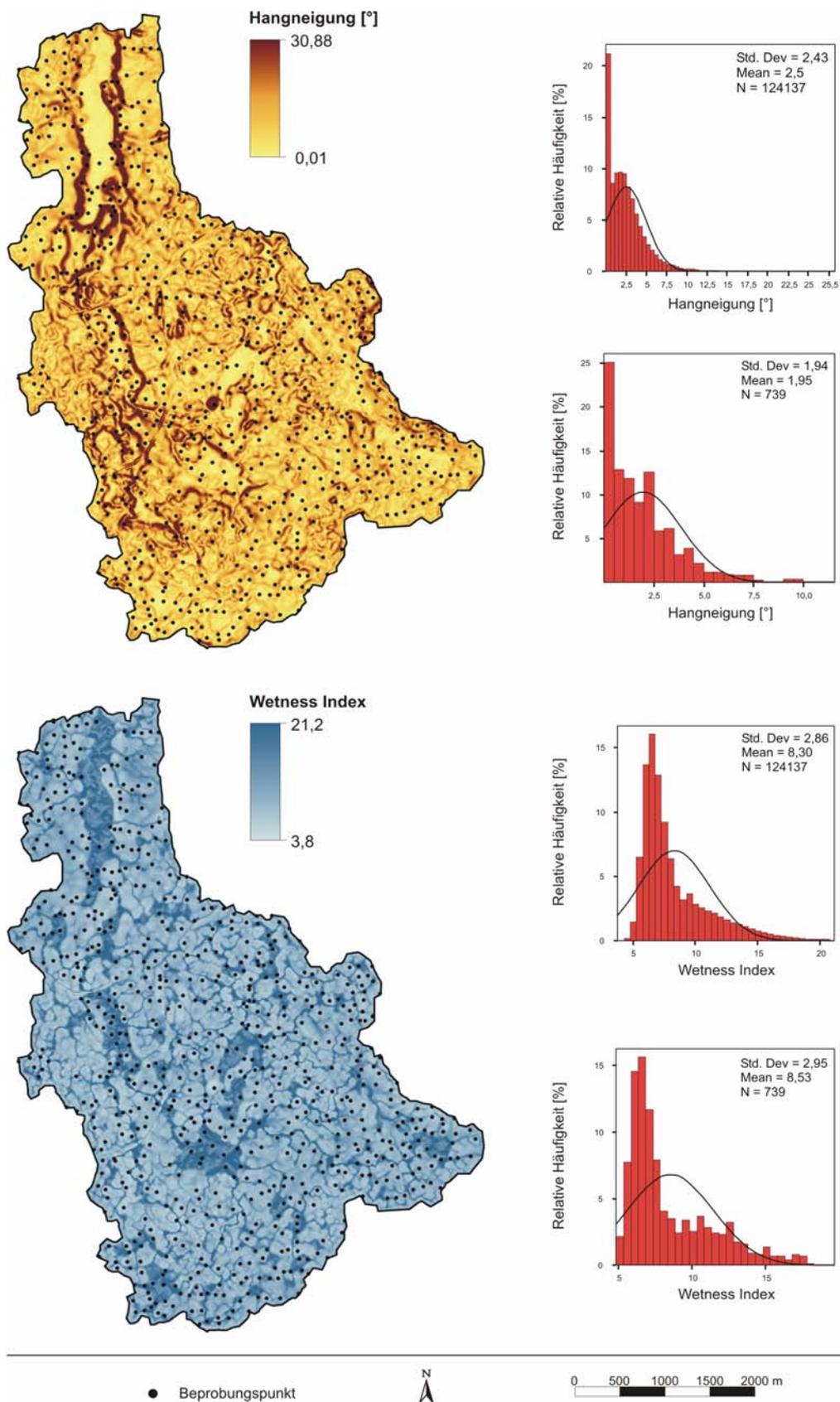


Abbildung 4.24: Räumliche Verteilung der Reliefparameter Hangneigung (oben) und Wetness Index mit Häufigkeitsverteilungen im Einzugsgebiet ($n = 124137$ Rasterzellen, jeweils oben) und aus dem Punktdatensatz ($n = 739$)

überbaute Bereiche ausgenommen sind. Die Häufigkeitsverteilungen des Wetness Index wird durch den Punktdatensatz im Vergleich gut wiedergegeben, was durch die annähernd gleichen Mittelwerte und Standardabweichungen bestätigt wird. Insgesamt ist die über den Punktdatensatz erfasste Variabilität des Reliefs als repräsentativ zu beurteilen.

Aus der Korrelationsanalyse zwischen den Boden- und Reliefparametern gehen überwiegend schwache bis mäßige Zusammenhänge hervor (vgl. Tab. 4.30) Höchste Korrelationskoeffizienten treten zwischen dem Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) und dem Konvergenz/Divergenz Index (CDI ; $r = -0,394$), der spezifischen Einzugsgebietsgröße (A_s ; $r = -0,420$), der Höhe über der Tiefenlinie (H_{Ch} ; $r = -0,492$) und dem Wetness Index (w ; $r = 0,457$) auf. Für die Korngrößenfraktionen der Schluff- und Sandgehalte sind höchste signifikante Zusammenhänge mit den gleichen Reliefparametern, jedoch mit geringeren Koeffizienten von $r = 0,315$ bis $r = -0,379$ zu verzeichnen. Dabei deutet der positive Zusammenhang des Schluffgehaltes mit der spezifischen Einzugsgebietsgröße und dem Wetness Index, bzw. der negative mit dem Konvergenz/Divergenz Index und der Höhe über der Tiefenlinie auf höhere Schluffgehalte in tieferen Lagen mit Wasserzufluss hin. Für den Sandgehalt sind umgekehrte Vorzeichen bei genannten Reliefparametern zu verzeichnen, womit ein Hinweis auf Umlagerungsprozesse mit einhergehender Korngrößen-sortierung vorliegt. Für den Tongehalt bestehen nur sehr schwache Zusammenhänge mit dem Konvergenz/Divergenz ($r = 0,102$) und der spezifischen Einzugsgebietsgröße ($r = -0,093$), die keine Rückschlüsse auf reliefinduzierte Prozesse hinsichtlich der Korngrößenverteilung zulassen.

Tabelle 4.30: Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Oberbodens und den Reliefparametern für den Datensatz des Einzugsgebietes ($n = 739$)

Bodenparameter	Reliefparameter									
	H	β	C_v	C_h	CDI	A_s	H_{Ch}	w	Ω	LS
T [Gew.-%]	-0,077*	0,006	0,086*	0,078*	0,102**	-0,093*	0,012	-0,059	-0,074*	-0,038
U [Gew.-%]	-0,149**	-0,228**	-0,267**	-0,252**	-0,343**	0,366**	-0,375**	0,362**	0,069	-0,123**
S [Gew.-%]	0,167**	0,224**	0,245**	0,232**	0,315**	-0,336**	0,379**	-0,345**	-0,049	0,129**
C_{org} [Gew.-%]	-0,281**	-0,327**	-0,327**	-0,291**	-0,394**	0,420**	-0,492**	0,457**	0,004	-0,214**

Korrelationskoeffizienten nach SPEARMAN; **zweiseitiges Signifikanzniveau von 99 %, * von 95 %, H =Höhe über N.N., β =Hangneigung, C_v =vertikale Wölbung, C_h =horizontale Wölbung, CDI =Konvergenz/Divergenz-Index, A_s =spezifische Einzugsgebietsgröße, H_{Ch} =Höhe über Tiefenlinie, w =Wetness Index, Ω =Streampower Index, LS =LS-Faktor.

Aus den Regressionsmodellen gehen mäßige Erklärungsgehalte für die Varianz der Schluffgehalte von 13,6 %, bzw. 19,4 % für die Sandgehalte und 14,5 % für die Gehalte an organischem Kohlenstoff hervor (vgl. Tab. 4.31). Das Bestimmtheitsmaß der Regression für den Tongehalt fällt dagegen mit $R^2 = 0,021$ deutlich schwächer aus und zeugt von keinem oder einem nur sehr geringen Zusammenhang mit dem Relief. Zu den häufiger in die multiple lineare Regression eingehenden unabhängigen Variablen sind der Wetness Index und die Höhe über der Tiefenlinie neben der Vertikalwölbung zu nennen. Im Gegensatz zur Untersuchung auf der feldübergreifenden Skala, findet hier die Hangneigung nur beim Schluffgehalt Berücksichtigung. Damit sind hier, wie auch schon auf der Feldskala vor allem die über die Abflusswege berechneten sekundären Reliefparameter hervorzuheben. Die vorgestellten Ergeb-

4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten

Tabelle 4.31: Parameter der schrittweisen multiplen Regression zwischen den Eigenschaften des Oberbodens und den Reliefparametern für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739)

Bodenparameter	b (Reliefparameter)					Gleichungsparameter		
	β	C_v	CDI	A_s	H_{ch}	w	a	R^2
Tongehalt [Gew.-%]	-	-	0,037	-	-0,194	-	14,535	0,021
Schluffgehalt [Gew.-%]	0,997	-845,9	-	-	-0,537	2,484	28,759	0,194
Sandgehalt [Gew.-%]	-	714,7	-	-	0,704	-1,884	49,457	0,136
C_{org} -Gehalt [Gew.-%]	-	-	-	-0,4E06	-	0,185	0,009	0,145

β = Hangneigung, C_v = vertikale Wölbung, CDI = Konvergenz/Divergenz Index, A_s = spez. Einzugsgebietsgröße, H_{ch} = Höhe über Tiefenlinie, w = Wetness Index.

nisse belegen, dass ein Teil der Variabilität der betrachteten Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala durch die Reliefparameter erklärt werden kann und sie damit als Co-Variablen für das Regressions-Kriging in Betracht zu ziehen sind.

4.3.3 Ergebnisse der Interpolationsverfahren

Die Ergebnisse der Kreuzvalidierung der mit dem **Inverse Distance Weighting**- Verfahren (IDW) interpolierten Bodeneigenschaften für die Landschaftsskala sind in der Tabelle 4.32 aufgeführt. Die über den MAE beschriebene mittlere Abweichung zwischen den gemessenen und geschätzten Werten ist mit 17,9 Gew.-% für den Schluff-, und 19,23 Gew.-% für den Sandgehalt als außerordentlich hoch zu beurteilen. Die große Schätzabweichung ist durch die hohe Streuung beider Korngrößenfraktionen hervorgerufen, die sich bei der Interpolation in vorliegender Art und Weise niederschlägt. Im Gegensatz dazu sind für die Tongehalte bei geringerer Standardabweichung auch wesentlich geringere Schätzabweichungen von 5,97 Gew.-% zu verzeichnen. Zudem deutet der Powerexponent „p“ von 1,21 auf eine schwache, umgebungsbezogene räumliche Strukturiertheit hin. Für die Gehalte an organischem Kohlenstoff ist ein MAE von 0,74 Gew.-% festzustellen, was bei einem Mittelwert von 1,47 Gew.-% ebenfalls als hoch zu beurteilen ist.

Tabelle 4.32: Validierungsergebnisse der mit dem IDW- Verfahren interpolierten Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739)

	Bodenparameter			
	T [Gew.-%]	U [Gew.-%]	S [Gew.-%]	C_{org} [Gew.-%]
Power p	1,21	1,00	1,00	1,00
MAE	5,97	17,91	19,23	0,74
RMSE	7,26	20,06	21,87	1,348

Die **geostatistischen Verfahren** des *Simple* und *Ordinary Kriging* konnten für den auf Basis von Klassenmitten metrisierten Werten nicht in Betracht gezogen werden, da eine Mehr Gipfeligkeit in der Häufigkeitsverteilung des Datensatzes für alle Bodenvariablen vorlag. Stattdessen wurde für die direkte Punktinterpolation auf das nichtlineare Verfahren des *Disjunktiven Kriging* mit einer zuvor durchgeführten „normal score“-Transformation über die Gaußsche Normalverteilung zurückgegriffen (vgl. Kapitel 3.4.3). Aus der Variogrammanalyse gehen Reichweiten von 686 m für den Tongehalt und knapp über 2800 m für alle anderen Bodenvariablen hervor, bei einer durchschnittlichen Ausdehnung des Untersuchungsraumes von 6086 m (vgl. Abb. 4.25). Durch den „Nugget to Sill Ratio“ (NSR) wird für den Schluff- und Sandgehalt eine schwache räumliche Autokorrelation ausgewiesen (NSR > 75 %), wohingegen der Ton- und C_{org}-Gehalt mit einer mittel strukturierten räumlichen Abhängigkeit gekennzeichnet werden (NSR 25 % – 75 %, vgl. Tab. 4.33).

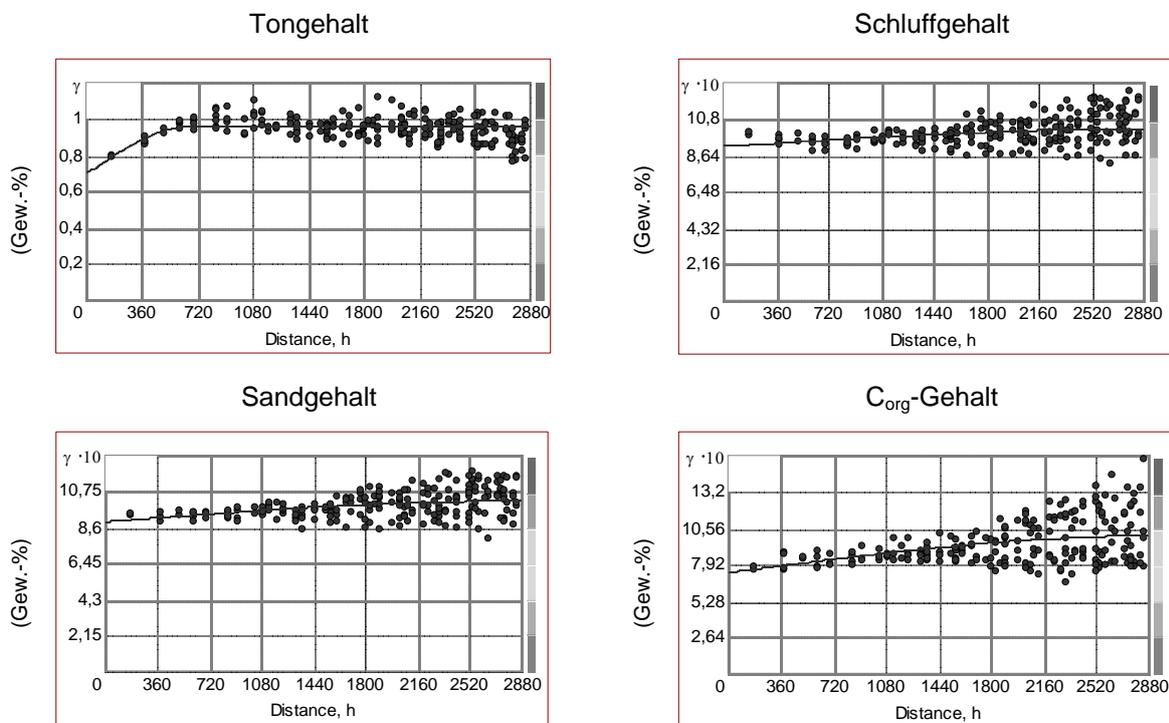


Abbildung 4.25: Sphärische Variogramme der Bodeneigenschaften für den Datensatz des Einzugsgebietes ($n = 739$)

Tabelle 4.33: Semivariogrammparameter für das Disjunktive Kriging (DK) der Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz des Einzugsgebietes ($n = 739$)

Zielvariable	Nugget-varianz C_0	Schwellenwert C_s	Reichweite a [m]	NSR [%]
Tongehalt [Gew.-%]	0,693	0,265	686,2	72,4
Schluffgehalt [Gew.-%]	0,916	0,102	2844,8	89,9
Sandgehalt [Gew.-%]	0,890	0,127	2844,8	87,5
C _{org} -Gehalt [Gew.-%]	0,731	0,265	2844,8	73,4

NSR=Nugget to Sill Ratio

4 Ergebnisse der regionalisierten Bodendaten

Auf Grundlage der in Kapitel 4.3.2 festgestellten Erklärungsanteile der Reliefparameter konnten sie als Co-Variablen für das **hybride Regionalisierungsverfahren** des Regressions-Kriging eingesetzt werden. Die Semivariogramme der aus der MLR mit den Reliefparametern hervorgegangenen Bodeneigenschaften sind in Abbildung 4.26 dargestellt. Für alle Bodenparameter ist ein schwacher Kurvenanstieg bei hoher Nuggetvarianz zu verzeichnen, der Anteil unerklärter räumlicher Varianz als hoch zu bezeichnen. Die Erhaltungsneigungen der geschätzten Werte des Tongehaltes sind mit 2188 m am höchsten, die der anderen Parameter liegen um 1000 m bei einer durchweg schwachen räumlichen Autokorrelation (NSR > 75 %, vgl. Tab.4.34).

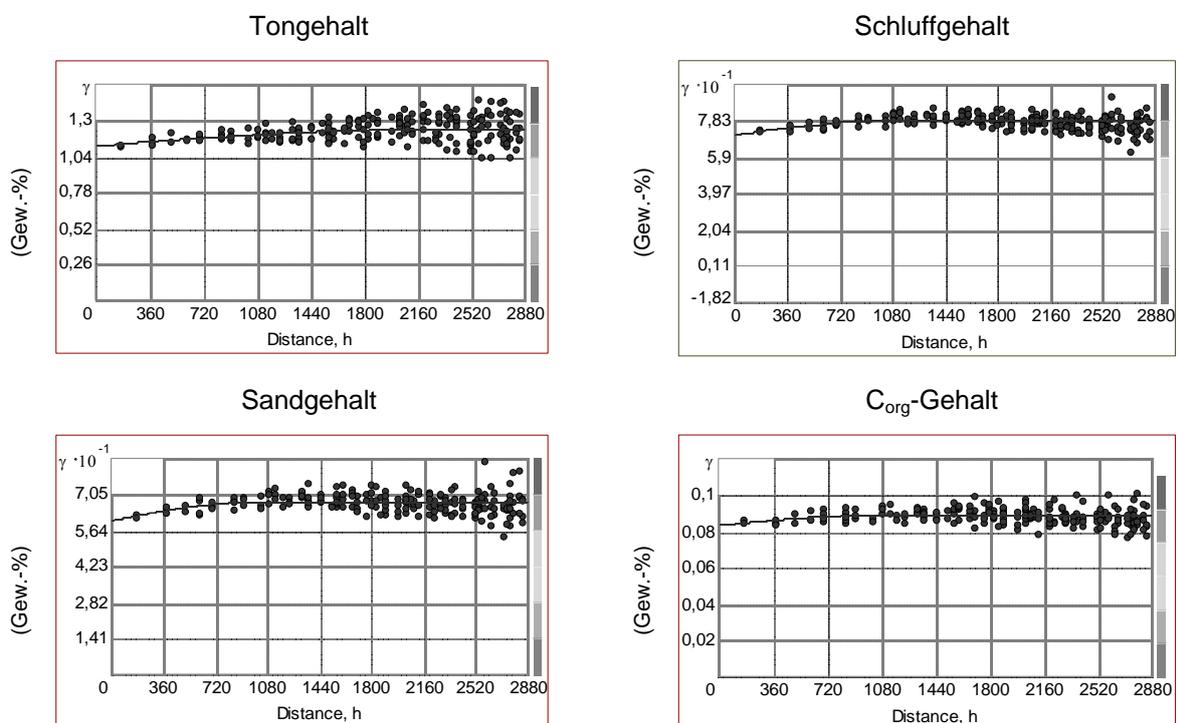


Abbildung 4.26: Sphärische Variogramme der mittels MLR geschätzten Bodeneigenschaften für den Datensatz des Einzugsgebietes ($n = 739$)

Tabelle 4.34: Semivariogrammparameter der aus der MLR vorhergesagten Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz des Einzugsgebietes ($n = 739$)

Zielvariable	Co-Variablen	R^2	Nugget-varianz C_0	Schwellenwert C_s	Reichweite a [m]	NSR [%]
Tongehalt [Gew.-%]	CDI, H_{Ch}	0,021	1,114	0,117	2188,7	90,5
Schluffgehalt [Gew.-%]	β, C_v, H_{Ch}, w	0,194	70,604	7,390	1047,0	90,5
Sandgehalt [Gew.-%]	C_v, H_{Ch}	0,136	60,152	7,427	1026,2	89,0
C_{org} -Gehalt [Gew.-%]	As, w	0,145	0,083	0,005	964,0	93,9

Alle Variogrammmodelle sphärisch, β = Hangneigung, C_v = vertikale Wölbung, CDI = Konvergenz/Divergenz Index, A_s = spez. Einzugsgebiet, H_{Ch} = Höhe über Tiefenlinie, w = Wetness Index, NSR = Nugget to Sill Ratio

Die Semivariogramme der Residuen sind in Abb. 4.27 dargestellt. Mit Ausnahme des Tongehaltes ist auch für die Residuen ein flacher Anstieg im Kurvenverlauf bei hoher Nuggetvarianz zu verzeichnen. Die Reichweiten der Erhaltungsneigung liegen um 2850 m bei einem geringen Grad räumlicher Abhängigkeit (vgl. Tab. 4.35). Für die Residuen des Tongehaltes sind sowohl die Reichweite von 648 m als auch der NSR wesentlich geringer.

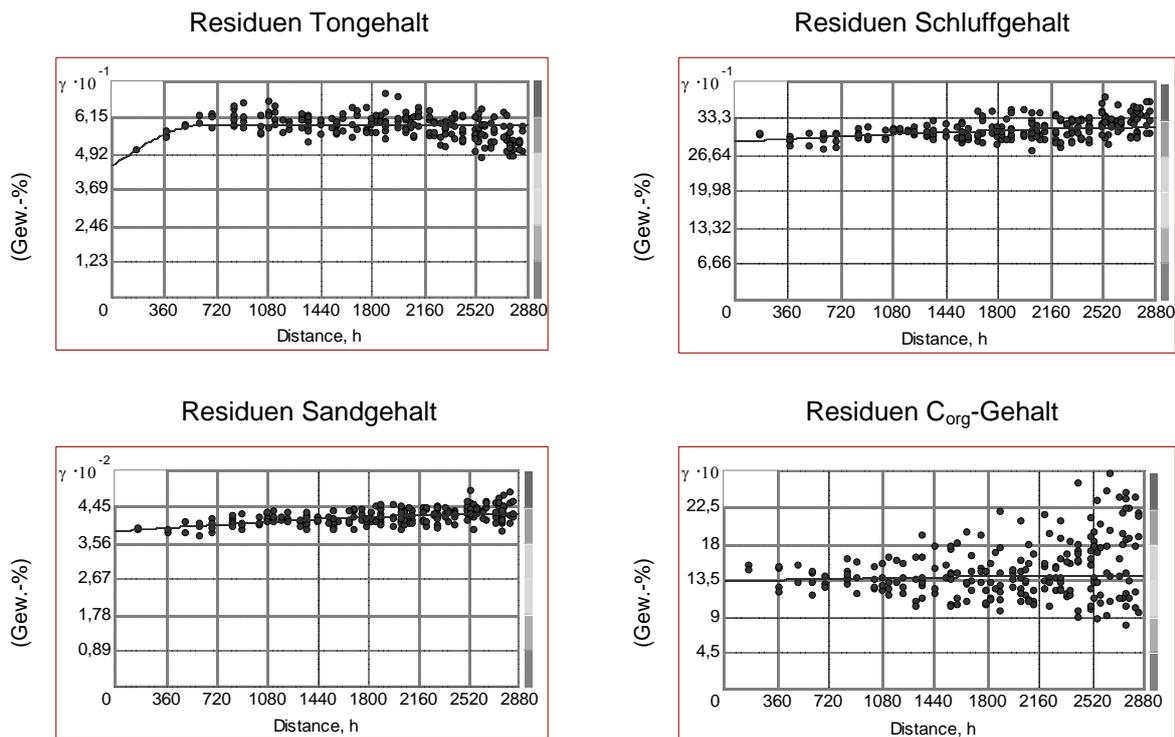


Abbildung 4.27: Sphärische Variogramme der Residuen der mittels MLR geschätzten Bodeneigenschaften für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739)

Tabelle 4.35: Semivariogrammparameter der aus der MLR hervorgegangenen Residuen der Eigenschaften des Oberbodens für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739)

Zielvariable	Co-Variablen	R ²	Nugget-varianz C ₀	Schwellenwert C _s	Reichweite a [m]	NSR [%]
Tongehalt [Gew.-%]	CDI, H _{Ch}	0,021	44,538	14,345	648,3	75,6
Schluffgehalt [Gew.-%]	β, C _v , H _{Ch} , w	0,194	288,110	26,126	2844,8	91,7
Sandgehalt [Gew.-%]	C _v , H _{Ch}	0,136	382,210	42,634	2844,8	90,0
C _{org} -Gehalt [Gew.-%]	A _s , w	0,145	1,324	0,073	2844,8	94,8

Alle Variogrammmodelle sphärisch, CDI=Konvergenz/Divergenz-Index, H_{Ch}=Höhe über der Tiefenlinie, β=Hangneigung, C_v=vertikale Wölbung, w=Wetness Index, A_s=spezifisches Einzugsgebiet, NSR=Nugget to Sill Ratio

4.3.4 Vergleich der angewendeten Regionalisierungsmethoden

Die Modellvalidierung erfolgte auch hier über den aus der Kreuzvalidierung berechneten RMSE. Die geringsten mittleren Abweichungen zwischen den aus der Feldaufnahme stammenden, metrisierten und den geschätzten Variablen sind bei der Regionalisierungsmethode des Regressions-Kriging „C“ zu verzeichnen (vgl. Tab.4.36). Daneben schneidet unter den Punktinterpolationsverfahren das Regressions-Kriging „B“ am besten ab, wohingegen das IDW die durchweg höchsten Schätzabweichungen aufweist. Mit der MLR sind mit Ausnahme des Tongehaltes trotz relativ geringer Erklärungsgehalte geringere Schätzabweichungen als mit den einfachen Interpolationsverfahren und dem Regressions-Kriging „B“ zu verzeichnen, was von der bereits beschriebenen schwachen räumlichen Autokorrelation der Bodeneigenschaften im Einzugsgebiet zeugt. Das Abschneiden der MLR und des RKA für den Tongehalt mit deutlich höheren Schätzabweichungen resultiert aus dem geringen Bestimmtheitsmaß der Regression, die erst durch die Einbindung der daraus resultierenden interpolierten Residuen (RK „B“, bzw. RK „C“) eine verbesserte Vorhersage mit sich bringt.

Tabelle 4.36: Ergebnisse der Kreuzvalidierung der Regionalisierungsmodelle mittels RMSE (root mean square error) für den Datensatz des Einzugsgebietes (n = 739)

Bodenparameter	Stabw.	Mittelwert	Regionalisierungsmethode					
			MLR_{Rel}	IDW	DK	RK_A	RK_B	RK_C
Tongehalt [Gew.-%]	7,7	14,2	7,653	7,261	7,241	7,707	6,061	6,026
Schluffgehalt [Gew.-%]	19,7	49,2	17,715	20,060	19,690	19,610	18,661	16,817
Sandgehalt [Gew.-%]	22,1	36,6	20,555	21,870	21,820	21,927	20,526	19,616
C_{org} -Gehalt [Gew.-%]	1,0	1,47	1,213	1,348	1,319	1,307	1,253	1,154

MLR_{Rel} =Multiple Lineare Regression mit den Reliefparametern, IDW=Inverse Distance Weighting, DK=Disjunktives Kriging, $RK_{A/B/C}$ =Regressions-Kriging Modell A, B und C

Im Anhang A3-6 sind Ergebniskarten der auf Grundlage des Regressionkriging C berechneten räumlichen Verteilungen dargestellt. Neben der schwerpunktmäßigen Verbreitung hoher oder geringerer Werte im Einzugsgebiet, tritt die räumliche Struktur der Co-Variablen hervor. Bei der Betrachtung der Korngrößenverteilungen fällt eine kleinräumige Strukturiertheit auf, die durch die in die MLR eingegangenen lokalen Reliefparameter des Konvergenz/Divergenz Index (CDI), der vertikalen Wölbung (C_v) oder der Hangneigung (β) hervorgerufen wird, die möglicherweise Hinweise auf lokale Umlagerungsprozesse geben. Die räumliche Verteilung des C_{org} – Gehaltes wirkt dagegen einheitlicher und großräumiger, da deren Verteilung durch den Wetness Index (w) und die spezifische Einzugsgebietsgröße (A_s) geprägt wird. Das erscheint in sofern plausibel, als dass die abflussbeschreibenden Reliefparameter einerseits potenzielle Erosions- und Akkumulationsbereiche kennzeichnen, andererseits Standorte mit hoher Bodenfeuchte und folglich reduzierter Mineralisierung der organischen Substanz indizieren. Aus der Gegenüberstellung der aus der Feldaufnahme stammenden mit den durch das RKC geschätzten Werten ist bei allen Bodenparametern eine starke Streuung zu verzeichnen (vgl. Abb. 4.28)

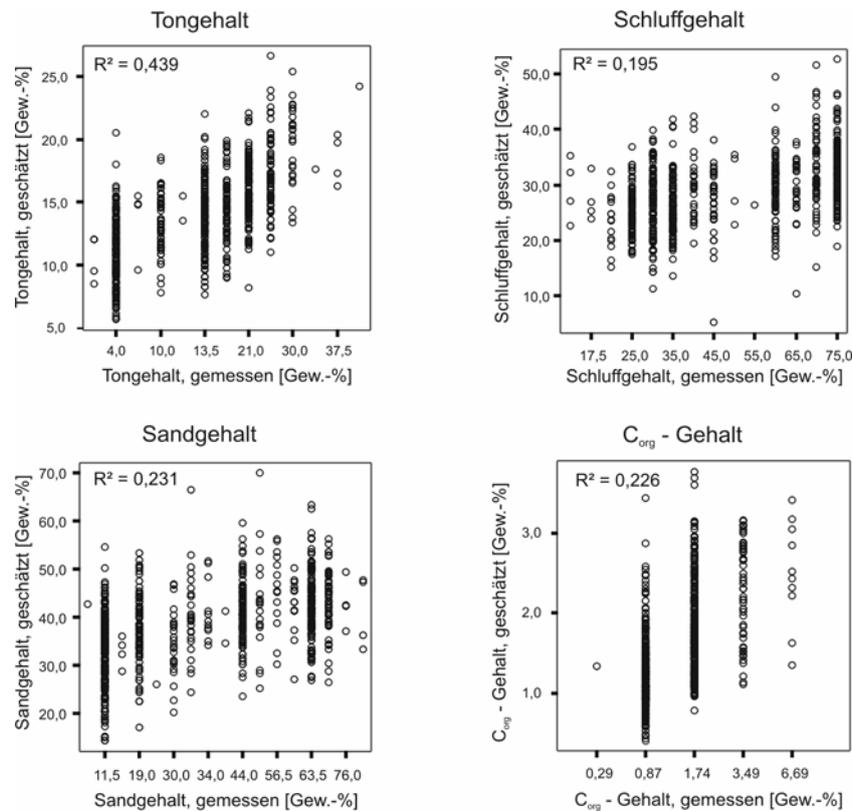


Abbildung 4.28: Streudiagramme der gemessenen gegenüber den mittels Regressions-Kriging Modell „C“ geschätzten Werten für den Datensatz des Einzugsgebietes ($n = 739$)

Aus den Streudiagrammen geht hervor, dass besonders hohe wie niedrige Werte bei allen Variablen unter- bzw. überschätzt werden. Die Schätzabweichungen für die Tongehalte erscheinen dabei am geringsten, was mit einem relativ hohen Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,439$ zum Ausdruck kommt, während der erklärte Anteil des Zusammenhanges der Schluff- und Sandgehalte ($R^2 = 0,195$, bzw. $0,231$), sowie der Gehalte an organischem Kohlenstoff ($R^2 = 0,226$) geringer ausfallen. Damit liegen im Einzugsgebiet für die betrachteten Bodenvariablen höhere Schätzgüten vor, als für die zuvor behandelten vorhergesagten Werte des Gebietsausschnittes der feldübergreifenden Skala.

4.3.5 Kurzfazit

Die räumliche Variabilität der Eigenschaften des Oberbodens auf der Landschaftsskala ist zu einem Teil durch die Reliefparameter zu erklären. Die höchsten Korrelationskoeffizienten sind mit dem Konvergenz/Divergenz Index (CDI), der spezifischen Einzugsgebietsgröße (A_s), der Höhe über der Tiefenlinie (H_{Ch}) und dem Wetness Index (w) zu verzeichnen, fallen aber geringer als auf den zuvor betrachteten Skalen aus. Der über die Reliefparameter erklärte Anteil an der Varianz beträgt 13,6 % für den Sand-, 19,4 % für den Schluff- und 14,5 % für den C_{org} - Gehalt. Für den Tongehalt ist dagegen ein sehr geringer Erklärungsgehalt von 2,1 % zu verzeichnen. Damit ist die räumliche Verteilung der Tongehalte wie auch der C_{org} - Gehalte

gegenüber den auf Basis gemessener Werte untersuchten Gebietsausschnitten zu einem geringeren Grad durch das Relief zu erklären. Dagegen weisen die Schluffgehalte ein deutlich höheres Bestimmtheitsmaß der Regression auf.

Die über das Semivariogramm ermittelten Reichweiten der Erhaltungsneigung der Bodeneigenschaften betragen minimale 686 m für den Tongehalt und um 2830 m für die anderen Parameter, bei einem mittleren (Ton- und C_{org}- Gehalt), bzw. schwachen (Schluff- und Sandgehalt) Grad räumlicher Autokorrelation. Grundsätzlich weisen alle Variogramme eine relativ hohe Nuggetvarianz auf, was auf einen großen Anteil nicht erfasster Variabilität schließen lässt.

Die mittels MLR geschätzten Bodenvariablen weisen Reichweiten zwischen 964 m und 1047 m auf, wobei der Tongehalt mit 2188 m aus dem Rahmen fällt. Mit einem NSR von 89 % - 93,5 % ist für alle Bodeneigenschaften der Grad der räumlichen Autokorrelation als gering einzustufen. Für die Residuen der Regression ist wiederum auf Grund des schwachen Erklärungsgehaltes der Regression eine geringere Reichweite von 648 m als auch ein mit 75 % als mittel bis schwach zu beschreibender Grad räumlicher Autokorrelation festzustellen.

Aus dem Vergleich der Modellergebnisse über den aus der Kreuzvalidierung berechneten „*root mean square error*“ (RMSE) geht für alle betrachteten Bodeneigenschaften die geringste Schätzabweichung aus der Anwendung des hybriden Verfahrens des Regressionkriging Modell „C“ hervor. Die vergleichsweise hohen Schätzabweichungen der Schluff- und Sandgehalte von 16,8 Gew.-%, bzw 19,6 Gew.-% resultieren aus der hohen Streuung der Eingangsparameter. Dagegen fällt der RMSE der Tongehalte mit 6,0 Gew.-% durch die kleinere Spannweite der Werte geringer aus.

Über den „*Relative Improvement*“ (RI) ist mit dem Regressions-Kriging Modell „C“ gegenüber dem Disjunktiven Kriging eine Verringerung der mittleren Schätzabweichung zwischen 10,1 % (Sandgehalt) und 16,78 % (Tongehalt) zu quantifizieren (vgl. Tab. 4.37).

Tabelle 377: Quantitativer Vergleich der Modellergebnisse aus der Kreuzvalidierung zwischen dem Disjunktiven Kriging und dem Regressions-Kriging Modell „C“ über den „Relative Improvement“ (RI)

	Bodenparameter			
	T [Gew.-%]	U [Gew.-%]	S [Gew.-%]	C _{org} [Gew.-%]
RI [%]	16,78	14,59	10,10	12,15

Die Integration von flächenverfügbaren Sekundärinformationen in ein entsprechendes Regionalisierungsmodell führt auch auf der hier untersuchten Landschaftsskala gegenüber herkömmlichen Interpolationsverfahren zu einer deutlich verbesserten räumlichen Vorhersage der Bodeneigenschaften. Im Vergleich zum untersuchten Gebietsausschnitt der feldübergreifenden Skala, liegen bei gleicher Punktdichte wesentlich höhere Reichweiten der Erhaltungsneigung bei einem deutlich geringerem Grad räumlicher Autokorrelation vor und zeugen so-

mit von den zu erwartenden, unsteten bodenbezogenen Verhältnissen im untersuchten Einzugsgebiet. Ferner konnte gezeigt werden, dass die aus der Felddaufnahme stammenden Werte mit den gemessenen Werten nur bedingt vergleichbar sind und bereits innerhalb der untersuchten Schläge eine deutlich höhere Varianz aufweisen (Kapitel 4.3.1). Trotz der hohen Wertestreuung der über die Klassenmitten metrisierten Daten im Einzugsgebiet, konnte ein höherer Grad verbesserter Schätzgüte (RI) festgestellt werden.

Für einen Vergleich zwischen der Aussagefähigkeit der vorliegenden Bodenkarte im Maßstab 1:25000 und den Regionalisierungsergebnissen der Korngrößenfraktionen, wurden die Bodenarten der diskreten Flächeneinheiten nach dem gleichen Verfahren wie für den punktbezogenen Felddatensatz in metrische Werte überführt (vgl. Anhang A1 und A8). Aus der Kreuzvalidierung mit dem 739 Standorte umfassenden Felddatensatz gehen gegenüber allen angewendeten Regionalisierungsverfahren wesentlich höhere Abweichungen hervor. Die Aussagegüte der mit dem Regressionkriging Modell „C“ regionalisierten Bodenvariablen ist gegenüber dem diesbezüglichen Informationsgehalt der Bodenkarte für die Tongehalte um 32,3 %, für die Schluffgehalte um 43,2 % und für die Sandgehalte um 39 % verbessert. Die zu Bodenarten zusammengeführten, auf Grundlage des Regressionkriging „C“ entstandenen einzelnen Grids der Ton-, Schluff- und Sandgehalte, zeigt im Vergleich zu den in der Bodenkarte ausgewiesenen Bodenarten ein deutlich differenzierteres Bild mit einer erheblich größeren Breite vorkommender Bodenarten (vgl. A7 und A8).

Damit ist im Ergebnis festzustellen, dass auf Basis dargestellter Grundlagen und Vorgehensweisen für den betrachteten Gebietsausschnitt eine im Vergleich zur bestehenden Bodenkarte im Maßstab 1:25000 wesentlich verbesserte Datengrundlage für etwaige Modellanwendungen zu erzielen ist. Allerdings kann diese Aussage lediglich für den Oberboden gelten, da der Unterboden innerhalb der Untersuchung nicht berücksichtigt wurde.

5 Diskussion und Ausblick

5.1 Die Beziehung zwischen den Bodeneigenschaften und den Reliefinformationen

Der Zusammenhang zwischen den verwendeten Reliefparametern und den untersuchten Bodeneigenschaften fällt je nach betrachteter Skala (Feldskala, feldübergreifende Skala, Landschaftsskala) und Beprobungsdichte unterschiedlich aus.

Auf der Feldskala konnten für alle untersuchten Bodeneigenschaften mit Ausnahme der Schluffgehalte mittlere bis schwache Zusammenhänge festgestellt werden. Höchste Erklärungsgehalte der Variabilität ergaben sich für die Trockenrohdichte (dB) mit 46,8 % und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) mit 38,5 %. Für die räumliche Verteilung der Korngrößenfraktionen Ton- und Sandgehalt waren 30,8 %, bzw. 23,4 % durch die Reliefparameter zu erklären. Vor allem die über die Abflusswege berechneten sekundären Reliefparameter wie die Höhe über der Tiefenlinie (H_{Ch}) und der Wetness Index (w) sind hierbei hervorzuheben. Wenn Zusammenhänge zwischen den Bodeneigenschaften und den Reliefattributen in Erscheinung treten, sind mit ihnen die engsten Zusammenhänge zu quantifizieren.

Gegenüber der Feldskala sind auf der feldübergreifenden Skala geringere Spannweiten als auch Standardabweichungen der Bodenvariablen zu verzeichnen, die erfasste Heterogenität der Bodeneigenschaften ist auf der Feldskala folglich als höher zu beurteilen. Die Bestimmtheitsmaße der Regression fallen auf der feldübergreifenden Skala mit höchsten Anteilen erklärter Varianz von 31,5 % für die Trockenrohdichte (dB) und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) mit 19,6 % deutlich geringer aus. Für die Korngrößenfraktionen sind Erklärungsgehalte von nur 4,8 % für den Ton-, 0,9 % für den Schluff- und 1,9 % für den Sandgehalt zu verzeichnen. In die schrittweise multiple Regression sind zumeist die Hangneigung (β), der Hanglängenfaktor (LS) und der Wetness Index (w) als erklärende unabhängige Variable eingegangen.

Für die Bodenhaushaltsparameter liegen im Allgemeinen auf beiden betrachteten Skalen jeweils schwächere Korrelationskoeffizienten mit den Reliefparametern vor. Sie beruhen vor allem auf dem Zusammenhang der in die Berechnung einfließenden Bodenbasisparameter mit den Reliefparametern. Hierbei ist anzumerken, dass die Berechnungen auf Grundlage empirischer Modelle durchgeführt wurden. Entsprechend wäre die Validierung über Messungen durchzuführen, da in Folge der Fehlerfortpflanzung mit erheblichen Abweichungen gegenüber den realen Zuständen zu rechnen ist.

Bereiche höherer Tongehalte sind auf dem kleinräumig untersuchten Schlag vor allem in größeren Geländesenken und in Hang- und Kuppenlagen auszumachen. Für letztgenannte Standorte ist anzunehmen, dass dies durch Zutagetreten des Bt-Horizontes der hier auftretenden erodierten Parabraunerden hervorgerufen wird. Ein Beleg hierfür ist die zu beobachtende hellere Färbung des Oberbodens in Folge des Bodenabtrags und der damit einhergehenden Humusverarmung. Aus der Korrelationsanalyse mit der Hangneigung geht dagegen ein negati-

ves, mit dem Wetness Index ein positives lineares Verhältnis hervor, was zunächst nicht plausibel erscheint. Die Erklärung liegt in der Flächendominanz der tiefer liegenden Bereiche mit hohen Tongehalten, die durch die Beprobung häufiger erfasst wurden, woraus die beschriebenen statistischen Verhältnisse resultieren. Ein weiteres Indiz hierfür ist das wesentlich geringere Bestimmtheitsmaß der Regression von $R^2 = 0,048$ auf der feldübergreifenden Skala.

Der relativ enge Zusammenhang der C_{org} -Gehalte mit den abflussbeschreibenden Reliefparametern entspricht dagegen mit höheren Werten in weniger geneigten Hangverflachungen und Tiefenlagen, geringeren in Kuppen- und Hanglagen, den Erwartungen. Dies ist einerseits durch Akkumulation hangaufwärts erodierten Materials in Senkenbereichen, andererseits durch die reduzierte Mineralisationsleistung in Folge hoher Bodenfeuchte durch reliefinduzierten Wasserzuschuss zu begründen.

Hierzu korrespondierend sind die Verteilungen der Lagerungsdichte ausgeprägt. Werte geringster Ausprägung sind im größeren Senkenbereich am nordöstlichen Teil des Schlages (Kolluvisol über Niedermoor) vorzufinden. Höhere Werte der zum Teil anstehenden humusarmen Bt-Horizonte in Kuppen- und Hanglagen geben einen weiteren Hinweis auf den hier stattgefundenen Prozess der Bodendegradierung durch Erosion (s.o.).

Die unterschiedlich ausfallenden Erklärungsgehalte zwischen den betrachteten Skalen gehen unter Umständen auf das Beprobungsverfahren zurück. Allerdings konnte gezeigt werden, dass die Reliefsituationen über die beprobten Standorte auf beiden Skalen relativ gut erfasst wurden. Daher liegt die Ursache möglicherweise in der sehr differenten morphologischen Struktur der einzelnen Schläge. Der kleinräumig untersuchte Schlag weist im östlichen Bereich größere auszugliedernde Reliefeinheiten, bestehend aus einer großen Kuppe und einer ausgeprägten Hanglage auf, die den Schlag im Nordosten abgrenzt. Dazwischen befindet sich ein großer zentral gelegener, ehemals vermoorter Senkenbereich, der mit bis zu 70 cm mächtigen Kolluvien überlagert ist. Vergleichbare Strukturen finden sich auf keinem der anderen Schläge wieder, was sich in der statistischen Auswertung widerspiegelt.

Die aus dem digitalen Geländemodell berechneten Abflusswege geben zu erkennen, dass hiernach die Entwässerung der Schläge größtenteils über die beschriebene Senke und das nördlich außerhalb des Schlages gelegene Gerinne erfolgt. Die menschliche Einflussnahme in Form von Siedlungs-, Straßen- und Wegebau sowie Meliorationsmaßnahmen verursachte eine starke Veränderung des Prozessgefüges im Bereich der untersuchten Schläge. Durch die prozessuale Entkoppelung sind seither die Umlagerungsprozesse kleinräumig auf die einzelnen Schläge begrenzt. So unterbinden die für das Ostholsteinische Hügelland charakteristischen Knicks als Einfriedung der Schläge den weiteren Transport der hangaufwärts erodierten Sedimente und erhöhen damit die kleinräumige Variabilität der Bodeneigenschaften innerhalb eines Schlages (vgl. HASSENPFUG, 1971 und FRÄNZLE, 1981). Dies kann allerdings nicht für kleinere Senken innerhalb der Schläge gelten. Hier sind die Hanglängen von entscheidender Bedeutung. ARMANTO (1992) spricht in diesem Zusammenhang von einem geschlossenen System, da das erodierte Material auf dem Schlag verbleibt.

Der beschriebene Sachverhalt liefert die Begründung dafür, dass auf der feldübergreifenden Skala vor allem für die Korngrößenfraktionen der lokale Reliefparameter der Hangneigung und der Hanglängenfaktor in die multiple Regression eingehen, weniger dagegen die den Abfluss beschreibenden wie der Wetness Index. Der geringe Grad erklärter Varianz auf der feldübergreifenden Skala zeugt von einem nur schwer zu erfassenden kleinräumigen und auf den Schlag begrenzten Prozessgeschehen. Je nach zeitlicher Entwicklung und morphologischer Struktur ergeben sich für jeden Schlag eigene Prozessstrukturen, bzw. Stoffflüsse zwischen den Böden der jeweiligen Bodengesellschaften, die stark durch das landwirtschaftliche Management beeinflusst werden (z. B. durch Bearbeitungserosion und Drainierung) und nur schwer zu quantifizieren sind (vgl. BLUME, 1984, RICHTER ET AL., 2007).

Die aus der Landesaufnahme stammenden, metrisierten Bodendaten weisen im Einzugsgebiet der Drögen Eider auf Grund der Größe des Gebietes und der stark variiierenden Landschaftsstruktur eine erwartungsgemäß sehr viel höhere Variabilität auf. Im Gegensatz zu den zuvor behandelten gemessenen Felddatensätzen sind hier Wertespannen (Klassen) angegeben, deren Aufnahme auf die subjektive Wahrnehmung, entsprechend den Möglichkeiten im Gelände, beruhen. Dennoch sind nach der erfolgten Metrisierung über die Klassenmitten vergleichbare Mittelwerte der Tongehalte im Vergleich zu den untersuchten Schlägen zu verzeichnen, wohingegen die Schluffgehalte über-, die Sandgehalte deutlich unterschätzt erscheinen, bei gleichzeitig höheren Variationskoeffizienten. Die Angaben der Humusgehalte beschränken sich auf lediglich 5 Klassen, sind aber tendenziell vergleichbar mit den gemessenen Werten.

Aus den Regressionsmodellen gehen mäßige Erklärungsgehalte der Variabilität von 13,6 % für den Schluff-, bzw. 19,4 % für den Sandgehalt und 14,5 % für den Gehalt an organischem Kohlenstoff hervor. Das Bestimmtheitsmaß der Regression für den Tongehalt fällt dagegen mit 0,021 aus bereits genannten Gründen deutlich schwächer aus. Zu den häufiger in das Regressionsmodell eingehenden unabhängigen Variablen sind der Wetness Index und die Höhe über der Tiefenlinie neben der Vertikalwölbung zu nennen. Damit sind hier, wie auch schon auf der Feldskala vor allem die über die Abflusswege berechneten sekundären Reliefparameter hervorzuheben.

Der Versuch, den Datensatz räumlich anhand der Flächeneinheiten der Bodenkarte oder durch Ausgliederung von Teileinzugsgebieten zu trennen, um so kleinräumigere Strukturen bei der Regression zu berücksichtigen, führte im Gegensatz zu Untersuchungen von ZIADAT (2005) zu keinem besseren Ergebnis.

Auf der Feldskala konnte nachgewiesen werden, dass die Variabilität der Bodeneigenschaften bis zu 46,8 % durch die berechneten Reliefparameter erklärt werden kann. Damit liegen Erklärungsgehalte vor, die mit den Ergebnissen der Untersuchungen von MOORE ET AL. (1993), GESSLER ET AL. (1995 und 2000), IQBAL ET AL. (2005) und SUMFLETH & DUTTMANN (2007) vergleichbar sind.

Höhere Erklärungsgehalte sind über die Reliefparameter kaum zu erwarten, da

1. die Bodenbildung auch von anderen Faktoren abhängt und beeinflusst wird, besonders durch anthropogene Eingriffe (z. B. Knicks) in das Prozessgefüge (vgl. FRÄNZLE, 1981; RICHTER ET AL., 2007),
2. das zu Grunde liegende digitale Geländemodell das rezente Relief wiedergibt, während die Umlagerungsprozesse in der Vergangenheit bei höherer Reliefenergie stattgefunden haben (vgl. JANETZKO, 1996),
3. ein Großteil der Umlagerungsprozesse in jüngerer Zeit durch Bearbeitungserosion hervorgerufen wurde, die zwar auch vor allem den Gesetzen der Gravitation folgt, aber nicht direkt über die Reliefparameter erklärt werden kann und
4. die für die Abflussmodellierung aufgefüllten Senken des DGM nicht die real existenten Verhältnisse widerspiegeln.

Insbesondere letztgenannter Punkt ist für die Abflussmodellierung im schleswig-holsteinischen Jungmoränengebiet von Bedeutung. So sind im vorgestellten Einzugsgebiet der Drögen Eider etwa 24 % der Fläche hiervon betroffen (s. Anhang A9). Das Verhalten abflussloser Senken in Bezug auf das Abflussgeschehen und die Retention von Wasser und die damit einhergehende Wirkung auf Umlagerungsprozesse, muss in diesem Raum als wenig untersucht gelten (vgl. Schmehe, 2006).

5.2 Die Anwendbarkeit des Vegetationsindex NDVI als Co-Variable für die Regionalisierung komplexer Bodenhaushaltsgrößen

Der Untersuchung lagen sechs, in den Zeiträumen von Ende April bis Mitte Juni der Jahre 2000 bis 2003 aufgenommene Fernerkundungs-Szenen zu Grunde (vgl. Kapitel 3.2.2.1). Im Vergleich der berechneten Vegetationsindizes waren mit dem „Simple Ratio“ (*SR*) und dem „Soil Adjusted Vegetation Index“ (*SAVI*) grundsätzlich nur geringfügig abweichende und keine besseren Ergebnisse als mit dem „Normalized Difference Vegetation Index“ (*NDVI*) zu verzeichnen. Sie konnten damit von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen werden. Ein gleicher Befund geht aus einer Arbeit der GAF (1999) hervor.

Es konnte festgestellt werden, dass ein zu erwartender positiver linearer Zusammenhang zwischen dem NDVI und den Bodenhaushaltsparametern auf der Feldskala lediglich in den Szenen der Jahre 2000 und 2001 zum Ausdruck kommt. Für die Szenen der Jahre 2002 und 2003 konnten hingegen witterungsbedingte Bestandesausfälle in den zur Vernässung neigenden abflusslosen Senken und Tiefenlagen als Ursache für schwache, z.T. negative Korrelationskoeffizienten identifiziert werden. Die höchsten aus der Regression hervorgegangenen Erklärungsgehalte betragen 19,9 % für die potenzielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}) und 24,3 % für das Retentionsvermögen bei Feldkapazität (*FK*), wobei der NDVI der Landsat-Szene vom 11.05.2001 zu Grunde liegt. Der NDVI des nur einen Tag zuvor aufgenommenen

CIR- Luftbildes mit 40 cm Bodenauflösung zeichnet zwar die Tendenzen nach, liefert aber geringere Erklärungsgehalte. Die hiermit gegenüber der Landsat-Szene kleinräumiger erfasste Bestandesheterogenität liefert neben der Lageungenauigkeiten der beprobten Standorte eine mögliche Begründung hierfür.

Auf der Feldskala konnte damit unter Hinzuziehen des NDVI als weitere Co-Variable neben den Reliefparametern der erklärte Anteil an der Variabilität für die potenzielle Kationenaustauschkapazität um 3,4 % auf 42,7 %, bzw. um 4,8 % auf 49,2 % für das Retentionsvermögen bei Feldkapazität, erhöht werden.

Als problematisch für die Nutzung von Fernerkundungsinformationen muss grundsätzlich die Fruchtfolgerotation angesehen werden, weil nur Felder mit einheitlicher Bewirtschaftung miteinander verglichen werden können. Demzufolge konnte lediglich bei der Landsat-Szene des Jahres 2000 der komplette Datensatz auf der feldübergreifenden Skala genutzt werden, da in der betreffenden Anbauperiode alle betrachteten Schläge mit Winterweizen bestellt waren.

Aus der Korrelationsanalyse zwischen dem NDVI und den Bodenhaushaltsparametern auf der feldübergreifenden Skala gingen in allen Fällen keine signifikanten positiven Zusammenhänge hervor. Der NDVI konnte folglich nicht als Co-Variable für die Regionalisierung der Bodenhaushaltsparameter in Betracht gezogen werden.

Dagegen sind mit den Reliefparametern der Vertikalwölbung (C_v), der spezifische Einzugsgebietsgröße (A_s) und der Höhe über der Tiefenlinie (H_{Ch}) hohe signifikante Zusammenhänge mit dem NDVI der Szenen aus den Jahren 2000 und 2001 zu verzeichnen. Erklärungsgehalte von bis zu 47 % belegen, dass die Verteilung der Wuchsleistung vielmehr durch das Relief, als durch die Bodeneigenschaften bestimmt wird. In allen Szenen ist an stärker geneigten Hang- und Kuppenlagen ein durch den NDVI indiziertes, geringeres Wachstum festzustellen. Während in den Szenen der Jahre 2000 und 2001 hohe Biomasseaufkommen vor allem in schwach geneigten Lagen und Senken zu beobachten sind, führten hohe winterliche Niederschläge in den Jahren 2002 und 2003 in den gleichen Bereichen zu reduziertem, in der Folgezeit nicht zu kompensierendem Wachstum durch kurzzeitige Überstauungen. Auch PILESJÖ ET AL. (2000), KRAVCHENKO ET AL. (2000) und REUTER (2004) stellten signifikante Zusammenhänge zwischen dem Relief und Bestandesparametern fest, die witterungsbedingt und relief-induziert jährlich variieren. Das Ausmaß des Bestandesausfalls ist von der Niederschlagsintensität und -dauer, vom Bewirtschaftungszustand und von der schlaginternen morphologischen Struktur abhängig. Dementsprechend sind bei einem entsprechenden Niederschlagsereignis nicht alle Schläge in gleicher Weise betroffen. Aus den Szenen der Jahre 2000 und 2001 konnte darüber hinaus festgestellt werden, dass der NDVI trotz gleicher Feldfrucht und Aussaattermine sehr unterschiedliche Werte auf den Schlägen aufwies, ein feldübergreifender Vergleich generell nur bedingt möglich erscheint.

Gesamtheitlich müssen die hier verwendeten Fernerkundungsinformationen für unzureichend erklärt werden. Neben Informationen zum Management und der Bestandesentwicklung bedarf es zeitlich höher aufgelöster Fernerkundungsdaten, um durchschnittliche Bestandesentwick-

lungen abzuleiten. Nur so ist ein sicherer räumlicher Bezug zu den Bodeneigenschaften zu quantifizieren. Daneben ist zu erwarten, dass sich das Retentionsvermögen der Böden erst dann bemerkbar macht, wenn die Vegetation bei höherer Evapotranspiration in den wärmeren Monaten verstärkt auf den Bodenwasserspeicher zugreift, womit allerdings auch die Eigenschaften des Unterbodens verstärkt in Erscheinung treten, da das bis zu diesem Zeitpunkt entwickelte Wurzelwerk tiefer reicht (DEMIRCAN, 1995).

Eine langjährige Reihe an Fernerkundungsdaten vorausgesetzt, könnten mit Hilfe einer Clusteranalyse Bereiche konstanter Biomasseverteilungsfelder abgegrenzt und mit den Bodeneigenschaften in Bezug gesetzt werden. Für eine multitemporale Mittelwertbildung müsste allerdings zuvor eine Atmosphärenkorrektur vorgenommen werden (vgl. SUMFLETH & DUTTMANN, 2007). Dieses Verfahren erscheint allerdings schwierig in kleinstrukturierten Landschaften mit Fruchtfolgewardwirtschaft wie dem Ostholsteinischen Hügelland, da die Betrachtung feldfruchtspezifisch erfolgen muss. Ferner spielt der betrachtete Zeitpunkt der Bestandesentwicklung eine wesentliche Rolle im Bezug auf das Reflexionsverhalten. Allein im Einzugsgebiet der Drögen Eider variieren die Aussattermine für die gleiche Feldfrucht, je nach landwirtschaftlichem Management bis zu 4 Wochen.

Eine Alternative bietet die Nutzung des spektralen Reflexionsverhalten von unbedeckten Böden. BISHOP & MCBRATNEY (2001) setzten mit Erfolg neben Reliefinformationen und Ertragsdaten Landsat-Szenen und Luftbilder zur Detektierung der räumlichen Verteilung der Kationenaustauschkapazität ein.

KLITZING ET AL. (2004) nutzten hyperspektrale Flugzeugscannerdaten und erfassten laboranalytisch Bodenkennlinien und konnten gute Ergebnisse für die Ton- und Humusgehalte erzielen. Ferner stellten auch sie fest, dass mit dem indirekten Verfahren über die Verteilung der Biomasse schlagübergreifend kaum belastbare Aussagen bezüglich der Bodeneigenschaften möglich sind.

Möglichkeiten bieten auch Fernerkundungsdaten von Radarsensoren, deren Wellen einige Zentimeter in den Boden eindringen, und über die Dielektrizitätskonstante des Bodenwassers Rückschlüsse auf die Korngrößenverteilung und den Humusgehalt ermöglichen (vgl. LILLESAND & CHIPMAN, 2004).

5.3 Vergleich der Regionalisierungsverfahren

Zur Klärung der Frage nach dem am besten geeigneten Verfahren für die räumliche Vorhersage von Oberbodeneigenschaften im Untersuchungsgebiet kamen verschiedene Regionalisierungsmethoden, wie die multiple lineare Regression, das Inverse Distance Weighting, das Ordinary, Simple und Disjunktive Kriging, sowie das Regressions-Kriging zum Einsatz. Die Regionalisierung erfolgte auf drei unterschiedlichen räumlichen Skalen, die hinsichtlich ihrer Ausdehnung, ihrer Auflösung und ihres Umfanges durch unterschiedliche Datensätze von Beprobungspunkten abgebildet wurden. Der Ergebnisvergleich wurde anhand des aus der

Kreuzvalidierung berechneten „*root mean square error*“ (RMSE) vorgenommen. Optimalerweise sollten für die Validierung 25 – 33 % des zur Verfügung stehenden Datensatzes hierfür vorgehalten werden (MCBRATNEY ET AL., 2003). Dies hätte allerdings einen im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht zu bewältigenden Mehraufwand mit sich gezogen, weshalb der zu erwartende und als geringfügig einzuschätzende Fehler in Kauf genommen wurde.

Auf der Feldskala konnten die deutlich höchsten Schätzgüten mit dem Regressions-Kriging Modell „B“ erreicht werden. Die mittlere Schätzabweichung (RMSE) beträgt im Ergebnis für den Tongehalt 2,3 Gew.-%, für den Schluffgehalt 2,9 Gew.-% und für den Sandgehalt 2,4 Gew.-% bei Standardabweichungen der Primärvariablen zwischen 4,7 Gew.-% für den Schluff- und 9,8 Gew.-% für den Sandgehalt. Für die Bodenparameter des C_{org} - Gehaltes und der Trockenrohdichte lagen ebenso hohe Schätzgenauigkeiten mit Abweichungen 0,45 Gew.-% und $0,06 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, bei einer ursprünglichen Standardabweichung von 1,43 bzw. 0,18 vor. Die aus Pedotransferfunktionen berechneten Bodenhaushaltsparameter des Retentionsvermögens für Wasser und der Kationenaustauschkapazität, zeichnen im Allgemeinen den Trend der hierbei eingegangenen Größen nach. Die Regressionsmaße zwischen den gemessenen und den geschätzten Werten liegen bei einem Konfidenzintervall von 98 % für alle Parameter zwischen $R^2 = 0,91$ und $R^2 = 0,94$. Eine Ausnahme hiervon ist für den Schluffgehalt mit einem $R^2 = 0,72$ zu verzeichnen, was immer noch als akzeptables Ergebnis zu erachten ist.

Die Ergebnisse aus der multiplen linearen Regression fallen dagegen deutlich schlechter aus, für die Verfahren des Ordinary und Simple Kriging sind mit einem RMSE von z. B. 5,3 Gew.-% für den Ton- und 7,0 Gew.-% für den Sandgehalt auch grundsätzlich gute Schätzergebnisse zu verzeichnen. Die relative Verbesserung des Regressions-Kriging „B“ gegenüber dem Ordinary Kriging beträgt zwischen 39,0 % (Schluffgehalt) und maximalen 67,4 % für den Sandgehalt und ist mit den von ODEH ET AL. (1994 und 1995) angegebenen Werten vergleichbar.

Die hohe Vorhersagegüte beruht auf den Zusammenhang zwischen den Bodenparametern und den erklärenden Co-Variablen. Je höher deren Erklärungsgehalt ausfällt und je stärker die räumliche Strukturiertheit der über den Raum variierenden Primärvariablen ist, desto besser eignet sich das Regressions-Kriging für die Regionalisierung.

Daher resultiert die vergleichsweise geringere Schätzgüte für die Schluffgehalte neben der relativ geringen räumlichen Autokorrelation aus dem geringen Grad der durch die Regression mit den Reliefparametern erklärten Varianz. Dagegen ist zu verzeichnen, dass für die Bodenhaushaltsparameter durch Hinzuziehen des NDVI als weitere Co-Variable neben den Reliefparametern die Erklärungsgehalte der multiplen Regression erhöht werden. Folglich fällt für z. B. die potenzielle Kationenaustauschkapazität und das Retentionsvermögen bei Feldkapazität die Schätzgüte um weitere 4,1 % bzw. 3,8 % im Vergleich zum Ordinary Kriging höher aus.

Damit liegt auf der Feldskala bei einer Beprobungsdichte von 1,5 Punkten pro Hektar und einer mittleren Beprobungsdistanz von 56 m auf dem untersuchten Schlag ein beachtliches

Vorhersageergebnis vor. Bezüglich der Erhaltensneigung der räumlichen Autokorrelation der Primärvariablen, liegen mit 160 m bis 300 m bei einem hohen Grad räumlichen Abhängigkeit wesentlich höhere Reichweiten vor, als dies aus Untersuchungen von ARMANTO (1992) und OTTE (1988) im norddeutschen Jungmoränengebiet unter vergleichbaren Verhältnissen bei ermittelten durchschnittlichen Reichweiten von 50 bis 100 m der Fall ist. Allerdings beziehen sich ihre Untersuchungen auf deutlich kleinere Flächen bei geringeren Beprobungsdistanzen und regelmäßigem Raster, womit die Vermutung nahe liegt, dass dies auf einem Skaleneffekt beruht (vgl. WESTERN & BLÖSCHL 1999, TRANGMAR ET AL., 1985) und die kleinräumige oder Mikrovariabilität mit dem hier genutzten Messnetz nicht erfasst wurde. Dennoch konnten auf der Feldskala mit der zu Grunde liegenden Methodik sehr gute Ergebnisse bezüglich der Vorhersagegenauigkeit bei relativ geringer Punktdichte erzielt werden.

Der Regionalisierung auf der feldübergreifenden Skala lag ein unregelmäßiges Messnetz mit einer Dichte von etwa 0,4 Punkten pro Hektar bei mittleren Distanzen von 109 m zu Grunde, was dem Datensatz der Landesaufnahme entspricht. Unter den Regressionkriging-Verfahren konnte lediglich das Regressions-Kriging Modell „A“ angewendet werden, da die Residuen der mittels multipler Regressionen geschätzten Werte keine räumliche Autokorrelation aufwiesen.

Grundsätzlich waren hier für alle Bodenvariablen, insbesondere für die Korngrößenfraktionen, geringere Zusammenhänge mit den Reliefparametern zu verzeichnen. Daneben war für die Bodenhaushaltsparameter kein Zusammenhang mit dem aus Fernerkundungsinformationen berechneten NDVI zu ermitteln, weshalb er auf der betrachteten Skala für diese Bodeneigenschaften nicht als weitere Co-Variable genutzt werden konnte.

Die geringsten mittleren Abweichungen zwischen den gemessenen und den geschätzten Variablen sind für die meisten Bodenbasisparameter aus der multiplen linearen Regression mit den Reliefparametern hervorgegangen. Der RMSE beträgt für den Schluff- und Sandgehalt 4,76 Gew.-% bzw. 8,65 Gew.-%, für den C_{org} - Gehalt 0,69 Gew.-% und für die Trockenroh-dichte $0,10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Daneben sind die besten Ergebnisse mit dem Verfahren des Regressions-Kriging Modell „A“ zu verzeichnen, deren Schätzabweichungen nur unwesentlich höher als bei der multiplen linearen Regression ausfallen. Für die Tongehalte und in diesem Fall auch für die Bodenhaushaltsparameter hingegen, sind die höchsten Gütemaße mit den direkten Punktinterpolationsverfahren, vor allem mit dem IDW, erreicht worden. Die räumliche Verteilung der Tongehalte konnte weder über die räumliche Autokorrelation noch über das Relief in ausreichendem Maße erklärt werden, sodass die geringste Schätzabweichung aus der Kreuzvalidierung mit dem IDW-Verfahren vorlag, dessen Ergebnis aber wenig plausibel oder erklärbar erscheint.

Bei Anwendung und Übertragung der Regressionsmodelle in die Fläche, treten bei einigen Bodenparametern extrem über- oder unterschätzte Werte an Standorten höchster oder geringster Reliefausprägung auf, da eine deutliche Schiefe in der Häufigkeitsverteilung vorlag oder diese Standorte über das Messnetz nicht erfasst wurden und somit keine Berücksichtigung bei der Regression fanden. So liegen für die Lagerungsdichte, bei der lediglich die Hangneigung

als erklärende unabhängige Variable einging, Werte von bis zu $3,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ vor, was der Dichte eines Diamanten entspricht. Entsprechend müssten bei einer Anwendung höchste oder geringste Werte je nach Parameter begrenzt werden, da die lineare Funktion hier keine Gültigkeit mehr besitzt. Ferner liegt einigen Regressionsmodellen lediglich die Hangneigung zu Grunde, wodurch die Bodenwerte an nicht geneigten Standorten (also Null Grad) auf dem Achsenabschnitt „a“ der Regressionsgleichung geschätzt werden.

Auch wenn bei der Kreuzvalidierung die Ergebnisse der MLR besser erscheinen, ist das Regressions-Kriging Modell „A“ dennoch zu bevorzugen, da neben den genannten Problemen einerseits der über die Reliefparameter erklärte Anteil der räumlichen Variabilität Berücksichtigung findet, andererseits die zufällige Komponente der räumlichen Verteilung der Bodenparameter einbezogen wird. Dennoch zeugen selbst die besten Ergebnisse des Regressions-Kriging Modell „A“, mit Erklärungsgehalten von 15 % (C_{org} -Gehalt), bzw. 24 % (Trockenrohddichte) bei einer Eintretenswahrscheinlichkeit von 98 % von einem vergleichsweise geringen Niveau der Vorhersagegüte. Gegenüber dem Ordinary Kriging ist allerdings auch hier eine Verringerung der mittleren Schätzabweichung von 7,9 % für den Schluff-, 4,6 % für den Sand- und 2,8 % für den C_{org} - Gehalt, sowie 4,6 % für die Trockenrohddichte zu quantifizieren.

Damit konnte gezeigt werden, dass auf der hier untersuchten feldübergreifenden Skala für die meisten Bodeneigenschaften eine geringfügige Verbesserung der Schätzgüte im Vergleich zu den einfachen Interpolationsverfahren durch die Berücksichtigung flächenverfügbarer Sekundärinformationen zu erreichen ist. Als Gründe für die auf dieser Skala erzielten vergleichsweise schwachen Vorhersagegüten, können einerseits die nur mäßige räumliche Autokorrelation der Primärvariablen und der geringe Erklärungsgrad der Reliefparameter angeführt werden. Die Reichweiten der Erhaltungsneigung der Primärvariablen von 172 m bis 800 m bei einem mittleren Grad räumlicher Autokorrelationen und relativ hoher Nuggetvarianz zeigen, dass bei einer Dichte von einem Punkt pro 2,5 Hektar über einzelne Schläge hinaus, keine hohen Schätzgüten zu erreichen sind.

Damit zeugt das Ergebnis, wie auch schon aus der Untersuchung der Relief - Bodenbeziehung hervorgegangen, von den unsteten Verhältnissen der räumlichen Verteilung der Bodeneigenschaften auf der schlagübergreifenden Betrachtungsebene, die nur zu einem geringen Maß über die zufällige Komponente der räumlichen Autokorrelation erklärt werden kann.

Für die Regionalisierung auf der Landschaftsskala konnte auf einen aus der Landesaufnahme stammenden Bodendatensatz von 739 unregelmäßig im Einzugsgebiet der Drögen Eider verteilten Punkten zurückgegriffen werden. Berücksichtigung fanden lediglich die Korngrößenfraktionen und der C_{org} -Gehalt des Oberbodens. Anstelle des Ordinary und Simple Kriging wurde das Disjunktive Kriging angewendet.

Die geringste Schätzabweichung auf der Landschaftsskala konnte für alle Bodenvariablen mit dem Regressions-Kriging Modell „C“ erreicht werden. Dabei erscheinen die mittleren Schätzabweichungen (RMSE) der Schluff- und Sandgehalte von 16,8 Gew.-% bzw. 19,6 Gew.-% als

besonders hoch, resultieren aber aus der aufgrund der Größe des Gebietes erwartungsgemäß hohen Streuung der Eingangsparameter mit einer Standardabweichung von 19,7 und 22,1. Der RMSE der Tongehalte liegt mit 6,0 Gew.-% deutlich niedriger und zeigt eine mit der feldübergreifenden Skala vergleichbare Schätzgenauigkeit.

Mit dem Regressions-Kriging Modell „C“ sind gegenüber dem direkten Punktinterpolationsverfahren des Disjunktiven Kriging verbesserte Schätzgüten von 16,8 % für den Ton-, 14,6 % für den Schluff- und 10,1 % für den Sandgehalt zu verzeichnen. Für die C_{org} -Gehalte konnte ein um 12,2 % geringerer RMSE ermittelt werden. Gegenüber dem Datensatz der feldübergreifenden Skala führte die Integration der Co-Variablen der Reliefparameter in die Vorhersage, mit Ausnahme des C_{org} -Gehaltes, zu einer Verbesserung der Schätzgenauigkeit, bei nahezu gleicher mittlerer Punktdichte und Beprobungsdistanz. Die Bestimmtheitsmaße der Regression zwischen den gemessenen und den geschätzten Werten liegen zumeist bei 20 %, für den Tongehalt ist ein wesentlich höherer Grad der Erläuterungsanteile von 44 % zu verzeichnen.

Somit liegt für die Landschaftsskala trotz der hohen Streuung der Werte und starken kleinräumigen Variation der geomorphologischen Strukturen (vgl. RICHTER ET AL., 2007) ein verwertbares Ergebnis vor. Im Vergleich zum untersuchten Gebietsausschnitt der feldübergreifenden Skala, liegen dabei wesentlich höhere Reichweiten der Erhaltungseignung bei einem deutlich geringeren Grad räumlicher Autokorrelation vor. Auch hier basiert die relativ hohe und verbesserte Schätzgüte auf dem durch die Reliefparameter zu erklärenden Anteil der räumlichen Variabilität der Bodeneigenschaften.

Bezüglich der Aussagefähigkeit der für das Bearbeitungsgebiet vorliegenden Bodenkarte im Maßstab 1:25000 konnte im Vergleich auf Grundlage einer Validierung mit den 739 Punkten für die Tongehalte ein um 32 %, für die Schluffgehalte ein um 43 % und für die Sandgehalte ein um 39 % verbesserter Informationsgehalt erzielt werden. Damit ist im Ergebnis festzuhalten, dass mit der erfolgten Vorgehensweise für den betrachteten Gebietsausschnitt eine im Vergleich zur bestehenden Bodenkarte im Maßstab 1:25000 wesentlich verbesserte Datengrundlage bereitgestellt werden kann.

Allerdings kann dies lediglich für den Oberboden gelten. Die Vorhersage der Eigenschaften des Unterbodens erscheint auf Grundlage der hier angewendeten Verfahren als schwierig, da zu der zweidimensionalen räumlichen Verbreitung noch die vertikale Komponente hinzukommt. Dann spielen Bodenbildungsprozesse wie z. B. die Tonverlagerung oder die Pseudovergleyung eine tragende Rolle. Zwar konnte gezeigt werden, dass die Integration der hier genutzten Reliefparameter stellenweise Hinweise auf solche Prozesse herausgearbeitet werden können (z. B. bei Kolluvien und erodierten Parabraunerden), was aber nur auf oberflächennah in Erscheinung tretenden Merkmalen beruht und keine Rückschlüsse auf die Gestalt des Unterbodens zulässt. Ansätze zur dreidimensionalen Interpolationen von Bodeneigenschaften bieten CASTRIGNANO ET AL. (2002), LORENZ (2004) und GRUJTERS ET AL. (2005).

Es ist anzunehmen, dass mit zunehmender Bodentiefe ein abnehmender Einfluss des Reliefs auf die primären Bodeneigenschaften einhergeht, da das hierdurch beeinflusste Prozessge-

schehen, wie z. B. Erosion, oberflächennah stattfindet. Die fernerkundlich erfasste räumliche Verteilung der Biomasse ist unter Umständen geeignet, Hinweise für Staunässe- und Verdichtungserscheinungen sowie Grundwasserbeeinflussung zu geben. Da sie aber auch auf die Eigenschaften des hiervon nicht betroffenen Oberbodens zurückgeht, lässt letztlich keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Bodeneigenschaften zu. Hinzu kommt der erhebliche Aufwand zur Erarbeitung einer Datengrundlage für die Regionalisierung.

Die vorliegende Untersuchung hat gezeigt, dass durch die Einbeziehung von Sekundärinformation auf allen betrachteten räumlichen Skalen gegenüber herkömmlichen Punktinterpolationsverfahren verbesserte Schätzgenauigkeiten zu erreichen sind. Das Verfahren des Regressions-Kriging weist dabei die Flexibilität auf, mehrere, die räumliche Verteilung der Bodeneigenschaften erklärende Co-Variablen in die Regionalisierung einzubeziehen. Weitere Gründe für den erfolgreichen Einsatz des Verfahrens liegen in der Eigenschaft, aus den linearen Regressionsgleichungen deutlich über- oder unterschätzte Werte durch die Kriginginterpolation der Residuen auszugleichen. Im Gegensatz zu den einfachen Krigingverfahren, bei denen die Schätzung unter Minimierung des Schätzfehlers erfolgt, bleiben hier die Spannweiten der Zielvariablen erhalten, Ausreisser fallen weniger ins Gewicht. Das Verfahren ist deshalb als robuster zu bezeichnen (ODEH ET AL. 1994). Hinzu kommt der Vorteil, dass neben der wissenschaftsbasierten, deterministischen Komponente auch der zufällige, nicht erklärbare Anteil an der räumlichen Variabilität der Bodeneigenschaften Berücksichtigung findet.

Es stellt sich die Frage, ob neben den hier verwendeten Co-Variablen noch weitere Sekundärinformationen in die Regionalisierung einbezogen werden können. Neben dem Relief ist das Klima, das für das betrachtete Gebiet als einheitlich anzusehen ist, als weiterer Bodenbildungsfaktor nicht in Betracht zu ziehen. Daher kommt allenfalls dem Ausgangsgestein noch eine Bedeutung zu, welches im Jungmoränengebiet aufgrund der kleinräumig sehr stark variierenden Ablagerungsbedingungen während des Pleistozäns einer ähnlichen Problematik wie der Bodenverbreitung unterliegt (PETERSEN ET AL., 2005; BILLWITZ & JANETZKO, 2006).

Eine sinnvolle Alternative bieten hochaufgelöste Ertragsdaten (vgl. BISHOP & MCBRATNEY, 2001), die ähnlich den Fernerkundungsinformationen Rückschlüsse auf wichtige ertragsbestimmende Bodeneigenschaften, wie der Korngrößenverteilung oder dem Humusgehalt ermöglichen. Ergänzend könnten auch Bodeninformationen aus der Bodenschätzung in die Regionalisierung einbezogen werden (vgl. HERBST, 2002).

Möglicherweise bieten andere, als die hier genutzten Methoden der Regionalisierung von Bodeneigenschaften, wie das von MERTENS (2002) und SELLE ET AL. (2006) erfolgreich angewendete „CART“-Verfahren (*classification and regression trees*), das auf der „fuzzy logic“-Theorie basierende Modell von FRIEDRICH (2002) und HANNEMANN (2005) oder die Aufstellung Neuronaler Netze („*Artificial Neural Networks*“, vgl. BEHRENS ET AL., 2005) eine Alternative.

Allerdings wurden die genannten Verfahren in großräumiger strukturierten Landschaften wie dem Berg- und Hügelland unter Einbindung von geologischen Informationen untersucht. Da-

her stellt sich die Frage, ob und in welcher Weise vorgestellte Methoden auch im Norddeutschen Jungmoränengebiet erfolgreich anzuwenden sind. Noch problematischer erscheint die Regionalisierung von Bodeneigenschaften in den Landschaftsräumen der Niederen Geest (vgl. DUTTMANN ET AL., 2004) oder der Marsch, da hier das Relief als wesentlicher Bodenbildungsfaktor seine tragende Rolle verliert (vgl. BÖHNER & KÖTHER, 2003; FRÄNZLE, 2004).

Literaturverzeichnis

- AHMEND & DEMARSILY (1987): *Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity and specific capacity*. In: Water Resources Research, 23, S. 1717-1737.
- ALBERTZ, J. (2001): *Einführung in die Fernerkundung*. 2. Auflage, Darmstadt.
- ANDERSON, M., T. BURT (1990): *Subsurface runoff*. In: Process studies in hillslope hydrology, New York, S. 365–400.
- ARBEITSGRUPPE BODEN (1982-2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 3., 4. und 5. Auflage, Hannover.
- ARMANTO, M. E. (1992): *Soil Variability as an Indicator of Erosion in Sloping Landscapes- Comparative Investigations in Eastern Holstein and South Sumatra*. Schriftenreihe des Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 18, Universität Kiel.
- BACHMANN, J. & K. H. HARTGE (1991): *Die Berechnung von Wasserspannungskurven aus Primärdaten - Ein Methodenvergleich*. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 155, S. 109-114.
- BANNARI, A., D. MORIN, F. BONN & A. R. HUETE (1995): *A Review of Vegetation Indices*. In: Remote Sensing Reviews, 13, S. 95-120.
- BECKET, P. H. & R. WEBSTER (1971): *Soil variability – a review*. In: Soils and Fertilizers, 34, S. 1-15.
- BEHRENS, T. ET AL. (2005): *Digital soil mapping using Artificial Neural Networks*. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 168, S. 21-33.
- BEHRENS, T. & T. SCHOLTEN (2006): *Digital soil mapping in Germany – a review*. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 169, S. 434-443.
- BELL, J. C., R. L. CUNNINGHAM & M. W. HAVENS (1994): *Soil drainage class probability mapping using a soil-landscape model*. In: Soil Science Society of America Journal, 58, S. 464-470.
- BELL, J. C., C. A. BUTLER & J. A. THOMPSON (1995): *Soil-terrain modelling for site-specific agricultural management*. In: ROBERT, P. C., W. E. LARSON R. H. RUST (Hrsg.): *Proceedings of Site-specific Management for Agriculture Systems*. Madison, S. 209-227.
- BELL, J. C., D. F. GRIGAL & P. C. BATES (2000): *A soil-terrain model for estimating spatial patterns of soil organic carbon*. In: WILSON, J. P. & J. C. GALLANT (Hrsg.): *Terrain Analysis: Principles and Applications*, S. 295-310, New York.
- BEVEN, K. J. & M. J. KIRKBY (1979): *A physically based variable contribution area model of basin hydrology*. In: Hydrological Sciences Bulletin, 24, S. 43-69.
- BIGGS, A. & B. SLATER (1998): *Using soil landscape and digital elevation models to provide rapid medium scale soil surveys on the eastern Darling Downs, Queensland*. In: Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science, Montpellier.

-
- BILLWITZ, K. & P. JANETZKO (2006): *Die Grundmuster der Bodenverbreitung im Jung- und Altmoränengebiet Schleswig-Holsteins und ihrer Bindung an geomorphologische Einheiten-Überlegungen für die Herstellung von Bodenkarten*. In: Zeitschrift für Geomorphologie, 50, S. 23-36.
- BIRKELAND, P. W. (1999): *Soils and Geomorphology*. 3. Auflage.
- BIRTH, G. S. & G. MCVEY (1968): *Measuring the Colour of Growing Turf with a Reflectance Spectrophotometer*. In: Agronomy Journal, 60, S. 640-643.
- BISHOP, T. F. A., A. B. MCBRATNEY & B. M. WHELAN (2001): *Measuring the quality of digital maps using information criteria*. In: Geoderma, 103, S. 95-111.
- BISHOP, T. F. A. & A. B. MCBRATNEY (2001): *A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil properties*. In: Geoderma, 103, S. 149-160.
- BLUME, H.P., P. FELIX-HENNINGSSEN, W. FISCHER, H. G. FREDE, R. HORN & K. STAHR (Hrsg.) (1999): *Handbuch der Bodenkunde*. Ecomed, Landsberg am Lech.
- BOCK, M. & R. KÖTHE (2005): *Regionalisierung von Bodenkennwerten zur Ableitung von Funktionalen Bodenkzeptkarten*. In: MÖLLER, M. & H. HELBIG (2005): *GIS-gestützte Bewertung von Bodenfunktionen. Datengrundlagen und Lösungsansätze*, S. 35-44.
- BÖHNER, J. ET AL. (2002): *Soil regionalisation by means of terrain analysis and process parameterisation*. In: MICHELI, E., F. NACHTERGAELE & L. MONTANARELLA (Hrsg.): *Soil Classification 2001*. – European Soil Bureau – Research Report No. 7, EUR 20398 EN, Luxembourg, S. 213-222.
- BÖHNER, J. & R. KÖTHE (2003): *Bodenregionalisierung und Prozessmodellierung: Instrumente für den Bodenschutz*. In: Petermanns Geographische Mitteilungen, 2003/3, S. 72-82.
- BÖHNER, J., K. R. MCCLOY & J. STROBL (Hrsg.) (2006): *SAGA-Analysis and Modelling Applications*. Göttinger Geographische Abhandlungen, 115, Geographisches Institut der Universität Göttingen.
- BORK, H.R. (1991): *Bodenerosionsmodelle – Forschungsstand und Forschungsbedarf*. In: Berichte über Landwirtschaft, 205, S. 51-67.
- BOUMA, J. (1989): *Using soil survey data for quantitative land evaluation*. In: Advances in Soil Science, 9, S. 177-213.
- BREIMANN, L., J. H. FRIEDMANN, R. A. OLSHEN & C. J. STONE (1984): *Classification and Regression Trees*. Wadsworth.
- BRINKMANN, J. (2002): *Räumliche Variabilität von Böden und Bodeneigenschaften auf dem Landwirtschaftlichen Versuchsgut Frankenforst im Pleiser Hügelland*. Dissertation, Universität Bonn.
- BROSIUS, F. (2002): *SPSS 11*. Bonn.
- BURROUGH, P. A. (1993): *Soil variability: a late 20th century view*. In: Soils and Fertilizers, 56, S. 529-652.
- BURROUGH, P. A., J. BOUMA & S. R. YATES (1994): *The state of the art in pedometrics*. In: Geoderma, 62, S. 311-326.

-
- BURROUGH, P. A., & R. A. McDONNELL (2000): *Principles of Geographical Information Systems*. New York.
- CAMBARDELLA, C. A. ET AL. (1994): *Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils*. In: Science Society of America Journal, 58, S. 1501-1511.
- CASTRIGNANO, A. (2005): *Using Digital Terrain Modelling For Estimation of Soil Properties*. In: Pedometrics 2005: Frontiers in Pedometrics, S. 16-17.
- CASTRIGNANO, A., M. MAIORANA, F. FORNARO & N. LOPEZ (2005): *3D spatial variability of soil strength and its change over time in a durum wheat field in Southern Italy*. In: Soil and Tillage Research, 65, S. 95-108.
- COLOMBO, R., D. BELLINGERI, D. FASOLINI & C. M. MARINO (2003): *Retrieval of Leaf Area Index in Different Vegetation Types Using High Resolution Satellite Data*. In: Remote Sensing of Environment, 86, S. 120-131.
- CONRAD, O. (1998): *Die Ableitung hydrologisch relevanter Reliefparameter aus Digitalen Geländemodellen*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Göttingen.
- CONRAD, O. ET AL. (2006): *Soil degradation risk assessment integrating terrain analyses and soil spatial prediction methods*. In: Geoöko, 27, S. 165-174.
- CRESSIE, N. A. C. (1993): *Statistics for spatial data*. New York.
- DEMIRCAN, A. (1995): *Die Nutzung fernerkundlich bestimmter Pflanzenparameter zur flächenhaften Modellierung von Ertragsbildung und Verdunstung*. Münchener Geographische Abhandlungen, Reihe B, 20.
- DEUTSCH, C.V. & A.G. JOURNAL (1998): *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*. 2. Auflage. New York.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) [HRSG.] (2000 – 2003): *Handbuch der Bodenuntersuchung: Terminologie, Verfahrensvorschriften und Datenblätter; physikalische, chemische, biologische Untersuchungsverfahren (1-6)*. Laufend erneuerte Blattsammlung, Berlin, Wien, Zürich.
- DIERBEN, K. (2004): *Vegetation Schleswig-Holsteins*. In: EcoSys-Beiträge zur Ökosystemforschung, 41, S.36-60, Kiel.
- DIETRICH, W. E. ET AL (1995): *A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data*. In: Hydrologic Processes, 9, S. 393-400.
- DIKAU, R. & J. SCHMIDT (1999): *Georeliefklassifikation*. In: SCHNEIDER-SLIWA, R., D. SCHAUB & G. GEROLD (Hrsg.): *Angewandte Landschaftsökologie- Grundlagen und Methoden*. S. 217 - 244, Heidelberg.
- DOBOS, E. ET AL. (2000): *Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping*. In: Geoderma, 97, S. 367-391.
- DOBOS, E. ET AL. (Hrsg.) (2006): *Digital Soil Mapping as a support to production of functional maps*. European Commission Joint Research Centre, EUR 22123 EN.

-
- DUTTMANN, R. (1999): *Partikuläre Stoffverlagerungen in Landschaften. Ansätze zur flächenhaften Vorhersage von Transportpfaden und Stoffumlagerungen auf verschiedenen Massstabsebenen unter besonderer Berücksichtigung räumlich-zeitlicher Änderungen der Bodenfeuchte*. Geosynthesis Heft 10, Geographisches Institut der Universität Hannover.
- DUTTMANN, R. (2001): *Bodenfeuchte als Steuergröße der Bodenerosion*. In: Geographische Rundschau, 5, S. 24-32.
- DUTTMANN, R. & J. BRUNOTTE (2002): *Oberirdische Stofftransporte in Agrarlandschaften – Vorhersage und Vermeidung*. In: Geographische Rundschau, 6, S. 29-35.
- DUTTMANN, R., H. FLEIGE & R. HORN (2004): *Landschafts- und Bodenentwicklung im Raum Goldelund unter Berücksichtigung der Winderosion*. In: EcoSys-Beiträge zur Ökosystemforschung, 41, S.36-60, Kiel.
- FLORINSKY, I. & G. KURYAKOVA (1998): *Determination of grid size for digital terrain models in soil investigations*. In: Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science, Montpellier.
- FLORINSKY, I. V. & R. G. EILERS (2002): *Prediction of the soil organic carbon content at micro-, meso- and macroscales by digital terrain modelling*. In: 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Paper Nr. 24.
- FLORINSKY, I. V. ET AL. (2002): *Prediction of the soil properties by digital terrain modelling*. In: Environmental Modelling and Software, 17, S. 295-311.
- FOHRER, N. ET AL. (1999): *Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt eines ländlichen Einzugsgebietes in einer peripheren Region*. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landesentwicklung, 40, S. 202-206.
- FRÄNZLE, O. (1981): *Erläuterungen zur Geomorphologischen Karte 1:25000 der Bundesrepublik Deutschland - GMK 25 Blatt 8, 1826 Bordesholm*. Geomorphologische Detailkartierung in der Bundesrepublik Deutschland, Berlin.
- FRÄNZLE, O. (2004): *Reliefentwicklung und Bodenbildung in Schleswig-Holstein*. In: EcoSys-Beiträge zur Ökosystemforschung, 41, S.11-35, Kiel.
- FREEMAN, T. G. (1991): *Calculating catchmentarea with divergent flow based on a regular grid*. In: Computers and Geoscience, 17(3), S. 413-422.
- FRIEDRICH, C. (2003): *GIS- basierte Regionalisierung und Quantifizierung unscharfer Bodeninformationen mit Hilfe der Fuzzy-Set-Theorie*. Dissertation, Universität Gießen.
- GARBRECHT, M. & L. W. MARTZ (1999): *TOPAGNPS - An automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation, and subcatchment parameterization for AGNPS 2001 watershed modeling technology*. USDA Agricultural Research Service.
- GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE FERNERKUNDUNG MBH (GAF) (1999): *Satellitenbildfernerkundung zur Managementunterstützung landwirtschaftlicher Betriebe*. München.

-
- GESSLER, P. E. ET AL. (1995): *Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes*. In: International Journal of Geographical Information Systems, 9, S. 421-432.
- GESSLER, P. E. ET AL. (2000): *Modeling Soil-Landscape and Ecosystem Properties using Terrain attributes*. In: Soil Science Society of America Journal, 64, S. 2046-2056.
- GOOVAERTS, P. (1997): *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York.
- GOOVAERTS, P. (2000): *Geostatistic approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall*. In: Journal of Hydrology, 228, S. 113-129.
- GRAYSON, R. B., I. D. MOORE & T. A. MCMAHON (1992): *Physically based hydrologic modeling – 2. Is the concept realistic?* In: Water Resources Research, 28 (10), S. 2659-2666.
- GRENZDÖRFFER, G. (1998): *Dokumentation und Analyse kleinräumiger Heterogenität mit Fernerkundung und GIS*. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL) (Hrsg.): *Erfassung der kleinräumigen Heterogenität*, Arbeitspapier 264, S. 93-105, Darmstadt.
- GRUIJTERS, S. H. L. L., D. MALJERS & J. G. VELDKAMP (2005): *3D interpolation of grain size distributions in the upper 5 m of the channel bed of three lower Rhine distributaries*. In: Physics and Chemistry of the Earth, 30, S. 303-316.
- GRUNWALD, S. (Hrsg.) (2005): *Environmental Soil-Landscape Modelling-Geographic information Technologies and Pedometrics*. Boca Raton.
- HAGEDORN, J. ET AL. (1999): *Fachwissenschaftliche Expertise: Weiterentwicklung von Verfahren zur Relieffanalyse, Klimaregionalisierung Prozessparametrisierung und Regionalisierung von Bodenmerkmalen*.
- HANEKLAUS, S., I. RUEHLING, D. SCHROEDER & E. SCHNUG (1997): *Studies on the variability of soil and crop fertility parameters and yields in different landscapes of northern Germany*. In: Stafford, J. V. (Hrsg.): *Precision Agriculture '97: Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture*, S. 785-792, London.
- HANNEMAN, J. (2005): *Aspekte inhaltlicher und räumlicher Datenintegration bei der Erstellung einer Bodenkzeptkarte*. In: MÖLLER, M. & HELBIG, H. (Hrsg.) (2005): *GIS-gestützte Bewertung von Bodenfunktionen – Datengrundlagen und Lösungsansätze*. Heidelberg.
- HARTGE, K. H. & R. HORN (1992): *Die physikalische Untersuchung von Böden*. Stuttgart.
- HASSENPFUG, W. (1971): *Studien zur rezenten Hangüberformung in der Knicklandschaft Schleswig-Holsteins*. In: *Forschungen zur deutschen Landeskunde*, 198, S. 1-161, Bonn-Bad Godesberg.
- HEINRICH, U. (1994): *Flächenschätzung mit geostatistischen Verfahren – Variogrammanalyse und Kriging*. In: SCHRÖDER, W., L. VETTER & O. FRÄNZLE (Hrsg.) (1994): *Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie*. S. 297-331, Braunschweig.
- HENGL, T., D. G. ROSSITER & S. HUSNJAK (2002): *Mapping soil properties from an existing national soil data set using freely available ancillary data*. In: 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Paper Nr. 1140.

-
- HENGL, T., G. B. HEUVELINK & A. STEIN (2004): *A generic framework for spatial prediction of soil variability based on regression-kriging*. In: *Geoderma*, 97, S. 293-327.
- HENGL, T. & N. TOOMANIAN (2006): *Maps are not what they seem: representing uncertainty in soil property maps*. Papers of the 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences.
- HERBST, M. (2001): *Regionalisierung von Bodeneigenschaften unter Berücksichtigung geomorphometrischer Strukturen für die Modellierung der Wasserflüsse eines mikroskaligen Einzugsgebietes*. Dissertaion, Universität Bonn.
- HERBST, M., B. DIEKKRÜGER & H. VERECKEN (2006): *Geostatistical co-regionalization of soil hydraulic properties in a micro-scale catchment using terrain attributes*. In: *Geoderma*, 132, S. 206-221.
- HERBST, R. (2002): *Bodenschätzung, geoelektrische Sondierung und pedostatistische Modellierung als Basis von digitalen Hof-Bodenkarten*. Schriftenreihe des Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 60, Universität Kiel.
- HERBST, R., M. LANGENSIEPEN & A. SCHULTE-EICKHOLT (2006): *Methodenentwicklung zur flächenhaften Analyse und Modellierung von Wurzelwachstum unter besonderer Berücksichtigung des Boden- und Pflanzenwasserhaushalts*. In: *Pre Agro-Zwischenbericht 2005*, S. 177-187.
- HEUVELINK, G. B. M. & R. WEBSTER (2001): *Modelling soil variation: past, present, and future*. In: *Geoderma*, 100, S. 269-301.
- HUETE, A. R. (1988): *A Soil-adjusted Vegetation Index (SAVI)*. In: *Remote Sensing of Environment*, 25, S. 295-309.
- HUETE, A. R. (1989): *Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectra*. In: ASRAR, G. (Hrsg.): *Theory and applications of optical remote sensing*, S. 107-141, New York.
- HUETE, A. R. & H. Q. LIU (1994): *An error and sensitivity analysis of the atmospheric-correcting and soil-correcting variants of the NDVI for the modis-eos*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32, S. 897-905.
- ISAAKS, E. H. & R. M. SRIVASTAVA (1989): *Applied geostatistics*. New York.
- ISAAKS, E., H. & R. M. SRIVASTAVA (1991): *An introduction to applied Geostatistics*. New York.
- IQBAL, J. ET AL. (2005): *Relationships between Soil-Landscape and Dryland Cotton Lint Yield*. In: *Soil Science Society of America Journal*, 69, S. 872-882.
- JANETZKO, P. (1996): *Verbreitung und Gliederung periglaziärer Deckschichten im Jungmoränengebiet von Schleswig-Holstein und ihre Bedeutung für die Pedogenese*. In: LANU S-H (Hrsg.): *Böden als Zeugen der Landschaftsentwicklung. Festschrift zum 80. Geburtstag von E. Stremme, Flintbeck*, S. 15-27.
- JENNY, H. (1941): *Factors of Soil Formation. A System of quantitative Pedology*. New York.
- JENSEN, J. R. (2007): *Remote Sensing of the Environment*. 2. Auflage, Upper Saddle River.

-
- JOHNSTON, K., J. M. VER HOEF, K. KRIVORUCHKO & N. LUCAS (2001): *Using ArcGIS™ Geostatistical Analyst*. ESRI, New York.
- JÜRSCHIK, P. (1999): *Grundlagen der Anwendung von Fernerkundungsmethoden für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung*. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL) (Hrsg.): *Erfassung der kleinräumigen Heterogenität*, Arbeitspapier 264, S. 82-92, Darmstadt.
- KLITZING, A. V., K. BÖTTCHER, C. GLÄBER & R. BISCHOFF (2004): *Multipler Einsatz von Fernerkundungsdaten für die bodenkundliche Landesaufnahme und den Bodenschutz*. THÜRINGER LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (Hrsg.), Jena.
- KNOTTERS, M., D. J. BRUS & J. H. OUDE VOSHAAR (1995): *A comparison of kriging combined with regression for spatial interpolation of horizon depth with censored observations*. In: *Geoderma*, 67, 227-246.
- KÖTHE, R. & F. LEHMEIER (1996): *SARA - Ein System zur Automatischen Relief-Analyse*. Unveröffentlichtes Benutzerhandbuch, Göttingen.
- KRAVCHENKO, A. N., D. G. BULLOCK & C. W. BOAST (2000): *Joint multifractional analysis of crop yield and terrain slope*. In: *Agronomy Journal*, 92, S. 1279-1290.
- LAGACHERIE, P., A. B. MCBRATNEY & M. VOLTZ (Hrsg.) (2006): *Digital soil mapping: An introductory Perspective*. *Development in Soil Science*, 31.
- LI, Y. & M. J. LINDSTRÖM (2001): *Evaluating soil quality-soil redistribution relationship on terraces and steep hillslopes*. In: *Soil Science Society of America Journal*, 65, S. 1500-1508.
- LIEDTKE, H. & J. MARCINEK (Hrsg.) (2002): *Physische Geographie Deutschlands*. 3. Auflage, Gotha.
- LILLESAND, T. M., R. W. KIEFER & J. W. CHIPMAN (2004): *Remote Sensing and Image Interpretation*. 5. Auflage, New York.
- LÓPEZ-GRANADOS, F., M. JURADO-EXPOSITO, J. M. PENA-BARRAGAN & L. GARCIA-TORRES (2005): *Using geostatistical and remote sensing approaches for mapping soil properties*. In: *European Journal of Agronomy*, 23, S. 279-289.
- LORENZ, K. (2004): *Nutzung der räumlichen Variabilität von ausgewählten Standorteigenschaften für die ortsspezifische N-Düngung – Messung und Simulation*. Dissertation, Humboldt-Universität Berlin.
- MATHERON, G. (1963): *Principles of geostatistics*. In: *Economic Geology*, 58, S. 1246-66.
- MATHERON, G. (1971): *The theory of regionalized variables and its applications*. Les cahiers du centre de morphologie mathématique, Fas.5, C. G. Fontainebleau, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France.
- MCBRATNEY, A. B. & M. J. PRINGLE (1997): *Spatial variability in soil-implications for precision agriculture*. In: STAFFORD, J. V. (Hrsg.) (1997): *Precision Agriculture. Spatial variability in crop and soil*. 1, S. 3-31.

-
- MCBRATNEY, A. B. ET AL. (2000): *An overview of pedometric techniques for use in soil survey*. In: Geoderma, 97, S. 293-327.
- MCBRATNEY, A. B. , ET AL. (2002): *From pedotransfer functions to soil inference systems*. In: Geoderma, 109, S. 41-73.
- MCBRATNEY, A. B., M. L. MENDONÇA SANTOS & B. MINASNY (2003): *On Digital soil mapping*. In: Geoderma, 117, S. 3-52.
- MCKENZIE, N. J. & P. J. RYAN (1999): *Spatial prediction of soil properties using environmental correlation*. In: Geoderma, 89, S. 67-94.
- MEER, U. (2005) : *Methoden zur Beurteilung der Heterogenität und Disaggregierungsverfahren zur Verbesserung der Aussagegehalte von Bodenbasisdaten*. Dissertation, Universität Hannover.
- MEYNEN, E. & J. SCHMITTHÜSEN (1962): *Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands*. Bad Godesberg.
- MERTENS, M., I. NESTLER & B. HUWE (2002): *GIS-based regionalization of soil properties with Classification and Regression Trees (CART)*. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 165, S. 39-43.
- MINASNY, B. & A. B. MCBRATNEY (1999): *A rudimentary mechanistic model for soil production and landscape development*. In: Geoderma, 90, S. 3-21.
- MÖLLER, D. ET AL. (1999): *Auswirkungen von Politik- und Strukturmaßnahmen auf die räumliche verteilung und Erfolgskennzahlen der Landnutzung: GIS-basierte Simulation mit ProLand*. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landesentwicklung, 40, S. 197-201.
- MÖLLER, M. & HELBIG, H. (Hrsg.) (2005): *GIS-gestützte Bewertung von Bodenfunktionen – Datengrundlagen und Lösungsansätze*. Heidelberg.
- MUELLER, T. G. & F. J. PIERCE (2003): *Soil Carbon Maps: Enhancing Spatial Estimates with Simple Terrain Attributes at Multiple Scales*. In: Soil Science Society of America Journal, 67, S. 258-267.
- MOORE, I. D. ET AL. (1993): *Soil Attribute Prediction Using Terrain Analyses*. In: Soil Science Society of America Journal, 57, S. 443-452.
- ODEH, I. A. O., D. J. CHITTLEBOROUGH & A. B. MCBRATNEY (1991): *Elucidation of soil-landform interrelationships by canonical ordination analysis*. In: Geoderma, 49, S. 1-32.
- ODEH, I. A. O., A. B. MCBRATNEY & D. J. CHITTLEBOROUGH (1994): *Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model*. In: Geoderma, 63, S. 197-215.
- ODEH, I. A. O., A. B. MCBRATNEY & D. J. CHITTLEBOROUGH (1995): *Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotropic cokriging and regression-kriging*. In: Geoderma, 67, S. 215-266.
- ODEH, I. A. O., J. TRIANTAFILIS & A. B. MCBRATNEY (2001): *Are quantitative methods useful for regional soil inventories?* Proceedings of the 5th Annual Symposium Geospatial In-

-
- formation Agriculture. Australian Technology Park, Eveleigh, Sydney, July 17-19, S. 17-29.
- ODEH, I. A. O. & A. B. MCBRATNEY (2001): *Estimating uncertainty in soil models (Pedometrics '99)*. In: Geoderma, 103, S. 1
- OTTE, F. (1988): *Über die quantitative Erfassung der Bodenvariabilität und Gütemaße für großmaßstäbige Karten*. Schriftenreihe des Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 2, Universität Kiel.
- PANNATIER, Y. (1996): *Variowin: Software for spatial data analysis in 2D*. New York.
- PANTEN, K. (2002): *Ein Beitrag zur Fernerkundung der räumlichen Variabilität von Boden- und Bestandesmerkmalen*. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Sonderheft 232.
- PARK, S. & P. VLEK (2002): *Environmental correlation of three-dimensional soil spatial variability: a comparison of three adaptive techniques*. In: Geoderma 103, S. 117-140.
- PETERSEN, C. (1991): *Precision GPS-navigation for improving agricultural productivity*. In: GPS World, 2 (1), S. 38-44.
- PETERSEN, H., W. RABELL & R. HORN (2005): *Anwendbarkeit geophysikalischer Prospektionsmethoden zur bestimmung von Bodenverdichtungen und Substratheterogenitäten landwirtschaftlich genutzter Flächen*. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 168, S. 68-79.
- PETTORELLI, N. ET AL. (2005): *Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change*. Trends in Ecology and Evolution, 20, S. 503-510.
- PILESJÖ, P., L. THYLEN & A. PERSSON (2000): *Digital Elevation Models for Delineation of Agricultural Management Zones*. 2nd International Conference on Geo-spatial Information in Agriculture and Forestry, Florida.
- QI, J., F. CABOT, M. S. MORAN & G. DEDIEU (1995): *Biophysical Parameter Estimations Using Multidirectional Spectral Measurements*. In: Remote Sensing of Environment, 54, S. 71-83.
- QUINN, P., K. BEVEN, P. CHEVALLIER & O. PLANCHON (1991): *The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models*. In: Hydrological Processes, 5, S. 59-79.
- REICHE, E. W. & F. MÜLLER (1994): *Modelle als wissenschaftliche und praxisrelevante Instrumente in der Geoökologie*. In: SCHRÖDER, W., L. VETTER & O. FRÄNZLE (Hrsg.) (1994): *Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie*. S. 297-331, Braunschweig.
- RESEARCH SYSTEMS INC. (2001): *ENVI Tutorials*. Boulder.
- REUTER, H. I. (2004): *Spatial crop and soil landscape processes under special consideration of relief information in a loess landscape*. Dissertation, Universität Hannover.

-
- RICHTER, F.-H., H. FLEIGE, H.-P. BLUME & R. HORN (2007): *Bodengesellschaften von geomorphen Einheiten unter Berücksichtigung des Gefügestils im Stormaner Jungmoränengebiet (Brandenburger Stadium) in Nordwestdeutschland*. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 170, S. 682-692.
- RIVERO, R. G., S. GRUNWALD & G. L. BRULAND (2007): *Incorporation of spectral data into multivariate geostatistical models to map soil phosphorus variability in a Florida wetland*. In: Geoderma 140, S. 428-443.
- RIVOIRAD, J. (1994): *Introduction to Disjunctive Kriging and Non-Linear Geostatistics*. Oxford.
- RONDEAUX, G., M. STEVEN & F. BARET (1996): *Optimization of Soil-adjusted Vegetation Indices*. In: Remote Sensing of Environment, 55, S. 95-107.
- ROUSE, J. W., R. H. HAAS, J. A. SCHELL & D. W. DEERING (1974): *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS*. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium- Volume I: Technical Presentations. NASA SP-351, S. 3010-3017.
- SCHEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde - 15. Auflage -*. Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- SCHELLBERG, J. (1990): *Die spektrale Reflexion von Weizen – ein Beitrag zur Zustandsbeschreibung landwirtschaftlicher Kulturpflanzenbestände durch Fernerkundung*. Dissertation, Universität Bonn.
- SCHLICHTING, E., H. P. BLUME & K. STAHR (1995): *Bodenkundliches Praktikum*. 2. Auflage, Berlin.
- SCHMEHE, B. (2007): *Modellierung erosionsbedingter Phosphorausträge mit AnnAGNPS am Beispiel des Einzugsgebietes der Drögen Eider (Schleswig-Holstein)*. Dissertation, Universität Kiel.
- SCHMIDHALTER, U. & T. SELIGE (2002): *Multispektrale Fernerkundung von Bodeneigenschaften und Aufwuchszuständen*. In: WERNER, A. & A. JARFE (Hrsg.): *Precision Agriculture - Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis*, S. 117-127, Darmstadt.
- SCHMIDHALTER, U., T. SELIGE & J. BOBERT (2004): *Geophysikalische und fernerkundliche Ermittlung teilflächenspezifischer Ertragspotenziale auf der Grundlage des Wasserhaushaltes*. In: *Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau, Verbundprojekt pre agro – Abschlussbericht*, S. 239-292
- SCULL, P. ET AL. (2003): *Predictive soil mapping: a review*. In: Progress in Physical Geography, 27, S. 171-197.
- SCULL, P. ET AL. (2005): *A Comparison of Methods to Predict Soil Surface Texture in an Alluvial Basin*. In: The Professional Geographer, 57, S. 423-437.
- SELLE, B., R. MORGEN & B. HUWE (2006): *Regionalising the available water capacity from readily available data*. In: Geoderma, 132, S. 391-405.

-
- SIMBAHAN, G.C., A. DOBERMANN, P. GOOVAERTS, J. PING & M. L. HADDIX (2006): *Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data*. In: *Geoderma*, 132, S. 471-489.
- SINOWSKI, W. & K. AUERSWALD (1999): *Using reliefparameters in a discriminant analysis to stratify geological areas with different spatial variability of soil properties*. In: *Geoderma*, 89, S. 113-128.
- SOMMER, M. ET AL. (2002): *Quantitative pedogenetic approach on soilscales by relief analysis, geophysics and remote sensing*. In: 17th World congress of Soil Science, Thailand, 109, S. 1-12.
- SOMMER, M. ET AL. (2003): *Hierarchical data fusion for mapping soil units at field scale*. In: *Geoderma*, 112, S. 179-196.
- STEPHAN, H.-J. & B. MENKE (1977): *Untersuchungen über den Verlauf der Weichsel-Kaltzeit in Schleswig-Holstein*. In: *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementbände*, 27, S. 12-28.
- SUMFLETH, K. & R. DUTTMANN (2007): *Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators*. In: *Ecological Indicators* (in press).
- TAYLOR, J., G. A. WOOD & J. P. WELSH (2000): *Exploring management strategies for precision farming of cereals assisted by remote sensing*. In: *Aspects of applied biology*, 60 – Remote sensing in agriculture, S.53-69.
- TRANGMAR, B. B., R. S. YOST & G. UEHARA (1985): *Application of geostatistics to spatial studies of soil properties*. In: *Advances in Agronomy*, 38, S. 45-93.
- VAN GENUCHTEN, R. & D. R. NIELSEN (1985): *On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils*. In: *Annales Geophysicae*, 3, S. 615-628.
- VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN –VDLUFA (1991): *Methodenhandbuch, Band I, Die Untersuchung von Böden*. 4. Aufl., Darmstadt.
- VERECKEN, H. J., J. MAES, J. FEYEN & P. DARIUS (1989): *Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content*. In: *Soil Science Society of America Journal*, 148, 6, S. 389-403.
- WACKERNAGEL, H. (2003): *Multivariate Geostatistics*. 3. Auflage, Berlin.
- WANG, Q., S. ADIKU, J. TENHUNEN & GRANIER, A. (2005): *On the Relationship of NDVI with leaf Area Index in a Deciduous Forest Site*. In: *Remote Sensing of Environment*, 94, S. 244-255.
- WEBSTER, R. (1994): *The development of pedometrics*. In: *Geoderma* 62, S. 1-15.
- WEBSTER, R. & M. OLIVER (2004): *Geostatistics for Environmental Scientist*. New York.
- WENDROTH, O., A. M. AL-OMRAN, C. KIRDA, K. REICHARDT & D. R. NIELSEN (1992): *State-space approach to spatial variability of crop yield*. In: *Soil Science Society of America Journal*, 56, S. 801-807.

-
- WENDROTH, O., G. KÜHN, P. JÜRSCHIK & D. R. NIELSEN (1997): *State-space Approach for Site Specific Management Decisions*. In: Stafford, J. V. (Hrsg.): Precision Agriculture '97: Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture, Vol. 2, S. 835-842, London.
- WENKEL, K. -O. & A. SCHULTZ (1999): *Vom Punkt zur Fläche – das Skalierungs- bzw. Regionalisierungsproblem aus der Sicht der Landschaftsmodellierung*. In: STEINHARDT, U. & VOLK, M. (Hrsg.) (1999): Regionalisierung in der Landschaftsökologie. Forschungs-Planung-Praxis.
- WERNER, A. & A. JARFE (Hrsg.) (2002): *Precision Agriculture: Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis*. Darmstadt.
- WERNER, M. (1995): *GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung der Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten*. Dissertation, Freie Universität Berlin.
- WESTERN, A. W. & G. BLÖSCHL (1999): *On the spatial scaling of soil moisture*. In: Journal of Hydrology, 217, S. 203-224.
- WILSON, J., P. & C. GALLANT (2000): *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York.
- WISCHMEIER, W. & D. SMITH (1978): *Predicting rainfall erosion loss: a guide to conservation planning*. Agricultural Handbook, 537, Washington.
- ZHU, A. & D. MACKAY (2001): *Effects of spatial detail of soil information on watershed modeling*. In: Journal of hydrology, 284, S. 54-77.
- ZIADAT, F. M. (2005): *Analyzing Digital Terrain Attributes to Predict Soil Attributes for a Relatively Large Area*. In: Soil Science Society of America Journal, 69, S. 1590-1599.
- ZEVENBERGEN, L. W. & C. R. THORNE (1987): *Quantitative analysis of land surface topography*. In: Earth Surface Processes and Landforms, 12, S. 47-56.

Anhang

Anhang A1: Übertragung der Bodenartenuntergruppen nach KA4, bzw. KA3 in metrische Werte der Kornfraktionen Ton, Schluff und Sand in Gewichtsprozent (vgl. AG Boden, 1982 und 1994)

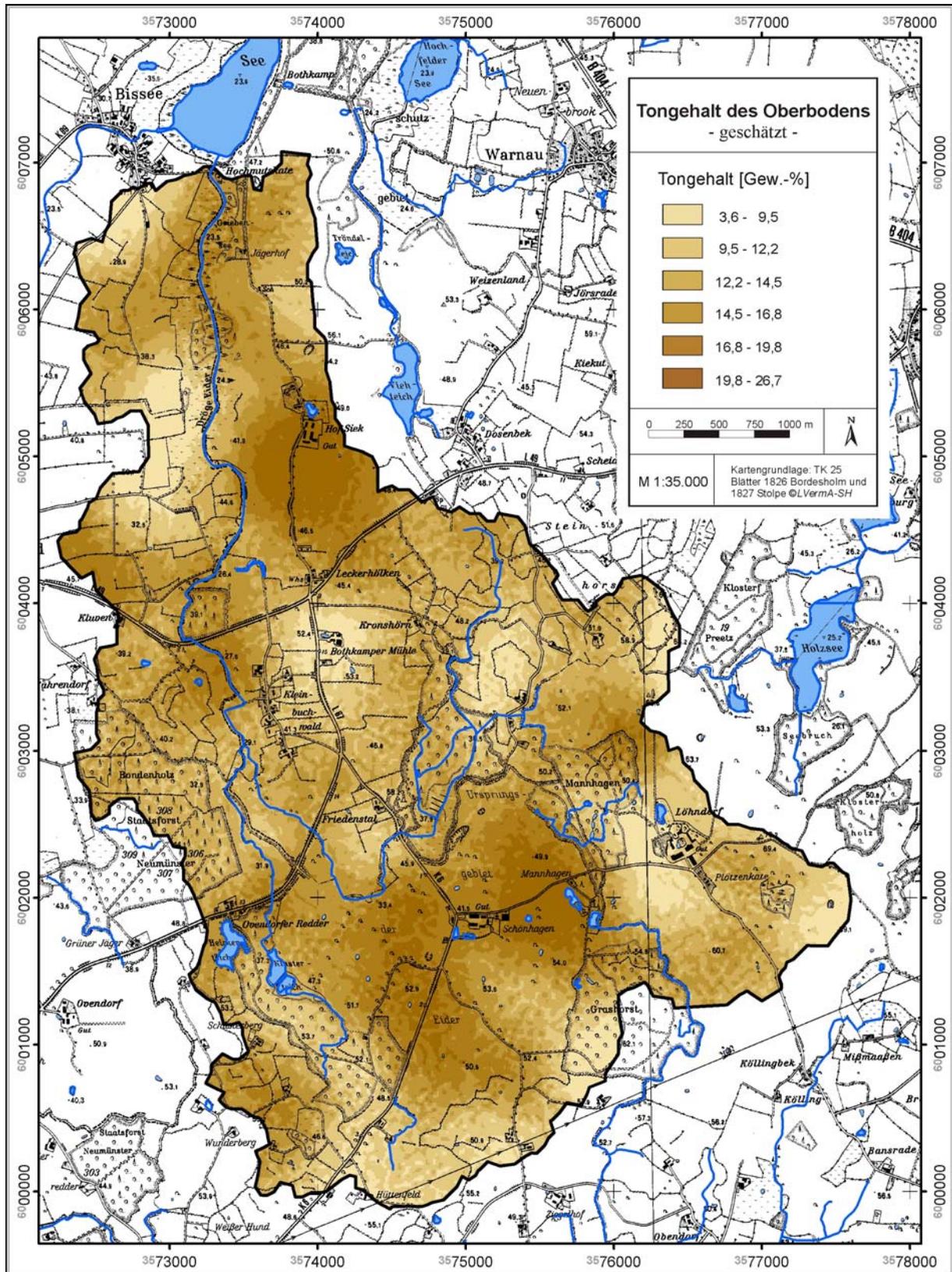
Kornfraktionen [Gew.-%]							
<i>Bodenarten- untergruppe</i>	<i>Kurz- zeichen</i>	Ton (T)		Schluff (U)		Sand (S)	
		<i>Spanne</i>	<i>Metrisierte Klassenmitte</i>	<i>Spanne</i>	<i>Metrisierte Klassenmitte</i>	<i>Spanne</i>	<i>Metrisierte Klassenmitte</i>
Reiner Sand	Ss	0-5	2,5	0-10	5,0	85-100	92,5
Schwach lehmiger Sand	Sl2	5-8	6,5	10-25	17,5	67-85	76,0
Mittel lehmiger Sand	Sl3	8-12	10,0	10-40	25,0	48-82	65,0
Mittel schluffiger Sand	Su3	0-8	4,0	25-40	32,5	52-75	63,5
Stark schluffiger Sand	Su4	0-8	4,0	40-50	45,0	42-60	51,0
Schluffig-lehmiger Sand	Slu	8-17	12,5	40-50	45,0	33-52	42,5
Stark lehmiger Sand	Sl4	12-17	14,5	10-40	25,0	43-78	60,5
Schwach sandiger Lehm	Ls2	17-25	21,0	40-50	45,0	25-43	34,0
Mittel sandiger Lehm	Ls3	17-25	21,0	30-40	35,0	35-53	44,0
Stark sandiger Lehm	Ls4	17-25	21,0	15-30	22,5	45-68	56,5
Schwach toniger Lehm	Lt2	25-35	30,0	30-50	40,0	15-45	30,0
Sandiger Schluff	Us	0-8	4,0	50-80	65,0	12-50	31,0
Mittel toniger Schluff	Ut3	12-17	13,5	65-88	75,0	0-23	11,5
Mittel toniger Schluff	Ul3	12-17	14,5	65-88	74,0	0-23	11,5
Schluffiger Lehm	Lu	17-30	23,5	50-65	57,5	5-33	19,0
Mittel toniger Lehm	Lt3	35-45	40,0	30-50	40,0	5-35	20,0
Mittel schluffiger Ton	Tu3	30-45	35,0	50-65	55,0	0-20	10,0

Anhang A2: Übertragung der Humusgehaltklassen nach KA4 in metrische Werte (vgl. AG Boden, 1982 und 1994)

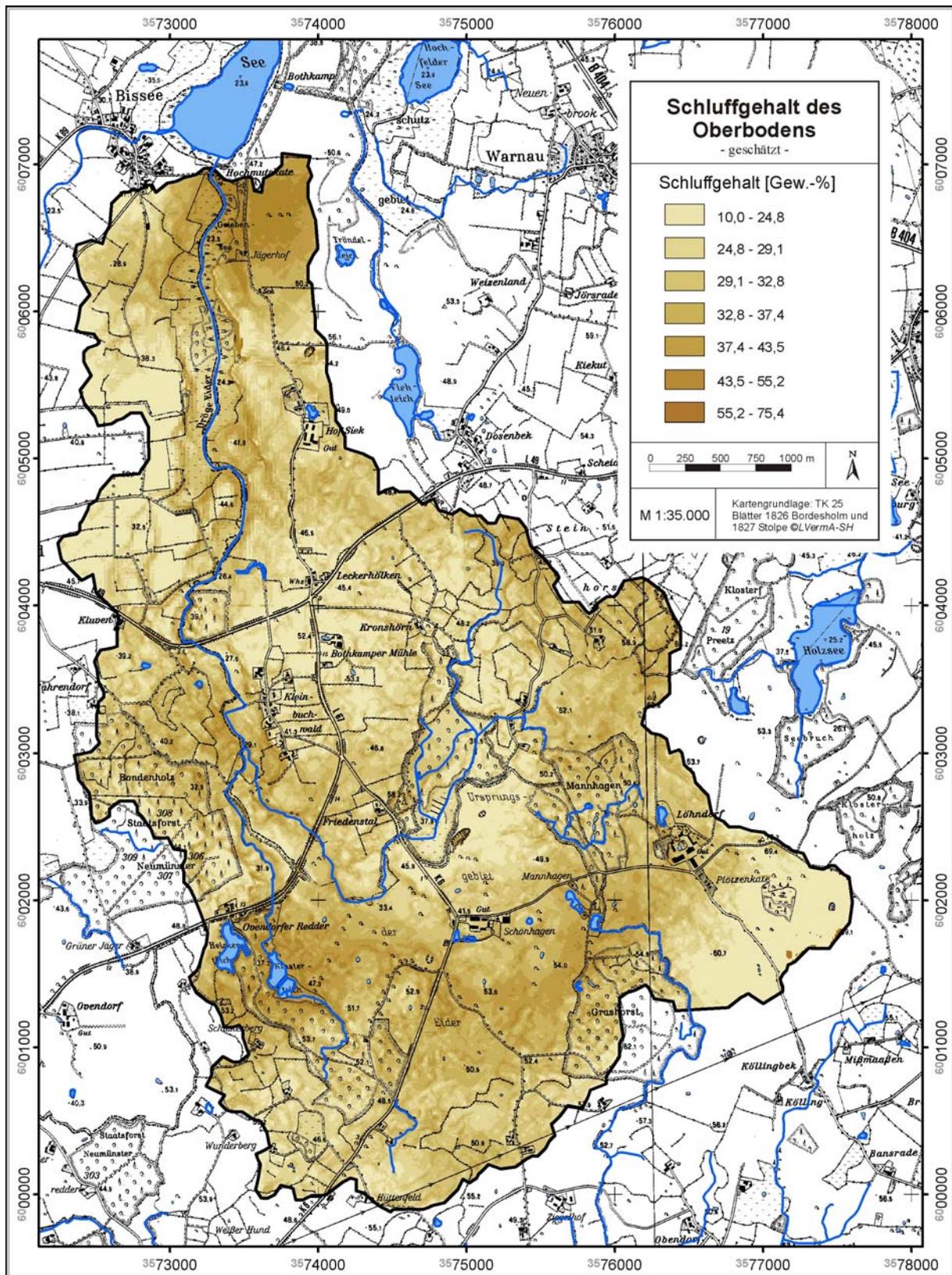
Humus (organische Substanz)				
<i>Bezeichnung</i>	<i>Kurz- zeichen</i>	<i>Spanne (Gew.-%)</i>	<i>Metrisierte Klassen- mitte (Gew.-%)</i>	<i>C_{org}-Gehalt* (Gew.-%)</i>
Sehr schwach humos	h1	<1	0,5	0,29
Schwach humos	h2	1 bis <2	1,5	0,87
Mittel humos	h3	2 bis <4	3,0	1,74
Stark humos	h4	4 bis <8	6,0	3,49
Sehr stark humos	h5	8 bis <15	11,5	6,69

*C_{org} = Gehalt an organischem Kohlenstoff in Gew.-% aus der Division des Humusgehaltes mit 1,72 (vgl. AG Boden, 2005).

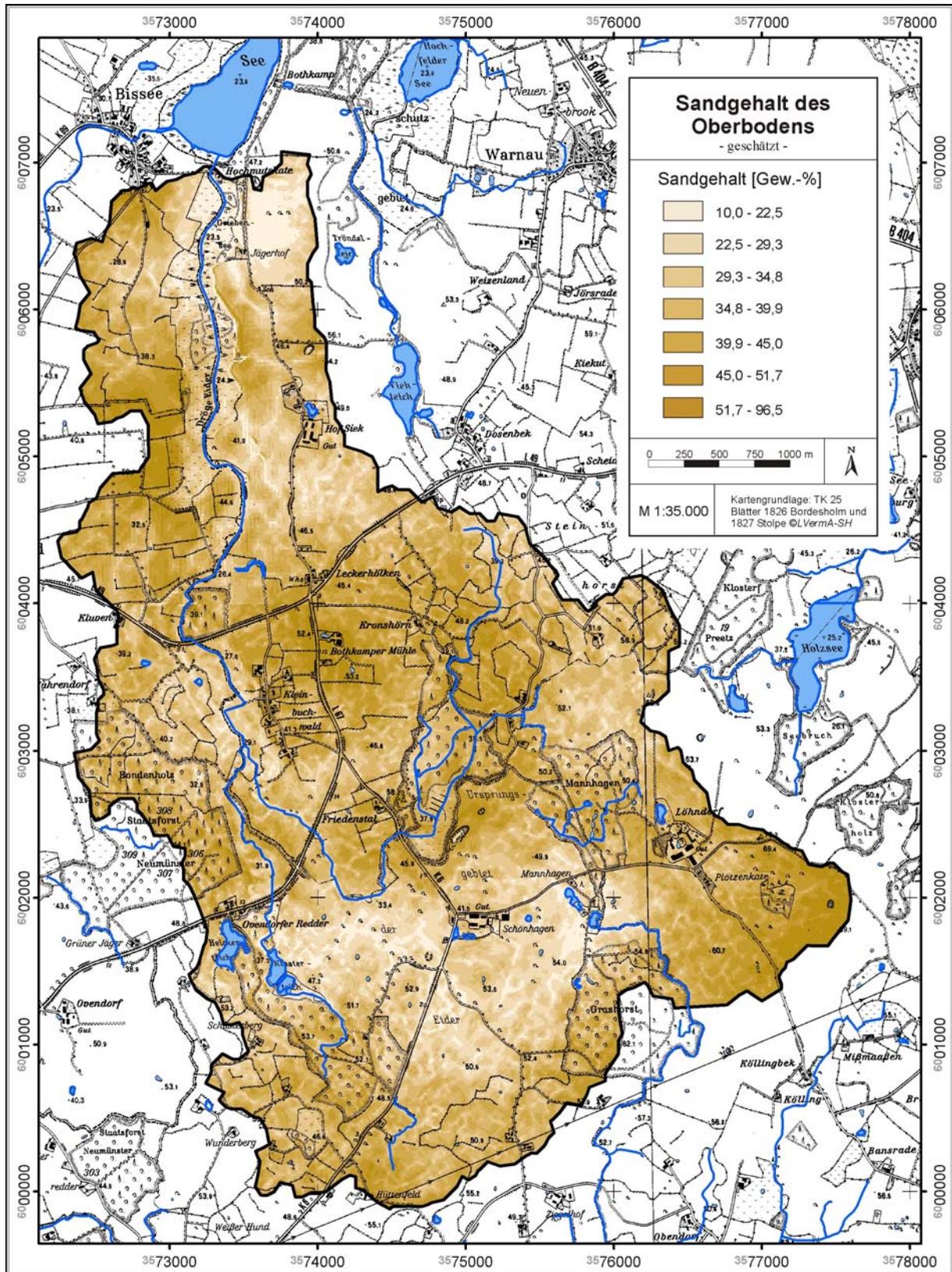
Anhang A3: Räumliche Verteilung der Tongehalte des Oberbodens im Einzugsgebiet der Drögen Eider auf Grundlage des Regressions-Kriging Modell „C“.



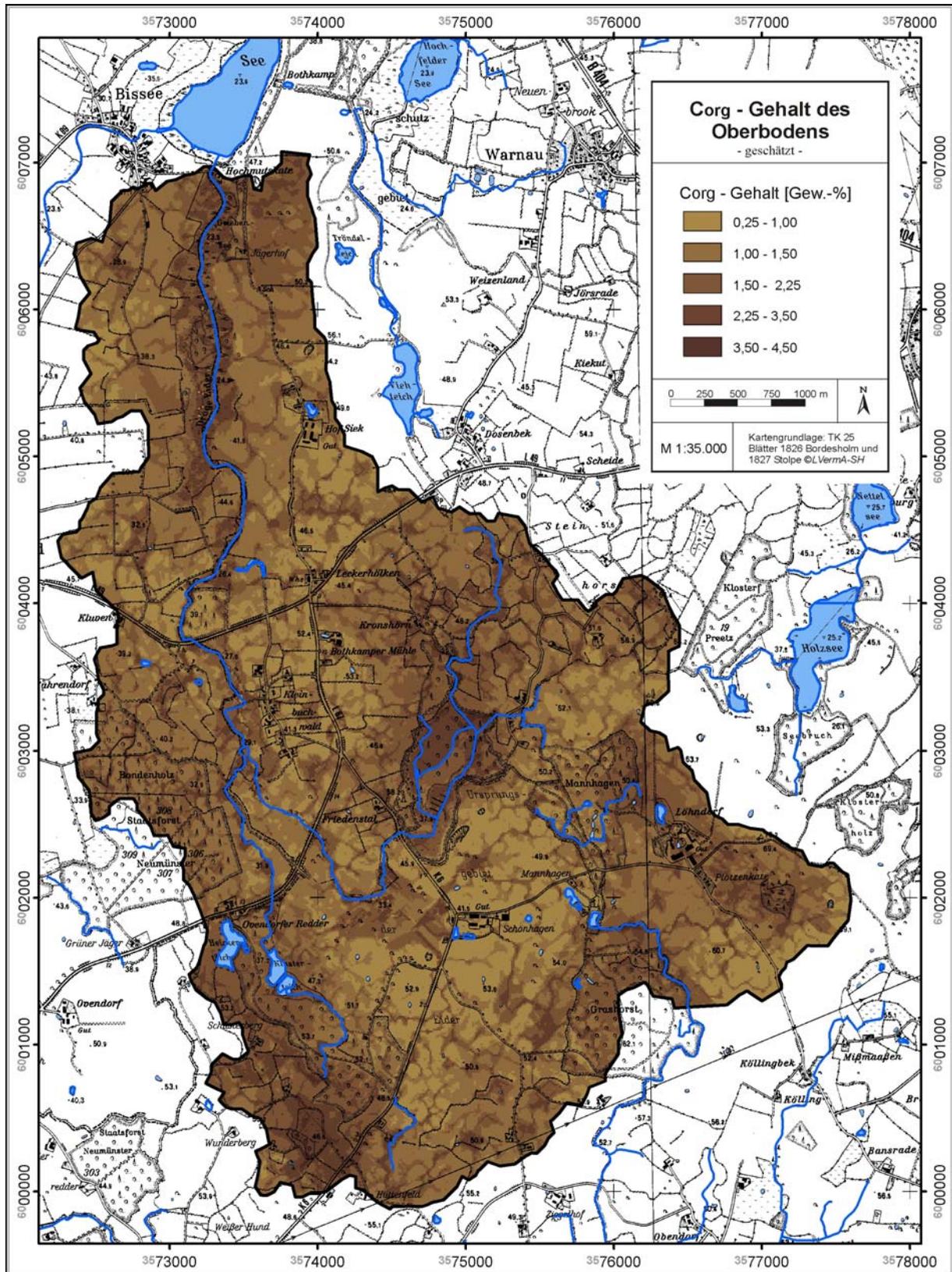
Anhang A4: Räumliche Verteilung der Schluffgehalte des Oberbodens im Einzugsgebiet der Drögen Eider auf Grundlage des Regressions-Kriging Modell „C“.



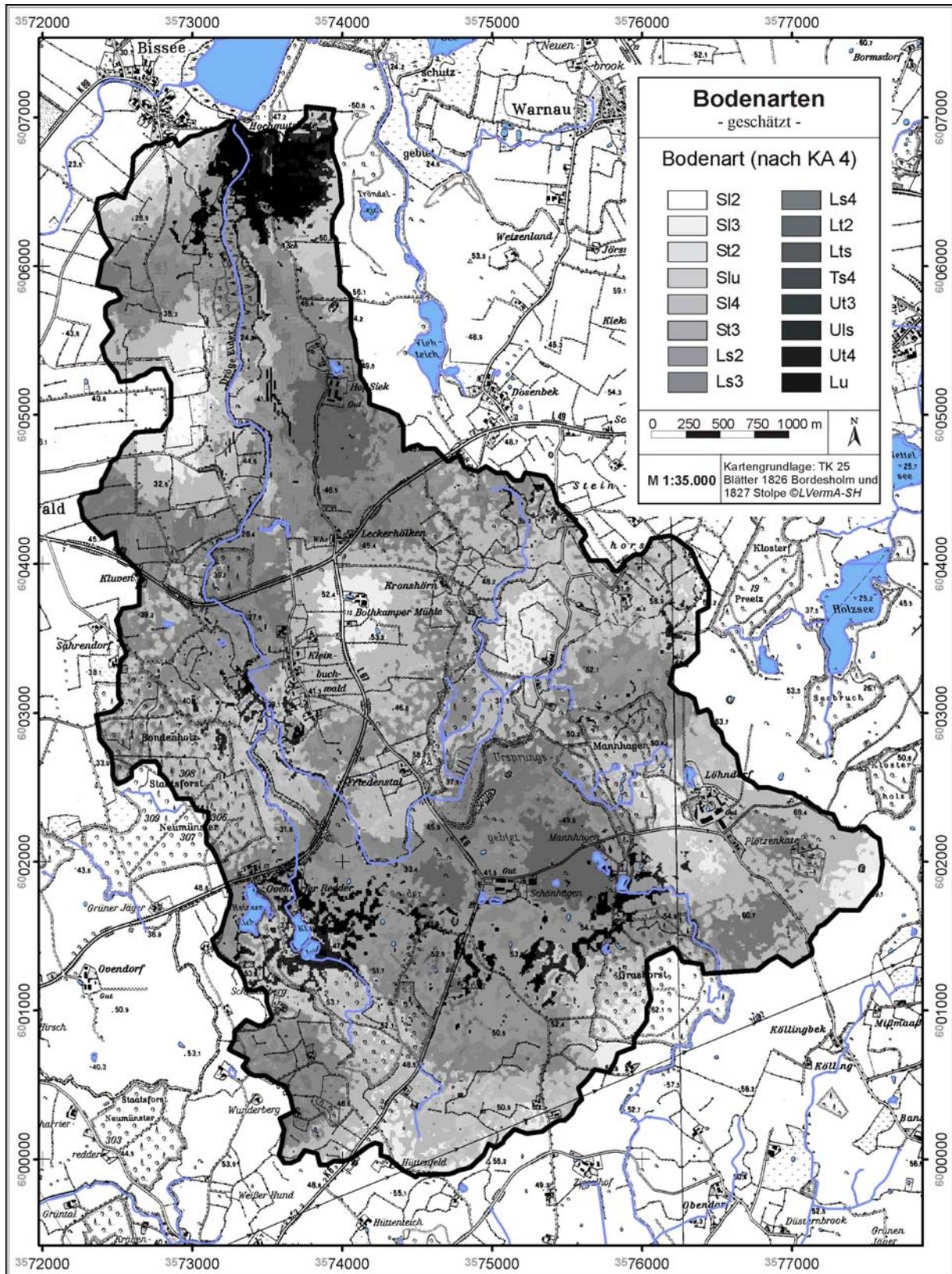
Anhang A5: Räumliche Verteilung der Sandgehalte des Oberbodens im Einzugsgebiet der Drögen Eider auf Grundlage des Regressions-Kriging Modell „C“.



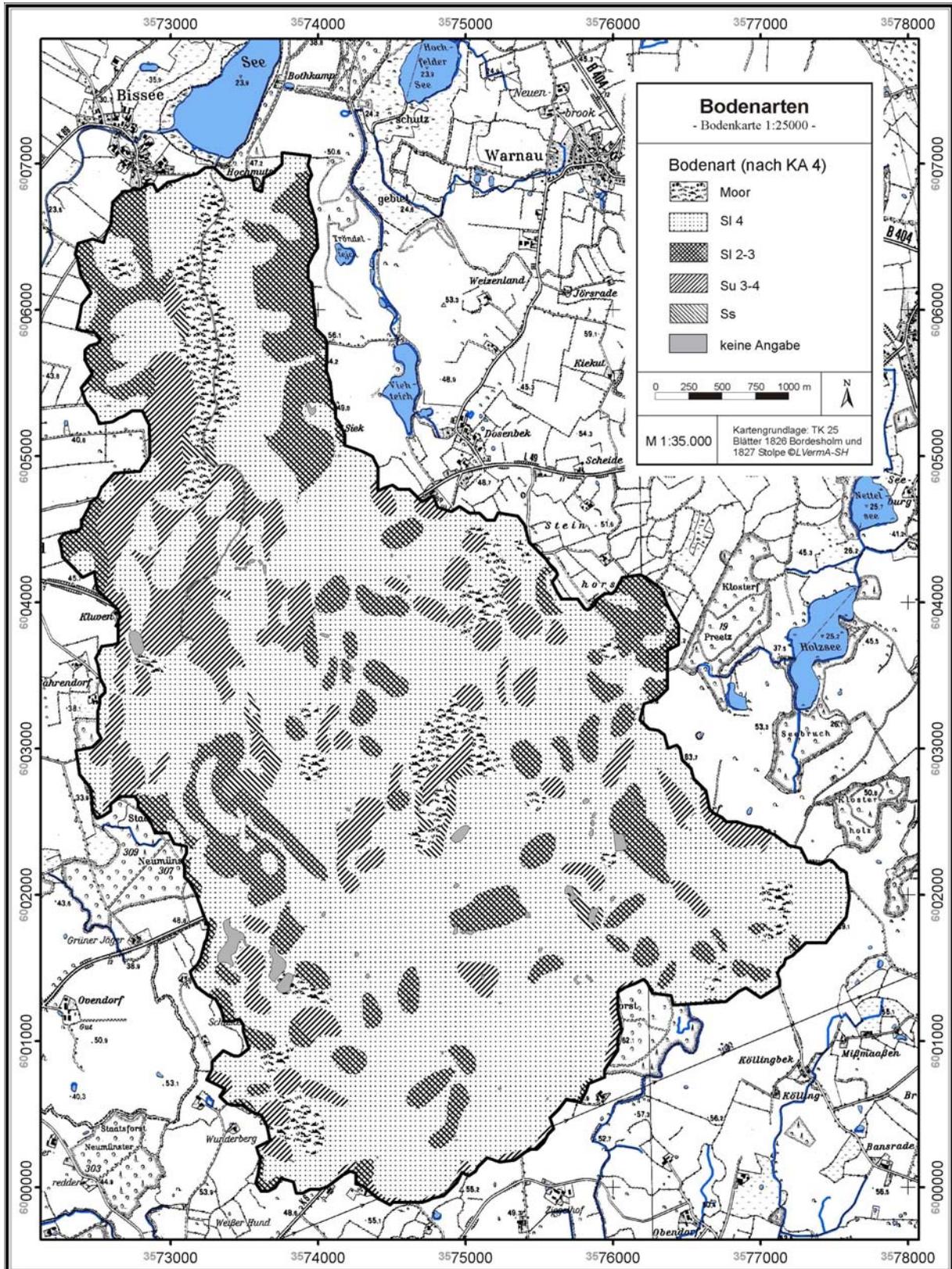
Anhang A6: Räumliche Verteilung des organischen Kohlenstoffgehaltes des Oberbodens im Einzugsgebiet der Drögen Eider auf Grundlage des Regressions-Kriging Modell „C“.



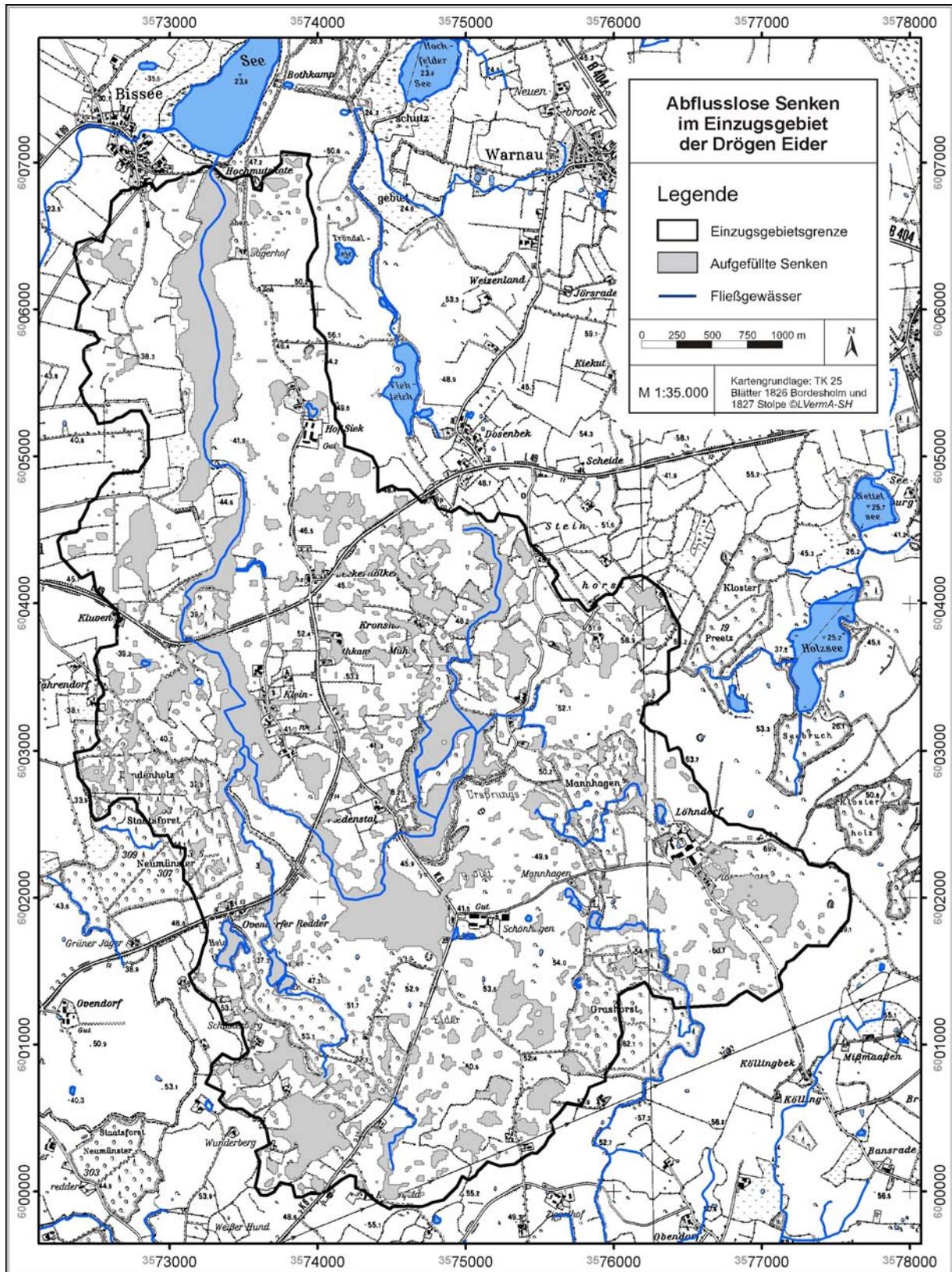
Anhang A7: Räumliche Verteilung der Bodenarten des Oberbodens im Einzugsgebiet der Drögen Eider auf Grundlage der Ergebnisse der einzelnen Korngrößen (Anhang A3-A5).



Anhang A8: Bodenarten der Bodenkarte BK 25, Blatt 1826 (Bordesholm) und Blatt 1827 (Stolpe) im Einzugsgebiet der Drögen Eider (Quelle: LANU S-H).



Anhang A9: Durch das Reliefanalysesystem SAGA für die Abflussmodellierung aufgefüllte Senken im Einzugsgebiet der Drögen Eider.



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich meine Dissertation:

„Regionalisierung von Bodeneigenschaften unter Verwendung digitaler Geländemodelle sowie multispektraler Fernerkundungsdaten am Beispiel einer Agrarlandschaft im Jungmoränengebiet Schleswig-Holsteins“

abgesehen von der wissenschaftlichen Beratung meines Doktorvaters selbständig, ohne fremde Hilfe angefertigt habe und dass ich alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen, wie auch die sich an die Gedanken anderer Autoren eng anlehnenden Ausführungen meiner Arbeit besonders gekennzeichnet und die Quellen nach den mir angegebenen Richtlinien zitiert habe. Ich erkläre außerdem, dass ich bisher noch an keiner anderen Stelle einen Promotionsversuch unternommen habe.

Kiel, den 14. Dezember 2007

(Karsten Krüger)

Lebenslauf

Name: Karsten Krüger
Geburtsdatum: 01.04.1969
Geburtsort: Hannover
Familienstand: verheiratet
Kinder: 2 Töchter (8 und 2 Jahre)

Schulausbildung

1975 - 1979 Grundschule Lengede (an der Fuhse)
1979 - 1981 Orientierungsstufe Lengede
1981 - 1985 Realschule Lengede
1991 - 1994 Braunschweig Kolleg (Inst. zur Erlangung der Allgemeinen Hochschulreife)

Gewerbliche Berufsausbildung und Tätigkeiten

1985 - 1988 Ausbildung zum Werkzeugmacher
1988 - 1990 Inspektionstätigkeiten in der Qualitätssicherung,
Fertigung und Einrichtung von Werkzeugmaschinen

Studium

10/1994 - 03/2002 Studium der Physischen Geographie und Landschaftsökologie, Bodenkunde, Landespflege und Geobotanik an der UNIVERSITÄT HANNOVER
Diplomarbeit: „*GIS – gestützte Untersuchung des Zusammenhanges von Geomorphologie und Bestandesdichte in einem Agrarökosystem unter Verwendung von Fernerkundungsdaten*“, erstellt im Rahmen des Pro Smart II-Projektes (2001/2), Teilprojekt FUGERA an der FAL (Projektbearbeitung: Dr. H. Lilienthal, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde)

Praktika

08/98 - 09/98 NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT (Abt. Waldökologie und Forstliche Standortskartierung), Wolfenbüttel:
U.a. Mitarbeit bei der forstlichen Standortskartierung zur Ermittlung der Standortspotenz bzgl. des Gesamtwasser- und Nährstoffhaushaltes in Hinsicht auf die Ansprüche von Waldbäumen, Einarbeitung in das Verfahren der niedersächsischen Waldbiotopkartierung

07/99 – 09/99 BUNDESFORSCHUNGSANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (FAL), Braunschweig-Völkenrode:
U.a. Koordinatenaufnahme mittels GPS zur Geokodierung und Entzerrung von Schrägbildaufnahmen, Bodeninventarisierung zur Untersuchung der räumlichen Variabilität von Bodeneigenschaften

02/00 -04/00 Fa. GEONOVA GmbH, Hannover:
Arbeiten für verschiedene Aufgabenstellungen im Rahmen des Altlastenprogrammes des Landes Niedersachsen (u.a. Auswertung von Karten und Analyseergebnissen, Einrichten und Beproben von Grundwasser- und Bodenluftmessstellen, geologische Bodenansprache und Auswertung von Rammkernbohrungen)

Tätigkeiten neben dem Studium

- 02/99 - 07/99 Wissenschaftliche Hilfskraft in der Abteilung Landschaftsökologie des
07/00 - 12/00 GEOGRAPHISCHEN INSTITUTS der UNI Hannover:
05/01 – 12/01 U.a. Betreuung und Verwaltung des Labors und des Messgeräteinventars
Wissenschaftliche Hilfskraft in der Arbeitsgruppe Bodenökologie am
05/99 – 07/99 INSTITUT FÜR BODENKUNDE (IfBk) der UNI Hannover:
11/00 – 12/00 Untersuchungen von Wasser- und Stoffflüssen im Wassergewinnungsgebiet
05/01 – 06/01 Fuhrberger Feld, Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik unter verschiedenen
Nutzungsbedingungen
Techniker bei der Fa. GEONOVA GmbH, Hannover:
Arbeiten für verschiedene Aufgabenstellungen im Rahmen des Altlastenpro-
grammes des Landes Niedersachsen (u.a. Einrichten und Beprobieren von
06/00 – 02/01 Grundwasser- und Bodenluftmessstellen sowie deren höhen- und lagemäßige
Vermessung, EDV-gestützte Datenaufbereitung und -auswertung, Mitarbeit
bei der Erstellung von Gutachten, Betreuung der Betriebstechnik)

Berufliche Tätigkeiten

- Wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für PHYSISCHE GEOGRA-
PHIE – LANDSCHAFTSÖKOLOGIE UND GEOINFORMATION – des
Geographischen Instituts der CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT
ZU KIEL:
U.a. Dozententätigkeit im Rahmen der studentischen Ausbildung, vor allem
physisch-geographische Grundveranstaltungen, bodenkundliche Gelände- und
Laborpraktika, Exkursionen
04/02 – 02/08 Beschaffung, Inventarisierung und Betreuung von wissenschaftlichen Gerä-
ten, Einrichten von Messsystemen für die Erfassung landschaftsökologisch
relevanter Daten
Mitarbeit im AgrisSAR2006 Projekt der ESA; Kampagnenplanung, Daten-
erhebung und Aufbereitung, Aufbau und Betrieb von Messstationen, Durch-
führung von in-situ Messungen von Boden und Pflanzenparametern (z.B. Bo-
denfeuchte, LAI, Biomasse, Phänologie), Aufbau und Administration der
Projektdatenbank sowie deren GIS- Integration.

Kenntnisse

- GIS Sehr gute Kenntnisse in ArcView, ArcGIS; Grundkenntnisse in GRASS
Bildanalyse Gute Kenntnisse in ENVI, Grundkenntnisse in ERDAS
Anwendungen Gute Kenntnisse in MS Office / Access, SPSS, VarioWin, Corel Graphics
Suite, Grundkenntnisse in Adobe Photoshop, Surfer
Sprachen Gute Englischkenntnisse in Wort und Schrift, Schulkenntnisse in Französisch