

Geostatistische Analysen zur Integration von Geländemodellen und Bodenschätzungsdaten für verbesserte digitale Bodenkarten am Beispiel einer alluvialen Landschaft

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Bodenkultur | Doctor rerum naturalium technicarum | Dr.nat.techn.

der Universität für Bodenkultur, Wien

Eingereicht von DI Thomas Schauppenlehner (Mat.-Nr. 9440251)

Betreuung: ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Andreas Muhar

Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur

Institut für Landschaftsentwicklung, Erholungs- und Naturschutzplanung

Universität für Bodenkultur, Wien

Danke

ao.Univ.Prof. DI. Dr. Andreas Muhar für die Anregung und Betreuung dieser Arbeit

ao.Univ.Prof. DI. Dr. Nicola Rampazzo, Univ.Prof. DI. Dr. Werner Schneider und Univ.Prof. Dr. Markus Fiebig für die fachliche
Unterstützung und wertvolle Anregungen bei der Durchführung dieser Arbeit

Katharina Musil für das Lektorat

Elisabeth Kloyber für die mentale Unterstützung und Liebe

Maria Schauppenlehner, Johann Schauppenlehner, Karin Schauppenlehner, Petra Reiter, Hannah Reiter und Felix Reiter für den
familiären Rückhalt

Kurzfassung

Viele Fragestellungen des landwirtschaftlichen Betriebsmanagements sowie der landschaftsökologischen Forschung erfordern ein flächenhaftes Vorliegen von detaillierten Bodeninformationen. Konventionelle Bodenaufnahmen und die daraus abgeleiteten Bodenkarten genügen diesen Anforderungen in der Regel nicht, weshalb Methoden zur Erstellung hoch aufgelöster digitaler Bodenkarten aus vergleichsweise wenig Aufnahmepunkten zusehends an Bedeutung gewinnen.

Zu diesem Zweck kommen vermehrt neue Interpolationsmodelle zum Einsatz, deren Entwicklung durch die immer bessere Verfügbarkeit fein aufgelöster Sekundärdaten aus der Fernerkundung gefördert wird, die zu signifikanten Verbesserungen der Modelle führen.

Die vorliegende Dissertationsarbeit untersucht die grundsätzliche Eignung von Punktdaten der österreichischen Finanzbodenschätzung für die Erstellung hoch aufgelöster Bodenqualitätskarten mit Hilfe statistischer als auch geostatistischer Interpolationsmodelle, am Beispiel einer 150ha großen landwirtschaftlich genutzten Fläche alluvialen Ursprungs im Osten Wiens (Rutzendorf, Marchfeld). Als Sekundärdaten kommen Ableitungen wie relative Höhe, Hangneigung oder Krümmungen aus einem detaillierten Höhenmodell zur Anwendung.

Nach der Aufbereitung, Bereinigung und Ableitung der Daten aus dem Höhenmodell, wurden mit Hilfe von Korrelationsanalysen Zusammenhänge zwischen den punktuell aufgenommenen Ackerzahlen und den ausgewiesenen Sekundärdaten ermittelt, um bodenbeeinflussende Geländeparameter zu identifizieren. Darüber hinaus wurde die Eignung von Ertragsdatenaufnahmen eines GPS-Mähdreschers aus mehreren Aufnahmejahren (2002-2005) für die Validierung der Modelle geprüft, indem die Zusammenhänge zwischen Ertragsdaten aus mehreren Aufnahmejahren und Ackerzahlen untersucht wurden.

Basierend auf den untersuchten Zusammenhängen zwischen Ackerzahlen und Reliefparametern wurden mehrere Interpolationsmodelle zur Erstellung fein aufgelöster Bodenkarten entwickelt. Neben einem nicht-räumlichen Regressionsmodell wurden vor allem geostatistische Ansätze wie von Ordinary Kriging, Cokriging, Universal Kriging und Regression Kriging für diesen Einsatzzweck getestet. Mit Hilfe verschiedener Validierungsmethoden wurden die erstellten Modelle hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit überprüft und verglichen.

Dabei zeigte sich, dass die geostatistischen Methoden mit Ausnahme des Ordinary Kriging bessere Ergebnisse liefern als das multiple Regressionsmodell. Als bestes Modell für die Fragestellung hat sich das Regression Kriging-Modell erwiesen, wenngleich die Unterschiede zu Universal Kriging, als auch Cokriging marginal sind.

Schlagwörter

Bodenschätzung, Marchfeld, Geostatistik, Regressionsmodelle, Kriging, Cokriging, Universal Kriging, Regression Kriging, Interpolationsmodelle, Geographische Informationssysteme (GIS), Precision Farming, Ertragsdatensammlung

Abstract

Many tasks in agricultural farm management as well as landscape ecological research require detailed information on soils in a continuous and extensive form. As conventional soil sampling and soil mapping approaches cannot comply with these demands, interpolation methods for creating high resolution soil maps from comparatively few sampling points are becoming ever more important.

For this purpose, the increasing amount and quality of secondary information from remote sensing can help to significantly improve the quality of interpolation models.

This doctoral thesis analyses the principal suitability of point data from the Austrian soil taxation for the creation of high resolution soil quality maps with the help of statistical and geostatistical interpolation methods for a study area (150ha) in an alluvial flat plain in Eastern Austria (Rutzendorf, Marchfeld). Secondary information like relative elevation, slope or curvatures was derived from a detailed elevation model.

After editing, correction and derivation of the data from the elevation model, coherences between these datasets and the point information from the soil taxation ("Ackerzahl") were identified using correlation analysis. Furthermore, the suitability of yield data from a GPS-Harvester for several recording years (2002-2005) for validation of the models was determined.

Based on the analysed coherences between soil quality and relief parameters, different interpolation models for creating high resolution soil maps were developed. One statistical model (multiple regression model) and several geostatistical approaches like Ordinary Kriging, Cokriging, Universal Kriging and Regression Kriging were tested for this application.

Afterwards, different validation methods were used to verify and compare the models concerning their reliability and accuracy.

The result from this validation was, that geostatistical models with the exception of Ordinary Kriging produced better maps than the multiple regression model. The best model was Regression Kriging, but there were only minor differences to Universal Kriging and Cokriging.

Keywords

Soil taxation, Marchfeld, geostatistics, regression models, Kriging, Cokriging, Universal Kriging, Regression Kriging, interpolation models, geographical information systems (GIS), precision farming, yield measurement

1.	EINLEITUNG	3
1.1.	PROJEKTRAHMEN	3
1.2.	FRAGESTELLUNG UND ZIELSETZUNG	5
1.3.	METHODISCHE VORGEHENSWEISE	6
2.	STAND DER FORSCHUNG.....	8
2.1.	MODELLE ZUR VARIABILITÄT VON BODENEIGENSCHAFTEN	8
2.2.	RÄUMLICHE MODELLIERUNG VON BODENEIGENSCHAFTEN	9
2.3.	PRECISION AGRICULTURE	11
2.3.1.	Entwicklung der Precision Agriculture.....	11
2.3.2.	Arbeitsablauf und Methoden	11
2.3.3.	Precision Farming und nachhaltige Entwicklung der Landwirtschaft	12
2.4.	BODENDATEN IN ÖSTERREICH	13
2.5.	ÖSTERREICHISCHE FINANZBODENSCHÄTZUNG	13
2.5.1.	Begriffsabgrenzung Feldschätzungskarte - Schätzungsreinkarte - Schätzungskarte - Schätzungsbuch	15
2.5.2.	Durchführung der Bodenschätzung.....	16
2.6.	BODENBEEINFLUSSENDE PARAMETER	20
2.6.1.	Hangneigung	23
2.6.2.	Kurvatur.....	23
2.6.3.	Relative Höhe	26
2.6.4.	Exposition	27
2.6.5.	Landformen.....	27
2.6.6.	Topographischer Feuchtigkeitsindex	28
2.6.7.	Bewirtschaftung und Verschleppung.....	28
2.7.	RÄUMLICHE INTERPOLATIONSMODELLE	30
2.7.1.	Datenanalyse und Interpolation auf Basis nichträumlicher Statistik.....	31
2.7.2.	Geostatistische Interpolationsmodelle.....	33
2.7.3.	Methodenübersicht und Vergleich.....	44
2.8.	SOFTWARE	45
2.8.1.	Landserf.....	45
2.8.2.	SAGA	46
2.8.3.	ArcGIS	47
2.8.4.	SPSS	48
2.8.5.	Weitere Programmpakete.....	49
2.8.6.	Softwarevergleich	50
3.	PROJEKTGEBIET	51
3.1.	LAGE UND BESCHREIBUNG DES PROJEKTGEBIETES.....	51
3.2.	KLIMATISCHE BEDINGUNGEN	53
3.3.	GEOLOGIE UND RELIEFENTWICKLUNG.....	55
3.4.	PEDOGENESE	56
3.5.	LANDNUTZUNG	59
4.	DATENGRUNDLAGEN.....	61
4.1.	DATEN DER ÖSTERREICHISCHEN FINANZBODENSCHÄTZUNG	61
4.1.1.	Punktdaten der Finanzbodenschätzung.....	61
4.1.2.	Flächenausweisung der Finanzbodenschätzung	61

4.2.	DIGITALES GELÄNDEMOMELL AUS EINEM STEREO-ORTHOFOTO	62
4.3.	ERTRAGSDATEN AUS EINER GPS-GESTÜTZTEN ERTRAGSMESSUNG	63
4.4.	BASISDATEN (GRENZEN, ORTHOFOTO, ETC.)	64
5.	DATENAUFBEREITUNG	66
5.1.	AUFBEREITUNG DER PUNKTDATEN AUS DER FINANZBODENSCHÄTZUNG	66
5.2.	AUFBEREITUNG, BEREINIGUNG UND INTERPOLATION DER PUNKTDATEN AUS DER GPS-GESTÜTZTEN ERTRAGSMESSUNG	68
5.2.1.	<i>Eliminierung von Extremwerten</i>	69
5.2.2.	<i>Fehlerhafte Ertragswerte im Wendebereich des Mähdreschers</i>	70
5.2.3.	<i>Bereinigung von Punktverdichtungen</i>	70
5.2.4.	<i>Korrektur des systematischen Fehlers durch Bodendüngung und Bodenverdichtung</i>	71
5.2.5.	<i>Geostatistische Interpolation der Punktdaten aus der GPS-gestützten Ertragsmessung</i>	75
5.3.	VORBEREITUNG DES DIGITALEN GELÄNDEMOMELLS	77
5.4.	ABLEITUNGEN AUS DEM DIGITALEN GELÄNDEMOMELL	77
5.4.1.	<i>Hangneigung</i>	78
5.4.2.	<i>Plan- und Profilkurvatur</i>	78
5.4.3.	<i>Relative Höhe</i>	80
5.4.4.	<i>Landformen</i>	81
5.4.5.	<i>Topographischer Feuchtigkeitsindex</i>	84
6.	ERGEBNISSE	85
6.1.	DARSTELLUNG DER INTERPOLATIONSERGEBNISSE	85
6.2.	ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN DER ACKERZAHL UND RELIEFPARAMETERN AUS DEM DIGITALEN GELÄNDEMOMELL	85
6.3.	ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN DER ACKERZAHL UND GPS-DATEN DER ERTRAGSMESSUNG	87
6.4.	NICHTRÄUMLICHE INTERPOLATION AUF BASIS EINES LINEAREN REGRESSIONSMOMELLS	89
6.5.	GEOSTATISTISCHE INTERPOLATION	92
6.5.1.	<i>Ordinary Kriging</i>	92
6.5.2.	<i>Cokriging</i>	95
6.5.3.	<i>Universal Kriging</i>	99
6.5.4.	<i>Regression Kriging</i>	102
6.6.	VALIDIERUNG DER ERGEBNISSE	105
6.6.1.	<i>Validierung auf Basis der Ertragsdatenmessung</i>	105
6.6.2.	<i>Kreuzvalidierung</i>	108
6.6.3.	<i>Validierung der Ergebnisse durch Bildung von Stichprobensubsets</i>	108
6.7.	MODELLÜBERSICHT	111
7.	DISKUSSION	113
8.	AUSBlick	118
9.	REFERENZEN	119
10.	ANHANG	126
10.1.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	131
10.2.	TABELLENVERZEICHNIS	133

1. Einleitung

Veränderte und neu entstandene Anforderungen an die Landwirtschaft, wie die Optimierung von Produktionsprozessen und gestiegene Ansprüche an eine nachhaltige Entwicklung, erfordern alternative Datengrundlagen zur Lösung dieser neuen Aufgaben- und Fragestellungen.

Der Boden ist die essentielle Produktionsgrundlage in der Landwirtschaft, weshalb möglichst detaillierte Informationen über diesen Produktionsfaktor eine zentrale Grundlage für die Verbesserung landwirtschaftlicher Produktionsketten sind. Eine hoch aufgelöste Kenntnis über die Ertragsfähigkeit eines Bodens ermöglicht eine punktuell optimierte Ausbringung von Saatgut und Düngemittel mit Hilfe GPS-gestützter Ausbringungsmaschinen und kann so einen Beitrag zur betrieblichen Kostenoptimierung sowie zur nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft (z.B. durch reduzierten, weil gezielten Düngereinsatz) leisten.

Vor dem Hintergrund zunehmender Bodenversiegelung durch den Bau von Straßen und Siedlungen, und der damit in Verbindung stehenden Ressourcenverknappung, können detaillierte Informationen über das Ertragspotential eines Bodens zudem als Entscheidungshilfe für die Flächenauswahl und -nutzung dienen.

Als limitierender Faktor bei der Erstellung detaillierter Bodenkarten ist allerdings oft der hohe Kostenaufwand zu nennen, der im Rahmen der Boden-Beprobung und der Erhebung von Bodeninformationen entsteht. Deshalb gewinnen räumliche Interpolationsalgorithmen, die dank immer besserer Zusatzinformationen aus Fernerkundungsdaten sehr gute Ergebnisse liefern können, zunehmend an Bedeutung (HENGL ET AL., 2004).

Die vorliegende Arbeit versucht mit Hilfe vorhandener Bodendaten – den Punktdaten der Finanzbodenschätzung – und ergänzenden Informationen, welche aus einem fein aufgelösten Höhenmodell gewonnen werden, anhand geostatistischer Methoden hoch aufgelöste Bodenkarten zu erstellen. Diese kommen einerseits ohne zusätzliche Beprobung aus, andererseits gewährleisten sie trotzdem einen entsprechenden Detaillierungsgrad, um bei Fragestellungen in der Versuchsplanung oder für Precision Agriculture sinnvoll eingesetzt werden zu können.

1.1. Projektrahmen

Der organisatorische Rahmen, der die Ausgangsbasis dieser Arbeit bildete, war das vom Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft finanzierte interdisziplinäre Forschungsprojekt MUBIL (Monitoring der Umstellung auf biologischen Landbau), an dem 11 Institute der Universität für Bodenkultur (BOKU), das Ludwig Boltzmann-Institut für biologischen Landbau und angewandte Ökologie, die Versuchswirtschaft Groß Enzersdorf sowie die Bundesversuchswirtschaften (BVW) GmbH von Februar 2003 bis Februar 2006 beteiligt waren. Das Gesamtprojekt wurde vom Institut für ökologischen Landbau geleitet und koordiniert (Projektleitung: Univ.Prof. Dipl.-Agr.Biol. Dr. Ing. Bernhard Freyer, Projektkoordination: DI Andreas Surböck)

Die grundsätzlichen Forschungsfragen beruhten auf der Annahme, dass die Umstellung von konventioneller auf biologische Landwirtschaft sowie die Anlage von Landschaftselementen (Hecken, Ökostreifen, Säume) Auswirkungen auf Bodenkennwerte (physikalisch, chemisch und biologisch) und den Wasserhaushalt des Bodens haben. Daraus sind in der Folge Veränderungen in den Pflanzengesellschaften, wie zum Beispiel den Ackerwildkräutern, im Bodensamenvorrat, in der Fauna

sowie im Ertragspotential der Kulturpflanzen zu erwarten. In einem interdisziplinären Arbeitsverbund wurden insgesamt 14 Teilprojekte mit folgenden grundsätzlichen Aufgabenfeldern bearbeitet (FREYER, 2006):

1. Grunddatenerhebung sowie Planung und Umsetzung eines Bewirtschaftungskonzeptes inkl. Begleitbiotopen, basierend auf verschiedenen Düngungskonzepten unter Beibehaltung einer Fruchtfolge
2. Einrichten eines wissenschaftlichen Langzeitmonitorings (auf Schlagebene, innerhalb von Kleinparzellenversuchen und Transekten sowie innerhalb von Begleitbiotopen)
3. Monitoring der Auswirkungen von Düngungsvarianten sowie der Umstellung des Betriebes auf biologische Landwirtschaft auf Umwelt, Produktion und Wirtschaftlichkeit

Zur Bearbeitung der Forschungsfragen wurde am Biobetrieb Rutzendorf (siehe Kapitel 3) der landwirtschaftlichen Bundesversuchswirtschaften GmbH ein umfassendes Langzeitmonitoring eingerichtet. Der Betrieb selbst wurde im Herbst 2001 mit ersten Anbaumaßnahmen auf biologische Landwirtschaft umgestellt.

Das Projekt MUBIL I wurde im Februar 2006 abgeschlossen, das Langzeitmonitoring wird jedoch, in dem ebenfalls vom Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft finanzierten Projekt MUBIL II, vorläufig bis 2008 fortgesetzt.

Das Gesamtprojekt MUBIL I setzte sich aus folgenden Teilprojekten zusammen:

Nr.	Durchführendes Institut	Teilprojekt
1	Institut für Ökologischen Landbau	Bodenmikrobiologie; Bodenstruktur und N-Kreislauf, Pflanzenbauliche Untersuchungen
2	Institut für Bodenforschung	Bodenchemie und -physik
3	Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft	Bodenwasserhaushalt und Erosion
4	Institut für Landschaftsentwicklung, Erholungs- und Naturschutzplanung	Geoinformationssystem und Metadatenkatalog
5	Institut für Landschaftsentwicklung, Erholungs- und Naturschutzplanung	Bodeninformationssystem
6	Institut für Meteorologie	Agrarmeteorologie
7	Institut für Zoologie	Bodentiere
8	Ludwig-Boltzmann-Institut für Biologischen Landbau und angewandte Ökologie	Nützlinge
9	Institut für Botanik	Ackerwildkrautflora, Diasporen
10	Institut für Zoologie	Avifauna
11	Institut für Landschaftsentwicklung, Erholungs- und Naturschutzplanung; Zentrum für Umwelt und Naturschutz	Naturschutz, Landschaftsökologie, Strukturkartierung, Systemanalyse - Ökostreifen, Wildbienen
12	Institut für Nutztierwissenschaften	Futtermittel
13	Institut für Agrar- und Forstökonomie	Ökonomie
14	Landwirtschaftliche Bundesversuchswirtschaften (BVW) GmbH	Bewirtschaftung Gesamtbetrieb

Tab. 1: MUBIL I: Teilprojekte und ausführende Institute

Die Grundlagen für die vorliegende Dissertation wurden im Teilprojekt „Bodeninformationssystem“ durch das Institut für Landschaftsentwicklung, Erholungs- und Naturschutzplanung (Projektleitung: Ao.Univ.Prof. Dr. Andreas Muhar) erarbeitet.

Aufgabe dieses Teilprojekts war die Erstellung einer fein aufgelösten Bodenkarte für den landwirtschaftlichen Betrieb Rutzendorf auf Basis der Punktdaten der österreichischen Finanzbodenschätzung sowie unter Einbeziehung von Relief-Parametern. Diese Karte bildete eine Grundlage für die Auswahl der Versuchs- und Monitoringflächen, die im Rahmen anderer Teilprojekte benötigt wurden.

1.2. Fragestellung und Zielsetzung

Viele jüngere Fragestellungen des landwirtschaftlichen Betriebsmanagements (z.B. Precision Agriculture (siehe Kapitel 2.3), Versuchsplanung, etc.) und der landschaftsökologischen Forschung erfordern ein flächenhaftes Vorliegen von Bodeninformationen in hoher Auflösung und Qualität (SCHWARZ ET AL., 2001; FINK & REICHE, 1999). Da jedoch konventionelle Bodenaufnahmen und die daraus erstellten analogen Bodenkarten (siehe Kapitel 2.4) in den meisten Fällen keine hoch aufgelösten Bodeninformationen zur Verfügung stellen (ZHU ET AL., 2001), ist ein Informationsdefizit über den Boden häufig der limitierende Faktor bei einer Vielzahl von Studien im Bereich der Umweltwissenschaften (KÖTHE & BOCK, 2006). Zudem besitzen diese Kartenformen meist eine diskrete Abgrenzung von Bodeneinheiten mit scharfen Übergängen (SINOWSKI, 1995), während in der Natur vielfach graduelle Übergänge bestehen (SCHAUPPENLEHNER & MUHAR, 2004).

Format und Detaillierungsgrad konventioneller Karten sind daher meist nicht kompatibel mit Daten aus der Fernerkundung (BAND & MOORE, 1995), welche aber wiederum häufig in der Versuchplanung bzw. in der Precision Agriculture Verwendung finden. Diese Inkompatibilität basiert primär auf den beschränkten Möglichkeiten konventioneller Bodenkarten infolge eines diskreten Datenmodells, sowie der polygonbasierten Abgrenzungspraxis (ZHU ET AL., 2001), die eine scharfe Abgrenzung von Bodeneinheiten bedingt, und somit nicht auf fließende Übergänge eingehen kann.



Abb. 1: Analog erstellte Bodenkarte (links) mit scharfen Grenzen, und eine Auflösung der Grenzen durch kontinuierliche Übergänge

Die klare Abgrenzung bedingt einerseits einheitliche Eigenschaften innerhalb einer Fläche, was den Informationsgehalt der Karte betrifft, sowie oftmals unnatürlich scharfe Grenzen. Mit Hilfe computer-gestützter digitaler Bearbeitung (GIS) ist es im Vergleich zur analogen Kartenerstellung möglich, auch unscharfe Klassifikationen bzw. Klassenübergänge zu modellieren (SCHAUPPENLEHNER & MUHAR, 2004; BRAGATO, 2004).

Vor diesem Hintergrund, sowie in Betrachtung des hohen Kostenfaktors für die Erstellung detaillierter Bodenaufnahmen gewinnt die Entwicklung von Methoden zur Fertigung verbesserter Bodenkarten aus vergleichsweise wenig Aufnahmepunkten immer mehr an Bedeutung (BISHOP & MCBRATNEY, 2001). Dank fein aufgelöster Sekundärdaten aus der Fernerkundung, wie etwa Höhenmodellen aus Luftbildern, Satellitenaufnahmen, Stereoscopic Scanner (HRS) oder Laserscannern, können diese Methoden signifikant verbessert werden (HENGL ET AL., 2004) – auch wenn dabei nicht vollständig auf die Bodenprobennahme verzichtet werden kann (HEUVELINK ET AL., 2007).

Im Rahmen dieser Arbeit werden auf Basis von Punktdaten der österreichischen Finanzbodenschätzung, mit Hilfe von Sekundärinformationen aus einem digitalen Höhenmodell, verbesserte digitale Bodenkartenkarten erstellt. Diese geben einen detaillierten Überblick über die Ertragsfähigkeit eines Bodens, ausgedrückt durch die Ackerzahl, und können in der Versuchsplanung oder in der Precision Agriculture eingesetzt werden.

Zur Erstellung der Karten werden unterschiedliche Interpolationsmodelle getestet und verglichen, wobei grundsätzlich zwischen nicht-räumlichen statistischen Regressionsmodellen und geostatistischen Ansätzen unterschieden werden soll.

Folgenden Fragestellungen sollen dabei behandelt werden:

- Eignen sich die Daten der österreichischen Finanzbodenschätzung für die Erstellung fein aufgelöster Bodenkarten?
- Welche Reliefparameter beeinflussen die Ertragsfähigkeit eines Bodens?
- Welche geostatistischen Modelle zur Integration externer Datensätze (Reliefparameter) können angewendet werden?

1.3. Methodische Vorgehensweise

Zu Beginn der Arbeit stand eine Literaturrecherche zur Variabilität und Modellierung von Bodenparametern, sowie die Erfassung bestehender Bodendaten in Österreich (siehe Kapitel 2) zur Identifikation von Zusammenhängen zwischen dem Relief einer Landschaft und der Ausbildung von Bodeneigenschaften.

Da das Ausgangsmaterial für diese Arbeit aus verschiedenen Quellen stammte, mussten die Daten für die weitere Bearbeitung in einer gemeinsamen GIS-Umgebung zusammengeführt werden. Dies umfasste einerseits die Digitalisierung (siehe Kapitel 4.1) oder Umwandlung in verarbeitbare Formate (siehe Kapitel 5.1) und die Integration in ein einheitliches Koordinatensystem sowie die Korrektur (siehe Kapitel 5.2) und Vorbereitung für die weitere Bearbeitung (siehe Kapitel 5.3).

Auf Grundlage der in Kapitel 2.6 ausgewiesenen Reliefparameter wurden mit Hilfe GIS-gestützter Methoden Ableitungen aus dem Höhenmodell berechnet (siehe Kapitel 5.4), die als Grundlage für die statistische Überprüfung über Zusammenhänge zwischen einzelnen Reliefparametern und der Ackerzahl dienten (siehe Kapitel 6.2).

Diese Zusammenhänge bildeten die Grundlage für die getesteten Interpolationsmodelle. Neben einem rein mathematisch-statistischen Regressionsmodell (siehe Kapitel 6.4) wurden auch verschiedene Kriging-Modelle getestet (siehe Kapitel 6.5).

Die Validierung der Ergebnisse (siehe Kapitel 6.6) erfolgte mit Daten aus einer GPS-Ertragsmessung (siehe Kapitel 4.3) sowie einer Subsample-Stichprobe aus dem Punktdatensatz der Finanzbodenschätzung (siehe Kapitel 4.1).

2. *Stand der Forschung*

2.1. Modelle zur Variabilität von Bodeneigenschaften

Die Modellvorstellung zur räumlichen Verteilung von Böden und Bodeneigenschaften basiert grundsätzlich auf dem Konzept, dass ein Boden das Ergebnis der Interaktion mit seiner gestaltenden Umwelt ist (GLINKA, 1927; JENNY, 1941; JENNY, 1961), was durch folgenden mathematischen Ausdruck dargestellt werden kann (JENNY, 1941):

$$S=f(c,o,r,p,t,...)$$

Formel 1

Die zentralen Parameter, welche die räumliche Verteilung von Boden bzw. Bodeneigenschaften (S) steuern, sind Klima (c), Organismen (o), was auch die menschliche Aktivität einschließt, Relief (r) sowie Ausgangsmaterial (p) und Zeit (t) (GANSSEN, 1972; SINOWSKI & AUERSWALD, 1999; MCBRATNEY ET AL., 2003). Dabei gilt das Relief als integrale Größe in der Bildung von Böden und Bodeneigenschaften (GERRARD, 1980), da es die Wirkung von Schwerkraft, Klima, Gestein, Wasser und Lebewelt nachhaltig beeinflusst und steuert (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2002) und deshalb auch im Zentrum von Boden-Landschafts-Modellen steht (BEHRENS, 2003).

Diesen starken Zusammenhang zwischen Relief und Boden beschreibt auch HUDSON (1992) im Rahmen des Boden-Landschafts-Paradigmas, das davon ausgeht, dass gleiche Landschaftsattribute auch gleiche Böden und Bodeneigenschaften bedingen (YOUNG & HAMMER, 2000). Das Boden-Landschafts-Paradigma ist das grundlegende Paradigma der Bodenkartierung in den Vereinigten Staaten (FENG & A-XING, 2004), und wird sehr häufig bei der Kartierung im Feld zur Identifikation von Bodeneinheiten verwendet (YOUNG & HAMMER, 2000).

CORWIN & LESCH (2005) beschreiben die räumliche Heterogenität des Bodens als Konsequenz der Interaktion von meteorologischen, pedogenetischen und biologischen Prozessen sowie anthropogenen Faktoren über die Zeit.

Ein weiteres Konzept zur Beschreibung des Zusammenhangs von Bodenabfolge und Relief wurde von Milne mit dem Catena Konzept vorgelegt (MILNE, 1935), wobei eine Catena eine typische Bodenabfolge für eine topographische Situation innerhalb einer Region beschreibt (BIRD, 1957). Die dabei zugrunde liegende Idee ist, dass die Topographie einer Landschaft den Wasserfluss und damit die stofflichen Verteilungsprozesse steuert, was zur Ausbildung typischer Bodenabfolgen (=Bodencatena) führt (GESSLER ET AL., 2000).

Grundsätzlich herrscht Konsens bezüglich der Ursachen der räumlichen Verteilung von Böden und Bodeneigenschaften, dennoch ist die Lösung der oben angeführten Gleichung, aufgrund der komplexen Korrelationen der einzelnen Parameter untereinander, sowie der unterschiedlichen Skalenniveaus und deren räumlichen und zeitlichen Auswirkungen nur schwer möglich. Daher beschränken sich viele Ansätze zur Beschreibung und Erklärung von Bodeneigenschaften nur auf einen bzw. maximal zwei bodenbeeinflussende Faktoren (SINOWSKI, 1999).

2.2. Räumliche Modellierung von Bodeneigenschaften

Im Zuge der analogen Kartierung werden Bodeneinheiten hauptsächlich auf Basis von Landschaftsattributen zusammengefasst (HUDSON, 1992). Die Position eines Bodens in der Landschaft ist demnach ein wichtiger Ansatz für die Klassifikation und Bildung von Bodeneinheiten (RUHE, 1956).

Auf diese Weise entstehen diskrete Karten mit scharf abgegrenzten Klasseneinheiten, die zwar beispielsweise für Landnutzungsplanungen auf regionaler Ebene wichtige Entscheidungshilfen bieten, aber für eine schlagbezogene Bewirtschaftung zu ungenau sind (BRAGATO, 2004).

Exemplarisch zeigt Abb. 2 am Beispiel der digitalen Bodenkarte Österreichs eine Karte mit diskreten Abgrenzungen zwischen den einzelnen Bodeneinheiten. Es gibt keine verlaufenden Übergänge zwischen den einzelnen Bodenklassen.

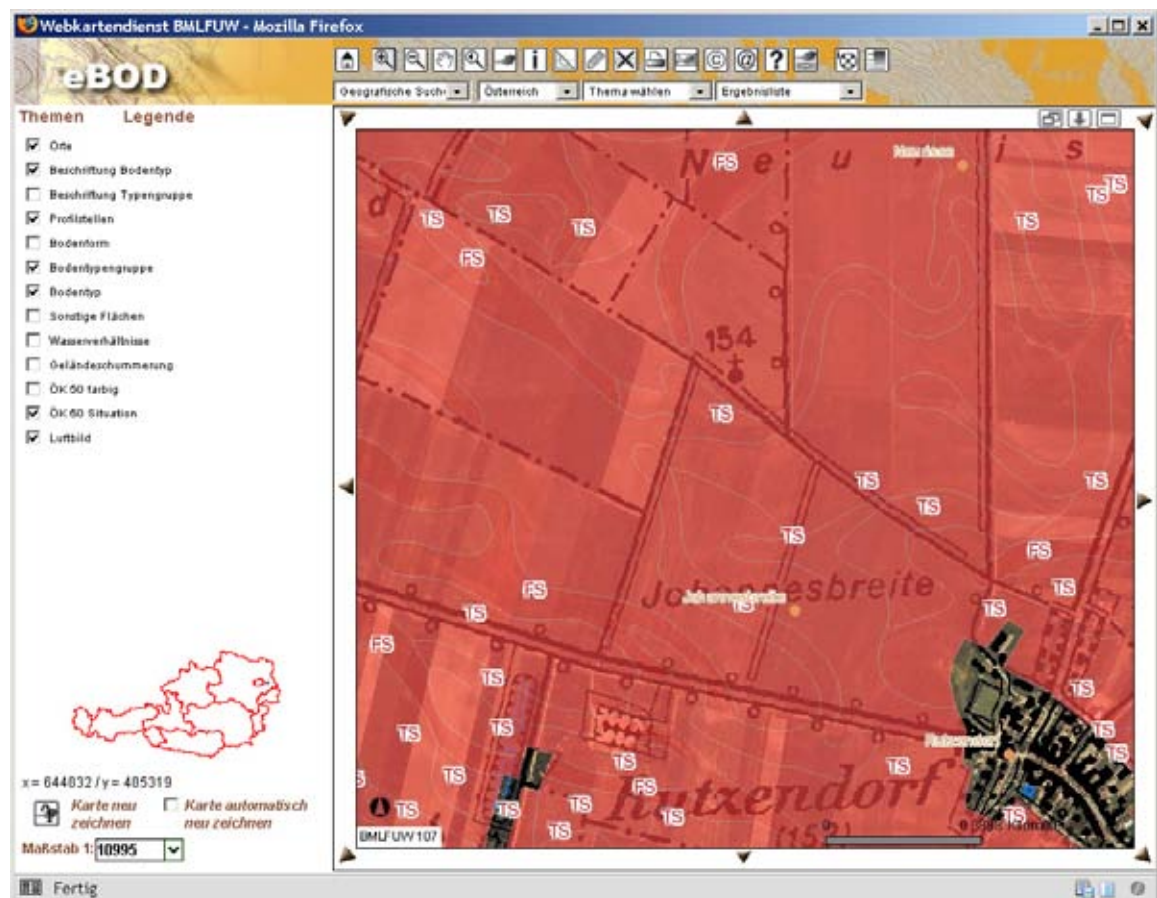


Abb. 2: Digitale Bodenkarte Österreichs mit scharfen Abgrenzungen der einzelnen Bodentypen¹

Ein weiteres Beispiel für die scharfkantige Abgrenzung von Bodeneinheiten ist die Flächenausweisung der österreichischen Finanzbodenschätzung. Diese bedient sich des diskreten Ansatzes und zeigt Flächeneinheiten gleicher Ackerzahl, als Grundlage der Besteuerung, in Kartenform (siehe Abb. 3). Für

¹ Screenshot: bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=2967, [Verfügbar: 23.4.2007]

den steuerlichen Einsatz mag diese Form der Darstellung zwar ausreichen, für den großmaßstäbigen Einsatz wie beispielsweise in der Precision Agriculture sind diese Karten jedoch nicht oder nur sehr bedingt verwendbar (BRAGATO, 2004).

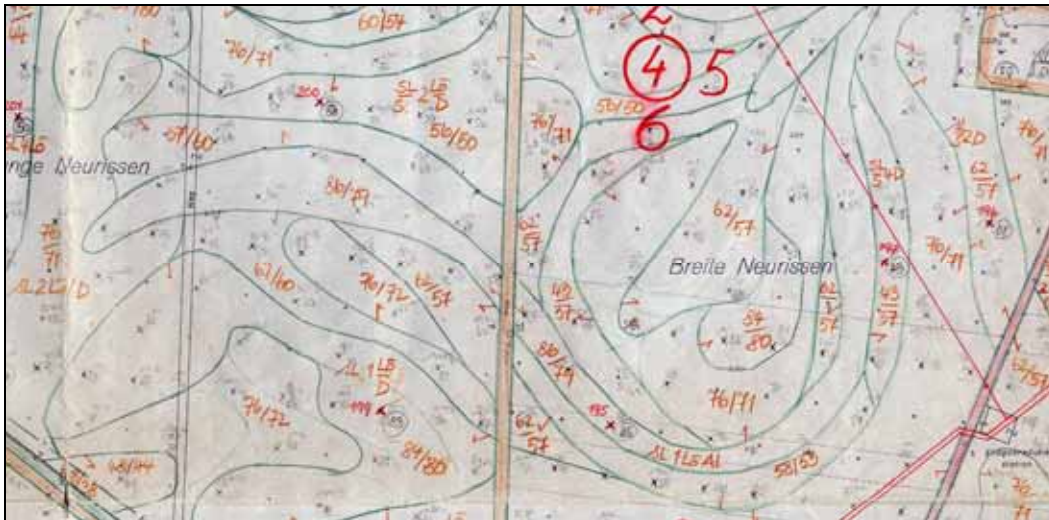


Abb. 3: Ausschnitt aus der analogen Feldschätzungskarte für das Versuchsgut Rutzendorf

Häufig ist es nicht nötig, den Detaillierungsgrad einer Karte zu erhöhen. Es reicht vielfach, die Diskrepanz zwischen den ausschließlich diskret vorliegenden Kartendaten und dem, zwischen Kontinuum und Diskontinuum wechselndem Modell des Bodens zu lösen, was einen neuen methodischen Ansatz bei der Kartenerstellung erforderlich macht (BRAGATO, 2004).

Mit Hilfe computergestützter Ansätze, basierend auf geographischen Informationssystemen, ist es möglich, diese Klassenübergänge zu modellieren und auch entsprechend kartographisch darzustellen.

Für die Interpolation landwirtschaftlich relevanter Messdaten können je nach Anwendung und Fragestellung unterschiedliche Interpolationsmethoden optimale Ergebnisse liefern. Häufig kommen die inverse Distanzgewichtung sowie Kriging-Modelle zur Anwendung (KRAVCHENKO & BULLOCK, 1999). Beide Methoden bestimmen den interpolierten Wert an einer unbeprobten Position, basierend auf den umliegenden Messpunkten durch Definition von Einfluss-Gewichten für jeden Messpunkt und jede unbeprobte Position (KRAVCHENKO & BULLOCK, 1999).

Aufgrund der meist geringen Probendichte liefern Interpolationsmethoden die ausschließlich die Bodenproben-Variable berücksichtigen, oft nur ungenaue Ergebnisse. Deshalb werden für die Verbesserung der Interpolation häufig zusätzliche Variablen (unabhängige Variablen), die in höherer Dichte verfügbar sind und eine Korrelation mit der Bodenproben-Variable (abhängige Variable) besitzen, herangezogen. Grundsätzlich lassen sich dabei nicht-räumliche statistische Modelle (Kapitel 2.7.1) und geostatistische Ansätze (Kriging-Modelle) unterscheiden (Kapitel 2.7.2).

ZIADAT (2005) beschreibt die Anwendung einer multiplen linearen Regression zur Vorhersage von Bodenattributen mit Hilfe von Reliefparametern für größere Gebiete. BÖHNER & SELIGE (2006) nutzen ein multiples lineares Regressionsmodell zur Interpolation verschiedener Bodenparameter mit Hilfe primärer und sekundärer Reliefparameter und Klimadaten. Das GIS-basierte Framework SOILSIM nutzt multiple lineare Regressionen, um statistische Zusammenhänge zwischen verschiedenen Bodenvariablen zu

ermitteln (MERGILI ET AL., 2006; TSAI ET AL., 2001) und GIASSON ET AL. (2006) wendet eine multiple logistische Regression zur Modellierung von Bodeneigenschaften basierend auf Geländeparametern an.

Kriging-Modelle (siehe Kapitel 2.7.2) mit mehreren Variablen können durch verschiedene Modellansätze realisiert werden. In der Literatur wird im Zusammenhang mit der Modellierung von Boden- und Bodeneigenschaften dabei sehr häufig auf Cokriging (LARK, 2002; ODEH ET AL., 1995; ERSAHIN, 2003) und Universal- bzw. Regression Kriging (HENGL ET AL., 2004; KNOTTERS ET AL., 1995; ODEH ET AL., 1995) hingewiesen.

2.3. Precision Agriculture

Der Begriff *Precision Agriculture* (in der deutschen Literatur auch als *Präzisionslandwirtschaft* beschrieben) bezeichnet eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Schläge unter Berücksichtigung der Boden- und Ertragsvariabilität (STRAUB ET AL., 1998), mit dem Ziel Aufwendungen für Dünger, Aussaatmengen, Pflanzenschutzmittel etc. zu verringern, bei gleichzeitiger Erhöhung der Erträge und Verminderung der Umweltbelastung (FRAISSE ET AL., 1999). Dieser Ansatz setzt jedoch eine genaue Kenntnis über die Variabilität des Boden auf einem Feld voraus (MZUKUA ET AL., 2005).

2.3.1. Entwicklung der Precision Agriculture

Der Ansatz der *Precision Agriculture* wurde Mitte der 70er bis in die frühen 80er Jahre in den USA entwickelt und damals als *Farming by Soil Types* bezeichnet. Mit der Ausweitung auf den Bereich der Tierhaltung etablierte sich der Begriff *Precision Agriculture* (GRAUSGRUBER, 2003).



Abb. 4: Precision Agriculture und die Unterteilung in Teildisziplinen (nach AUERNHAMMER, 2002)

Der Teilbereich *Precision Farming* (Ackerwirtschaft) ist der bedeutendste Bereich dieser Entwicklung. *Precision Pasturing* (Weidewirtschaft) verliert aufgrund von Änderungen in der Stalltechnik und somit in der Tierhaltung immer mehr an Bedeutung (GRAUSGRUBER, 2003). Ergänzt wird Precision Agriculture durch *Precision Forestry* (Forstwirtschaft), *Precision Horticulture* (Gartenbau) und *Precision Landscape Management* (AUERNHAMMER, 2002).

2.3.2. Arbeitsablauf und Methoden

Der Arbeitsablauf im *Precision Farming* erfolgt in mehreren Schritten. Zu Beginn werden meist Daten direkt am Feld gesammelt, die für die Produktion von Relevanz sind (z.B. Ertragsdaten, Feuchte, etc.). In einem zweiten Schritt werden diese Daten ausgewertet und für die weitere Verwendung als Grundlage

der Maschinensteuerung aufbereitet, um damit Ausbringungsmengen, in Abhängigkeit von der genauen Position am Feld, zu steuern. Die Ergebnisse werden entsprechend dokumentiert und fließen in die Verfeinerung und Verbesserung der Datengrundlage ein (LUDOWICY ET AL., 2002).

Basierend auf der Art der Informationsgewinnung werden drei verschiedene Ansätze beim Precision Farming unterschieden (LUDOWICY ET AL., 2002):

Kartieransatz (Mapping Approach)

Sensoransatz (Realtime Sensor Approach)

Sensoransatz mit Kartenüberlagerung (Realtime Sensor Approach with Map-Overlay)

Am häufigsten kommt der Kartiereinsatz zur Anwendung, bei dem eine Rasterkarte mit entsprechenden Bewirtschaftungsdaten (z.B. Ertragsdaten oder Bodendaten) spezifische Informationen für die Bearbeitung (Aussaat, Düngung, etc.) einer Rasterzelle bereitstellt. Voraussetzung ist, dass die Bearbeitungsmaschine ihre aktuelle Position kennt, was mit Hilfe eines GPS-Gerätes realisiert wird (üblicherweise Differential-GPS (DGPS) zur Verringerung des Lagefehlers).

Der Sensoransatz kommt ohne Positionsermittlung aus, indem anstelle der Rasterkarten Sensoren in Echtzeit Informationen liefern, die dann direkt von der Bewirtschaftungsmaschine umgesetzt werden. Die zur Verfügung stehenden Parameter sind im Gegensatz zum Kartieransatz allerdings beschränkt. Vorteilhaft ist dieser Ansatz bei sehr variablen Boden- und/oder Pflanzeigenschaften (z.B. Unkrautbekämpfung).

Der Sensoransatz mit Kartenüberlagerung ist ein kombinierter Ansatz. Dieser Ansatz wird beispielsweise bei der Stickstoffdüngung eingesetzt. Sensoren erfassen einerseits die Lichtreflexionen der Pflanzen, eine Faktorkarte unterstützt bei der Bestimmung der Düngemenge (LUDOWICY ET AL., 2002).

Als Einschränkung ist festzuhalten, dass der Einsatz von *Precision Farming* nur dann sinnvoll ist, wenn Heterogenität in den Produktionsbedingungen eines Schläges vorhanden ist (GRAUSGRUBER, 2003).

2.3.3. Precision Farming und nachhaltige Entwicklung der Landwirtschaft

In der Vergangenheit wurden lokale Unterschiede in der Bodenqualität oftmals ignoriert und durch hohen Düngemittelseintrag nivelliert, was weitreichende Folgen für die Ökosysteme zur Folge hatte bzw. hat (SINOWSKI, 1995).

Als Mitte der 80er bis Anfang der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts mit der Veröffentlichung von Publikationen begonnen wurde, die sich mit den Umweltproblemen der Landwirtschaft auseinandersetzten (SRU, 1985; CONRAD, 1992), war dies der Auslöser für eine wissenschaftliche, technologische und politische Diskussion zur Reduzierung der Umweltbelastungen in der Landwirtschaft (GANDORFER, 2006).

Trotz einiger Erfolge zur Reduktion der Einträge aus der agrarischen Produktion trägt die Landwirtschaft immer noch durch eine sehr hohe stoffliche Belastung, vor allem von Stickstoffdünger, zu einer Anreicherung des Grundwassers mit Stickstoffverbindungen bei (GANDORFER, 2006). Die technologischen Entwicklungen des *Precision Farming* können dabei einen wichtigen Beitrag für eine nachhaltigere Landwirtschaft leisten (AUERNHAMMER, 2002).

2.4. Bodendaten in Österreich

Österreich verfügt im europäischen Vergleich über eine sehr große Dichte von Bodeninformationen (SCHWARZ ET AL., 2001). Die nachfolgende Tabelle (Tab. 2) gibt eine Übersicht über die in Österreich verfügbaren Bodeninformationen:

Bezeichnung	Maßstab	Flächendeckung (ha)	Datenurheber	Verfügbarkeit
Forstliche Standortskartierung	1:10.000 1:5.000 1:25.000	15% der Waldfläche (ca. 600.000 ha)	Institut f. Forstökologie, Forstliche Bundesversuchsanstalt (FBVA); Institut f. Waldökologie, Universität für Bodenkultur (BOKU); AK Standortskartierung, Österreichischer Forstverein (ÖFV); Landesforstdirektionen und Landwirtschaftskammern der Länder	Vorwiegend analog (Karten und Kartierungsoperare) an FBVA und BOKU, vorwiegend digital bei LFD Tirol (TIRIS), Analysedaten, Standorts- und Profilbeschreibungen z.T. digital
Bodenkartierung 1:25.000	1:25.000 1:10.000 1:5.000 1:2.880	98% der kartierungswürdigen Fläche (=landwirtschaftliche Nutzfläche minus Hochlagen und Extensivflächen) (3,065 Mio. ha)	Institut für Bodenkultur, Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft (BFL)	Analog beim Datenurheber (70% Karten und Bände) Digital ab 2003 bei BFL, Institut für Bodenkultur und als WebGIS-Applikation
Bodenschätzung 1:2.000	1:2.000 1:2.880 1:1.000 1:2.500	100% der landwirtschaftl. genutzten Fläche (jedoch ohne Alpflächen) (2,7 Mio. ha)	Finanzverwaltung	Analog aufgelegt bei den Finanzämtern, Dzt. Ca. 20% digitale Schätzungskarten bei Finanz- und Vermessungsämtern (Stand 2005)

Tab. 2: Bodeninformationen in Österreich (verändert nach SCHWARZ ET AL., 2001)

Zusätzlich gibt es noch Übersichtskarten in den Maßstäben 1:750.000 (Bodenkarte von Fink (FINK ET AL., 1979) und 1:1.000.000 (Österreichausschnitt der „FAO-Bodenkarte Mitteleuropas“ angepasst von RIECK (in BLUM & WENZEL, 1989) und Österreichkarte nach FAO-Nomenklatur von FINK ET AL. (1998).

2.5. Österreichische Finanzbodenschätzung

Die Wurzeln der Bodenkartierung in Österreich reichen bis in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts zurück (BLUM ET AL., 2005; SCHNEIDER ET AL., 2001). Eine systematische Kartierung landwirtschaftlich genutzter Flächen für steuerliche Zwecke wird seit 1947 vorgenommen (JABOREK, 2003). Die Erstschatzung für das gesamte Bundesgebiet wurde 1973 abgeschlossen (WAGNER, 2001), wobei die gesamte landwirtschaftliche Fläche Österreichs mit Ausnahme der Alpflächen erhoben wurde (PEHAMBERGER, 1998). Damit existieren Schätzdaten für ca. 2,7 Mio. Hektar, was wiederum 32% der österreichischen Landesfläche entspricht (BLUM ET AL., 2005). Nach Abschluss der Erstschatzung werden derzeit hauptsächlich Aktualisierungen im Rahmen von Überprüfungsschätzungen durchgeführt. Bis zum Jahr 2005 wurden ca. 68% der landwirtschaftlichen Fläche nachgeschätzt. Die restlichen Daten stammen aus der Erstschatzung zwischen 1950 und 1973 (WAGNER, 2005). Dies ist vor allem bei der Verwendung der Daten für nichtsteuerliche Zwecke zu beachten (WAGNER, 2005).



Abb. 5: Grabloch der österreichischen Finanzbodenschätzung

Die Finanzbodenschätzung ist ein bewährtes Verfahren zur Bewertung landwirtschaftlich genutzter Böden (PFEIFFER ET AL., 2003), bei dem die natürliche Ertragsfähigkeit eines Bodens auf Basis der natürlichen Ertragsbedingungen (Bodenbeschaffenheit, Geländegestaltung, Klima und Wasserverhältnisse) ermittelt wird (WAGNER, 2001). Rechtsgrundlage für dieses Verfahren ist das Bodenschätzungsgesetz 1970 (BGBl. Nr. 233/1970).

Je nach Kulturart (Acker oder Grünland) kommt der Ackerschätzungs- bzw. Grünlandätzungsrahmen zum Einsatz, mit dessen Vorgaben die Acker- bzw. die Grünlandzahl ermittelt wird.

Um eine Gleichmäßigkeit der Bewertung zu gewährleisten gibt es 432 Vergleichsstücke (=Bundes- und Landesmusterstücke), die bewertet und rechtsverbindlich kundgemacht (BLUM ET AL., 2005) und in standardisierten Aufnahmeblättern dokumentiert werden (siehe Anhang 4). Sie zeigen einen Durchschnitt der natürlichen Ertragsfähigkeit aller landwirtschaftlich genutzten Böden Österreichs und sollen im Einzelnen für den jeweiligen Landschaftsraum kennzeichnend sein (PEHAMBERGER, 1998).



Abb. 6: Faktoren und Kriterien bei der Bestimmung der Acker- bzw. Grünlandzahl (nach JABOREK, 2003)

Zwischen 1994 und 1997 wurden die Bundesmusterstücke neuerlich durch den Bundesschätzungsbeirat überprüft, um den klimatischen Einflüssen aus Klima-Gunsträumen sowie Trockenräumen durch Zu- bzw. Abschläge mehr Gewicht zu geben (PEHAMBERGER, 1998).

Seit 1997 werden die Daten der Finanzbodenschätzung zwar digitalisiert, sie liegen derzeit aber noch überwiegend in analoger Form vor. Mit Stand 2005 waren etwa 20% digital verfügbar (BLUM ET AL., 2005). Auch für das, im Rahmen dieser Arbeit, untersuchte Gebiet (siehe Kapitel 3) konnten nur analoge Daten bezogen werden, weshalb diese Informationen für die Weiterverwendung in einem Geoinformationssystem digitalisiert und aufbereitet werden mussten (siehe Kapitel 5.1). Seit dem Jahr

1999 werden die Schätzungskarten von den Vermessungsbehörden grundsätzlich digital angelegt, analoge Schätzungskarten werden nur mehr in Ausnahmefällen erstellt (WAGNER, 2001).

2.5.1. Begriffsabgrenzung Feldschätzungskarte - Schätzungsreinkarte - Schätzungskarte - Schätzungsbuch

Für die Dokumentation der Finanzbodenschätzung kommen verschiedene Medien zum Einsatz, die im Folgenden genauer definiert und abgegrenzt werden.

a. Feldschätzungskarte

Die *Feldschätzungskarte* dient zur Aufnahme der im Feld gewonnenen Informationen aus den Bohrstichen (siehe Kapitel 2.5.2) und ist entweder eine Kopie der Katastralmappe oder Kopie der bisherigen Schätzungsreinkarte. Die dem Kartierungsraster (siehe Kapitel 2.5.2) folgenden Bohrstiche werden dabei durch eine *Feldansprache* direkt am Feld mit Hilfe des Schätzungsrahmens eingewertet, und in die Feldschätzungskarte übertragen.

Unter dem Begriff *Feldansprache* ist das Bestimmen von Bodeneigenschaften direkt im Feld, d.h. ohne spezielle Laborgeräte, zu verstehen.

b. Schätzungsreinkarte

Die *Schätzungsreinkarte* wird entweder analog durch gemeinsames Ablichten der Schätzungskarte mit der Katastralmappe, oder digital durch Drucken (Plotten) der Schätzungsreinkarte im Maßstab 1:2000 erstellt (WAGNER, 2001). Dabei werden die digitalisierten Bodenschätzungsergebnisse über der digitalen Katastralmappe dargestellt (JABOREK, 2003).

Die Bodenschätzungsergebnisse umfassen die Klassenflächen mit einheitlichen Bodeneigenschaften sowie die im Schätzungsbuch (siehe weiter unten) beschriebenen charakteristischen Bohrstiche.

c. Schätzungskarte

Die *Schätzungskarte* bezeichnet eine Karte, die nur die Bodenschätzungsergebnisse ohne Basiskarte beinhaltet. Der Begriff wird aber häufig auch synonym für die Schätzungsreinkarte verwendet und kommt auch als Terminus Bodenschätzungskarte vor.

d. Schätzungsbuch

Im *Schätzungsbuch* wird pro ausgewiesener Klassenfläche (siehe Kapitel 2.5.2) ein charakteristischer Bohrstich ("Grabloch") bodenkundlich beschrieben (siehe Anhang 3).

Folgende Parameter und Eigenschaften werden dabei erfasst:

- Bodentyp (nach FINK, 1969)
- Horizontabfolge

- Mächtigkeit der Horizonte
- Bodenmerkmale wie Humus, Bodenart, Grobanteile, Kalkgehalt, Konkretionen, Fleckung, Vergleyung etc.

Neben den Eigenschaften am Grabloch wird auch die Klassenfläche durch folgende Eigenschaften dargestellt:

- Kulturart
- Klassenbezeichnung
- Wertzahlen (Zu- und Abschlüge für Gelände, Klima, etc.)

Die Boden- bzw. Grünlandgrundzahl einer Klassenfläche ergibt sich aus einem gewogenen Mittel der innerhalb einer Klassenfläche vorkommenden Grablochzahlen.

Besondere Geländebeziehungen, sowie Klima und Wasserversorgung werden durch Zu- und Abschlüge in Prozentpunkten von der Boden- bzw. Grünlandgrundzahl berücksichtigt.

2.5.2. Durchführung der Bodenschätzung

Die nachfolgende Beschreibung der technischen Durchführung der Finanzbodenschätzung wurde aus WAGNER (2001) – „Bodenschätzung in Österreich“ entnommen und zusammengefasst.

Die Schätzung erfolgt üblicherweise katastralgemeinde- oder riedeweise und umfasst dabei die Untersuchung der Bodenbeschaffenheit sowie deren Darstellung in Schätzungsreinkarten (basierend auf der Katastralmappe) und Schätzungsbüchern.

Die Probennahme zur Feststellung der Ertragsfähigkeit erfolgt entweder im Rastersystem, wobei der Raster in ebenen Lagen zwischen 40 und 60 Metern liegt, oder aber grundstücksweise, was vor allem in steileren Lagen angewendet wird. Die Beprobung wird an von Vermessern eingemessenen Begangslinien durchgeführt, um eine hohe Lagegenauigkeit zu gewährleisten. An jedem Probenpunkt wird ein Bohrstich entnommen, der direkt im Feld eingewertet und in die Feldschätzungskarte (auf Basis der Katastralmappe oder bisheriger Schätzungsreinkarten) eingetragen wird. Der für eine Klassenfläche (siehe weiter unten) charakteristische Bohrstich wird auch im Schätzungsbuch beschrieben.

Für einen Bohrstich wird ein Erdbohrer durch Drehen einen Meter in den Boden getrieben. Das Bodenmaterial, das nach dem Herausheben im Bohrer verbleibt, ermöglicht eine Beschreibung des Bodens an dieser Position.

Für die Feststellung der natürlichen Ertragsbedingungen werden Bodenbeschaffenheit, Geländegestaltung, klimatische Verhältnisse sowie die Wasserverhältnisse im Boden herangezogen.

Der Bodenschätzer ist dabei an einen Schätzungsrahmen gebunden (Acker- oder Grünlandschätzungsrahmen), mit dessen Hilfe eine Wertezahlenspanne auf Basis der Bodenart, der Zustandsstufe und der Entstehungsart ermittelt wird. Jeder Boden muss also in diese drei Merkmalsgruppen eingeordnet werden, um seine entsprechende Wertzahl bestimmen zu können.

Nachfolgend werden diese drei Merkmalsgruppen beschrieben:

a. Bodenart

Die mineralischen Bodenarten werden im Feld mit der Fingerprobe (Reiben und Kneten einer feuchten Bodenprobe zwischen den Fingern) ermittelt. Dabei werden die Mengenanteile von Sand, Schluff und Ton festgestellt und die Bodenart entsprechend den Angaben im Texturdreieck (siehe Abb. 7) ausgewiesen. Folgende Bodenarten werden dabei gekennzeichnet:

S = Sand

SI = anlehmiger Sand

IS = lehmiger Sand

SL = stark lehmiger Sand

sL = sandiger Lehm

L = Lehm

LT = toniger Lehm, lehmiger Ton

T = Ton

Als organische Bodenartengruppe wird noch das Moor (Mo) ausgewiesen.

Der Wert des Bodens steigt beginnend bei Sand bis zu Lehm und nimmt in Richtung Ton wieder ab.

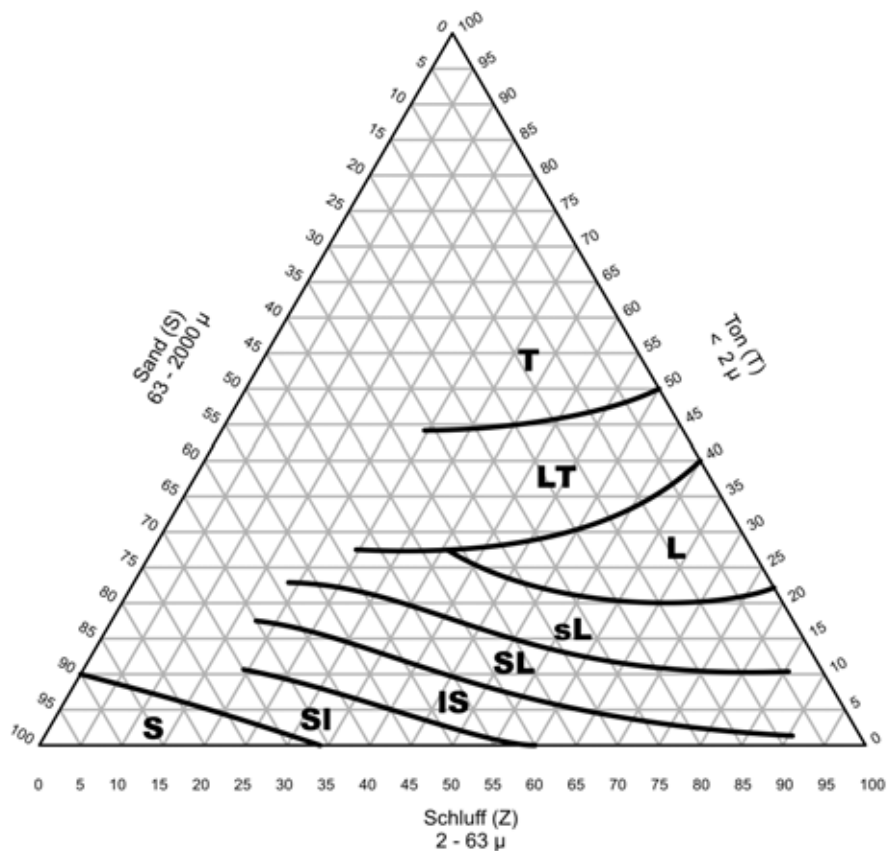


Abb. 7: Einteilung der Bodenarten im Texturdreieck (nach WAGNER, 2001)

b. Zustandsstufe

Nach Feststellung der Bodenartengruppen werden diese in Zustandsstufen, welche die Gesamtbeschaffenheit des Bodens repräsentieren, untergliedert.

Die Zustandsstufe eines Bodens beschreibt im Fall der Ackerschätzung die grundsätzliche Eignung eines Bodens für den Anbau von Kulturpflanzen und fasst in einer Wertezahl Klimaeinflüsse, frühere Vegetation, Geländeform, Wasserverhältnisse sowie menschliche Bearbeitung zusammen.

Sie bildet entweder Entwicklungs- oder Alterungsstufen der Böden ab, wobei für die Einteilung eines Ackerbodens sieben Zustandsstufen möglich sind. Stufe „1“ bezeichnet den günstigsten, „7“ den ungünstigsten Zustand eines Bodens. Die Entwicklung erfolgt beginnend beim Rohboden hin zur höchsten Leistungsfähigkeit, und Abnahme der Leistungsfähigkeit durch Verarmung und Versauerung (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2002).

Gut entwickelte, tiefgründige Böden (z.B. Tschernoseme und gut ausgebildete Feuchtschwarzerden) werden den Zustandsstufen 1 bis 3 zugeordnet. Braunerden oder Parabraunerden liegen üblicherweise im Bereich 2 bis 4. Seichtgründige (z.B. Ranker oder Rendsinen) und/oder vernässte Böden (z.B. Pseudogleye) bewegen sich im Bereich 5 bis 7.

flachgründig steinreich oft trocken z.T. kalkhaltig			mittelgründig mäßig durchwurzelbar mäßig frisch mäßig entkalkt			tiefgründig locker, humus gut durchwurzelbar frisch-feucht			mittelgründig versauert oder staunass			flachgründig stark versauert stark staunass oder nass		
7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7		
Ranker						Braunerde						Podsol		
Rendzina						Terra fusca								
Pararendzina						Tschernosem		Parabraunerde		Pseudogley		Stagnogley		
						Niedermoor		Übergangsmoor		Hochmoor				

Abb. 8: Zustandsstufen mit Zuordnungsbeispielen (nach SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2002)

c. Entstehungsart

Die Entstehungsart beschreibt die geologischen Begebenheiten, im Rahmen derer die landwirtschaftlichen Böden entstanden sind. Die Einteilung erfolgt in

D = Diluvialböden: Böden aus quartären bzw. tertiären Sedimenten.

Lö = Lössböden: Diluvialböden aus äolischem Sediment.

Al = Alluvialböden: Jüngere Schwemmlandböden in Tälern und Niederungen.

V = Verwitterungsböden: Böden, die aus dem Muttergestein an Ort und Stelle entstanden sind.

Für D, Al und V-Böden ist es möglich, durch den Index g einen hohen Grobanteil (Steine, Schotter) in der Krume zu kennzeichnen, was einen Einfluss auf die Wertigkeit des Bodens hat.

Mit Hilfe dieser Merkmalsausprägungen ist es möglich, den Boden in einen Wertebereich einzuteilen, der im Ackerschätzungsrahmen festgelegt ist:

Ackerschätzungsrahmen

Überprüfung 2

Bodenart	Entstehungsart	Zustandsstufe						
		1	2	3	4	5	6	7
S	D		43-36	35-29	28-22	21-17	16-12	11-7
	Dg			32-25	24-19	18-14	13-9	8-7
	Al		50-42	41-34	33-27	26-21	20-17	16-10
	Alg			38-31	30-26	25-20	19-12	11-7
	V		42-35	34-28	27-21	20-16	15-12	11-7
	Vg			30-24	23-19	18-14	13-9	8-7
SI (S/IS)	D	60-53	52-45	44-37	36-29	28-22	21-17	16-11
	Dg			40-33	32-25	24-19	18-14	13-7
	Al	68-60	59-51	50-43	42-35	34-28	27-22	21-15
	Alg			46-39	38-32	31-25	24-18	17-10
	V		50-43	42-36	35-29	28-21	20-16	15-10
	Vg			39-33	32-25	24-19	18-14	13-7
IS	D	68-60	59-52	51-45	44-38	37-30	29-22	21-16
	Dg			48-42	41-34	33-26	25-20	19-13
	Lö	73-65	64-56	55-48	47-41	40-33	32-25	24-18
	Al	76-67	66-59	58-52	51-44	43-35	34-27	26-18
	Alg			55-48	47-38	37-31	30-23	22-16
	V	65-58	57-50	49-44	43-37	36-29	28-21	20-16
	Vg			47-41	40-33	32-25	24-20	19-12
SL (Is/sL)	D	77-69	68-61	60-53	52-46	45-38	37-30	29-20
	Dg			56-50	49-42	41-33	32-25	24-15
	Lö	82-74	73-65	64-56	55-48	47-41	40-33	32-25
	Al	84-75	74-66	65-58	57-51	50-44	43-36	35-26
	Alg			61-55	54-48	47-40	39-30	29-21
	V	73-66	65-58	57-50	49-44	43-36	35-29	28-20
sL	D	87-78	77-69	68-60	59-53	52-46	45-38	37-28
	Dg			63-57	56-50	49-42	41-32	31-22
	Lö	92-83	82-74	73-65	64-56	55-48	47-41	40-32
	Al	94-84	83-75	74-66	65-58	57-50	49-42	41-32
	Alg			69-62	61-54	53-46	45-36	35-26
	V		73-65	64-57	56-49	48-42	41-34	33-24
L	D	92-83	82-74	73-66	65-58	57-50	49-42	41-33
	Dg			69-62	61-54	53-46	45-37	36-29
	Lö	100-90	89-80	79-71	70-63	62-55	54-46	45-36
	Al	100-90	89-80	79-71	70-62	61-54	53-45	44-35
	Alg			74-66	65-58	57-49	48-39	38-29
	V		79-71	70-62	61-54	53-45	44-37	36-27
LT	D	84-75	74-66	65-58	57-51	50-43	42-35	34-26
	Dg			61-55	54-47	46-39	38-31	30-21
	Al	90-80	79-71	70-62	61-54	53-46	45-38	37-27
	Alg			65-58	57-50	49-42	41-33	32-22
	V		70-63	62-54	53-46	45-38	37-29	28-20
	Vg			57-50	49-42	41-32	31-25	24-15
T	D		67-60	59-53	52-45	44-38	37-28	27-18
	Dg			56-49	48-42	41-32	31-23	22-14
	Al		73-65	64-56	55-48	47-39	38-29	28-18
	Alg			59-52	51-43	42-35	34-26	25-14
	V		64-56	55-48	47-40	39-32	31-23	22-15
	Vg			51-44	43-36	35-26	25-18	17-10
Mo			45-37	36-29	28-22	21-16	15-10	9-7

Abb. 9: Ackerschätzungsrahmen (WAGNER, 2001)

Die Acker-Wertzahl kann, entsprechend ihrer Einwertung im Ackerschätzrahmen, Werte zwischen „7“ und „100“ annehmen. Die Ergebnisse der Bodenschätzung sind am jeweiligen Lagefinanzamt einsehbar.

Die einzeln bewerteten Probenpunkte werden anschließend in Klassen zusammengefasst, die als zusammenhängende Klassenflächen in der Schätzungsreinkarte ausgewiesen werden (siehe Anhang 2), wobei hier der Bodenschätzer auch sein Verständnis über die Boden-Landschaftsbeziehungen (HUDSON, 1992) benutzt, um diese Abgrenzungen herzustellen.

Neben der Verwendung der Daten als Grundlage der Besteuerung landwirtschaftlicher Betriebe kann dieser Datenpool auch für eine Reihe anderer Fragestellungen verwendet werden (verändert nach BLUM ET AL., 2005; PEHAMBERGER, 1998):

- Raumordnung, Flächenwidmungsplanung
- Landschaftsplanung
- Wasser-, Boden-, Naturschutz
- Bodenreform
- Förderungsverfahren (ÖPUL, etc.)
- Basis für ein schlagbezogenes Bodenmanagement (Precision Farming)
- Beantwortung wissenschaftlicher Fragestellungen (z.B. Versuchsplanung)

2.6. Bodenbeeinflussende Parameter

Das Relief ist neben Ausgangsmaterial und Klima der Haupteinflussfaktor bei der Ausbildung von Böden (THOMAS ET AL., 1999), weshalb die Eigenschaften eines Bodens sehr stark von seiner Lage in der Landschaft abhängen (RUHE, 1956; HUDSON, 1962). Die Topographie einer Landschaft steuert die Verteilung von Wasser, Sedimenten und gelösten Stoffen, was zu einer Differenzierung der Böden führt (PACHEPSKY ET AL., 2001). In Tieflagen kann die Bedeutung des Reliefs den Einfluss des Klimas weit übertreffen (PAYER, 2001).

Grenzen und Übergänge im Gelände stellen daher auch häufig Grenzen für Bodenparameter dar, weshalb geomorphometrische Informationen wie Hangneigung, Krümmung, Landformen oder kombinierte Indices aus digitalen Höhenmodellen eine wichtige Grundlage für die Erstellung von Bodenkarten bilden (KÖTHE & Bock, 2006).

Funktion	ausgewählte Beispiele
Lokal	Höhe über NN, Hangneigung, Krümmung, Exposition
Regional	relative Höhe, Fließakkumulation, Fließlänge
Kombiniert	Topographischer Feuchtigkeitsindex (TWI), Hanglängenfaktor (LS-Faktor), Stream Power Index (SPI)

Tab. 3: Klassifikation geomorphometrischer Reliefparameter hinsichtlich ihrer Funktion mit ausgewählten Beispielen (verändert nach BEHRENS, 2003)

Diese Zusammenhänge zwischen Boden und Relief werden auch bei der Herstellung konventioneller Bodenkarten berücksichtigt, indem die Wechselwirkung zwischen Boden und Landschaftsform bzw. -charakteristik interpretiert wird, was aber immer ein qualitativer Ansatz bleibt (ZHU ET AL., 2001).

Neben dem Relief der Landschaft hat auch das Mikrorelief großen Einfluss auf die räumliche Variabilität des Bodens, vor allem auf seine chemischen Zusammensetzung (SOUZA ET AL., 2006). Dies bestätigen auch andere Arbeiten zur Variabilität der chemischen Zusammensetzung des Bodens (HALBFASS & GRUNEWALD, 2003; KUZJAKOVA ET AL., 1997).

In landwirtschaftlich intensiv genutzten Landschaften wirken neben Relief und Klima auch anthropogene Einflüsse auf den Boden und dessen Eigenschaften (siehe Kapitel 2.6.7). Wenngleich die Bewirtschaftung selbst kein Reliefparameter ist, so werden die Auswirkungen der Bodenbearbeitung im Rahmen der landwirtschaftlichen Produktion stark von ebendieser beeinflusst (z.B. Erosion in Hanglagen).

Berechnung von Reliefparametern

Bei der Berechnung von Reliefparametern wird die Oberfläche des digitalen Höhenmodells in eine Funktion $z=f(x)$ übersetzt, wobei z die Höhe und x die horizontale Position ist. Die Funktion ist lokal angepasst, durch Verwendung der an der Position vorhandenen Höhenwerte. Meist handelt es sich um ein Fenster mit einer Ausdehnung von 3×3 Rasterzellen, welches über das Rastermodell bewegt wird (*Moving Window*).

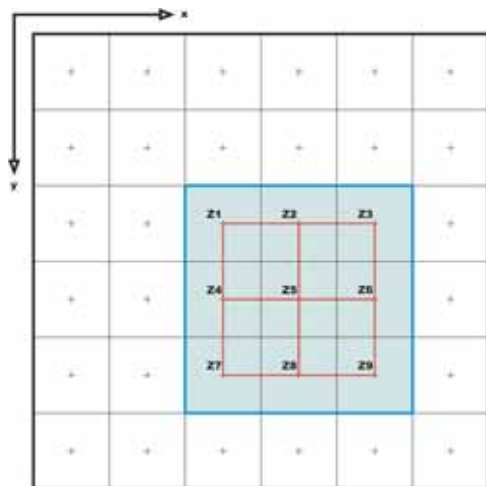


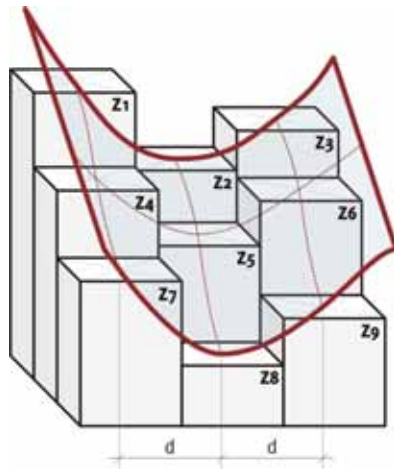
Abb. 10: Schematische Darstellung eines *Moving Window* (3×3 Rasterzellen) über einem Rasterdatensatz (nach BEHRENS, 2003; CLARKE, 1995)

Für die Ausweisung von Reliefparametern stehen zwei grundsätzliche Berechnungsansätze (EVANS, 1980 sowie ZEVENBERGEN & THORNE, 1987) zur Verfügung, weitere Ansätze bauen auf diesen Grundlagen auf (BEHRENS, 2003).

Der Aufbau beider Systeme ist zwar grundsätzlich identisch (BEHRENS, 2003), das System von Evans ermöglicht jedoch eine Berechnung der 3×3 -Zellenmatrix unter Einbeziehung weiterer Pixel im Umfeld der Matrix, was einer Glättung (Tiefpassfilter) entspricht (FLORINSKY, 1998). Die Methode von Zevenbergen & Thorne ist demnach zwar die mathematisch genauere, kann jedoch in Abhängigkeit von Qualität und Auflösung des verwendeten Höhenmodells Artefakte verursachen (BEHRENS, 2003; siehe auch Kapitel 2.6.2 und 5.4.2).

Die Berechnung der Reliefparameter erfolgt üblicherweise in GIS-Programmen, wobei hier zu beachten ist, dass kaum eine Software mehrere Methoden integriert hat. Eine Ausnahme stellt SAGA dar (siehe

Entsprechend der Methode von ZEVENBERGEN & THORNE (1987) bilden sich die Koeffizienten für die Berechnung wie folgt (BURROUGH & McDONNELL, 1998):



$$A = \frac{\frac{Z1+Z3+Z7+Z9}{4} - \frac{Z2+Z4+Z6+Z8}{2} + Z5}{d^4} \quad \text{Formel 2}$$

$$B = \frac{\frac{Z1+Z3-Z7-Z9}{4} - \frac{Z2-Z8}{2}}{d^3} \quad \text{Formel 3}$$

$$C = \frac{\frac{-Z1+Z3-Z7+Z9}{4} - \frac{Z4-Z6}{2}}{d^3} \quad \text{Formel 4}$$

$$D = \frac{\frac{Z4+Z6}{2} - Z5}{d^2} \quad \text{Formel 5}$$

$$E = \frac{\frac{Z2+Z8}{2} - Z5}{d^2} \quad \text{Formel 6}$$

$$F = \frac{-Z1 + Z3 + Z7 - Z9}{4d^2} \quad \text{Formel 7}$$

$$G = \frac{-Z_4 + Z_6}{2d} \quad \text{Formel 8}$$

$$H = \frac{Z_2 - Z_8}{2d} \quad \text{Formel 9}$$

$$I=Z5$$

Formel 10

Abb. 11: Koeffizienten für die Berechnung von Reliefparametern auf Basis eines 3x3-Zellen Fensters

Die Koeffizienten (A-I) errechnen sich aus den 9 Zellwerten (Z1-Z9) des *Moving Windows* und den Abständen (*d*) der jeweiligen Zellenmittelpunkte (=Rasterweite).

Mit Hilfe dieser Koeffizienten können Ableitungen der 1. Ordnung (Hangneigung, Exposition) und 2. Ordnung (Profil- und Plankurvatur) berechnet werden. Nachstehend werden die für diese Arbeit relevanten Reliefparameter genauer erläutert. Die in den jeweiligen Berechnungsformeln verwendeten Koeffizienten sind den weiter oben genannten Formeln (Formel 2 bis Formel 10) zu entnehmen.

2.6.1. Hangneigung

Die Hangneigung (S =Slope) bezeichnet den Neigungswinkel, unter dem die Fall-Linie gegen die Horizontale geneigt ist (BURROUGH & McDONNELL, 1998; SHARY ET AL., 2002) und wird üblicherweise in Grad oder Prozent angegeben.

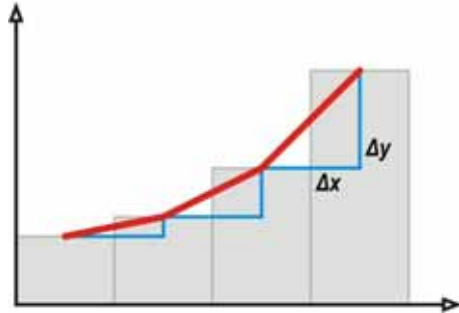


Abb. 12: Darstellung der Hangneigung in einem Rastermodell

Die Hangneigung ist der wichtigste Einflussfaktor für die Bodenerosion durch Wasser und korreliert neben der relativen und absoluten Höhe signifikant mit der Bodentiefe (GOODMAN, 1999). Die Abflussgeschwindigkeit des Wassers nimmt mit steigender Hangneigung zu und bedingt dadurch stärkere Erosion (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2002).

Zusätzlich erhöht sich bei langen Hängen die Menge des Abflusses, denn je länger ein Hang, desto mehr Material kann akkumulieren (BEHRENS, 2003; RICHTER, 1998). Im Boden selbst führt Hangzugwasser zu Stoffverlagerungen und Akkumulationen am Hangfuß. Die Stoffumlagerungen bewirken einerseits eine Verarmung in den oberen Hangbereichen und eine Anreicherung an den Hangfüßen andererseits.

Die Hangneigung hat demnach großen Einfluss auf Horizontmächtigkeiten und die Nährstoffversorgung sowie die Bodenart (GESSLER ET AL., 2000).

Berechnung der Hangneigung im 3x3-Zellen *Moving Window* (ZEVENBERGEN & THORNE, 1987):

$$S = \sqrt{G^2 + H^2}$$

Formel: 11

2.6.2. Kurvatur

Die Kurvatur (C =Curvature) eines Geländes ist ein wichtiger Einflussfaktor für Erosions- und Abflussprozesse in der Landschaft, da sich abhängig von der Ausprägung der Kurvatur Unterschiede im Wasserfluss ergeben (SOUZA ET AL., 2006). Mathematisch betrachtet ist die Kurvatur äquivalent zum Begriff Krümmung.

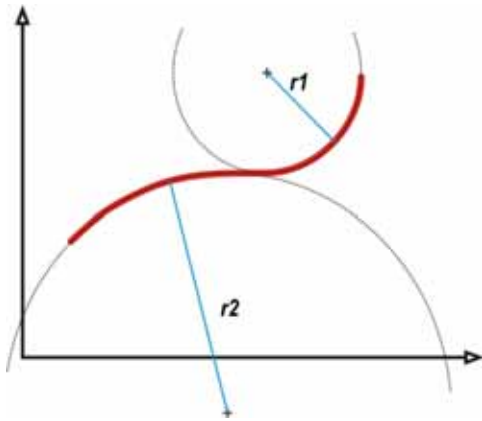


Abb. 13: Unterschiedliche Krümmungsradien einer Kurve

Die Krümmung einer Kurve bezeichnet die Richtungsänderung pro Längeneinheit. Aus diesem Grund ist die Krümmung einer Geraden null, da keine Richtungsänderung pro Längeneinheit gegeben ist. Im Fall eines Kreises ist die Krümmung überall gleich als Verhältnis des Radius ($=1/r$) definiert.

Bei unregelmäßigen Kurven bzw. Oberflächen wechselt die Krümmung (siehe Abb. 13, $1/r_1$, $1/r_2$). Je größer der Radius der Krümmung, desto kleiner wird der Wert für die Krümmung, der sich dem Wert null (=ebene Fläche) annähert. Je nach Richtung der Krümmung wird zwischen einer konvexen ($> \text{Null}$) oder einer konkaven ($< \text{Null}$) Krümmung unterschieden.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Profil- und Plankrümmung, wobei die Profilkrümmung die Krümmung in Hangrichtung und die Plankrümmung die Oberflächenform quer dazu angibt.

Darüber hinaus gibt es noch eine Vielzahl anderer Krümmungsmodelle, wie etwa die Longitudinal- und Querschnittskrümmung sowie verschiedene Maximal- und Minimalkrümmungen (WOOD, 1996) oder die Gauß'sche Krümmung, Differenzkrümmung oder Akkumulationskrümmung (SHARY ET AL., 2002).

Für die Ausbildung der Böden ist die Profilkrümmung von höherer Bedeutung als die Plankrümmung, da sie die Geschwindigkeit des Abflusses beeinflusst, die Landschaft damit in Erosions- und Anlagerungszonen differenziert (GESSLER ET AL., 2000) und so Einfluss auf die Bodentiefe und Mächtigkeit des A-Horizonts hat (GESSLER ET AL., 1995).

Konkave Profilkrümmungen bedingen tiefgründigere Böden mit höherem Feinanteil während konvexe Flächen seichtere Böden mit weniger Feinanteil fördern (FRAZIER ET AL., 2005).

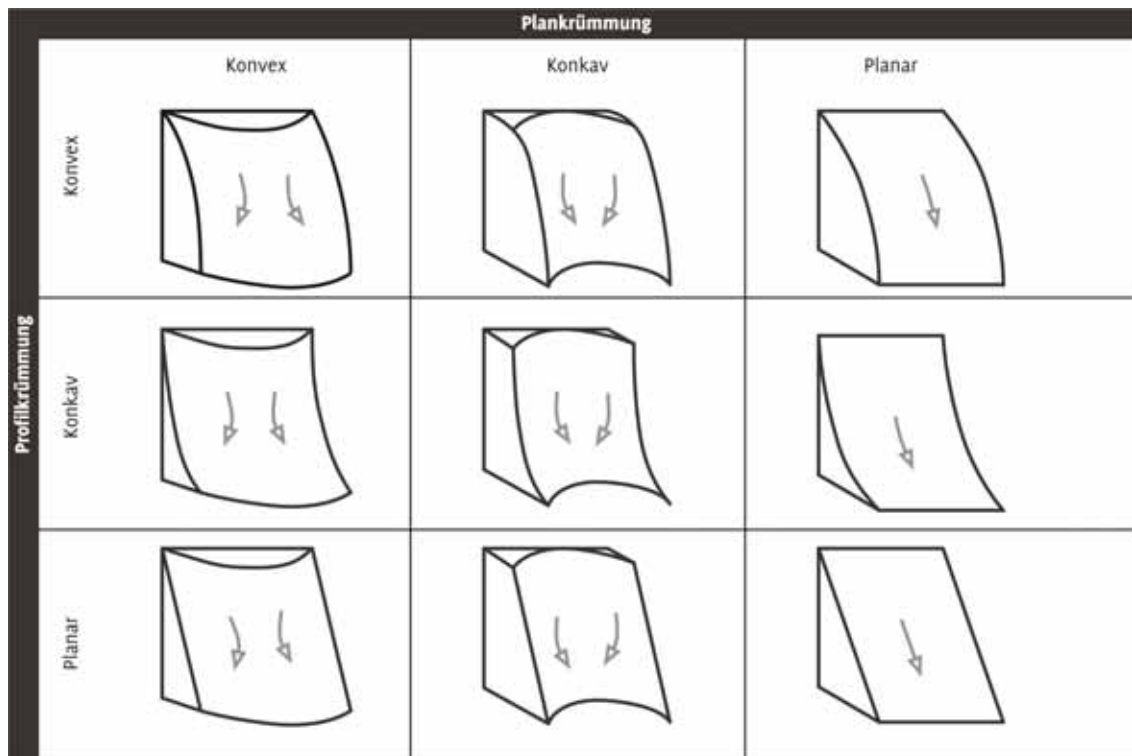


Abb. 14: Die aus der Plan- und Profilkurvatur abgeleiteten Landformen (Vertikal: Plankurvatur, Horizontal: Profilkurvatur) (nach PESCHIER, 1996; DIKAU, 1989)

Für die Berechnung der Krümmung wird für jede Zelle ein Polynom vierter Ordnung berechnet. Das Ergebnis dieser Funktion entspricht der zweiten Ableitung des digitalen Geländemodells (FRIEDRICH, 1996):

$$C = -2(D + E)$$

Formel 12

Die Einheit der Krümmung (C) entspricht im metrischen System 1/m (FRIEDRICH, 1996). Da ökologisch relevante Krümmungen jedoch häufig schon bei Werten um +/-0,0001 liegen (BEHRENS, 2003) wird vorgeschlagen, die Krümmung mit dem Faktor 100 zu multiplizieren (ZEVENBERGEN & THORNE, 1987).

Die Vorgehensweise hat sich bewährt, weshalb auch viele GIS-Programme (z.B. ArcGIS) diesen Multiplikationsfaktor bei der Krümmungsberechnung bereits berücksichtigen (BEHRENS, 2003).

Die Formel 12 ändert sich demnach wie folgt:

$$C = -2(D + E) * 100$$

Formel 13

Für die Beschreibung von Zusammenhängen mit bodenbildenden Prozessen wird meist auf die Profil Krümmung (C_{pr}) zurückgegriffen:

$$C_{pr} = -2 \frac{(DG^2 + EH^2 + FGH)}{(G^2 + H^2)} * 100$$

Formel 14

Ergänzend dazu die Plankurvatur (C_{pl}):

$$C_{pl} = -2 \frac{(DH^2 + EG^2 - FGH)}{(G^2 + H^2)} * 100$$

Formel 15

Diese Methode von ZEVENBERGEN & THORNE (1987) ist im Gegensatz zur Methode von EVANS (1980) zwar die mathematisch genauere, kann jedoch in Abhängigkeit von Qualität und Auflösung des verwendeten Höhenmodells Artefakte verursachen (BEHRENS, 2003). Aus diesem Grund kommt häufig die Methode von EVANS (1980) zur Anwendung, die in der Lage ist, durch Glättungseffekte diese Artefakte weitgehend zu exkludieren.

Ein an dieses Evans-Modell angepasstes System (Formel 16 und Formel 17) stammt von WOOD (1996), das mit dem GIS-Programm Landserf (siehe Kapitel 2.8.1) umgesetzt werden kann.

Die Profilkurvatur (CW_{pr}) sowie die Plankurvatur (CW_{pl}) nach WOOD (1996) errechnen sich wie folgt:

$$C_{pr} = -2 \frac{(DG^2 + EH^2 + FGH)}{((G^2 + H^2)(1 + G^2 + H^2)^{1,5})} * 100$$

Formel 16

$$CW_{pl} = 2 \frac{(DH^2 + EG^2 - FGH)}{(G^2 + H^2)^{1,5}} * 100$$

Formel 17

2.6.3. Relative Höhe

Die relative Höhe beschreibt die Höhenlage eines Punktes in Relation zu seinem unmittelbaren Umfeld und hat Einfluss auf Landschaftsprozesse wie Erosion, Akkumulation oder Wasserabfluss (MCDONALD ET AL., 1990).

Vor allem in alluvial entstandenen Gebieten kann davon ausgegangen werden, dass Bereiche mit großer relativer Höhe seichtgründigere Böden mit höherem Sandanteil beheimaten, während niedrige (negative) relative Höhen durch Anlagerungsprozesse tiefgründiger sind und höheren Feinanteil besitzen (STOLT ET AL., 2001).

Für die Berechnung wird neben der gemessenen Höhe an einem Punkt, die gemittelte Höhe für ein definiertes Vergleichsgebiet benötigt. Man bedient sich hierbei wie auch bei der Berechnung von Hangneigung und/oder Kurvatur fokaler Funktionen, die statistische Werte für jeden Punkt abhängig von seiner unmittelbaren Umgebung ermitteln, wobei das Berechnungsfenster (moving window) üblicherweise größer ist als 3x3 Zellen. Durch einfache Subtraktion der tatsächlichen Höhe von der gemittelten Höhe ergibt sich die relative Höhe.

Bei negativen Werten der relativen Höhe handelt es sich um Tieflagen, positive Werte bezeichnen Punkte, die höher als der sie umgebende Durchschnitt liegen. Liegen die Werte um Null, kann von ebenen Lagen ausgegangen werden.

Weiters kann die relative Höhe für die Definition von Landformen herangezogen werden, die Höhenklassen werden dabei je nach Größe und Form der Landschaft für die Landformenklassifikation genutzt.

Landform	Relative Höhe
Ebene	0-9 m
Hang	9-30 m
niedriger Hügel	30-90 m
Hügel	90-300 m
Berg	>300 m

Tab. 4: Definition von Landformen über die relative Höhe (McDONALD ET AL., 1990)

2.6.4. Exposition

Die Exposition (A=Aspect) bezeichnet die Ausrichtung eines Hanges und ist die Richtung des Gefälles ausgedrückt als Abweichung von der Nordrichtung (ZEVENBERGEN & THORNE, 1987; BURROUGH & McDONNELL, 1998). Die Exposition wird üblicherweise in Grad-Einheiten und im Uhrzeigersinn von 0-360° angegeben.

Konzeptionell betrachtet wird die Exposition durch Einpassung einer Ebene in die Höhenwerte eines 3x3-Zellen großen Fensters. Die Richtung der eingepassten Ebene bildet die Exposition der mittleren Zelle ab. Ebene Bereiche (Hangneigung ist 0) besitzen demnach keine Exposition.

$$A = 180 - \tan^{-1}\left(\frac{H}{G}\right) + 90\left(\frac{G}{|H|}\right)$$

Formel 18

Gemeinsam mit der Hangneigung beeinflusst die Exposition die auf einer Fläche auftretende Strahlungsmenge und somit weitere Faktoren wie etwa die Verdunstung am Boden (BRINKMANN, 2002).

Dies hat Auswirkungen auf die Vegetation, und damit auch auf die Bodenbildung (z.B. Humusmächtigkeit) (BRAUN-BLANQUET ET AL., 1960). Bei sinkender Hangneigung nimmt der Einfluss der Exposition ab.

Neben dem Einfluss auf den Strahlungshaushalt hat die Exposition auch Einfluss auf Erosionsprozesse durch Wind und kann so etwa für lokale Lössmächtigkeiten von großer Bedeutung sein (JANUS, 1988).

Der Einfluss der Exposition auf rezente Bodenbildungsprozesse ist eher gering, hatte aber im periglazialen Milieu der letzten Eiszeit eine größere Rolle (BRINKMANN, 2002).

2.6.5. Landformen

Landformen bzw. Geländeformen beschreiben die geomorphologische Ausprägung regionaler Landschaften oder lokalen Geländes.

Neben der rein visuellen Ausweisung von Landformen, wie sie beispielsweise bei Bodenaufnahmen direkt im Gelände erfolgt (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993), gibt es eine Reihe von automatisierten Methoden, die je nach Geländeform sowie Auflösung und Qualität des Höhenmodells unterschiedliche Ergebnisse liefern können. Die Methoden basieren auf Kurvaturklassifikationen, kombiniert mit Hangneigungsfunktionen und arbeiten häufig mit einem 3x3 Moving Window. Dabei treten

jedoch oft Fehler und Artefakte auf, weshalb einige Ansätze eine Vergrößerung des Fensters ermöglichen (WOOD, 1996) oder objekt-basierte Methoden kombiniert mit flexiblen Fuzzy-Funktionen (Nachbarschaftsfunktionen) anwenden (DRAGUT & BLASCHKE, 2006).

Geländeform	Beschreibung
Ebene	Flachform mit großer Ausdehnung
Verebnung	Flachform mit geringer Ausdehnung
Talboden, Talsohle	Flachform, die von ansteigenden Flächen begrenzt ist
Terrasse	Flachform, die einerseits von ansteigenden, andererseits von abfallenden Flächen begrenzt ist
Platte, Plateau	Flachform, die von abfallenden Flächen begrenzt ist
Mulde, Wanne	Konkavform mit rundem bis länglichem Grundriss
Graben	Konkavform mit langgezogenem Grundriss
Kuppe	Konvexform mit rundem Grundriss
Rücken, Riedel	Konvexform mit langgezogenem Grundriss
Schwemmfächer, Schuttkegel	flache Aufschüttungsform
Ober-, Mittel-, Unterhang	verschiedene Hangpositionen
Hangfuß	Übergang vom Hang in einer Flachform

Tab. 5: Geländeformen für bodenkundliche Erhebungen (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993)

Je nach Methode oder Einsatzzweck kann diese Landformenklassifikation (siehe Tab. 5) etwas variieren.

2.6.6. Topographischer Feuchtigkeitsindex

Der topographische Feuchtigkeitsindex (Topographic Wetness Index, TWI) wird, wie andere Indices auch, aus mehreren geomorphometrischen Reliefparametern ermittelt (BEHRENS, 2003). Beim topographischen Feuchtigkeitsindex, der aus dem hydrologischen Modell TOPMODEL (BEVEN & KIRBY, 1979) stammt, wird die Fließakkumulation eines Reliefs mit der Hangneigung gewichtet. Die Fließakkumulation beschreibt, auf ein Rastermodell bezogen, die Anzahl der Zellen, die in eine Zelle hineinfließen, und wird vielfach auch als Catchment Area bezeichnet (OLAYA, 2004). Der TWI zeigt die Tendenz einer Rasterzelle zum Oberflächenabfluss, und steht in einem engen Zusammenhang mit der Feuchte eines Bodens (OLAYA, 2004). Je höher der Wert des TWI, desto höher die Bodenfeuchte.

2.6.7. Bewirtschaftung und Verschleppung

Auch Anthropogene Tätigkeiten am und im Boden infolge von Bewirtschaftungstätigkeiten können Einfluss auf den Boden und dessen Bonität haben.

Eine Überprüfung der Bundesmusterstücke der Bodenschätzung in den Jahren 1994 bis 1996 hat gezeigt, dass nur in sehr wenigen Fällen eine Verminderung der Bodenfruchtbarkeit durch menschliche Tätigkeit nachgewiesen werden konnte. Die Bodenfruchtbarkeit blieb bei etwa der Hälfte der untersuchten Proben gleich, fast die Hälfte der Proben zeigte eine Verbesserung (NESTROY & GESSL, 1998).

Diese Verbesserungen sind auf folgenden Faktoren zurückzuführen (nach NESTROY & GESSL, 1998):

- Verbesserte Bodenbearbeitung durch tiefere Pflugarbeit
- Bessere Bearbeitbarkeit schwerer Böden durch stärkere Traktoren
- Verbesserung des Bodenwasserhaushaltes durch Bodenmelioration

Gleichzeitig führt die intensive landwirtschaftliche Bearbeitung aber auch zu Bodenverschlechterungen und Bodenverlusten. Eine der häufigsten Bodenbelastungen, die durch landwirtschaftliche Tätigkeit initiiert bzw. verstärkt wird, ist die Bodenerosion durch Wind und/oder Wasser (KUDERNA, 1999). Dazu kommt eine mögliche Bodenverschleppung durch Bearbeitungsmaschinen.

Dabei geht fruchtbarer Boden verloren, was einerseits zu verringerter Ertragsfähigkeit führt, und andererseits an anderer Stelle erhebliche Probleme durch Verunreinigungen (Straßen, Gebäude), Verfüllungen (Gräben, Kanäle) und Nährstoffeinträge in Gewässer verursacht (SCHMIDT, 2003). Über das tatsächliche Ausmaß der Bodenerosion in Österreich gibt es bislang keine Zahlen (UMWELTBUNDESAMT, 2007). Vor dem Hintergrund, dass die Bodenneubildung mit ca. 1 cm in 100 Jahren (GRAßL, 1997) nur sehr langsam erfolgt, sind Maßnahmen zur Verringerung bzw. Verhinderung der Bodenerosion von großer Bedeutung.



Abb. 15: Lössunterboden, der durch Pflugarbeit an die Oberfläche transportiert wird, und damit der Winderosion ausgesetzt ist.

Durch die maschinelle Feldbearbeitung kommt es zu Änderungen im Bodengefüge durch lokale Verdichtung (siehe auch Kapitel 5.2.4), was wiederum Einfluss auf den Wasserhaushalt und die Bodenorganismen hat. Dazu kommen Entwicklung und Einsatz immer stärkerer und damit auch schwererer Arbeitsmaschinen, wodurch die Bodenverdichtung weiter forciert wird (NESTROY & GESSL, 1998).

Neben der mechanischen Verdichtung durch Maschinen trägt auch die Düngung erheblich zur Verschlechterung des Bodens bei. Der teils massive Einsatz mineralischer Dünger führt zu Humusschwund und verringerter Aktivität der Bodenorganismen. Die Mikroorganismen können damit ihre Aufgabe beim Aufbau eines stabilen Bodengefüges nicht mehr wahrnehmen. Die dadurch vermehrt nötige mechanische Lockerung des Bodens stört die Bodenfauna zusätzlich und erzeugt kein stabiles Gefüge, wodurch wieder die Bodenverdichtung gefördert wird (BESTE, 2005).

2.7. Räumliche Interpolationsmodelle

*“Essentially,
all models are wrong
but some are useful”
(Box & DRAPER, 1987)*

Der Begriff *räumliche Interpolation* beschreibt die Berechnung (Schätzung) von Werten an unbeprobten Positionen auf Basis punktuell gemessener Datenpunkte (BURROUGH & McDONNELL, 1998). Ziel dabei ist es, aus Punktbeobachtungen kontinuierliche Oberflächen zu erzeugen.

Interpolationsmodelle können grundsätzlich in rein mathematische, *nicht-räumliche Modelle* und *geostatistische Modelle*, die auch Eigenschaften der räumlichen Variabilität der Messparameter enthalten, eingeteilt werden (SINOWSKI, 1995).

Zu den nicht-räumlichen deterministischen Modellen zählen beispielsweise verschiedene Spline-Modelle, aber auch multiple Regressionsmodelle, welche die Integration mehrerer Variablen zur Beschreibung einer Verteilung ermöglichen.

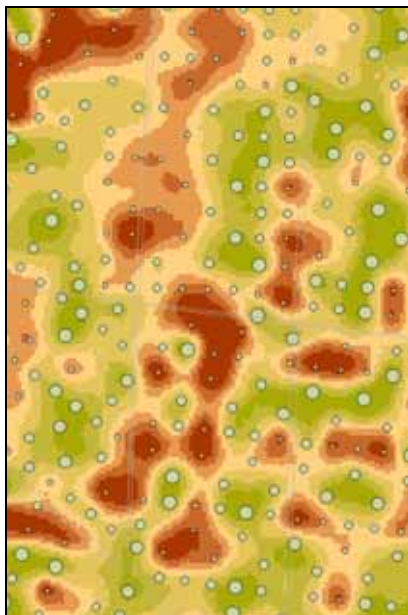


Abb. 16: Beispielbild einer interpolierten Karte (Aufgrund der feinen Abstufungen wird eine Genauigkeit suggeriert, die möglicherweise in dieser Form nicht gegeben ist)

Das Modell der inversen Distanzgewichtung nimmt einen Bereich zwischen nicht-räumlichen und geostatistischen Interpolationsmodellen ein, indem es die Daten zwar räumlich gewichtet, aber einem deterministischen Ansatz folgt.

Neben den nicht-räumlichen Modellen, die auf einem rein deterministischen Ansatz beruhen, reihen sich die stochastischen geostatistischen Modelle, die auf der Theorie der regionalisierten Variablen beruhen (SINOWSKI, 1995) (siehe Kapitel 2.7.2).

Einer der wichtigsten Anwendungsbereiche geostatistischer Modelle ist die räumliche Schätzung bzw. die räumliche Interpolation von Punktaufnahmen (HENGL, 2007).

Unabhängig von der verwendeten Methode sind interpolierte Karten generell kritisch zu betrachten, denn wie das Zitat am Beginn dieses Kapitels anmerkt sind alle Modelle falsch, die Frage ist also, wie falsch darf ein Modell sein um noch brauchbar zu sein (Box & DRAPER, 1987).

Es ist relativ einfach, mit interpolierten Daten ansprechende Karten zu produzieren, die sehr realistisch wirken und deshalb auf die Betrachter eine große Wirkung haben können (siehe).

Dabei sollte jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass Interpolationsmodelle meist große Datensätze sowie sorgfältig ausgewählte Variablen und Methoden erfordern, um tatsächlich zuverlässige und wissenschaftlich bewertbare Ergebnisse zu liefern (MERGILI ET AL., 2006).

Räumliche Probennahme

Die Auswahl der genauen geographischen Positionen für die Probennahme hat entscheidenden Einfluss auf die spätere Analyse/Interpolation der Daten. Idealerweise sind die Probennahmepunkte gleichmäßig über das gesamte Gebiet verteilt (BURROUGH & McDONNELL, 1998).

Bedingt durch Landschaftsstrukturen (z.B. Flüsse, Geländekanten) oder unterschiedliche räumliche Variabilität der aufzunehmenden Attribute, kann es nötig bzw. hilfreich sein, von dieser regelmäßigen Struktur abzuweichen, um etwa entlang von linearen Strukturen Werte aufnehmen.

In der Praxis häufig verwendet wird die geschichtete Probennahme, bei der zwar ein Raster vorgegeben wird, die Wahl des exakten Probennahmepunktes erfolgt innerhalb einer Rasterzelle dann mehr oder weniger beliebig (BURROUGH & McDONNELL, 1998).

Die Datenaufnahme der österreichischen Finanzbodenschätzung erfolgt grundsätzlich nach dem Prinzip der geschichteten Probennahme. Bedingt durch besondere Reliefformen kann diese Methode aber durchaus von einer Transekt- und/oder Konturaufnahme ersetzt bzw. ergänzt werden.

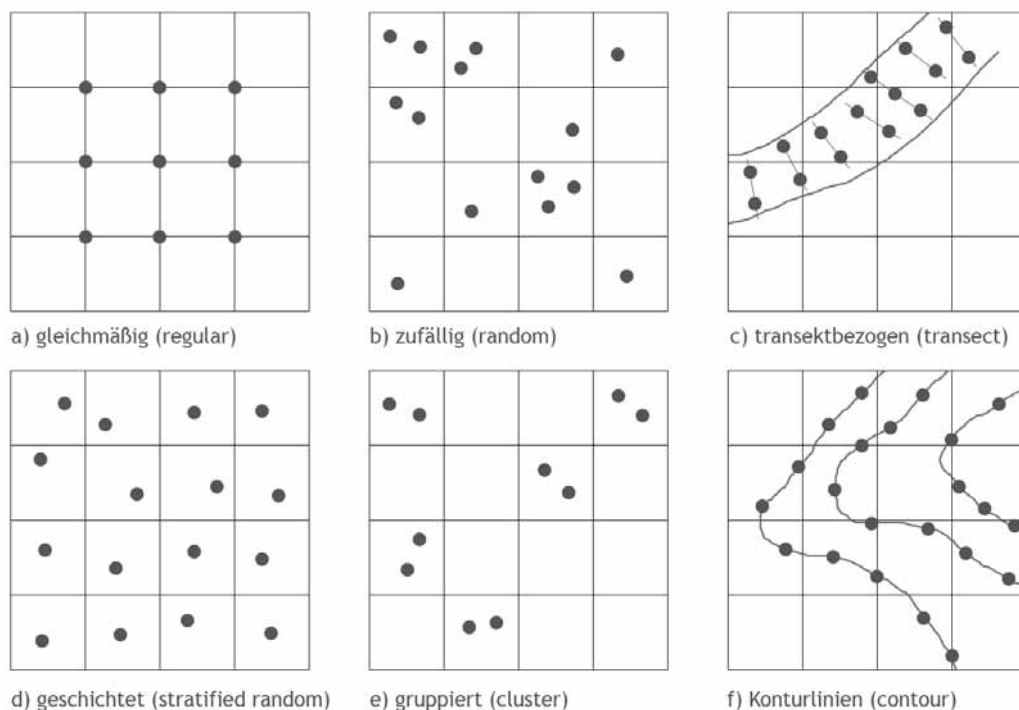


Abb. 17: Verschiedene Arten der Auswahl von Probennahmepunkten (nach BURROUGH & McDONNELL, 1998)

2.7.1. Datenanalyse und Interpolation auf Basis nichträumlicher Statistik

Auf Basis nicht-räumlicher statistischer Methoden können einerseits Aussagen über die Stichprobe in Form deskriptiver Statistiken (z.B. Verteilung, Mittelwert, Standardabweichung, etc.) ermittelt und

andererseits Zusammenhänge einzelner Reliefparameter, in Form von Korrelations- und Regressionsmodellen, analysiert werden. Diese Form der Datenanalyse stellt also einen wichtigen Schritt für die Auswahl der Modellparameter nachfolgender statistischer und geostatistischer Interpolationsmodelle dar.

Ein Regressionsmodell beschreibt darüber hinaus ein sehr flexibles, nicht-räumliches, statistisches Analyseverfahren (deterministisches Modell), das zum Ziel hat, die Beziehungen zwischen einer abhängigen und einer oder mehrerer unabhängigen Variablen festzustellen, bzw. Werte von abhängigen Variablen auf Basis einer oder mehrere unabhängiger Variablen zu schätzen (BACKHAUS ET AL., 2006).

Im einfachsten Fall geht man von einem linearen Zusammenhang aus und spricht dann von einem linearen Regressionsmodell. Bei diesem Modell wird die abhängige, zu erklärende Variable (z) durch einen linearen Zusammenhang mit der unabhängigen Variablen (x_i) beschrieben. Die Einflussgewichte werden aus den zu Verfügung stehenden Daten geschätzt.

Die Basisformel für eine lineare Regression lautet demnach:

$$z = a + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i + \varepsilon$$

Formel 19

a ... Regressionskonstante (Schnittpunkt mit der y-Achse)

b_i ... Regressionskoeffizienten

ε ... Residuum (beträgt im Mittel 0)

Für eine lineare Einfachregression, eine Regression mit nur einer unabhängigen Variable gilt also:

$$z = a + b \cdot x + \varepsilon$$

Formel 20

Lineare Regressionsmodelle bieten eine einfache Methode für die räumliche Schätzung mit Hilfe von Co-Variablen, und werden aus diesem Grund auch häufig eingesetzt (BRUS & HEUVELINK, 2007). Voraussetzung für die Regressionsanalyse ist, dass die unabhängigen Variablen eine metrische Skalierung aufweisen oder binär (zweiwertig) vorliegen (BACKHAUS ET AL., 2006).

Problematisch im Zusammenhang mit der Schätzung von Bodenkenngößen ist das häufig sehr geringe Bestimmtheitsmaß (R^2), bedingt durch hohe Streuungen der unabhängigen Eingangsvariablen (MERGILI ET AL., 2006).

Zusammenhänge zwischen zwei Variablen müssen nicht zwangsweise einen linearen Verlauf haben, sondern können auch polynomial sein. Bei Berücksichtigung von ausschließlich zwei Variablen lässt sich dies sehr leicht durch Betrachten des Streudiagramms erkennen (BACKHAUS ET AL., 2006).

Eine Überführung in einen linearen Zusammenhang ist dann durch Transformieren (z.B. logarithmische Transformation) der Eingangsvariablen möglich (BACKHAUS ET AL., 2006).

2.7.2. Geostatistische Interpolationsmodelle

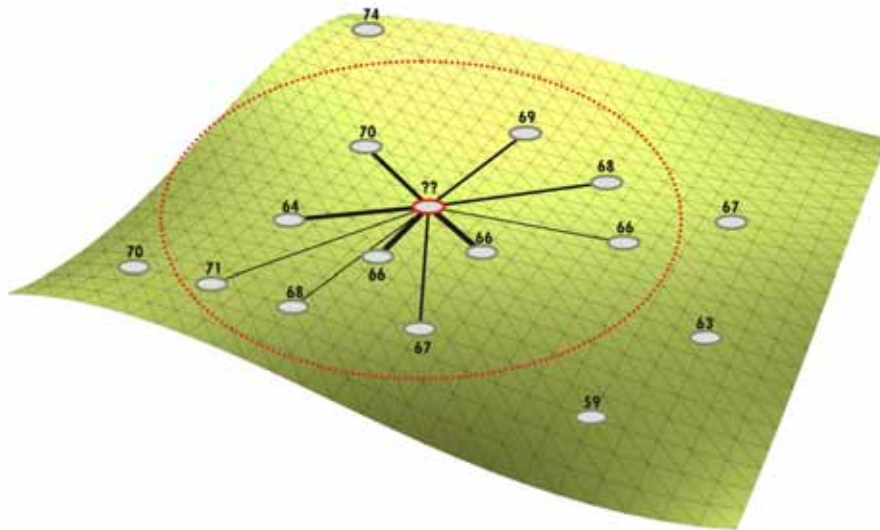
"Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things" (TOBLER, 1970)¹

Geostatistische Methoden gehen im Gegensatz zu deterministischen Interpolationsansätzen (siehe Kapitel 2.7.1) davon aus, dass die räumliche Variabilität eines Attributes häufig zu unregelmäßig ist, um mit einer einfachen mathematischen Funktion (z.B. Regressionsfunktion) beschrieben zu werden. Stattdessen versuchen geostatistische Modelle, die Variabilität mit Hilfe einer stochastischen Oberfläche (Zufallsfunktion) abzubilden (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

Das Grundprinzip einer Zufallsfunktion zeigte G. de Marsily praktisch am Beispiel eines mit Sand gefüllten Behälters. Im Rahmen der Präsentation seiner Dissertation (MARSILY, 1986), bezeichnete er den Inhalt des Behälters als poröses Medium. Nach einmaligem Schütteln bezeichnete er den Inhalt als ein weiteres poröses Medium, und illustrierte damit das Prinzip einer Zufallsfunktion auf mikroskopischer Ebene im drei-dimensionalen Raum – eine Anordnung einzelner Körner unterschiedlicher Form und Ausdehnung, die sich nach dem Schütteln des Behälters neu arrangieren (CHILES & DELFINER, 1999).

Der Begriff *Geostatistik* bzw. *geostatistische Methoden oder Modelle* wird grundsätzlich für jenen Bereich der angewandten Statistik verwendet, der von Georges Matheron (MATHERON, 1963) auf Basis der Arbeiten von Daniel Gerhardus Krige entwickelt wurde (KRIGE, 1951) und in vielen naturwissenschaftlichen Bereichen Anwendung findet (DAVIS, 1986).

Waren geostatistische Modelle im ursprünglichen Kontext ein Werkzeug für die statistische Analyse von Punktdaten, so können heute durch Einbeziehung externer Datensätze komplexe Zusammenhänge zwischen verschiedenen Variablen modelliert werden (HENGL, 2007).



¹ Zentrale Aussage des „First Law of Geography“ von Waldo Tobler (1970, S. 236).

Abb. 18: Schätzung eines Punktes unter Berücksichtigung gemessener Punkte in der Umgebung und Definition eines Suchradius

Bei geostatistischen Interpolationsmethoden wird der Wert eines Punktes an einer unbeprobten Position unter Berücksichtigung umliegender Messwerte (=regionalisierte Variablen) geschätzt. Nahe liegende Messpunkte haben dabei ein höheres Gewicht als weiter entfernte Messpositionen (dargestellt in Abb. 18 durch unterschiedliche Strichstärken), die Gewichte können auch negative Werte annehmen.

Regionalisierte Variablen bilden das Schlüsselkonzept geostatistischer Methoden und sind in ihren Eigenschaften zwischen reinen Zufallsvariablen und rein deterministischen Variablen angesiedelt (DAVIS, 1986).

Im Gegensatz zu reinen Zufallsvariablen besitzen regionalisierte Variablen eine Kontinuität zwischen zwei Punkten, deren Zusammenhänge jedoch so komplex sind, dass sie mit deterministischen Funktionen nicht steuerbar sind (DAVIS, 1986). Die Theorie der regionalisierten Variablen basiert auf der Annahme, dass sich die räumliche Variabilität eines Attributes aus drei Hauptkomponenten (siehe Abb. 19) zusammensetzt (BURROUGH & McDONNELL, 1998).

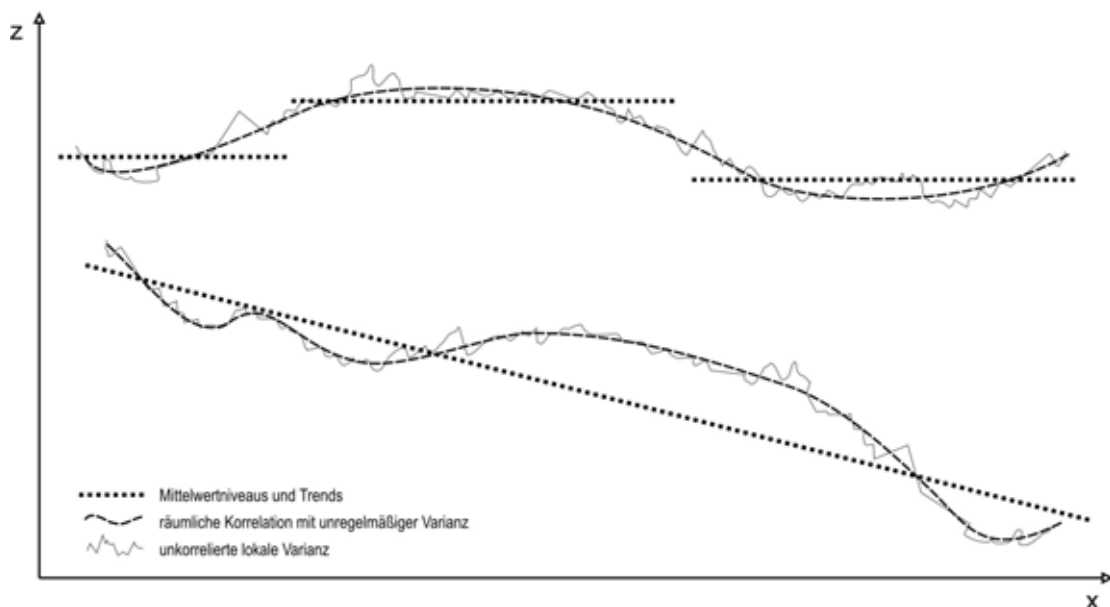


Abb. 19: Komponenten der Theorie der regionalisierten Variablen: Mittelwertniveaus (oben) bzw. Trends (unten), räumlich korrelierte aber unregelmäßigen (zufällige) Varianzen sowie unkorrelierte lokale Varianzen bedingt durch Messungenauigkeiten und kleinräumigen Variationen (nach BURROUGH & McDONNELL, 1998)

Auf Basis dieser Komponenten wird mit Hilfe eines theoretischen Variogramms (siehe Abb. 20) die Gewichtung der einzelnen Messpunkte zur Bestimmung des Wertes an einer unbeprobten Position ermittelt. Durch Festlegung eines Suchradius kann die maximale Distanz für eine räumliche Autokorrelation definiert werden. Damit werden nur Punkte innerhalb einer definierten Entfernung berücksichtigt (siehe Abb. 18). Kommt kein Suchradius zur Anwendung, spricht man von einer globalen Interpolationsfunktion.

Bei Verwendung eines Suchradius sind grundsätzlich zwei Modelle zu unterscheiden - das lokalisierte und das lokale Modell.

Während das lokalisierte Modell lediglich eine rechentechnische Vereinfachung, verbunden mit einer signifikanten Verringerung der Rechenzeit, darstellt, indem für die Berechnung einer globalen Funktion

nur die Punkte in einem definierten Suchradius herangezogen werden, bedeutet ein lokales Modell, dass in Abhängigkeit vom Suchradius das Variogramm lokal angepasst wird (HENGEL, 2007). Lokale Modelle können also der Nicht-Stationarität von Variogrammen Rechnung tragen (HAAS, 1990).

Geostatistische Interpolationsmodelle werden häufig unter dem Sammelbegriff „Kriging“ subsumiert (HOFFMANN, 2002; HENGEL, 2007), wobei sich Kriging in verschiedene stochastische Ansätze unterteilen lässt, die, abhängig von Fragestellung und Datenstruktur, unterschiedliche Ergebnisse liefern. Darüber hinaus werden ständig neue Ansätze entwickelt, die meist auf einer Kombination mehrerer statistischer und/oder geostatistischer Methoden beruhen und dann entsprechend benannt werden.

Unabhängig vom Kriging-Modell basieren geostatistische Methoden auf folgendem Ansatz:

$$Z(x) = \mu + E(x) \quad \text{Formel 21}$$

wobei $Z(x)$ die zu interpolierende Variable, μ den Mittelwert (=Trend) und $E(x)$ die räumlich autokorrelierten Fehlerresiduen repräsentieren (WACKERNAGEL, 2003).

Im Vergleich zu nicht-räumlichen Interpolationsmodellen ermöglicht der Kriging-Ansatz die Einbeziehung räumlicher Nachbarschaftsbeziehungen (räumliche Auto-Korrelation). Angaben über diese räumliche Auto-Korrelation werden mit Hilfe eines Semivariogramms ermittelt, welches wie folgt beschrieben wird:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \sum [(z(s) - z(s+h))^2] \quad \text{Formel 22}$$

Dabei ist $z(s)$ der Messwert an einer Position und $z(s+h)$ ein Messwert mit der Entfernung h zum Punkt $z(s)$. Die Semivarianz ist demnach eine Entfernungsfunktion, welche die Hälfte der quadrierten Differenz zwischen den Werten an zwei Positionen darstellt.

Die Darstellung der Semivarianzen erfolgt üblicherweise mit Hilfe eines Variogramms (siehe Abb. 20), das einen visuellen Überblick über die räumliche Autokorrelation gibt und so die Anpassung des theoretischen Semivariogramms ermöglicht.

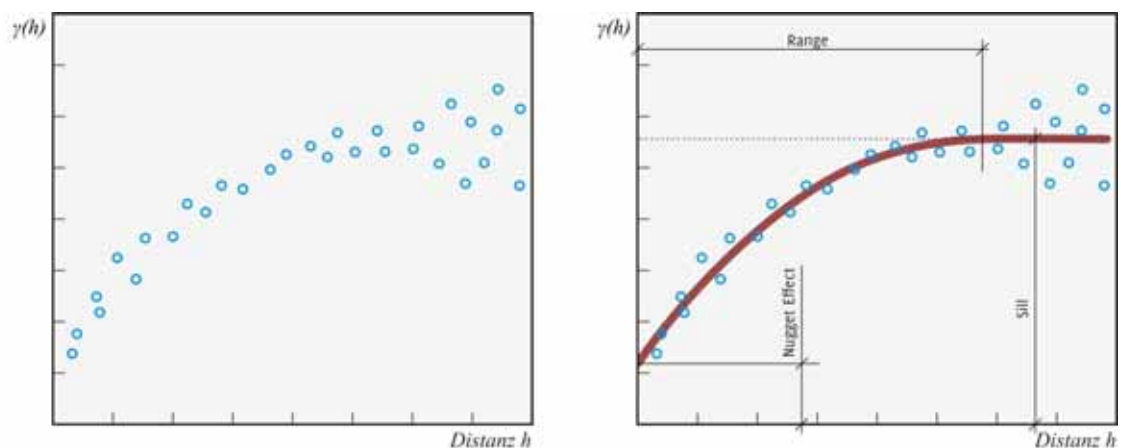


Abb. 20: Experimentelles und theoretisches Semivariogramm (nach WACKERNAGEL, 2003)

Am theoretischen Semivariogramm sind drei Parameter abzulesen.

Range gibt den Einflussbereich (Entfernung) der Autokorrelation an,

Sill bezeichnet die maximal zu erreichende erklärbare Varianz. Die Semivarianz erreicht an dieser Position den Wert der Varianz (DAVIS, 1986)

Nugget Effect beschreibt die zufällige Streuung im unmittelbaren Nahbereich der Messpunkte (z.B. durch Messfehler).

Die räumliche Autokorrelation - die Korrelation einer Variable mit sich selbst innerhalb eines Raumes - nimmt mit zunehmender Semivarianz ab und ist mit Erreichen des Sill-Wertes nicht mehr erklärbar. Der Einfluss der räumlichen Autokorrelation reicht also bis zur Range-Entfernung (siehe Abb. 20).

Grundsätzlich sind drei Ausprägungen für die räumliche Autokorrelation möglich:

- Eine positive Autokorrelation liegt vor, wenn gleiche oder ähnliche Werte benachbart liegen.
- Die negative Autokorrelation beschreibt den Umstand, wenn sowohl hohe, als auch niedrige Werte gleichzeitig in unmittelbarer Nachbarschaft liegen.
- Liegt keine Autokorrelation vor, so sind die Werte räumlich betrachtet unabhängig voneinander. Hohe und niedrige Werte liegen daher zufällig verteilt nebeneinander. Im theoretischen Semivariogramm wird dies durch eine de facto vollkommen horizontale Linie angezeigt. Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom „Pure nugget effect“ (siehe Abb. 21), da weder Range noch Sill eine entsprechende Ausprägung besitzen. Das theoretische Variogramm entspricht dann einer horizontalen Linie.

Die Anpassung des theoretischen Variogramms an das experimentelle Variogramm ist grundsätzlich ein „Trial & Error“-Prozess und erfolgt vielfach manuell durch eine rein optische Anpassung der Kurve an die Messpunkteverteilung (DAVIS, 1986). GIS- und/oder Statistik-Programme besitzen zwar häufig automatische Anpassungsalgorithmen, in Abhängigkeit der Eingangsdaten besteht dennoch häufig ein manueller Anpassungs- bzw. Korrekturbedarf.

Für die Anpassung des theoretischen Semivariogramms stehen verschiedenen Modellansätze zur Verfügung, die jedoch nicht zwangsweise in Statistik-/Geostatistikprogrammen implementiert sein müssen. Die gebräuchlichsten werden in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

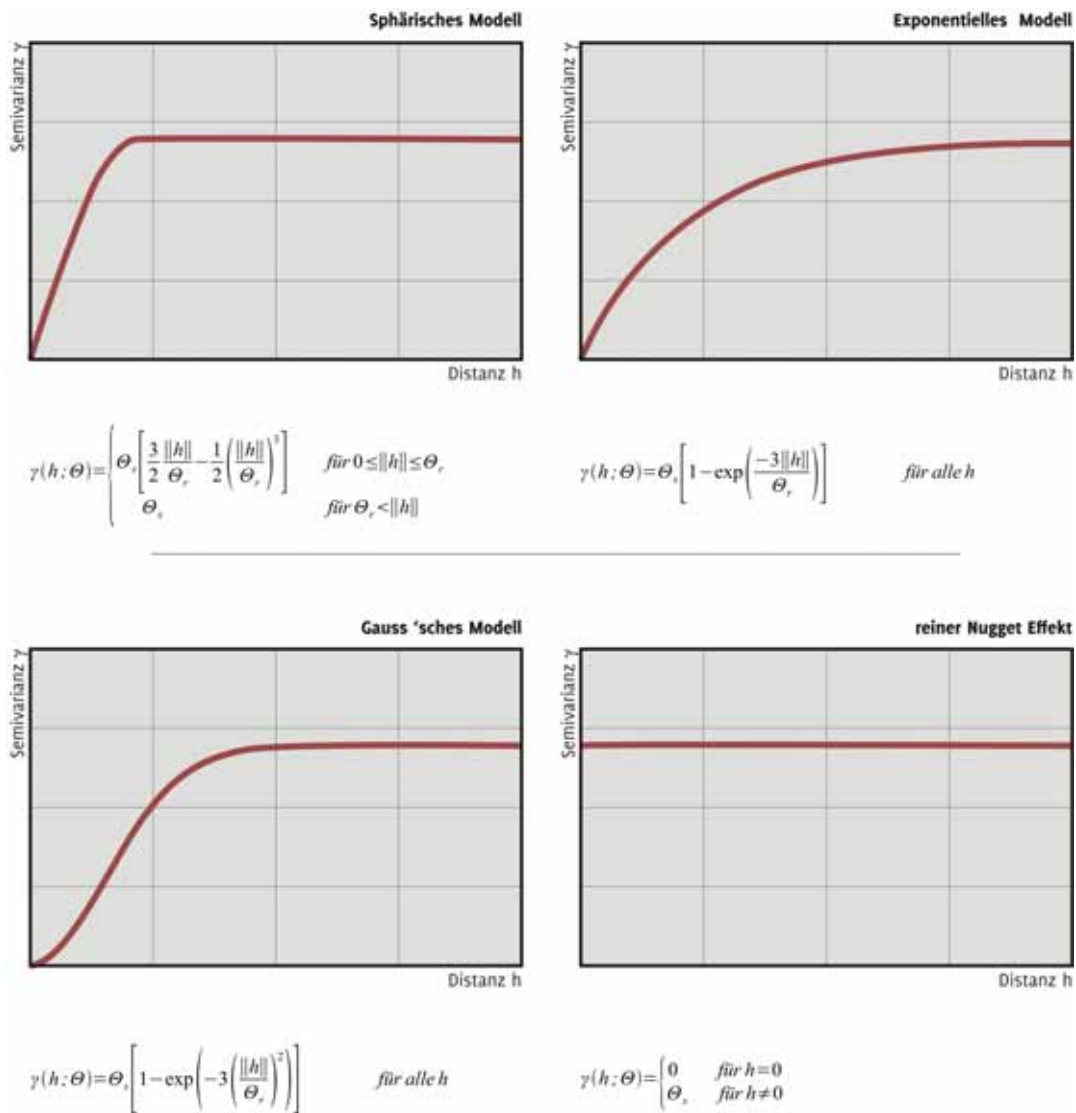


Abb. 21: Verschiedene gebräuchliche Semivariogrammmodelle (nach WACKERNAGEL, 2003 und JOHNSTON ET AL., 2001)

γSemivarianz

hDistanz

Θ_sSill Parameter

Θ_rRange Parameter

Neben dem Semivariogramm als Zeiger für die räumliche Autokorrelation kann für das Kriging-Modell auch die Kovarianz (Covariance) berechnet werden, die dem gespiegelten Semivariogramm entspricht und eine skalierte Korrelation abbildet (siehe Abb. 22). Dem klassischen Modell der positiven räumlichen Autokorrelation folgend kann für nahe liegende Werte angenommen werden, dass sie einander ähnlich sind. Die Korrelation zwischen den beiden Werten ist also hoch. Je weiter die Punkte voneinander entfernt liegen, desto unähnlicher sind die Werte, und die Korrelation geht gegen Null.

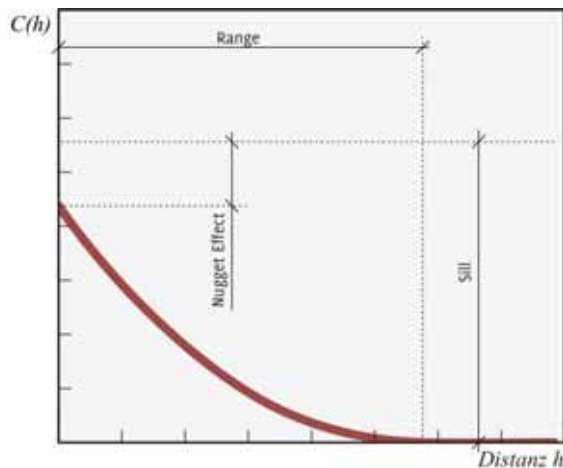


Abb. 22: Theoretisches Kovarianz-Diagramm

Der formale Zusammenhang zwischen Semivarianz $\gamma(h; \theta)$ und Kovarianz $C(h; \theta)$ lässt sich wie folgt beschreiben:

$$C(h; \theta) = \gamma(\infty; \theta) - \gamma(0; \theta) \quad \text{und} \quad \gamma(0; \theta) = C(0; \theta) - C(h; \theta) \quad \text{Formel: 23}$$

Inverse Distanzgewichtung

Die inverse Distanzgewichtung berücksichtigt zwar den Abstand eines Punktes als räumliche Komponente zur Interpolation, ist aber formal betrachtet kein Geostatistik-Modell, da es im Gegensatz zu Kriging-Modellen einem rein deterministischen Ansatz folgt (keine Variogramm-Modellierung). Ein zu berechnender Punkt ist dabei einem umliegenden Messpunkt mit bekanntem Wert umso ähnlicher, je näher dieser Punkt zur Berechnungsposition liegt. Dazu wird für einen zu interpolierenden Punkt die Distanz zu den umliegenden Messpunkten ermittelt. Der Wert des gesuchten Punktes ergibt sich als Mittelwert der umliegenden Punkte, die mit dem Kehrwert der Distanzen ($1/d$) gewichtet werden (BURROUGH & McDONNELL, 1998).

Die Interpolation erfolgt entsprechend der nachstehenden Formel:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n z(x_i) \cdot d_{ij}^{-r} \quad \text{Formel 24}$$

X_jInterpolationspunkte

X_igemessene Punkte

d_{ij}Distanz zwischen Interpolations- und Messpunkt

Die Methode der inversen Distanzgewichtung besitzt keine Funktion zum Testen der Interpolation. Die Qualität der interpolierten Karte kann nur durch Aufnahme zusätzlicher Kontrollmesspunkte überprüft werden (BURROUGH & McDONNELL, 1998).

Die inverse Distanzgewichtung kann auch mit einem Exponentialfaktor (=Power) berechnet werden, und so das Modell unter Umständen signifikant verbessern. Dieser optimale Exponentialfaktor kann jedoch nicht a priori, sondern nur durch Testen (Trial & Error) ermittelt werden (ROBINSON & METTERNICHT, 2005).

Simple Kriging

Simple Kriging ist ein Kriging-Verfahren, das bei bekanntem Mittelwert μ der Schätzvariable angewendet werden kann. Simple Kriging setzt voraus, dass die zu interpolierenden Variable stationär ist, das heißt, dass die Mittelwerte der Daten an allen Positionen des untersuchten Gebietes gleich sind (WACKERNAGEL, 2003).

$$Z(x) = \mu + E(x)$$

Formel 25

Für Simple Kriging wie auch für Ordinary Kriging (siehe unten) wird häufig auch nur der Begriff Kriging verwendet, der seinerseits aber wie bereits erläutert auch als Oberbegriff für stochastische (geostatistische) Interpolationsverfahren verwendet wird.

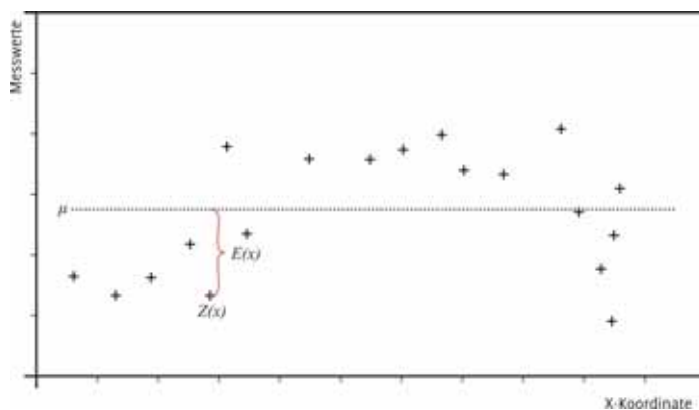


Abb. 23: Darstellung von Probenpunkten in einer Raumdimension mit dem Mittelwert μ und dem Schätzfehler $E(x)$ (nach JOHNSTON ET AL., 2001)

Ordinary Kriging

Ordinary Kriging verfolgt grundsätzlich den gleichen Ansatz wie Simple Kriging (siehe Abb. 23). Im Gegensatz zu Simple Kriging ist bei *Ordinary Kriging* der Mittelwert μ der Schätzvariable jedoch nicht bekannt. Stationarität der Zielvariable ist wie beim Simple Kriging aber ebenfalls Voraussetzung.

$$Z(x) = \mu + E(x)$$

Formel 26

Das *Ordinary Kriging* wird häufig auch mit dem Akronym B.L.U.E. („best linear unbiased estimator“) (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989) oder B.L.U.P. („best linear unbiased prediction“) (FORTIN ET AL., 2002) in Verbindung gebracht. *Linear*, da der Schätzer eine gewichtete lineare Funktion der Eingangsdaten ist. Die Funktion ist *erwartungstreu* (unbiased), da versucht wird, den Fehler bzw. den Mittelwert der Residuen gleich Null zu setzen. Die Bezeichnung „Best“ beruht darauf, dass die Fehlervarianz minimal ist (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

In der Praxis ist eine solche Erwartung allerdings nur selten erfüllbar, da in der Regel weder der Schätzfehler noch die Varianz dieses Fehlers bekannt ist. So kann in der Praxis nicht garantiert werden, dass der Fehler gleich Null ist. Der Fehler kann häufig auch nicht minimiert werden, da die Varianz des Fehlers unbekannt ist (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

Ein Vorteil von Ordinary Kriging (und Simple Kriging) ist die vergleichsweise einfache Handhabung des Modells und die vielfältige Integration in GIS-Programmen (HENGL ET AL., 2007; siehe auch Kapitel 2.8).

Cokriging

Im Gegensatz zu Simple Kriging oder Ordinary Kriging, deren Modelle ausschließlich auf einer Variable basieren, können mit Hilfe von Cokriging zusätzliche Variablen (sekundäre Variablen), die mit der primären Variable über eine räumliche Kreuzkorrelation (Cross-Correlation) in Beziehung stehen, in das Modell integriert werden. Damit kann die Interpolation verfeinert und die Varianz des Schätzfehlers verringert werden (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

Somit handelt es sich bei Cokriging um eine Erweiterung des Kriging-Ansatzes, der sehr vielfältig einsetzbar ist, wenn neben der primären Schätzvariable sekundäre Daten (Covariate) verfügbar sind (TRIANTAFILIS ET AL., 2001).

Voraussetzung für die sekundären Daten ist eine höhere Probennahmedichte sowie eine Korrelation der Daten mit der primären Schätzvariable (KNOTTERS ET AL., 1995).

Die Methode kann zum Einsatz kommen, wenn zwei oder mehrere Variablen im Raum korrelieren und sich in ihrer Probendichte unterscheiden oder die Variablen über eine Summengleichung (z.B. $A = VAR_1 - VAR_2$) miteinander korrelieren (SINOWSKI, 1995). Cokriging ist besonders dann sehr gut einsetzbar, wenn eine Zusatzvariable in hoher Dichte vorhanden ist und stark mit der abhängigen Variable korreliert (STEIN & CORSTEN, 1991).

Für die Auswahl der sekundären Co-Variablen bezieht man sich entweder auf theoretisches Wissen über die Zusammenhänge zwischen zwei Variablen oder man untersucht die Zusammenhänge empirisch mit Hilfe von Streudiagrammen und Kreuz-Variogrammen (ROSSITER, 2007).

Im Gegensatz zum Simple Kriging und Ordinary Kriging Ansatz ist beim Cokriging mit erhöhtem Anpassungsbedarf zu rechnen, da neben der Semivarianz auch die Kreuz-Korrelationen angepasst werden müssen.

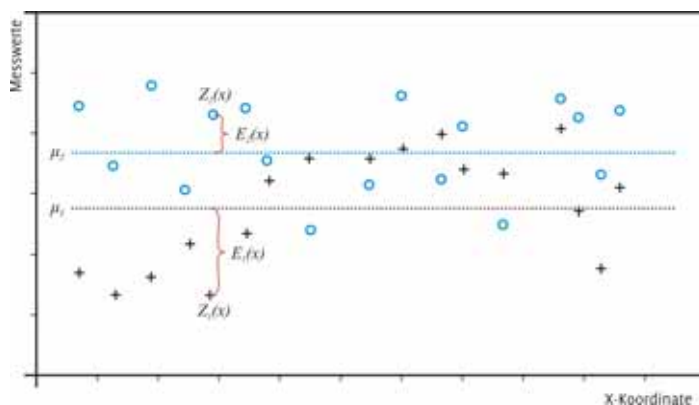


Abb. 24: Darstellung von Probenpunkten zweier Stichproben in einer Raumdimension mit dem Mittelwerten μ_1, μ_2 und den jeweiligen Schätzfehlern $E_1(x)$ und $E_2(x)$ (nach JOHNSTON ET AL., 2001)

Eine Kreuz-Korrelation - die Kontinuität zwischen zwei Variablen (cross-continuity) - wird mit Hilfe eines Kreuz-Variogramms (Cross-Variogramm) beschrieben, welches nach dem gleichen Prinzip wie ein Semivariogramm (siehe Kapitel 2.7.2) für eine Variable funktioniert und den Zusammenhang zwischen zwei Variablen beschreibt (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989). Wie beim Variogramm handelt es sich um eine Entfernungsfunktion, welche die Varianz der Differenz zwischen zwei Variablen an zwei beprobten Positionen darstellt (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989). Die Definition des theoretischen Cross-Variogramm erfolgt analog über Nugget, Sill und Range.

Die nachfolgende Formel (Formel 27) beschreibt ein Cokriging-System für zwei Variablen. Es zeigt sich eine lineare Kombination der primären Schätzvariable mit den sekundären Daten (GOOVAERTS, 1999).

$$\hat{u}_0 = \sum_{i=1}^n a_i \cdot u_i + \sum_{j=1}^m b_j \cdot v_j$$

Formel 27

U_0 : Schätzung der Variable U am Ort o

$u_1, \dots, u_n$: Primärvariablen an n Positionen

$v_1, \dots, v_m$: Sekundärdaten an m Positionen

$a_1, \dots, a_n; b_1, \dots, b_m$: Cokriging-Gewichte

Das Cokriging-Modell erfordert das gleichzeitige Modellieren des Variogramms sowie der Cross-Variogramme, was besonders bei einer großen Anzahl an Co-Variablen sehr zeitintensiv sein kann (HENGL ET AL., 2007).

Eine Verbesserung der Interpolation gegenüber Verfahren, die nur auf einer Variable beruhen, kann mit Cokriging nur dann erreicht werden, wenn auch entsprechende Zusammenhänge zwischen primärer und sekundärer/sekundären Variable/n bestehen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, entsprechende Korrelationsanalysen im Vorfeld durchzuführen (siehe Kapitel 2.7.1).

Im Zusammenhang mit der Modellierung von Bodeneigenschaften wird für die Erstellung sekundärer Hilfsvariablen meist auf digitale Höhenmodelle und deren Ableitungen zurückgegriffen, da diese sehr gut in GIS-Systemen verarbeitet werden können und die Boden-Landschaftsbeziehungen gut beschreiben (ZIADAT, 2005; BEHRENS, 2003).

Cokriging wurde grundsätzlich für die Verwendung externer Variablen entwickelt, die ebenfalls als Punktinformationen vorliegen also räumlich betrachtet nicht vollständig erhoben wurden (KNOTTERS ET AL., 1995), es kann aber auch natürlich auch für flächendeckend vorliegende Datensätze verwendet werden, wie das bei digitalen Geländemodellen der Fall ist

Universal Kriging, Kriging with external Drift

Die vom französischen Mathematiker Matheron (MATHERON, 1969) entwickelte Interpolationsmethode *Universal Kriging* (*Le krigeage universel*) ist eine Technik, die sowohl die Korrelation mit zusätzlichen Datensätzen als auch die räumliche Korrelation berücksichtigt (HENGL ET AL., 2004). Universal Kriging ist eine gebräuchliche Methode, um Trends in der Verteilung einer Variable zu berücksichtigen (ODEH ET AL., 2001).

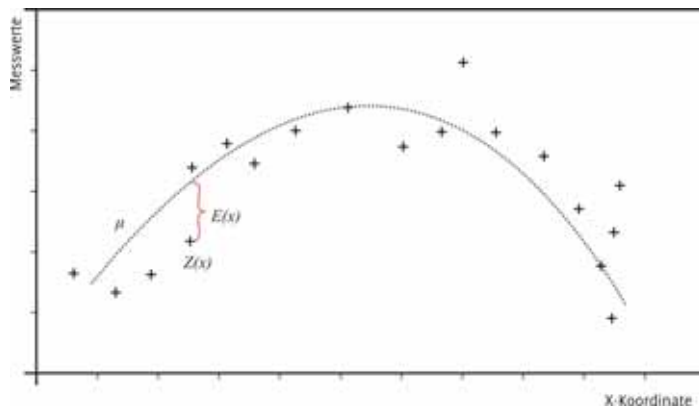


Abb. 25: Darstellung von Probenpunkten einer Stichprobe in einer Raumdimension mit dem Mittelwert μ als polynomiale Trendfunktion zweiter Ordnung und dem Schätzfehler $E(x)$ (nach Johnston et al., 2001)

Geostatistische Modelle wie Simple Kriging oder Ordinary Kriging setzen voraus, dass die zu interpolierende Variable stationär ist (siehe weiter oben). Trifft diese Voraussetzung nicht zu, weil ein Trend im Datensatz vorliegt, muss dieser Trend als polynomiale Funktion modelliert werden (HOFFMANN, 2002). Dies kann mit Hilfe von *Universal Kriging* oder *Kriging with external Drift* umgesetzt werden.

Universal Kriging und *Kriging with external Drift* nutzen für die Modellierung des Trends eine deterministische Funktion, auf der dann die stochastische Kriging-Funktion aufsetzt (HENGL, 2007).

Die terminologische Abgrenzung des *Universal Kriging* zu anderen Kriging-Methoden ist etwas problematisch, da hier eine Vielzahl verschiedener Begriffe und Definitionen existieren, die aber grundsätzlich äquivalent zu verwenden sind (HENGL ET AL., 2003; HENGL ET AL., 2004).

Die nachfolgende Abgrenzung verschiedener Methoden basiert auf Zitaten aktueller Publikationen aus dem Bereich der Geostatistik. Es ist jedoch anzumerken, dass diese Abgrenzungen weder standardisiert noch normiert sind, also durchaus auch andere Definitionen zu finden sind.

Universal Kriging (UK) bezeichnet eine Methode, die den Trend einer Variable aus dieser selbst, ohne Zuhilfenahme externer Variablen, modelliert (WACKERNAGEL, 2003)

Kriging with external drift (KED) berücksichtigt zusätzliche unabhängige (externe) Variablen zur Modellierung des Trends (CHILES & DELFINER, 1999).

Anzuführen ist hier auch noch das *Regression Kriging* (RK), das für die deterministische Modellierung sowohl Regressionsmodelle (ODEH ET AL., 1995; HENGL ET AL., 2004) als auch Regressionsbäume (MCBRATNEY ET AL., 2001, LAMSAL ET AL., 2006) integrieren kann (siehe unten).

Regression Kriging

Regression Kriging ist eine räumliche Interpolationsmethode, die ein (multiples) Regressionsmodell einer abhängigen Variable mit einem Kriging der Regressionsresiduen kombiniert (ODEH ET AL., 1995; HENGL ET AL., 2004). Die Beziehung zwischen der abhängigen Zielvariable und den zusätzlichen Variablen wird demnach über ein Regressionsmodell beschrieben (KNOTTERS ET AL., 1995).

Mathematisch entspricht es den Interpolationsmethoden *Universal Kriging* bzw. *Kriging with External Drift* (siehe oben), wobei dort die Hilfsvariablen direkt verwendet werden um die Kriging-Gewichte zu

ermitteln, während beim *Regression Kriging* die Residuen der Regression von der(den) abhängigen Variable(n) mit den Hilfsvariablen für das Kriging verwendet werden (HENGL ET AL., 2004).

Wie beim *Universal Kriging* bzw. *Kriging with External Drift* ist Stationarität keine Grundvoraussetzung für die zu interpolierende abhängige Zielvariable. Dies gilt jedoch nicht für die Residuen des Regressionsmodells, diese müssen stationär sein (HENGL, 2007).

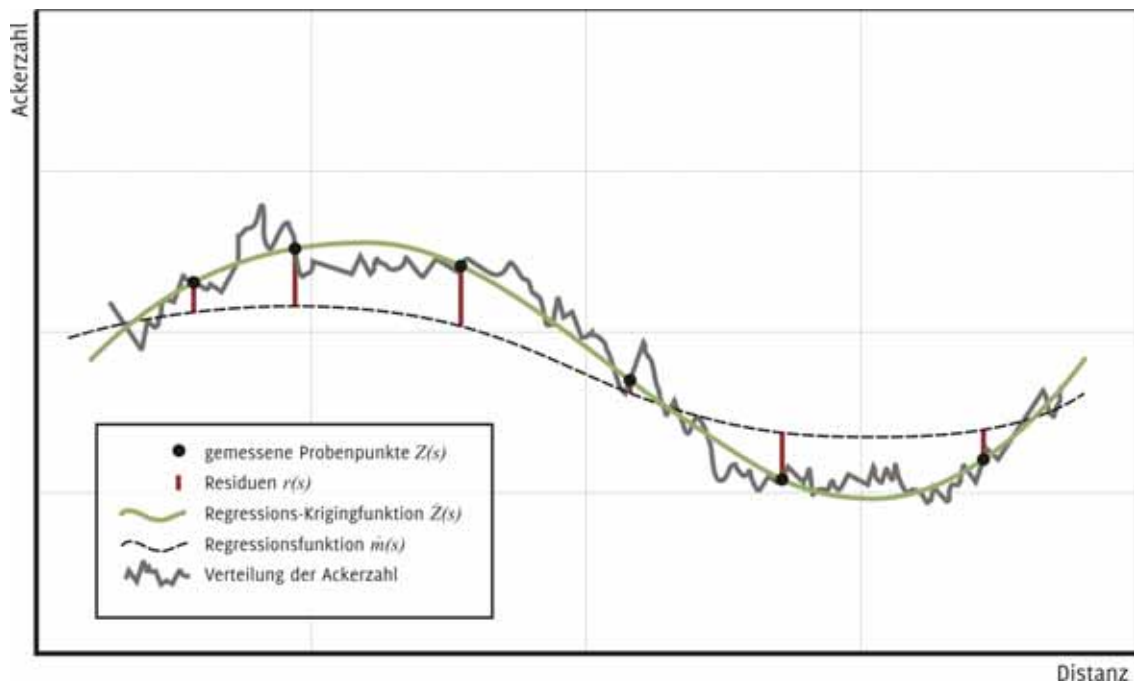


Abb. 26: Modell des Regression Kriging am Beispiel eines Querprofils und der Bodenvariable Ackerzahl (nach HENGL ET AL., 2004)

Beim *Regression Kriging* wird im ersten Schritt ein Regressionsmodell mit Hilfe externer Variablen ermittelt. Die daraus ermittelten Residuen werden anschließend mit Hilfe eines Simple Kriging (bei gegebenen Mittelwert = 0) bzw. Ordinary Kriging interpoliert und mit dem Regressionsmodell über eine einfache Addition kombiniert.

Der Vorteil von Regression Kriging gegenüber anderen Methoden ist, dass eine Vielzahl von Regressionstechniken (lineare Regression, logistische Regression, Regressionsbäume, etc.) zur Verfügung steht, die eine bestmögliche Anpassung gewährleisten, und dass eine separate Interpretation der beiden Interpolationskomponenten (Regressions- und Kriging-Modell) ermöglicht wird (HENGL ET AL., 2007).

Liegen die externen Hilfsvariablen flächendeckend vor (z.B. bei Verwendung eines digitalen Geländemodells), liefert *Regression Kriging* tendenziell bessere Ergebnisse gegenüber *Cokriging*, wenngleich es von dieser Regel datenabhängige Ausnahmen geben kann (GOOVAERTS, 1999; XU ET AL., 1992).

2.7.3. Methodenübersicht und Vergleich

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 6) zeigt einen Vergleich unterschiedlicher Interpolationsmodelle:

Deterministisch/ Stochastisch	Einbindung sekundärer Daten möglich	Lokal/ Global	Übergänge diskret/ graduell	Exakter Interpolator	Einschränkungen	Anwendung	Rechen- zeit	Annahmen des Interpolations- modells
Regressionsmodell								
Deterministisch	+	Global, lokale Optimierungen möglich	Graduell wenn Eingangs- parameter graduell	-	stark abhängig von der Passgenauigkeit des Regressionsmodells sowie Qualität der Eingangsdaten	Untersuchung von Zusammen- hängen. Interpolation mit vielen Sekundärdaten	gering	phänomenologische Erklärung des Regressionsmodells
Inverse Distanzgewichtung								
Deterministisch	-	Lokal	Graduell	+/-	Keine Informationen über den Fehler; Ergebnis abhängig von der Größe des Suchradius	Schnelle Interpolation von Daten mit geringer Probendichte	gering	die zu interpolierenden Oberfläche besitzt graduellen Übergängen
Kriging								
Stochastisch	+/-	Lokal	Graduell	+/-	Nicht alle Methoden liefern Informationen über den Fehler. Aufwändig in der Anwendung	Interpolation von Daten mit räumlicher Autokorrelation	mittel bis hoch	Die zu interpolierende Oberfläche besitzt graduelle Übergänge. Daten sind stationär. (Ausnahme: Universal Kriging)

Tab. 6: Methodenübersicht (nach BURROUGH & McDONNELL, 1998)

2.8. Software

Geostatistische und statistische Analysen sowie Interpolationsmodelle sind bislang in keinem Softwarepaket zur Gänze abgebildet (HENGL ET AL., 2007). Aus diesem Grund ist es im Rahmen geostatistischen Modellierens häufig notwendig, für verschiedene Arbeitsschritte unterschiedliche Softwarepakete einzusetzen. Nachfolgend werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Programme hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten beschrieben.

2.8.1. Landserf

Landserf (aktuelle Version 2.2, Stand 01/2008, 2.3 als Beta-Version verfügbar) ist eine JAVA-basierte, plattformunabhängige GIS-Applikation, die als freie Software (Freeware) über das Internet kostenlos¹ bezogen werden kann. Voraussetzung für den Betrieb ist eine JAVA-Installation². Das Programm kann sowohl Raster- als auch Vektorformate verarbeiten und unterstützt gängige Datenaustauschformate wie ArcGIS Textaster (.asc, .txt) für Rasterdaten oder das Shape-Format (.shp) für Vektordaten. Daneben werden einige DEM-Formate (Digital Elevation Model) unterstützt, die hauptsächlich aus dem amerikanischen Raum kommen (z.B. GTOPO30, SRTM, USGS DEM, VistaPro, etc.). Darüber hinaus sind GPS-Daten direkt vom GPS-Empfänger importierbar.

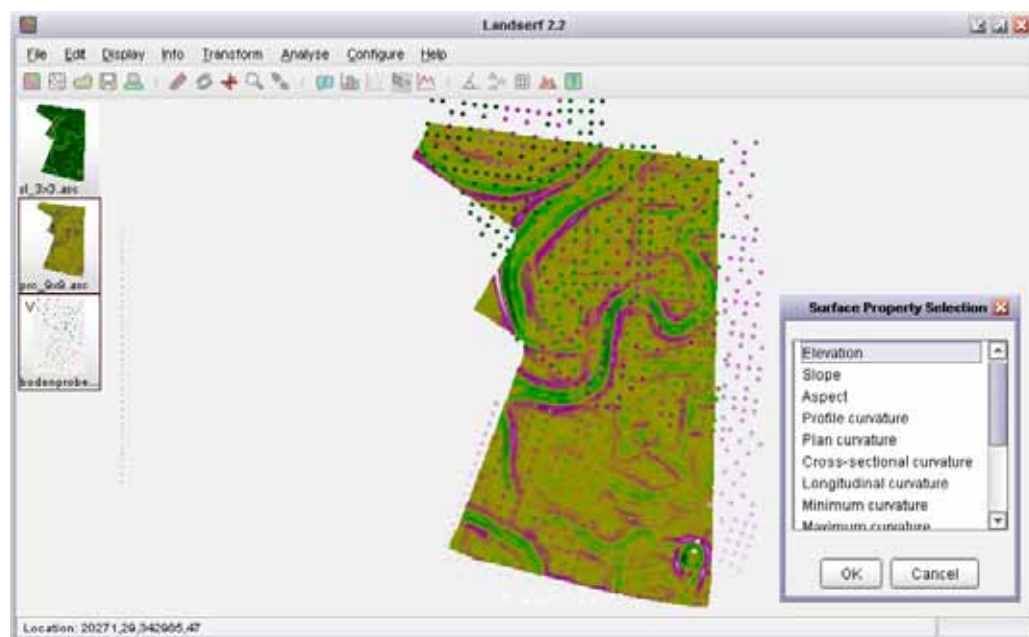


Abb. 27: Benutzeroberfläche von Landserf 2.2

Landserf bietet eine umfassende Toolbox zur Analyse von Geländemodellen und Erstellung primärer (z.B. Hangneigung, Exposition, Kurvaturen) und sekundärer Reliefparameter (z.B. Landformen, Netzwerke,

¹ Download von Landserf unter www.landserf.org [Verfügbar: 11.01.2008]

² Download der JAVA-Software unter www.java.com [Verfügbar: 28.02.2008]

etc.). Der Vorteil gegenüber anderen Programmen ist, dass das zur Berechnung der Parameter benötigte Moving Window nicht auf ein 3x3 Zellen großes Fenster beschränkt ist, sondern frei definiert werden kann. Die Berechnungsmethode für die Reliefparameter basiert auf einer modifizierten Version (Wood, 1996) des Evans-Verfahrens (EVANS, 1980). Dadurch können beispielsweise sehr kontinuierliche Krümmungsoberflächen ohne vorherige Glättung des Geländemodells berechnet werden (siehe auch Kapitel 2.6.2).

2.8.2. SAGA

SAGA (System for Automated Geoscientific Analysis) ist eine Hybrid-GIS Anwendung, die seit 2001 an der Universität Göttingen entwickelt wird. Die aktuelle Versionsnummer ist 2.0.2 (Stand 01/2008). Das Programmpaket wird als Open Source Anwendung unter der General Public Lizenz (GPL) über das Internet für Windows und Linux sowie als Source Code zur Verfügung gestellt¹.

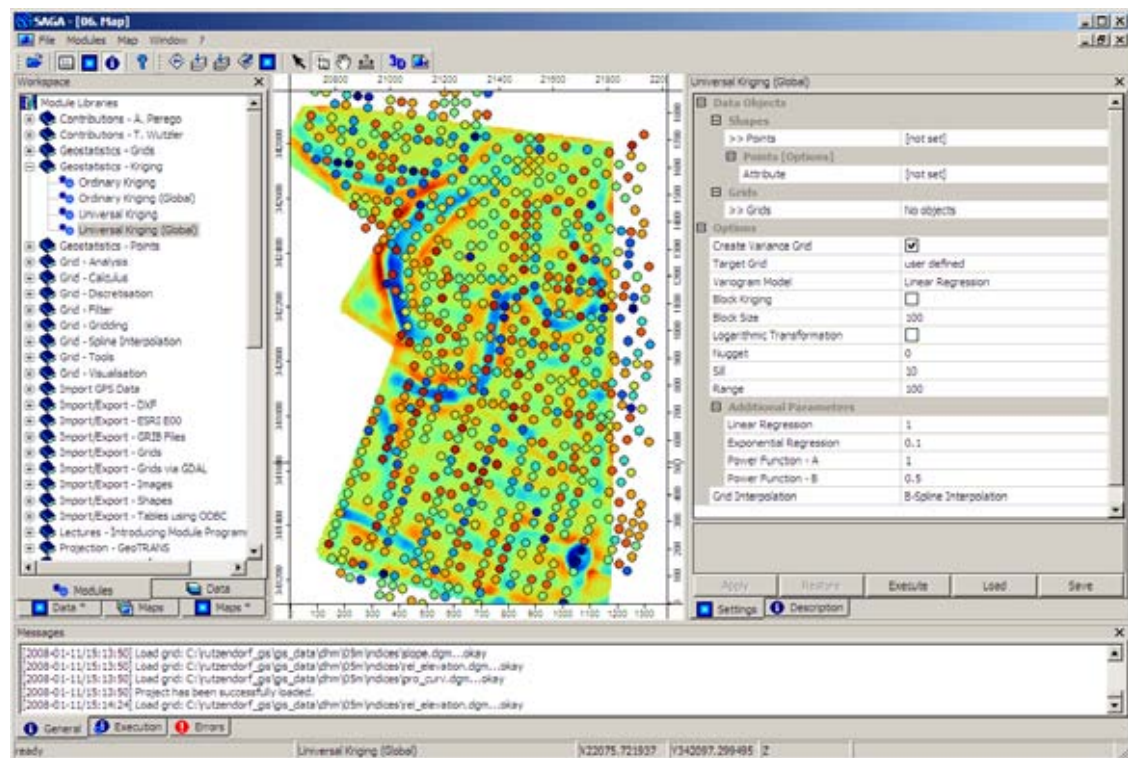


Abb. 28: Benutzeroberfläche von SAGA 2.0.2

Das Paket ist in Module gegliedert, die sehr umfangreiche Algorithmen für geostatistische Analysen und die Verarbeitung von Geländemodellen zur Verfügung stellen. Aktuell stehen 42 freie Modul-Bibliotheken mit 234 Modulen zur Verfügung (HENGEL, 2007). Durch die freie Verfügbarkeit des Quellcodes ist es für EntwicklerInnen möglich, eigene Module zu entwickeln bzw. bestehende anzupassen.

Die Software erlaubt die Verarbeitung von Vektor-, Raster- und Tabellendaten, die aus gängigen Formaten importiert werden können. Für Vektordaten wird das ESRI Shape-Format (nur die 2D-Variante)

¹ Download von SAGA unter www.saga-gis.uni-goettingen.de [Verfügbar: 11.01.2008]

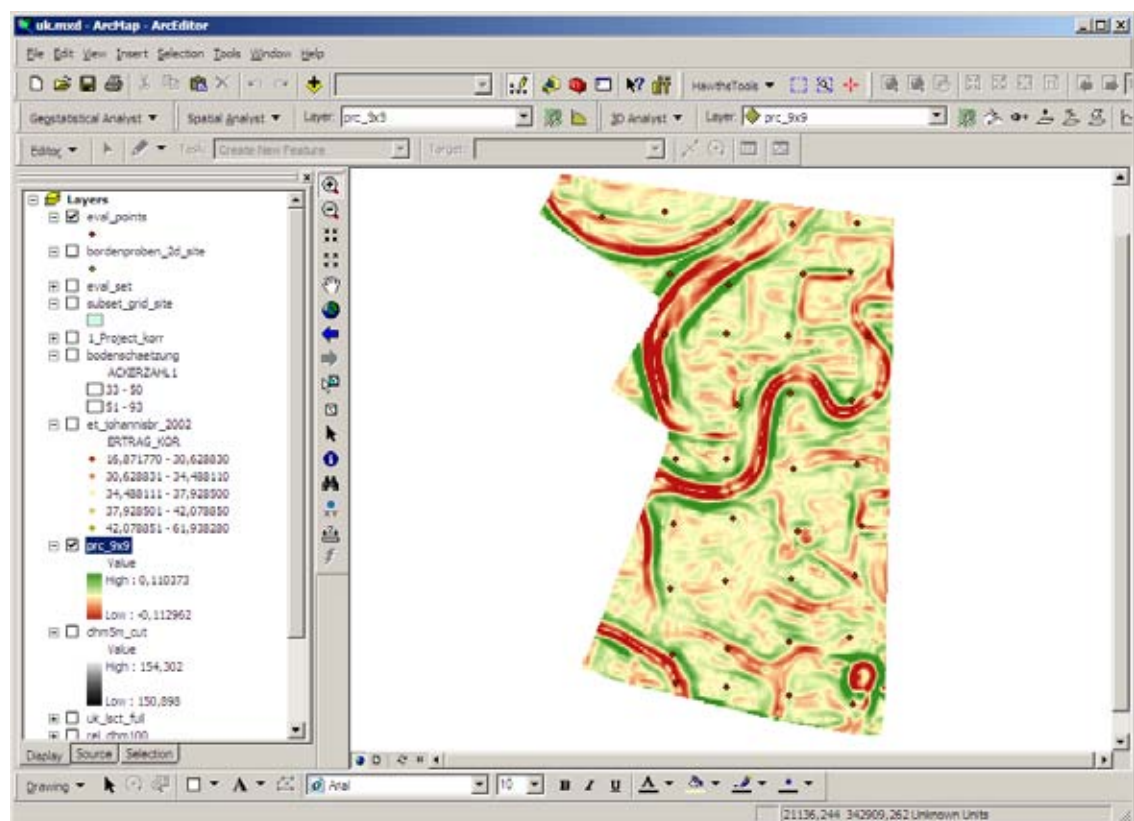
unterstützt, Tabellen können im dBase- oder Text-Format (.dbf, .txt) importiert werden, und mit Rasterdaten kann in SAGA-eigenen Formaten (.dgm, .grd, .sgrd) gearbeitet werden. Zusätzlich werden im Rahmen der verfügbaren Module eine Vielzahl an Import/Export-Filtern zu Verfügung gestellt, womit auch andere Formate, wie etwa das text-basierte ASCII-Rasterformat (.asc, .txt) von ArcGIS, problemlos integriert werden können.

Im Rahmen statistischer Analysen können Diagramme (z.B. Streudiagramme, Histogramme, etc.) erstellt werden, an geostatistischen Interpolationsmodellen werden Ordinary Kriging und Universal Kriging jeweils in einer globalen und einer lokalisierten Variante angeboten. Universal Kriging unterstützt für der Berechnung eine beliebige Anzahl von Rasterdatensätzen. Für die Modellierung des theoretischen Variogramms stehen verschiedene Modell-Algorithmen zu Auswahl. Im Bereich der nicht-räumlichen statistischen Interpolation ist die Erstellung multipler Regressionsmodelle möglich, was für die Anwendung im Regression Kriging hilfreich ist.

Ein weiteres Feature von SAGA ist die Stapelverarbeitung durch kommandozeilen-basierte Abarbeitung von Batch-Dateien (HENGL, 2007). Damit ist es möglich auch große Datenmengen, bzw. wiederkehrende Modelle automatisiert berechnen zu lassen.

2.8.3. ArcGIS

ArcGIS ist eine Geoinformationsapplikation von ESRI (Environmental Systems Research Institute), dem Weltmarktführer im Bereich Geoinformationssysteme. Mit ArcGIS (Version 9.2, Stand 01/2008) wird eine umfassende Arbeitsumgebung für Geodaten und Geodatenmanagement zur Verfügung gestellt, wobei je nach Ausbaustufe (ArcView, ArcEditor oder ArcInfo) die anwendungstechnischen Möglichkeiten unterschiedlich sind.



Die Software wird als kommerzielles Produkt vertrieben und ist aufgrund ihres hohen Anschaffungspreises (ArcView 9.x ist als Basispaket ohne Extensions ab ca. €1000.- erhältlich) für viele Institutionen nur minder attraktiv. Aufgrund der Dominanz von ESRI-Dateiformaten (z.B. Shapefile), aber auch durch die eine umfangreiche Unterstützung zur Einbindung von Geodaten-Servern, führt vielfach kein Weg daran vorbei.

ArcGIS ist eine Sammlung von Programmen (z.B. ArcMap für Datenanalyse und Kartenerstellung, ArcCatalog für Geodatenmanagement, ArcScene für die 3-dimensionale Darstellung von Datenbeständen, etc.), die aufgrund der hohen Ressourcen-Anforderungen eine entsprechende Hardware-Ausstattung voraussetzen.

Ausgehend von der Basisinstallation kann ArcGIS durch Erweiterungen (Extensions) und Scripte (basierend auf Visual Basic) um Funktionen und Methoden erweitert werden.

Im Rahmen der ebenfalls von ESRI vertriebenen Extension „Geostatistical Analyst“ wird ein Methodenpaket für geostatistische Analysen bereitgestellt. Unterstützt werden darin Simple Kriging, Ordinary Kriging, Indicator Kriging, Probability Kriging, Disjunktive Kriging und Cokriging neben inverser Distanzgewichtung und polynomialer Interpolation.

Mit Ausnahme von Cokriging ist keine Integration externer Datensätze möglich, und auch Cokriging unterstützt lediglich die Verwendung von maximal drei Co-Variablen.

Die Arbeit erfolgt wizard-gestützt und ermöglicht ein nachträgliches Anpassen, indem die Methoden-Parameter editiert werden können, was besonders in der explorativen Phase eines Projekts von Vorteil sein kann. Für alle Kriging-Modelle wird eine Kreuzvalidierung zum Prüfen des Modells durchgeführt. Eine explorative Datenanalyse ist in Form von Diagrammen (Histogramme, Q-Q-Plots, Semivariogramme) möglich.

Für die Berechnung von Reliefparametern wird der Ansatz von ZEVENBERGEN & THORNE (1987) verwendet.

In ArcGIS ist es darüber hinaus möglich, komplexe Kartenlayouts, mit Legenden, Labels, Kartenbeiwerk, externe Bilddaten, Tabellen, etc., zu erstellen.

2.8.4. SPSS

SPSS (Version 15, Stand 01/2008) ist ein Statistik-Paket der Firma SPSS Inc. und bietet keine GIS-Unterstützung. Die Datenverarbeitung erfolgt ausschließlich im Tabellenformat. SPSS besitzt eine eigenes Datenformat (.sav) mit dem neben den reinen Tabellendaten auch Zusatzinformationen wie Datentyp, Alias, und Wertebereiche oder -klassen abgespeichert werden können.

Für die Arbeit mit GIS-Daten hat sich das dBase-Tabellenformat (.dbf) für den Datenaustausch etabliert, da es aus einer Vielzahl an GIS-Applikationen erstellt, und ebenso auch wieder eingebunden werden kann. Die Ergebnisse der statistischen Analysen und Modelle werden in einer, von der Datentabelle unabhängigen Ausgabedatei (.spo) gespeichert. Für die weitere Verwendung ist der Export der Ergebnisse in gängige Tabellen- oder Grafikformate möglich.

Das Programm bietet umfassende Möglichkeiten für die statistische Datenanalyse und Modellentwicklung, sowie die Erstellung von Diagrammen in Form von Histogrammen, Streudiagrammen

oder Box-Plots und Q-Q-Plots. Daneben steht eine Vielzahl parametrischer und nicht-parametrischer statistischer Tests zur Verfügung. Geostatistische Methoden und Modelle sind jedoch nicht implementiert.

	D_R	fid_1	id	ackerzahl	bodenprobe	ackerzahl1	ackerzahl2	Max_BODENP	BP_Zuweisung
1		5	0	40	0	37	31	0	240
2		75	0	64	0	57	51	233	233
3		18	0	87	0	86	81	0	237
4		95	0	93	0	86	81	0	234
5		111	0	87	0	86	81	0	234
6		46	0	49	0	48	43	232	232
7		164	0	74	0	76	71	222	222
8		145	0	48	0	48	49	0	232
9		78	0	54	0	52	48	231	231
10		85	0	86	0	86	80	227	227
11		139	0	86	0	86	80	227	227
12		142	0	87	0	86	80	227	227
13		188	0	87	0	86	80	227	227
14		296	0	84	0	87	83	209	209
15		182	0	72	0	67	67	0	219
16		203	0	67	0	67	67	0	219
17		253	0	75	0	67	67	0	219
18		41	0	90	0	82	79	230	230
19		238	0	63	0	64	59	225	225

Abb. 30: Benutzeroberfläche (Daten Editor) von SPSS

SPSS wird im Rahmen einer kommerziellen Lizenz vertrieben und kostet ca. € 1200.- als Einzelplatzlizenz.

2.8.5. Weitere Programmpakete

Die oben beschriebenen Programme stellen eine Auswahl an Produkten dar, mit denen statistische und geostatistische Aufgaben computer-gestützt gelöst werden können. Daneben gibt es eine Vielzahl anderer Anwendungen, die ebenso in der Lage sind, diese Aufgaben zu bewältigen.

Im Bereich der statistischen Analysen und Modelle sei hier besonders das Programm R erwähnt, da es vom Umfang her SPSS in nichts nachsteht, allerdings als Open Source Projekt kostenlos angeboten wird¹. Der Nachteil von R ist jedoch, dass das Programm Kommandozeilen-basiert arbeitet und deshalb relativ viel Einarbeitungszeit in Anspruch nimmt.

Am GIS-Sektor sind für die Umsetzung geostatistischer Modelle noch die Programme ILWIS, IDRISI und GRASS-GIS nennenswert. ILWIS (Integrated Land and Water Information System) wurde vom International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC) in Enschede entwickelt und ist seit der Versionsnummer 3.4 ebenfalls als kostenloses Open Source-Programm² unter der General Public License (GPL) verfügbar. Es werden viele Rasteroperationen unterstützt, und mit Hilfe von Scripts können häufig

¹ Download von R unter cran.r-project.org [Verfügbar: 28.02.2008]

² Download von ILWIS unter 52north.org oder www.itc.nl/ilwis [Verfügbar: 28.02.2008]

wiederkehrende Operationen automatisiert werden. Auch GRASS-GIS wird kostenlos¹ als Open Source Programm für verschiedene Plattformen angeboten.

IDRISI besitzt eine sehr große Anzahl qualitativ hochwertiger Algorithmen für die Analyse von Rasterdaten und unterstützt auch Regression Kriging (HENGLE ET AL., 2007). Das Programm wird als kommerzielles Programm für ca. € 850.- (Einzelplatzlizenz) vertrieben.

2.8.6. Softwarevergleich

Die nachstehende Tabelle (Tab. 7) zeigt eine Übersicht der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Softwarepakete, sowie deren Eignung für verschiedene Einsatzgebiete (++ sehr gute Implementierung, + gute Implementierung, -/+ schlechte Implementierung, - keine Implementierung).

	ArcGIS	Landserf	SAGA	SPSS
Rasterdatenintegration	++	++	++	-
Vektordatenintegration	++	+	+	-
Erweiterbar	Extensions	-	Module	-
Geländeanalyse	+	++	++	-
Graphisches User Interface (GUI)	++	++	++	++
Deskriptive Statistik	++	-/+	+	++
Regressionsmodelle	-	-	+	++
Variogramm Modellierung	++	-	+	-
Regression Kriging mit externen Daten	-	-	++	-
Cokriging	+	-	-	-
Kartographie, Kartengestaltung	++	-/+	+	-
Lizenz	kommerziell	Freeware	Open Source	kommerziell
Preis	>1000 €	kostenlos	kostenlos	>1000 €

Tab. 7: Softwareüberblick

¹ Download von GRASS GIS unter grass.itc.it [Verfügbar: 28.02.2008]

3. Projektgebiet

3.1. Lage und Beschreibung des Projektgebietes

Das Versuchsgut Rutzendorf ($48^{\circ} 13' N$, $16^{\circ} 37' E$) liegt auf ca. 150m Seehöhe im Gemeindegebiet von Groß-Enzersdorf im niederösterreichischen Marchfeld, 7km östlich der Wiener Stadtgrenze. Das Marchfeld umfasst eine Gesamtfläche von etwa 1000km² und ist aufgrund seiner Lage und Böden für die landwirtschaftliche Produktion in Österreich von großer Bedeutung („Kornkammer Österreichs“) (NESTROY, 1973). Mit einem durchschnittlichen Jahresniederschlag etwa von 530mm (siehe Kapitel 3.2) ist es gleichzeitig eine der trockensten Regionen Österreichs. Die Begrenzung des Marchfeldes, das in seiner Ausdehnung etwa 45km lang und 30km breit ist, erfolgt im Süden durch die Donau, im Westen von den Ausläufern der Flyschzone (Bisamberg), im Norden durch den großen Wagram sowie im Osten durch die March (NESTROY, 1973). Das Marchfeld ist geologisch betrachtet Teil des Wiener Beckens (siehe Kapitel 3.3) und wurde trotz des Namens zu etwa 9/10 (bezogen auf die Gesamtfläche) von der Donau geformt (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993; NESTROY, 1973). Die nachfolgende Karte zeigt die Lage von Rutzendorf im Großraum Österreich Ost/Marchfeld.

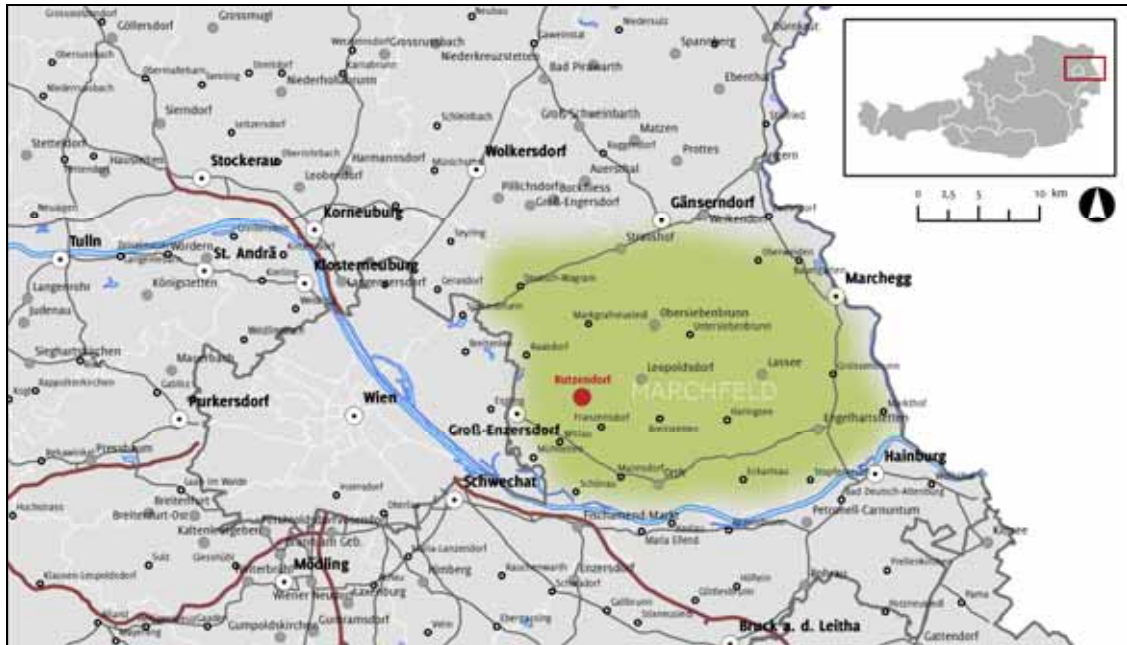


Abb. 31: Übersichtskarte Ostösterreich (Datenquellen: ArcAustria, Corine Landcover)

Das Marchfeld ist eine ebene Landschaft und zeichnet sich durch sehr geringe Reliefenergie aus. Obwohl der Höhenunterschied im Versuchsgut Rutzendorf bei einer Gesamtfläche von ca. 150ha insgesamt nur etwa 4m beträgt, sind die Bodenverhältnisse und damit auch die Bodenqualität dennoch sehr heterogen (siehe Kapitel 4.1).

Das Ausgangsmaterial für die Bodenbildung stammt aus Donauschottern, die im Marchfeld in Form von Terrassen unterschiedlichen Alters abgelagert wurden (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993). Rutzendorf befindet sich auf der so genannten Praterterrasse (siehe Kapitel 3.4) mit einer Seehöhe von 142-152m. Auf einer Unterlage aus Tertiärsedimenten schichtet sich die Schotterablagerung mit einer Mächtigkeit von 5-7m auf. Niveauschwankungen an der Schotteroberkante befinden sich im Bereich von

1-2m, welche allerdings durch Feinsedimente (z.B. Feinsand oder äolische lößähnliche Sedimente) mit einer Mächtigkeit von 1-2m weitgehend ausgeglichen werden. Die vorherrschenden Böden sind Tschernoseme (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993).



Abb. 32: Versuchsgut Rutzendorf (Orthofoto und Schlaggrenzen)

Wie in der vorhergehenden Abbildung (Abb. 32) sehr gut zu erkennen, ist das Gelände von schwach ausgeprägten Rinnen durchzogen, die von Gewässern eines ehemaligen Auegebietes stammen. Diese Rinnen sind im Gelände visuell kaum wahrnehmbar, die Hangneigungen im Querprofil betragen maximal drei Grad.

Die „Hänge“ dieser Rinnen bilden die Prall- und Gleitufer dieser ehemaligen Gewässer. Durch periodische Überschwemmungen wurden die Rinnen teilweise mit Sedimenten gefüllt und so nivelliert. Auf dem Luftbild sind diese ehemaligen Donauarme nach wie vor sehr gut zu erkennen (siehe Abb. 32).

Aufgrund der geringen Hangneigungen ist das Problem der Hangerosion durch Wasser im Untersuchungsgebiet praktisch nicht gegeben. Winderosion konzentriert sich im Marchfeld vor allem auf vegetationsfreie Flächen, die häufig beim konventionellen Gemüsebau zu finden sind (HADATSCH ET AL., 2000). Das Versuchsgut Rutzendorf ist davon kaum betroffen.

3.2. Klimatische Bedingungen

Klimatisch betrachtet liegt das Marchfeld in der Übergangszone zwischen dem westeuropäischen Klimaraum, mit milden Wintern sowie feuchten und verhältnismäßig kühlen Sommern, und dem kontinentalen osteuropäischen, mit kalten Wintern sowie trockenen, heißen Sommern.

Das Marchfeld zählt zu den wärmsten Gebieten Österreichs. Die Maximal- und Minimaltemperaturen differieren sehr stark und reichen von -30°C bis $+35^{\circ}\text{C}$ (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993).

Bezugnehmend auf die Klimaräume Österreichs befindet sich das Projektgebiet im pannonischen Klimaraum, welches sich durch Niederschlagsarmut und eine negative Wasserbilanz auszeichnet und vom oberen Weinviertel bis zum Neusiedlersee reicht (HARLFINGER & KNEES, 1999).



Abb. 33: Klimaräume Österreichs (nach HARLFINGER & KNEES, 1999)

Die nachfolgenden Messreihen zu Temperatur, Niederschlag und Wind stammen aus Klimaaufzeichnungen der meteorologischen Station Fuchsenbigl ($48^{\circ} 12' \text{ N}$, $16^{\circ} 45' \text{ E}$, ca. 6km östlich von Rutzendorf, Seehöhe 143m) im Marchfeld für den Zeitraum 1971-2000 (ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK, 2006):

Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
-0,8	1,3	5,2	9,3	14,4	17,6	19,5	19,4	14,7	9,2	3,9	0,5

Tab. 8: Monatsmitteltemperatur in Grad Celsius

Die für die bodenkundliche Bewertung eines Standortes relevante 14-Uhr Temperatur liegt in den Sommermonaten (April bis August) zwischen 19,5 und 21,5°C. Die Wärmesummen eines Jahres liegen zwischen 3400°C und 4000°C. Im Vergleich dazu wird im alpinen Raum eine Wärmesumme von 700 bis 800°C erreicht (HARLFINGER & KNEES, 1999). Die Wärmesumme eines Jahres ist definiert als die Summe aller 14-Uhr Temperaturen, bei denen das Tages-Temperaturmaximum über 15°C und das Minimum über 5°C gelegen ist (HARLFINGER & KNEES, 1999).

Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Gesamt
24,9	20,9	35,5	45,7	50,9	69,6	64,2	44,5	51,3	37,4	46,8	33,0	524,7

Tab. 9: Niederschlag in l/m

Bedingt durch das pannonische Klima fällt die Niederschlagsmenge für diese Region relativ niedrig aus. Besonders problematisch für die Vegetation sind mögliche Trockenklemmen im Sommer (=längere Phasen ohne nennenswerte Niederschläge), die bis zu zwei Monate andauern können. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge von 2001 bis 2005 liegt mit 540mm etwas über dem langjährigen Durchschnitt (1971-2000), wobei in diesen Zeitraum ein extrem regenarmes Jahr (2002) mit nur 434mm Jahresniederschlag, aber auch ein für diese Region regenreiches Jahr (2004) mit 671mm Jahresniederschlag fiel. Nebel fällt als zusätzlicher Feuchtigkeitsspende kaum ins Gewicht, da nur an 35-45 Tagen Nebel herrscht (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993).

Weiters charakteristisch für das Marchfeld ist die praktisch ständige Windbewegung (Jahresmittel 2,5 bis 4 m/s) mit Minima im Spätsommer/Frühherbst (DOBESCH & NEUWIRTH, 1982), wobei zu allen Jahreszeiten die West-/Nordwest-Winde überwiegen (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993).

Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
3,1	3,1	3,3	2,9	2,6	2,7	2,0	2,4	2,8	2,8	2,9	2,8

Tab. 10: Windgeschwindigkeiten in m/s

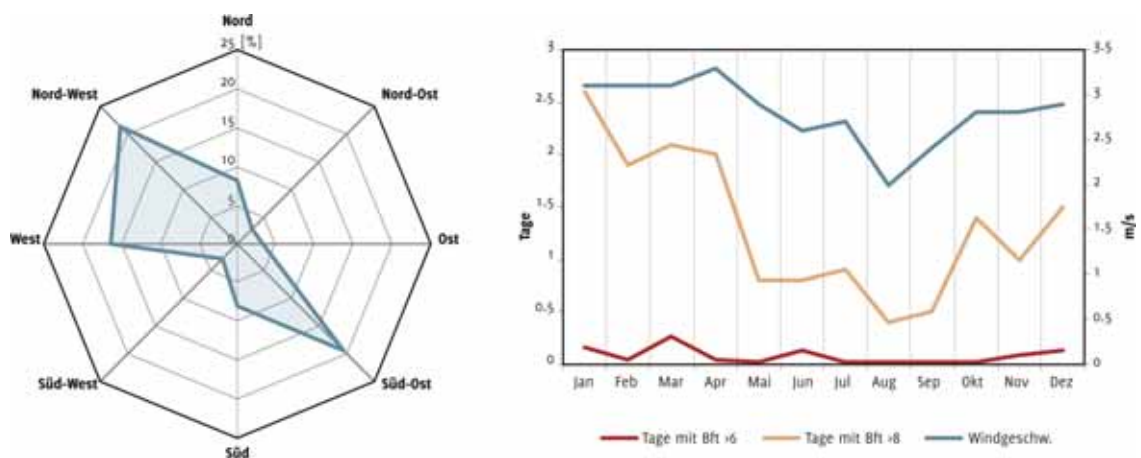


Abb. 34: Linkes Diagramm: Windrichtungen (%-Anteil nach Windrichtungen); Rechtes Diagramm: Windgeschwindigkeiten (in m/s) und Starkwindtage mit Beaufort (Bft) > 6 bzw. > 8

Stärkerer Wind kommt in der Region kaum vor. Eine Windstärke von Beaufort 6 (entspricht einer Windgeschwindigkeit von 8 bis 10,7 m/s) wird an durchschnittlich 15 Tagen im Jahr erreicht, Beaufort 8 (entspricht einer Windgeschwindigkeit von 10,8 bis 13,8 m/s) an durchschnittlich einem Tag im Jahr. Starkwindereignisse konzentrieren sich um die Winter-/Frühlingsmonate von November bis April (ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK, 2006). Trotzdem trägt der Wind durch seine austrocknende Wirkung sehr stark zur negativen Niederschlagsbilanz bei.

Die Verdunstung ist in diesem Teil Österreichs einer der wichtigsten Klimafaktoren. Für den Bereich Groß-Enzersdorf wurde eine durchschnittliche Verdunstungsmenge von 566mm pro Jahr ermittelt (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993), was über der Niederschlagsmenge im langjährigen Durchschnitt liegt (ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK, 2006).

Die vor allem im Sommer auftretenden starken Winde unterstützen diesen Effekt, und bedingen Dürreperioden sowie Versteppungstendenzen (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993).

3.3. Geologie und Reliefentwicklung

Die geologische Einheit, in der sich das Untersuchungsgebiet befindet, wird als Wiener Becken bezeichnet und ist ein asymmetrisches Einbruchbecken im Alpen-Karpatenbogen (geologische Karte siehe Anhang 5).

Die Absenkung des Beckens begann im Badenien (vor 16 bis 13,3 Mio. Jahren) und hatte ein Eindringen des Meeres (Paratethys) zur Folge, das dort bis zu 5000m Sedimente ablagerte (SCHNEIDER, 2001). Die Sedimentablagerung zog sich bis ins Pont vor ca. 6 Mio. Jahren, und wurde von mehreren Austrocknungsphasen unterbrochen. Die Entwicklung erfolgte vom Salzwassermeer der Paratethys über ein brackisches Binnenmeer zu einem aufgegliederten Süßwassermeer, bis hin zur vollständigen Verlandung des Wiener Beckens im Pont (BLÜHBERGER, 1996).

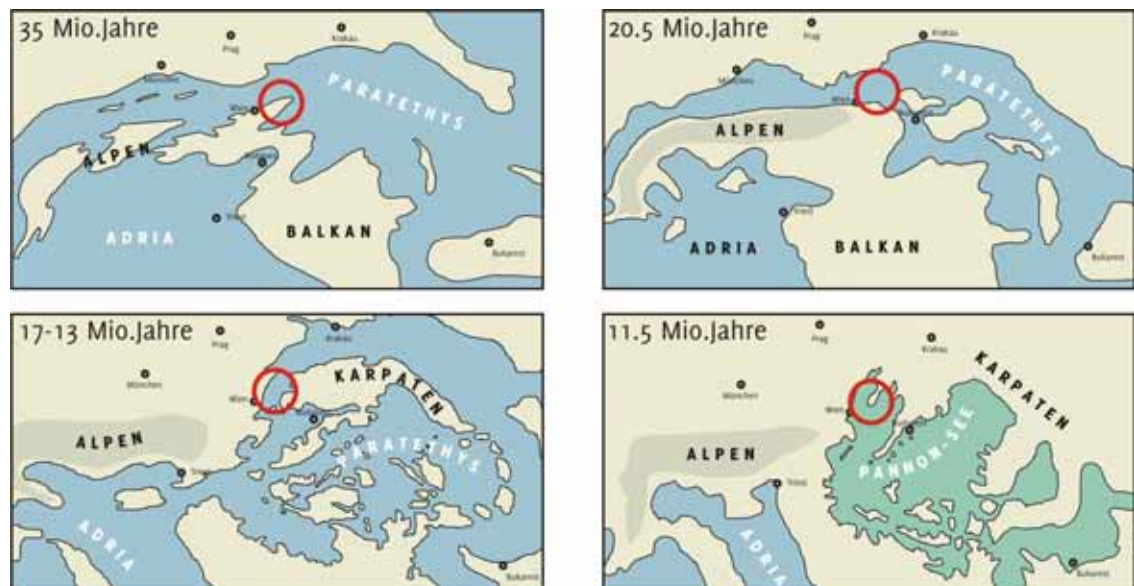


Abb. 35: Ausdehnung der Paratethys und des Mittelmeers und die Entstehung des Wiener Beckens (nach RÖGL & STEININGER, 1983)

Die heutige Landschaft des Wiener Beckens wurde von den letzten beiden Eiszeiten geprägt. Das Wiener Becken war zwar eisfrei, die Donau transportierte in dieser Zeit jedoch enorme Mengen an Schotter und

Geröll in das Wiener Becken, welche dort auf zwei Terrassen (Prater- und Gänserndorfer Terrasse) abgelagert wurden (BLÜHBERGER, 1996).

Der Aufbau der im Würm entstandenen Praterterrasse ist verhältnismäßig einheitlich und besteht aus einer 5-8m hohen Schicht ungefärbten Donauschotter, die über den Tertiärsedimenten der Paratethys abgelagert wurde.

Die Oberkante dieser Schotterablagerungen zeigt Niveauschwankungen im Bereich von 1 bis 2m die durch Wechselwirkungen zwischen Ablagerungen und Erosion entstanden sind. Fluviale Feinsedimente, die auf dem Schotter abgelagert wurden, gleichen dieses Mikrorelief jedoch weitgehend aus (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993).

Der untere Teil dieser Feinsedimente besteht aus schluffigem Feinsand (Silt), der von hauptsächlich äolischen Ablagerungen (Löß bzw. lößähnliche Sedimente) bedeckt wird, die ortsnahe umgelagert wurden. Tritt der schluffige Feinsand an die Oberfläche, wird er, sofern nicht gegen Winderosion geschützt, zum Flugsand. Die Mächtigkeit dieser Feinsedimentdecke liegt im Bereich von 1 bis 2m (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993).

3.4. Pedogenese

Die Ausgangsmaterialien für die Bodenbildung im Marchfeld sind, wie im Kapitel 3.3 erwähnt, quartäre Fluss-Schotter, die von der Donau terrassenförmig auf tertiärem Tegel abgelagert wurden (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993). Das Grundwasser liegt im Bereich der Praterterrasse (Seehöhe ca. 150m), auf der sich das Versuchsgut Rutzendorf befindet, in einer Tiefe von 2-5m.

Bis zur Donauregulierung im Jahre 1870, die auch mit der Abholzung vieler Auwälder und Entwässerungsmaßnahmen einherging, waren weite Teile der Praterterrasse Wiesen, Sümpfe und Feuchtzonen, die von einer Vielzahl wechselnder Gerinne durchzogen waren (BLÜHBERGER, 1996). In manchen Senken (z.B. Lasseer Wanne oder Siebenbrunner Bucht) finden sich noch Reste von Feuchtzonen in kleinen abflusslosen Rinnen und auch alte Namen und Bezeichnungen (z.B. Haringsee) weisen auf dieses ehemalige Auegebiet hin (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993).

Ständig wiederkehrende Hochwässer (die älteste Hochwasserbeschreibung stammt aus dem Jahr 1022) veränderten permanent die Landschaft und die Infrastruktur. So wurde etwa bei einem Hochwasser im März 1830 der Ort Kimmerleinsdorf (ca. 1,5km südlich von Rutzendorf) durch ein Hochwasser, verbunden mit einem Eisstoß, vollständig zerstört. Der Ort wurde wieder aufgebaut, und trägt heute den Namen "Franzensdorf" nach Kaiser Franz I (SARTORI, 1830).

Im Untersuchungsgebiet sind diese Au- und Überschwemmungsreste sehr gut am Luftbild und am Höhenmodell in Form alter nunmehr wasserloser Gewässerläufe und -schlingen sichtbar, die sich mäandrierend über das Versuchsgut erstrecken (siehe Abb. 32) und so Informationen über die frühere Fluss- und Überschwemmungsdynamik preisgeben. Auch wenn diese Formen im Gelände optisch kaum wahrnehmbar sind, da sie teilweise nur wenige Zentimeter tief sind, zeigen sich in den Bodenproben der österreichischen Finanzbodenschätzung enorme Unterschiede in der Ertragsfähigkeit in Abhängigkeit von der Lage in diesem Rinnensystem (siehe Abb. 32).

Im Untersuchungsgebiet handelt sich bei den Böden vorwiegend um Tschernoseme aus kalkhaltigen Feinsedimenten, die sich in ebener Lage großflächig verbreiteten. Sie sind mäßig trocken und besitzen eine mäßige Speicherkraft und Durchlässigkeit. Die Bodenart in den Horizonten A und AC ist lehmiger

Schluff, sandiger Lehm oder Lehm, im C-Horizont ist sandig-lehmiger Schluff zu finden, teilweise auch Sand und Schotter.

Das nachstehende Bild (Abb. 36) zeigt einen typischen Tschernosem vom Versuchsgut Rutzendorf (Profilstandort: Alte Neurisse im nord-westlichen Teil des Untersuchungsgebiets). Der A-Horizont reicht bis 55cm, daran anschließend wurde ein AC-Horizont mit 15 cm ausgebildet.



Abb. 36: Tschernosemprofil

Die A- und AC-Horizonte sind mittelhumos bis schwach humos mit der Humusart Mull. Die Tschernoseme sind stellenweise sehr tiefgründig und können bis 55 cm (A-Horizont) bzw. 70 cm (AC-Horizont) reichen. Sie sind hochwertiges Ackerland und gut zu bearbeiten (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993).

Die mächtigen Humushorizonte entstanden unter kontinentalen Klimaverhältnissen mit ausgeprägt heißen Sommern und sehr kalten Winterperioden. Bedingt durch die Trockenheit im pannonischen Raum konnten sich keine Wälder ausdehnen, es herrschte stattdessen üppige Steppenvegetation (überwiegend *Stipa*-, *Koeleria*-, *Festuca*- und *Artemisia*-Arten) vor. Die damit großen Mengen an organischem Pflanzenmaterial vertrockneten in den heißen niederschlagsarmen Sommern und der geringe Niederschlag sowie die kalten Winter verhinderten einen raschen Abbau, wodurch die Menge anwuchs und die Grundlage für eine ständige Humusakkumulation bildete (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2002).

In den feuchteren Herbstmonaten wurde von Mikroben die Humifizierung eingeleitet. Durch Aktivitäten von Bodentieren wurde das Material tief in den Boden eingearbeitet, wodurch sich im Bodenquerschnitt häufig die für Tschernoseme charakteristischen Tiergänge (Krotovinen) von steppenbewohnenden Bodenwühlern wie Hamstern (*Cicretus cicretus*) oder Zieseln (*Citellus sp.*) finden (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2002).

Tschernoseme gehören zu den fruchtbarsten Böden in Österreich, werden in ihrer Ertragskraft aber häufig durch Wassermangel begrenzt. Auf der von 7-100 reichenden Skala des Schätzrahmens wurden Tschernoseme in Großnondorf bei Hollabrunn (Bundesmusterstück BMSt 12) und Pachfurth bei Bruck an der Leitha mit der Bodenzahl 100 bewertet. Aufgrund der ungünstigen klimatischen Bedingungen wurden dem Musterstück in Großnondorf (BMSt 12) jedoch 17 Punkte abgezogen (100/83) (WAGNER, 2001). Die Tschernoseme im Projektgebiet sind entweder auf Löss oder auf Sand entstanden, wobei der Löss-Tschernosem eine ausgezeichnete Struktur mit ausreichender Durchlässigkeit und Speicherkraft besitzt (JABOREK, 2003), was sich auch in einer tendenziell höheren Ackerzahl niederschlägt. Im Gegensatz dazu haben Sand-Tschernoseme sehr hohe Durchlässigkeit mit geringem Speichervermögen. Sand-Tschernoseme sind leicht zu bearbeiten aber sehr leicht anfällig für Abschwemmungen und Winderosion (JABOREK, 2003).

In Hanglagen sind sie meist weniger tiefgründig und werden dann häufig auch als Rumpf-Tschernoseme oder Kulturrehoböden klassifiziert.



Abb. 37: a. tiefgründiger Tschernosem in Muldenlage auf tertiären Sedimenten, b. Tschernosem (Rumpf-Tschernosem) auf Lössuntergrund in leichter Hanglage, trocken gefallene Feuchtschwarzerde in Muldenlage auf tertiären Ablagerungen

Neben den Tschernosemen bildete sich vor allem in Mulden anmoorige, kalkhaltige Feuchtschwarzerde aus Feinsedimenten. In den A-Horizonten (A₁, A₂) ist die Bodenart schluffiger Lehm oder lehmiger Schluff (A₁) bzw. lehmiger Ton oder lehmiger Schluff (A₂). Der CG-Horizont ist schluffiger Lehm oder lehmiger Ton sowie zum Teil schluffiger Sand. Die Humusverhältnisse reichen von mittel bis stark humos, die Humusart ist Mull oder Anmoormull (im A₂-Horizont nur mehr Anmoormull). Die Feuchtschwarzerde ist ebenfalls hochwertiges Ackerland, aufgrund der bindigen Bodenart aber erschwert zu bearbeiten und mit einer Neigung zu Schollenbildung und Verkrustung (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993).

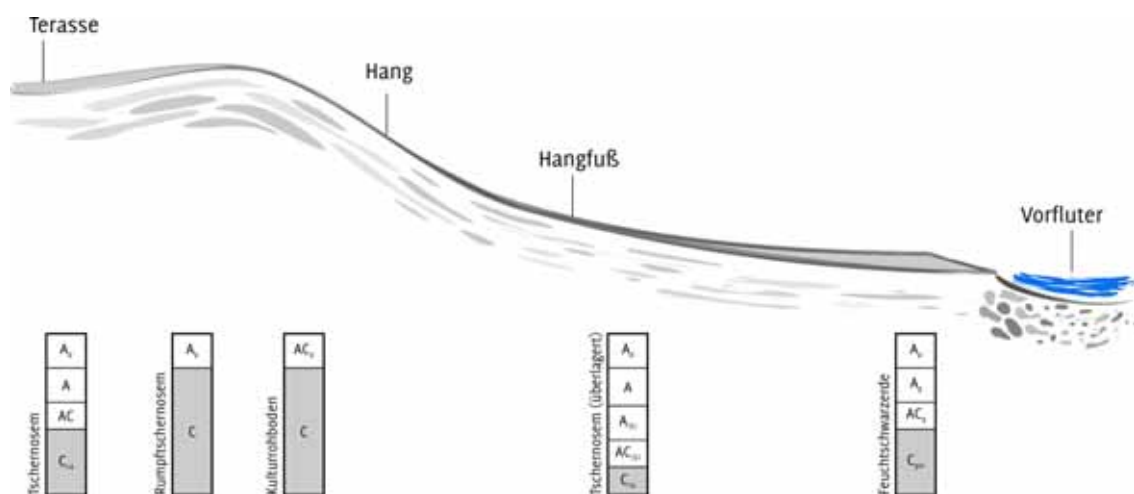


Abb. 38: Beispiel für eine typische Catena (Bodenabfolge) des Trockenraums

Dies bedingt weiters höhere Konzentrationen von Nitrat, Chlorid, Natrium, Atrazin und Desethylatrazin im Grundwasser, die vor allem durch landwirtschaftlichen Dünger und Pflanzenschutzmittel eingebracht wird (WWK & UBA, 1997).

Bei der zu erwartenden Änderung der klimatischen Bedingungen (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007) ist von vermehrten Trockenperioden auszugehen.

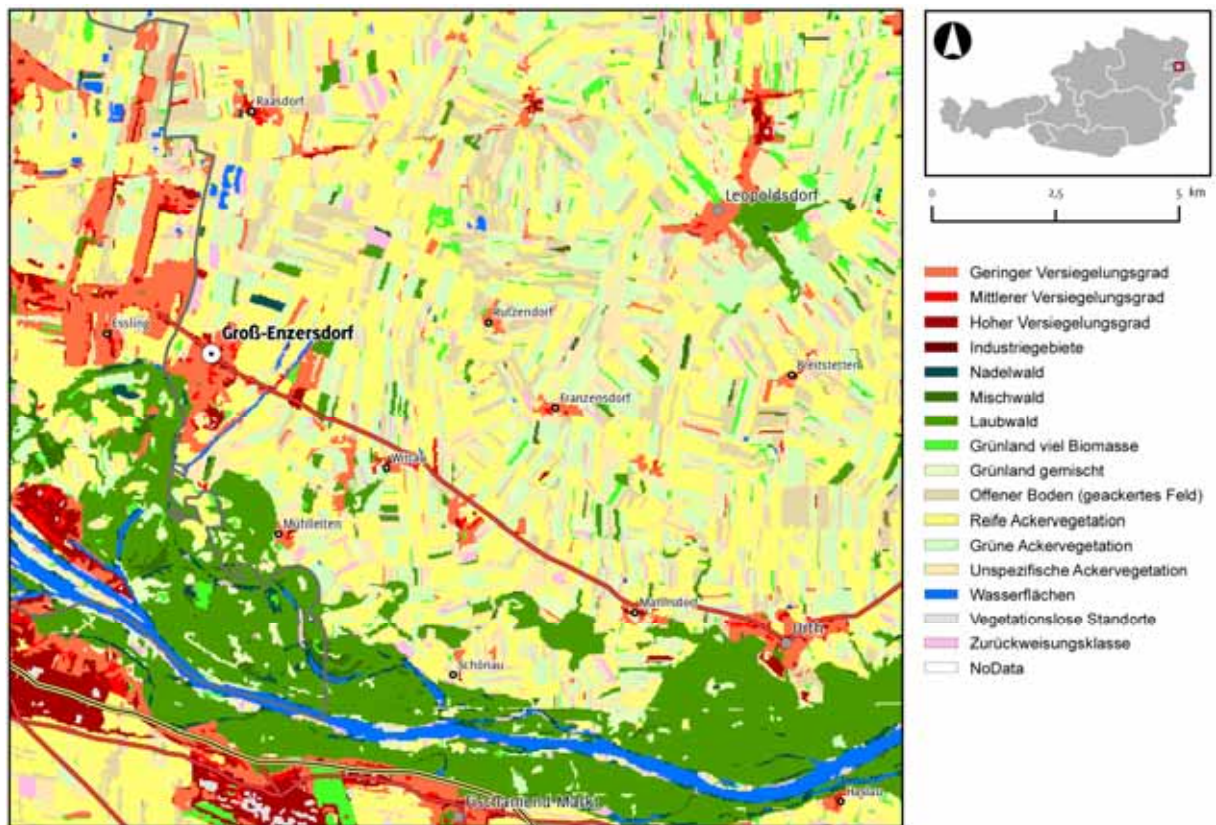


Abb. 40: Übersicht des Großraums um das Untersuchungsgebiet auf Basis Landschaftsökologischen Strukturmerkmale als Indikatoren der Nachhaltigkeit (SINUS) (BEISSMANN ET AL., 2003)

Etwas feiner aufgelöst als die Corine Landcover Daten zeigt die oben stehenden Karte (Landschaftsökologische Strukturmerkmale als Indikatoren der Nachhaltigkeit kurz SINUS für Spatial **IND**ices for Land**USE** Sustainability (BEISSMANN ET AL., 2003)) den Großraum um das Untersuchungsgebiet in Rutzendorf. Die Landschaft ist zu weiten Teilen landwirtschaftlich dominiert, es besteht ein dichtes System an Bearbeitungsschlägen, die direkt aneinander grenzen.

4. Datengrundlagen

4.1. Daten der österreichischen Finanzbodenschätzung

4.1.1. Punktdaten der Finanzbodenschätzung

Die Punktdaten der österreichischen Finanzbodenschätzung repräsentieren die Probennahmestellen für die Einwertung des Bodens (siehe Kapitel 2.5). Die Ackerzahl, welche jedem Punkt nach der Feldansprache des Bodens (siehe Kapitel 2.5.2) zugewiesen wird, ist die Ausgangsbasis für die in dieser Arbeit erstellten Interpolationsmodelle (siehe Kapitel 2.7). Da die Punktdaten der Finanzbodenschätzung nach wie vor größtenteils analog vorliegen (Stand 2007), mussten die Daten für das Untersuchungsgebiet digitalisiert werden (siehe Kapitel 5.1). Die Punktdaten liegen als geschichtete Stichprobe im 50x50m Raster vor.

Statistische Kennwerte der Punktdaten:

Stichprobengröße	500
Mittelwert	71,95
Median	74,00
Modalwert	76
Standardabweichung	13,558
Varianz	183,811
Schiefte	-0,484
Minimum	32
Maximum	96

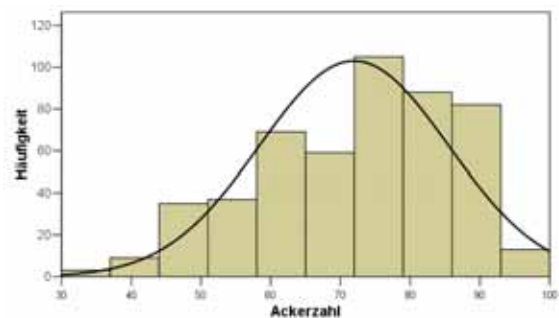


Abb. 41: Statistische Kennwerte der Punktdaten und das Histogramm der Ackerzahl (n=500)

Minimum und Maximum zeigen eine sehr breite Streuung der vorkommenden Ackerzahlen, jedoch ist zu beachten, dass nur sehr wenige Punkte sehr schlechte Ackerzahlen liefern. Grundsätzlich sind die Böden im Untersuchungsgebiet gut bis sehr gut. Daraus ergibt sich auch eine entsprechende Schiefe in der Verteilung, und ein Test nach Kolmogorov-Smirnov auf Normalverteilung ergab eine signifikante Abweichung von ebendieser.

4.1.2. Flächenausweisung der Finanzbodenschätzung

Wie in Kapitel 2.5 angeführt, werden die Punktdaten nach der Erhebung zu de facto homogenen Flächeneinheiten zusammengefasst, die als Basis für die Besteuerung der landwirtschaftlich genutzten Fläche dienen. Die Abgrenzung erfolgt dabei durch den Bodenschätzer, der mit Hilfe seines Expertenwissens, und meist auch mit Hilfe eines Höhenmodells diese Abgrenzung durchführt. Für die Erstellung der Interpolationsmodelle wurde dieser Datensatz nicht verwendet, da dieser einerseits bereits einen Interpretationsschritt durchlaufen ist, und andererseits auch einen Vergleichsdatsatz für die Ergebnisse der Interpolationsmodelle darstellt.

4.2. Digitales Geländemodell aus einem Stereo-Orthofoto

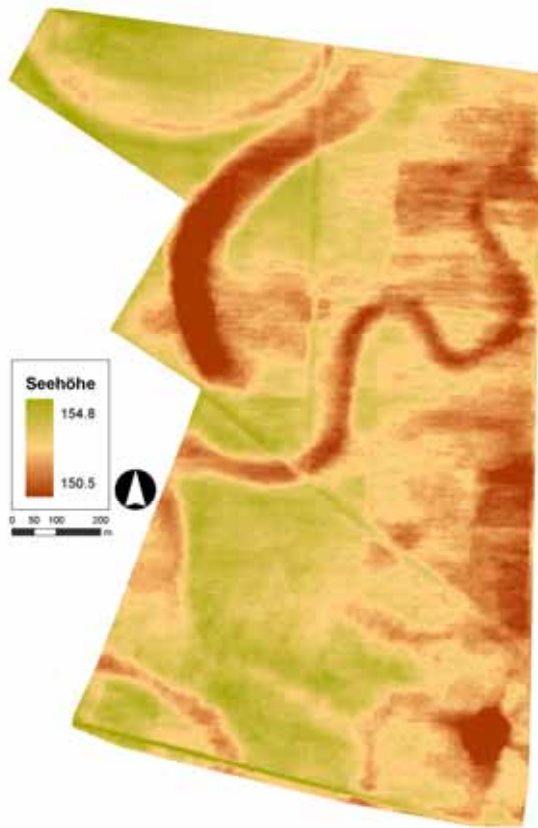


Abb. 42: Digitales Geländemodell, Auflösung 1m

Das digitale Geländemodell wurde auf Basis eines Stereo-Orthofotos erstellt (siehe Abb. 42). Der Bildflug dazu erfolgte am 28. April 2002 mit einem Aufnahmemaßstab von 1:8500. Die Passpunkte wurden mit einem GPS-Gerät eingemessen (Genauigkeit: +/- 2cm in der Lage; +/- 3cm in der Höhe)¹.

Die Geländemodellauswertung erfolgte automatisch. Danach wurde eine manuelle Nachbearbeitung durchgeführt. Der Höhenfehler beträgt dabei weniger als 20cm.

Die Modellerstellung erfolgte durch das Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation (DI Brigitte Rudel) an der Universität für Bodenkultur im Jahr 2002. Die Auflösung des Höhenmodells wurde mit 1m festgelegt und zeigt deshalb auch sehr feine Strukturen im Mikorelief des Untersuchungsgebietes. Durch die feine Auflösung sind feine Artefakte (Noise) im cm/dm-Bereich vorhanden, die aber üblich sind, und durch die sequentielle Abarbeitung der Daten bei der Modellerstellung entstehen².

Die Seehöhe liegt am Versuchsgut zwischen 150,5 und 154,8 m, die gesamte Reliefenergie somit bei 4,3 m, was auf die Gesamtfläche von ca. 150 ha gerechnet sehr gering ist.

Die im Modell erkennbaren linearen Strukturen in Südost-Nordwest- und Nord-Süd-Richtung zeigen Feldwege zwischen den einzelnen Schlägen an, wobei die optisch dominanteren Strukturen (im mittleren Bereich) bestehende Wege kennzeichnen, während die schwächeren Linien und Linien-Artefakte Wege andeuten, die früher existierten. Bei der runden Vertiefung im Süd-östlichen Teil handelt es sich um eine ehemalige Schotterentnahmestelle. Dieser Bereich wurde aufgrund der starken anthropogenen Überformung aus der Modellierung ausgeschlossen.

¹ E-Mail von DI Dr. Erwin Heine vom Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation an der Universität für Bodenkultur vom 23.02.2007

² Nach Aussage von Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Werner Schneider, Leiter des Institutes für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation, das mit der Erstellung des Höhenmodell beauftragt war (Besprechung am 25.7.2003).

4.3. Ertragsdaten aus einer GPS-gestützten Ertragsmessung

Ertragsdatenmessungen sind eine wichtige Basis für schlagbezogene Managementstrategien (Bocchi & Castrignanò, 2007). Die Rohdaten dieser Messungen beinhalten jedoch häufig eine Vielzahl an Fehlern aus unterschiedlichen Quellen, die eine Bearbeitung nötig machen, bevor sie für Aussagen herangezogen werden (Robinson & Metternicht, 2005). Dazu kommt, dass temporäre Variationen wie etwa besondere Klimaereignisse die Ergebnisse der Ertragsmessung stark beeinflussen können, weshalb die Verwendung mehrjähriger Ergebnisse empfohlen wird (Vitharana et al., 2008).

Am Versuchsgut Rutzendorf wurden für die Jahre 2002, 2003, 2004 und 2005 auf ausgewählten Schlägen Ertragsmessungen durchgeführt. Diese bilden eine Grundlage der Validierung der Bodenkarten (siehe Kapitel 6.6.1). Die nachfolgende Abbildung (Abb. 43) zeigt eine Übersicht jener Schläge auf denen Ertragsmessungen durchgeführt wurden aufgeschlüsselt nach Jahren.



Abb. 43: Übersicht der aufgenommen Ertragsdaten von 2002 bis 2005

Als System zur Ertragsmessung kam der AFS Yield Monitor der Firma CASE IH Agriculture zum Einsatz. Die räumliche Auflösung der Ertragsdaten ergibt sich aus der Breite des Mähdreschers und dem Zeitabstand zwischen den Wägevorgängen. Im vorliegenden Fall entsteht dadurch eine Punktauflösung von 5x5m. Als GPS-Modul wurde eine Trimble-Antenne verwendet. Durch Zuhilfenahme eines Korrektursignals (Differential GPS, DGPS) liegt der Lagefehler beim eingesetzten System im Bereich von 0,5-1m (PRAIRIE AGRICULTURAL MACHINERY INSTITUTE, 1999).

Die Erträge wurden in dt/ha (Dezitonnen/Hektar) erfasst, zusätzlich wurde die Feuchte gemessen. Das Messprinzip des Ertragssensors funktioniert auf Basis der Aufprallkraft des Getreides und liefert hohe Genauigkeit unabhängig von der Tausendkornmasse¹. Bei korrekter Kalibrierung liegt die Genauigkeit der Gewichtsmessung im Bereich von +/-3% (PRAIRIE AGRICULTURAL MACHINERY INSTITUTE, 1999).

Die Rohdaten der Ertragsmessung beinhalten de facto immer eine Vielzahl an Fehlern, die aus verschiedenen Quellen stammen (nach BLACKMORE & MOORE, 1999):

- Kalibrierungsfehler in der Messeinheit
- unbekannte Schnittbreite (besonders im Anfahrbereich, bzw. bei starker Überlappung mit einer bereits gemähten Fläche)
- Zeitfehler durch die Dauer des Dreschvorgangs
- Lagefehler (DGPS-Fehler)
- Erhöhte Werte bedingt durch das Transportsystem (Akkumulationen, Verstopfungen)
- Messfehler (Null-Werte und andere Extrem-Werte)

Normalerweise beinhalten Ertragsmessungen viel mehr Punkte, als für die Erstellung einer interpolierten Ertragskarte notwendig wären, weshalb eine Filterung und damit verbundene Eliminierung fehlerhafter Daten keine negativen Auswirkungen auf die Validität einer Ertragskarte hat (BLACKMORE & MOORE, 1999).

Trotzdem bleibt anzumerken, dass zwar die Störfaktoren bei der Ertragsdatenmessung bekannt sind, ihr Einfluss auf die Messwerte bisher jedoch nur ansatzweise untersucht wurde (STEINMAYR, 2002).

4.4. Basisdaten (Grenzen, Orthofoto, etc.)

Als Basisdaten werden im vorliegenden Fall jene Datensätze betrachtet, die primär für Orientierungs- und Darstellungszwecke verwendet werden.

Dazu zählen ein Auszug aus der digitalen Katastermappe (DKM) sowie ein Orthofoto, das im Rahmen der Befliegung für die Höhenmodellerstellung erstellt wurde (siehe Kapitel 4.2).

Die DKM (siehe Abb. 32) wurde aus AutoCAD übernommen und entsprechend der aktuellen Situation erweitert bzw. korrigiert. Geänderte bzw. neue Schlaggrenzen wurden mit Hilfe eines GPS-Gerätes

¹ Das Tausendkornmasse (oder Tausendkorngewicht) ist eine Saatgut-Kenngröße, und gibt die Masse von 1000 trockenen Samenkörnern an. Das Tausendkorngewicht unterliegt starken Schwankungen (z.B. witterungsbedingt) und ist deshalb eine sehr ungenaue Maßeinheit.

(Differential GPS) von Mitarbeitern des Instituts für ökologischen Landbau eingemessen und mit der bestehenden Katasterkarte kombiniert.

Das Orthofoto (siehe Abb. 32) wurde am 28. April 2002 mit einem Aufnahmemaßstab von 1:8500 für die Höhenmodellerstellung (siehe Kapitel 4.2) aufgenommen und zeigt das Versuchsgut wenige Wochen nach der ersten Frühjahrs-Aussaat. Sehr gut zu erkennen sind auf dem Orthofoto auch die Geländerinnen, wie sie im Höhenmodell zu finden sind.

Wie bereits in Kapitel 4.2 erläutert bildete das Orthofoto die Ausgangsbasis für Erstellung des Höhenmodells. Daneben wird es für kartographische Darstellungen als Hintergrundebene verwendet.

5. Datenaufbereitung

5.1. Aufbereitung der Punktdaten aus der Finanzbodenschätzung

Die Daten der Finanzbodenschätzung wurden in analoger Form übernommen und bestanden aus der Schätzkarte (siehe Anhang 2) für das Versuchsgut Rutzendorf sowie dem Schätzbuch mit Aufzeichnungen über die Grablöcher (siehe Anhang 3 und Kapitel 2.5)

Die Schätzkarte für das Untersuchungsgebiet bestand aus 6 Einzelblättern, die gescannt und in ArcGIS georeferenziert wurden. Für das Georeferenzieren wurde die im Gauß-Krüger Österreich (M34) –System vorliegende digitale Katastermappe verwendet.

Die Digitalisierung der Punktdaten erfolgte ebenfalls in ArcGIS¹. Als Attributdaten wurden die Ackerzahl sowie die Identifikationsnummer direkt im Geodatenatz erfasst. Für ausgewählte Punkte (pro Flächeneinheit ein Punkt, am analogen Plan rot gekennzeichnet) wurde die im Schätzbuch (siehe Kapitel 2.5.1 und Anhang 3) zugrunde liegende Profilnummer angegeben. Für diese Daten aus dem Schätzbuch wurde in einer Access-Datenbank mit den Profilen dazugehörigen Horizontbeschreibungen aufgebaut. Über die Identifikationsnummer ist eine Verbindung der Geodaten mit den Daten der Datenbank möglich.

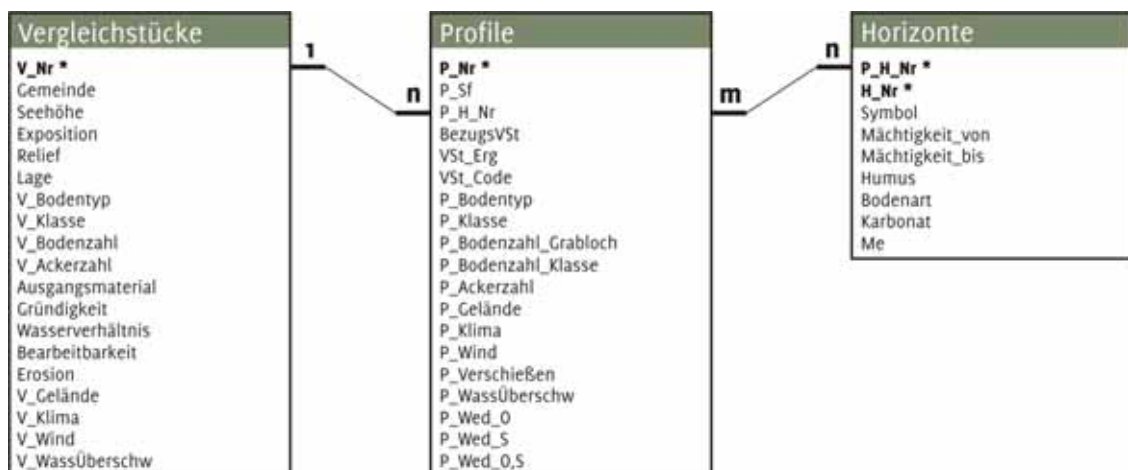


Abb. 44: Darstellung der Access-Datenbank als Entitätsmengen mit Attributen und Beziehungen

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Attribute ist in Anhang 1 zu finden.

Wie in Kapitel 2.5 angeführt werden auf Grundlage der Punktdaten unter Einbeziehung von Landformen und Expertenwissen des Bodenschätzers Flächeneinheiten gleicher Ackerzahl ausgewiesen, welche die Grundlage für die Grundbesteuerung liefern. (siehe Kapitel 2.5.2). Auch diese Flächeneinheiten wurden digitalisiert. Als Attributdaten für diese Flächen wurde neben der Ackerzahl auch eine durch Zu- bzw. Abschlüsse bereinigte Ackerzahl erfasst.

¹ Die Georeferenzierung der analogen Kartenblätter sowie die Digitalisierung der Punktdaten und Profilinformatoren wurde von DI Alexander Beran am Institut für Landschaftsentwicklung, Erholungs- und Naturschutzplanung durchgeführt.

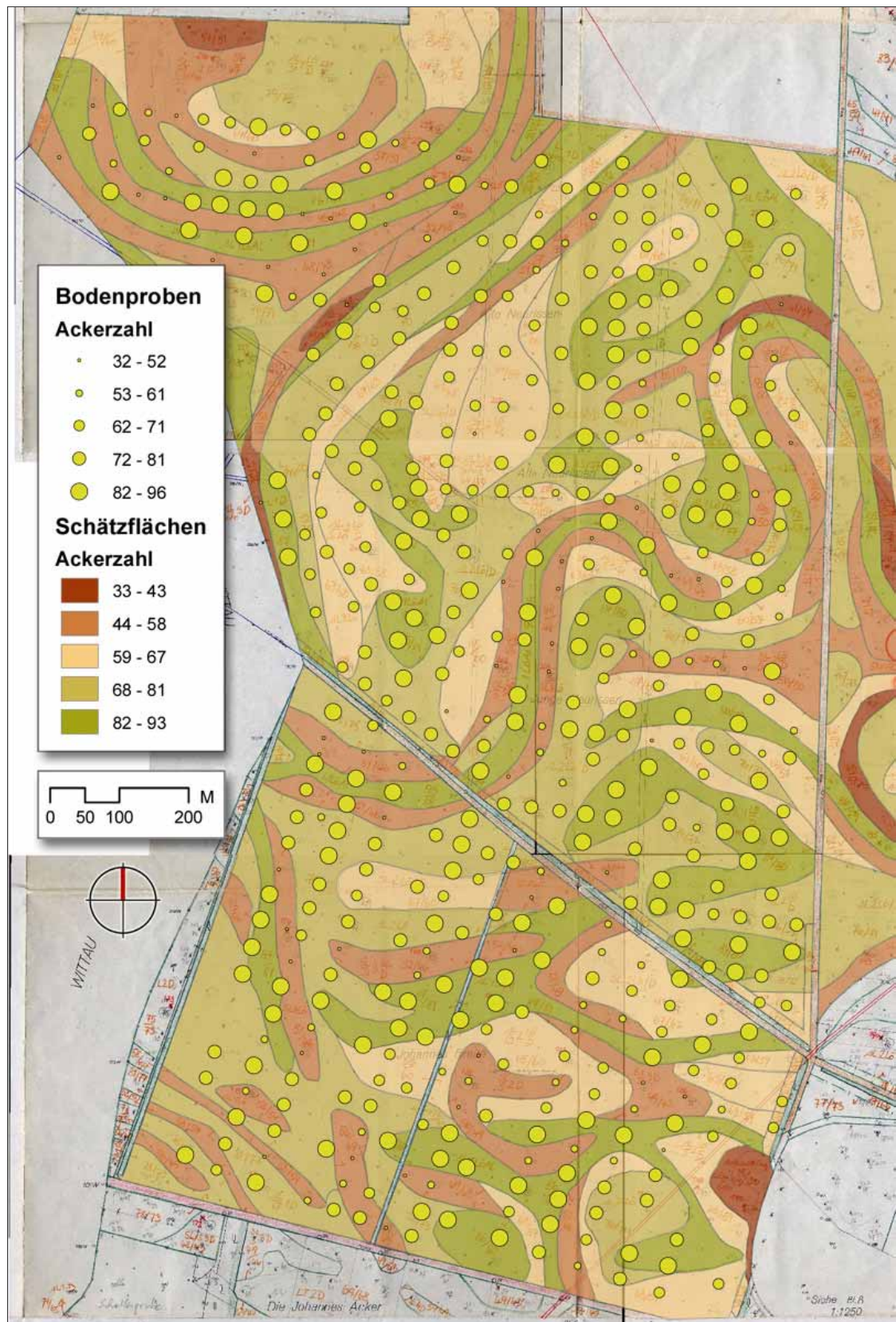


Abb. 45: Digitalisierte Bodenprobenpunkte und die manuell ausgewiesenen Flächeneinheiten vor dem Hintergrund der analogen Schätzkarte

5.2. Aufbereitung, Bereinigung und Interpolation der Punktdaten aus der GPS-gestützten Ertragsmessung

Die Daten der GPS-Ertragsmessung wurden als Rohdaten, in Form kommaseparierter ASCII-Textdateien, übernommen und mussten nach deren Integration im GIS angepasst und korrigiert werden.

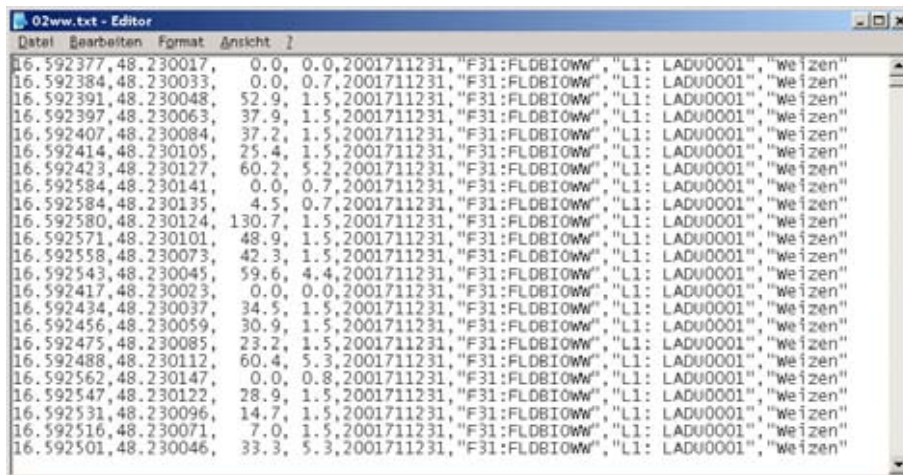


Abb. 46: Darstellung der ASCII-Rohdaten als kommaseparierte Werte im Texteditor

Die Spaltenreihenfolge wurde durch das Messgerät vorgegeben, die Spaltenbezeichnungen wurden wie folgt definiert:

LON	Längengrad (WGS84 ¹)
LAT	Breitengrad (WGS84)
ERTRAG	gemessene Erträge [dt/ha]
FEUCHTE	gemessene Feuchte [%]
MONITOR	Bezeichnung des verwendeten Aufzeichnungsmonitors
FELD	Feldbezeichnung
LADUNG	Ladungsnummer (wurde nicht erhoben)
FRUCHT	angebauter Frucht

Da die Punktaufnahmen ohne Zeitstempel erfolgten, wurde zusätzlich noch eine Punktidentifikations-Spalte (ID) mit fortlaufender Nummer angelegt, um den genauen Aufnahmeverlauf auch später noch nachverfolgen zu können.

¹ WGS84 bezeichnet das World Geodetic System 1984, welches ein einheitliches geographisches Koordinatensystem für die gesamte Erde darstellt und das Grundlagensystem für das Global Positioning System (GPS) bildet.

Die Rohdaten wurden als einfache ASCII-Textdatei mit kommaseparierten Werten übernommen, und mit Hilfe von Microsoft Access in eine dBase-Datei konvertiert, um den Import in ArcGIS als XY-Daten zu ermöglichen. Für die weitere Verwendung wurden die XY-Daten ins Shape-Format umgewandelt.

Der Umstand, dass die GPS-Koordinaten als Längen- und Breitengrade im WGS84-System erfasst wurden, erforderte nach dem Daten-Import in ArcGIS eine Koordinatentransformation ins metrische Gauß-Krüger-System (M34, Austrian Datum), um den Lagefehler aufgrund unterschiedlicher geodätischer Daten auszugleichen.

Neben dieser Lageanpassung mussten für die weitere Verwendung der Ertragsdaten Fehlerkorrekturen durchgeführt werden.

5.2.1. Eliminierung von Extremwerten

Nach Übernahme der Rohdaten wurden in einem ersten Schritt die Extrem- und Nullwerte eliminiert. Plausible Wertebereiche für die Ertragsmenge pro Messpunkt wurden nach Rücksprache mit DI Karl Refenner¹ von der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf definiert und entsprechend angewandt.

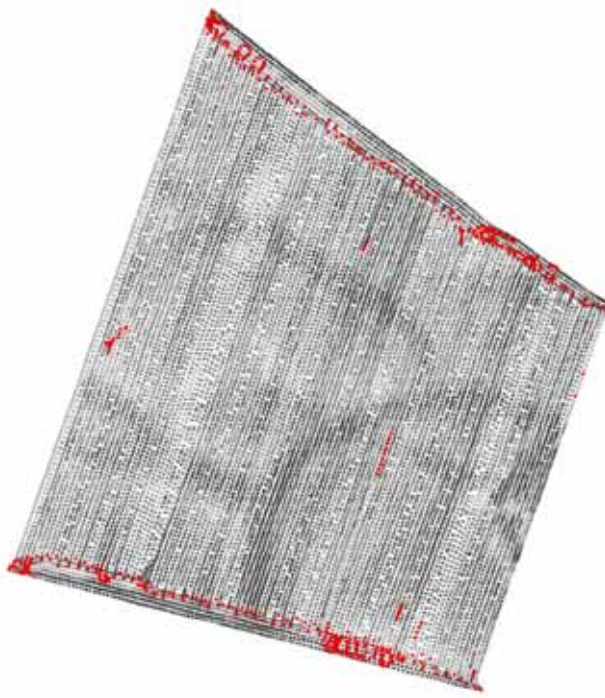


Abb. 47: Ertragsmessung Johannesbreite 2002 mit Markierung der Extremwerte

Realistische Ertragswerte finden sich zwischen 15 und 100 dt/ha. Werte darunter entstehen häufig beim Anfahren, wenn nicht die volle Länge zwischen zwei Messungen abgenommen wird. Extremwerte im oberen Bereich treten viel seltener (siehe weiter unten) und meist bei Verstopfungen in der Messeinheit auf.

Mit Entfernung der Extremwertmessungen wurden pro Datensatz zwischen 200 und 700 Punkte gelöscht, die sich aber fast ausschließlich in den Anfahr- und Wendebereichen der Schläge befanden, wie in der nebenstehenden Abbildung am Beispiel der Ertragsdaten von 2002 am Schlag Johannesbreite sehr gut zu sehen ist.

Gefiltert wurden an diesem Beispiel Werte die kleiner als 15 und größer als 100 dt/ha waren. Prozentuell betrachtet haben die Extremwerte im unteren Bereich (0-15dt/ha) einen Anteil von 90-95% bezogen auf alle

Extremwert bedingten Datenpunkte, und entstehen fast ausschließlich im Anfahrprozess.

¹ Telefonat mit DI Karl Refenner (Versuchswirtschaft Großenzersdorf, Department für Angewandte Pflanzenwissenschaften und Pflanzenbiotechnologie, Universität für Bodenkultur) am 27.5.2003

5.2.2. Fehlerhafte Ertragswerte im Wendebereich des Mähdreschers

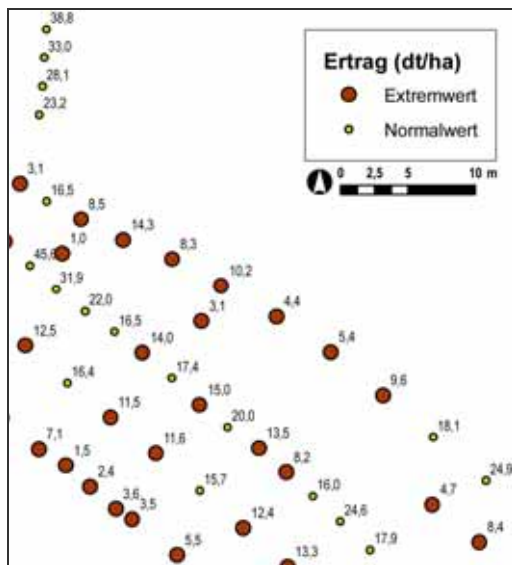


Abb. 48: Ertragsmessung Johannesbreite 2002;
Detailansicht der Extremwerte im Wendebereich

Im Bereich der Wende des Mähdreschers fällt der Großteil der Messfehler an. Diese Fehler sind primär dadurch bedingt, dass beim Wendemanöver die Mäheinheit häufig vom Boden abgesetzt wird, oder dass eine veränderte Schnittbreite (bedingt durch bereits abgemähte Teilstellen vorhergegangener Wendemanöver) fehlerhafte Daten verursacht (siehe dazu auch Kapitel 5.2.1).

Durch das unsystematische Auftreten dieser Fehler - Punktverdichtungen und/oder Extremwerte treten ohne erkennbares Muster oder System auf, bzw. dominieren weite Abschnitte wie in der nebenstehenden Abbildung (Abb. 48) zu erkennen - war eine mathematische Korrektur dieses Bereichs nicht möglich. Dazu kommt, dass in diesem Bereich auch für (scheinbar) gültige Werte nicht davon ausgegangen werden kann, dass es sich um einen für diesen Punkt wirklich korrekten Messwert handelt.

Für die weitere Verwendung wurden die Wendebereiche daher durch manuelles Löschen dieser Streifen ausgeschlossen. Ebenfalls von dieser Fehlerart betroffen sind Punkte im Nahbereich der Versuchsflächen, die umfahren werden mussten, was ebenfalls zu falschen Datenwerten aufgrund verringerter Schnittbreiten führte. Auch diese Bereiche wurden manuell bereinigt.

5.2.3. Bereinigung von Punktverdichtungen



Abb. 49: Ertragsmessung Johannesbreite 2002;
Detailansicht der Extremwerte bei Punktverdichtungen

In einigen wenigen Bereichen existieren Verdichtungen der Messpunkte (Norm-Abstand 5m) meist auch verbunden mit einer extremen Zu- oder Abnahme der Ertragswerte (siehe Abb. 49).

Besonders hohe oder tiefe Werte in diesen Abschnitten wurden bereits durch die Eliminierung der Extremwerte (siehe Kapitel 5.2.1) ausgeschieden. Die in diesen Bereichen verbleibenden, eng beieinander liegenden Punkte wurden mit Hilfe einer Distanzmessung zwischen den einzelnen Punkten aussortiert (ROBINSON & METTERNICHT, 2005).

Die Ermittlung der Distanz zwischen zwei Punkte erfolgte über den Satz von Pythagoras ($a^2 + b^2 = c^2$; bei einem rechtwinkligen Dreieck, wobei a und b die beiden Katheten und c die Hypotenuse beschreiben).

Die Umsetzung erfolgte mit Microsoft Excel.

Bei Unterschreitung einer Minimaldistanz zwischen zwei Punkten ($<3\text{m}$) wurde der Punkt ausgeschieden. Durch dieses Verfahren entstanden zwar einige kleine "Daten-Löcher" in den Messdaten, das dichte Punktenetz blieb aber weitgehend erhalten.

Insgesamt wurden mit den oben erwähnten Filtermethoden ca. 20% der GPS-Datenpunkte ausgeschieden, wobei der Großteil auf die entfernten Wendebereichsstreifen fiel. Dieser Wert deckt sich auch mit anderen Arbeiten zum Thema Ertragsdatenkorrektur (siehe dazu z.B. ROBINSON & METTERNICHT, 2003). Die Ausscheidungen bei der Entfernungsmessung und Extremwert-Entfernung lagen im Bereich von 1-2%. Die nachstehende Tabelle (Tab. 11) zeigt eine Übersicht aller GPS-Datensätze (siehe dazu auch Abb. 43) mit dem jeweils ausgeschiedenen Punkteanteil. Der generell höhere Wert beim Schlag Johannesbreite ist auf die zusätzliche Punktentfernungen im Bereich der ehemaligen Schottergrube zurückzuführen. Der Datensatz Johannesbreite 2005 ist davon nicht betroffen, da in diesem Jahr ein geänderter Flächenabschnitt gemessen wurde.

	Anteil entfernter Punkte
2002	
Johannesbreite	24%
Junge Neurisse	16,5%
Neurisse	23%
2003	
Johannesbreite	32%
Neurisse	21%
2004	
Johannesbreite	27,5%
Alte Neurisse	14,5%
2005	
Johannesbreite	10%

Tab. 11: Anteil der je Bewirtschaftungsschlag ausgeschiedenen Messpunkte gruppiert nach dem Aufnahmejahr

5.2.4. Korrektur des systematischen Fehlers durch Bodendüngung und Bodenverdichtung

Die Daten der GPS-Ertragsmessung zeigen in Bearbeitungsrichtung teilweise Streifenstrukturen aus, die tendenziell höhere Erträge beinhalteten, die aber nicht auf Reliefstrukturen zurückzuführen sind (siehe Abb. 50).

Diese Streifenstrukturen konnten nach einem Gespräch mit einem Vertreter der Versuchswirtschaft Großenzersdorf (DI Karl Refenner¹) auf unterschiedlich intensive Düngung früherer Bearbeitungen (bis

¹ Telefonat mit DI Karl Refenner (Versuchswirtschaft Großenzersdorf, Department für Angewandte Pflanzenwissenschaften und Pflanzenbiotechnologie, Universität für Bodenkultur) am 27.5.2003

2003 wurde das Bearbeitungsgebiet konventionell bearbeitet) und nicht auf einen Messfehler des GPS-Mähdreschers zurückgeführt werden.



Abb. 50: Ertragsmessung Johannesbreite 2002 mit gut zu erkennenden Düngungsbedingten Streifenstrukturen

Diese Aussage deckt sich auch damit, dass die Breitenausdehnungen dieser linearen Strukturen sehr genau mit der Breite eines Düngestreuers übereinstimmen (etwa 15-20m) und im Orthofoto (siehe Abb. 32) an der Vegetation erkennbar sind. Wie in Kapitel 4.2, beschrieben, wurde das Orthofoto am 28. April 2002, also nur kurz nach der Frühlingsaussaat aufgenommen, und auf den Streifenstrukturen ist die Vegetation bereits weiter entwickelt. Besonders stark war dieser Einfluss am Schlag Johannesbreite zu erkennen. Auf anderen Schlägen war unregelmäßige Düngung weder in den Ertragsdaten, noch am Orthofoto ausgeprägt zu erkennen.

Rein formal handelt es sich dabei zwar um keinen Fehler, da die Streifenstruktur ja lediglich höhere düngungsbedingte Erträge

ausweist. Da diese Tatsache sich jedoch nicht im Relief nachweisen lässt, wurde versucht, den Einfluss dieser Strukturen zu reduzieren, wobei zwei grundsätzliche Korrekturansätze getestet wurden:

Gerichtetes Ordinary Kriging der Ertragswerte:

Basierend auf der Annahme der räumlichen Autokorrelation der Ertragsdaten wurde versucht, den Düngungseffekt durch ein gerichtetes Ordinary Kriging quer zur Ausbreitungsrichtung der Streifen zu minimieren – Als Testdatensatz wurde die Ertragsmessung von Schlag Johannesbreite aus dem Jahr 2002 verwendet, da in diesem Datensatz die Streifenstrukturen besonders gut ausgeprägt waren. Wie im nachfolgenden Semivariogramm zu erkennen, besteht ein ausgeprägter räumlicher Zusammenhang zwischen den Ertragsmesspunkten bis zu einer Entfernung von 45m. Das theoretische Semivariogramm wurde als sphärisches Modell aufgebaut ($12,043 \cdot \text{Spherical}(46,992) + 4,7573 \cdot \text{Nugget}$):

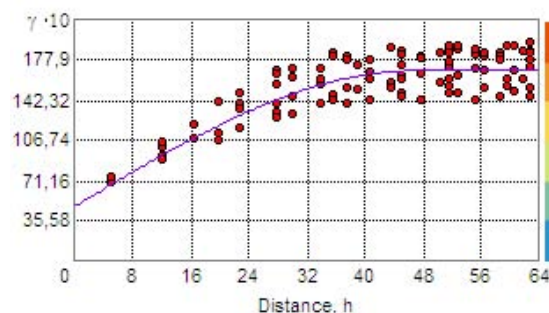


Abb. 51: Semivariogramm der Ertragsdatenmessung vom Schlag Johannesbreite (Erntejahr 2002; Lagsize=8m)

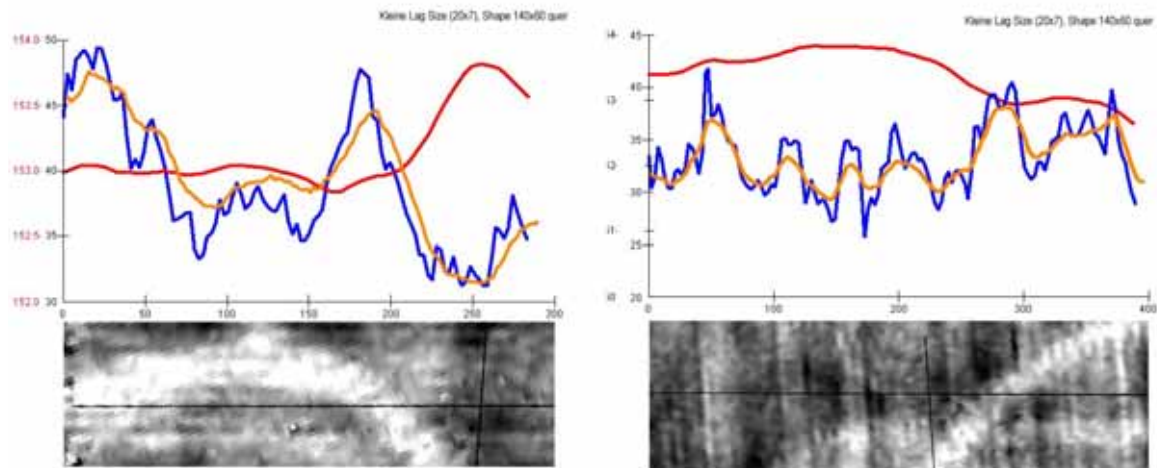


Abb. 52: Profilvergleich der gemessenen Erträge (blaue Linie) mit den Ergebnissen des gerichteten Ordinary Kriging (orange Linie). Die rote Linie zeigt das Höhenprofil.

Die durch das Kriging erzeugten Oberflächen in Abb. 52 zeigen im Profil einen deutlichen Glättungseffekt der Ertragsdaten (orange Linie). Der Streifeneffekt kann damit zwar minimiert, aber nicht vollständig gelöscht werden. Der Glättungseffekt nimmt jedoch sehr viel Information aus den Datensätzen, sodass kleinräumige Strukturen teilweise vollständig verschwinden. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt, und eine weitere Methode für die Korrektur des Streifeneffektes getestet.

Annahme der Gleichverteilung der Reihenmittelwerte mit dem Gesamtmittelwert der Ertragsdaten:

Bei dieser Methode wurde von der Annahme ausgegangen, dass eine Bearbeitungsreihe den gleichen Mittelwert wie die gesamte Ertragsmessung besitzt. Dazu wurden die einzelnen Bearbeitungsreihen auf die Mittelachse des Gesamtertrages projiziert und mit korrigierten Werten zurückgegeben. Voraussetzung dafür war eine eindeutige Zuordnung der einzelnen Punkte zu einzelnen Bearbeitungsreihen (siehe weiter unten)

Das Ergebnis ist eine weitgehende Auslöschung des Streifeneffekts unter Beibehaltung aller relevanten Strukturen und ohne Glättungseffekt.

Neben diesen, mehrere Streifen umfassenden Strukturen, sind auch Einzelreihen beziehungsweise Reihensegmente zu finden, deren Punktwerte stark von denen in unmittelbarer Umgebung (benachbarte Streifen) abweichen und im Vergleich sehr niedrige Erträge aufweisen. Hier liegt die Ursache an einer ungleichmäßigen Bodenbearbeitung oder an einer Bodenverdichtung. Als primäre Verursacher dieser Bodenverdichtungen sind einerseits schwere Bearbeitungsmaschinen, sowie alte Wegstrukturen (siehe Kapitel 4.2), die durch Änderungen der Bearbeitungsschläge aufgelassen wurden, zu nennen.

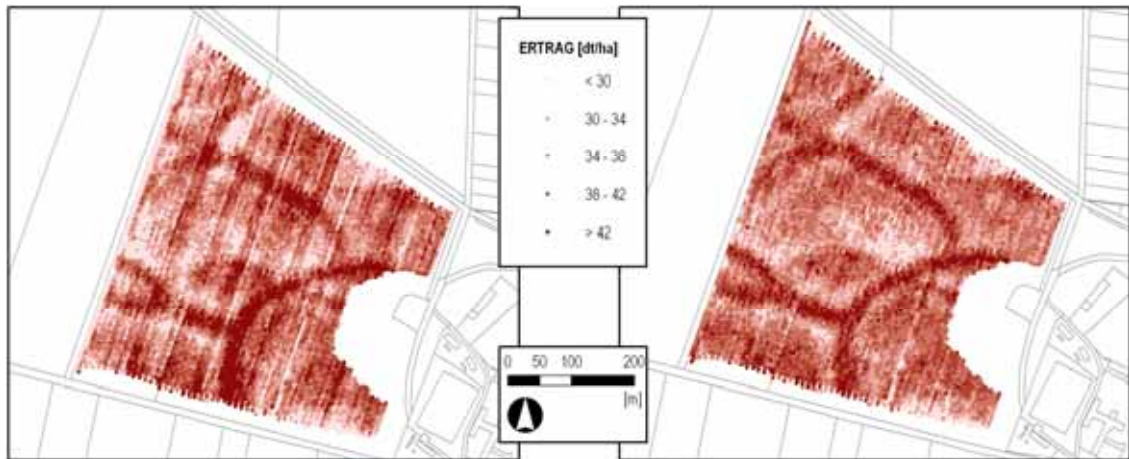


Abb. 53: Vergleich der Ertragsdaten (Ausschnitt Johannesbreite, 2002) vor und nach der Datenkorrektur auf Basis der Mittelwertanpassung

Ausweisung von Reihenkennungen:

Voraussetzung für den Mittelwertvergleich und die damit verbundene Korrektur der Ertragsdaten war eine Zuordnung der Punkte zu den jeweiligen Reihen. Da diese Information nicht in den aufgenommenen GPS-Daten enthalten war, musste eine nachträgliche Reihenausweisung am Computer erfolgen.

Aufgrund der hohen Punktemengen (7000-14000 Datenpunkte/Schlag) war eine manuelle Ausweisung bei der Datenmenge zu aufwändig und uneffizient, weshalb eine Funktion für die automatische Ausweisung der Reihenzuordnung entwickelt wurde.

Grundsätzlich ist diese Ausweisung über die Zeit möglich, wenn davon ausgegangen wird, dass der Wendevorgang etwas länger benötigt als die reguläre Datenaufnahme innerhalb einer Reihe (BLACKMORE & MOORE, 1999).

Da mit dem vorhandenen Aufzeichnungs-Monitor (siehe Kapitel 5.2) jedoch keine Zeitangaben aufgenommen wurden, musste die Reihenausweisung über die Analyse der Fahrtrichtung zwischen zwei Messpunkten ermittelt werden.

Dazu wurde ein Modell entwickelt, welches die Richtung der Strecke zwischen zwei Aufnahmepunkten einem Quadranten zuordnet, und daraus Informationen über die Zugehörigkeit zu einer Aufnahmereihe ableitet.

Am Beispiel Johannesbreite etwa verläuft die Bearbeitungsrichtung sehr konstant in Richtung SW-NO, was bedeutet, dass sich die Verbindungen zwischen zwei Punkten entweder im 1.Quadranten, oder bei Fahrt in die Gegenrichtung im 3.Quadranten befinden muss. Ein Schwenk in die Quadranten 2 oder 4 würde demnach einen Reihenwechsel bedeuten. Die Information, in welchem Quadranten sich die Linie befindet, wurde über die Vorzeichen in x/y-Richtung eingeholt (1.Quadrant +/+, 2.Quadrant -/+, 3.Quadrant -/-, 4.Quadrant +/-)

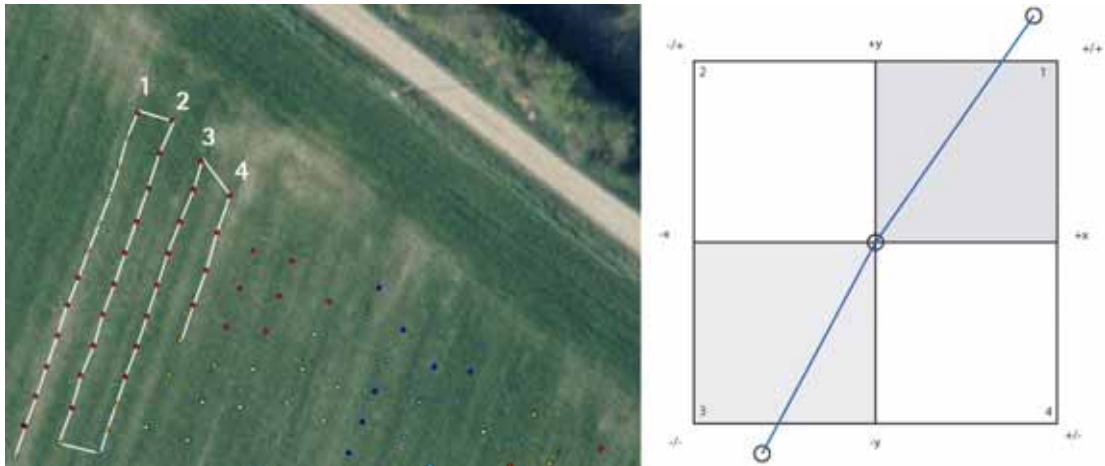


Abb. 54: Automatische Selektion der Bearbeitungsreihen, durch Berechnung des Quadranten, den eine Linie zwischen zwei aufeinander folgenden Messpunkten durchläuft.

Die Punktpaare wurden hinsichtlich ihrer Quadrantenlage automatisch analysiert, und einer Reihe zugeordnet. Bei einem Reihenwechsel wurde die Identifikationsnummer einer Reihe um eins erhöht, und den Folgepunkten bis zum nächsten Wechsel zugeordnet. Durch die sehr konstante Bearbeitungsrichtung im Untersuchungsgebiet lieferte diese Methode sehr gute Ergebnisse. Unzuverlässig wird dieser Ansatz bei wechselnder Bearbeitungsrichtung, was aber durch eine Unterteilung der Gesamtfläche in, hinsichtlich der Bearbeitungsrichtung, homogene Flächen lösbar ist, oder aber durch eine Bearbeitungsrichtung, die sich im Übergangsbereich zweier Quadranten befindet (Nord-Süd, Ost-West). In letzterem Fall, ist es möglich das Verfahren durch ein Verdrehen der Quadrantenmatrix zu verbessern.

Eine weitere Voraussetzung für diese Methode ist das Vorhandensein sauberer Übergänge zwischen den Reihen. Die Aussortierung der Punkte aus dem Wendebereich (siehe Kapitel 5.2.2) war also zwingende Voraussetzung, bevor dieser Ansatz umgesetzt werden konnte.

5.2.5. Geostatistische Interpolation der Punktdaten aus der GPS-gestützten Ertragsmessung

Für die weitere Verwendung der Ertragsmessungen als Datensatz für die Validierung der Interpolationsmodelle (siehe Kapitel 6.6) war es nötig, die Punktdaten durch Interpolation in eine flächenhafte Form zu bringen. Durch die knappen Punktabstände (ca. 5x5m) bestand eine ausgeprägte Autokorrelation zwischen den einzelnen Aufnahmepunkten, weshalb als Interpolationsmethode das Ordinary Kriging gewählt wurde.

Für die Umsetzung des Modells wurde ArcGIS mit der Extension „Geostatistical Analyst“ (siehe Kapitel 2.8.3) verwendet.

Zu Beginn stand die Variogrammodellierung. Das theoretische Variogramm wurde Nugget=5, Sill=12 und Range=50 festgelegt (siehe Abb. 55).

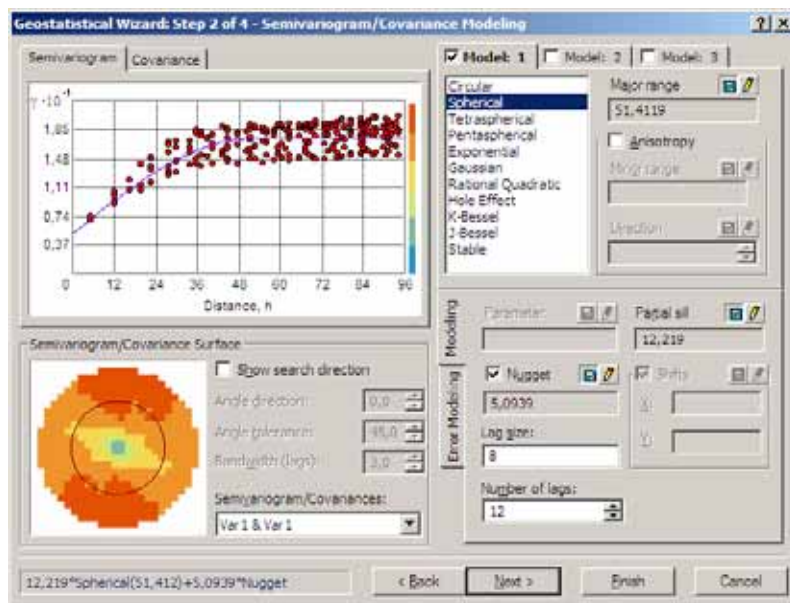


Abb. 55: Semivariogrammodellierung der Ertragsdaten in ArcGIS

Die Ergebnisse dieses Modells sind in nachfolgenden Plan zu sehen.

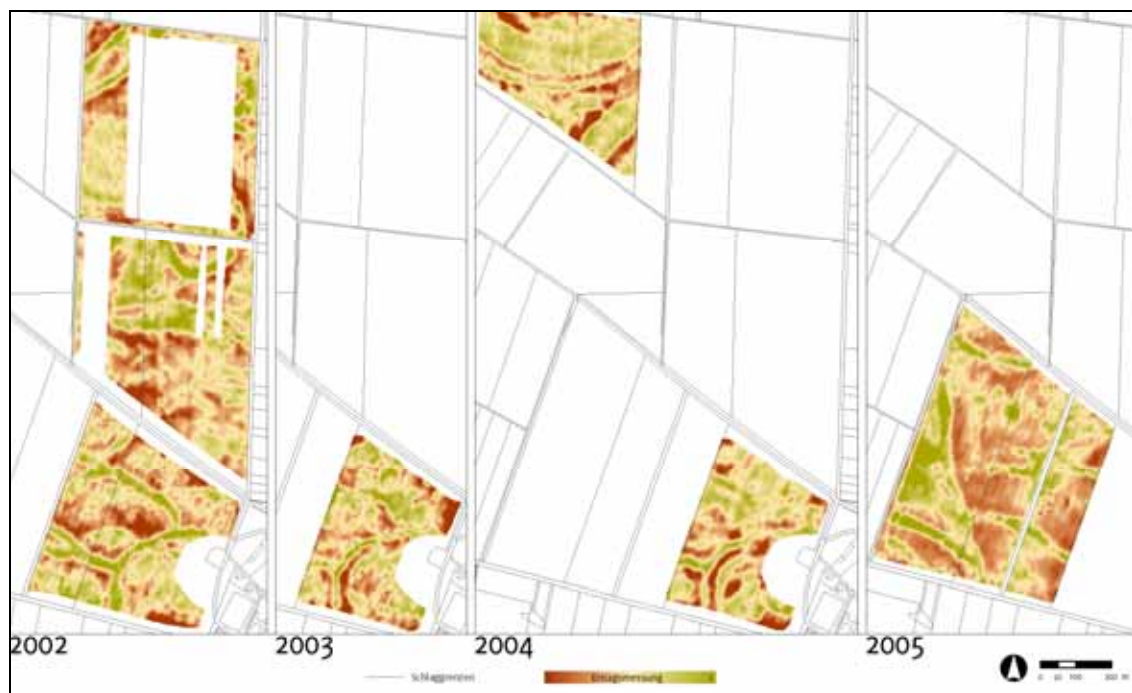


Abb. 56: Interpolation der Ertragsdaten durch Ordinary Kriging

Durch das flächenhafte Vorliegen der Daten wurde eine Grundlage für die Verwendung im Rahmen der Validierung (siehe Kapitel 6.6) geschaffen.

5.3. Vorbereitung des digitalen Geländemodells

Die Genauigkeit eines digitalen Raster-Geländemodells ist, neben der zu erwartenden Genauigkeit der verwendeten Aufnahmemethode, definiert durch die horizontale und vertikale Auflösung des Modells. Diese Auflösung hat einen signifikanten Einfluss auf die Ableitung von Reliefparametern wie Hangneigung, Exposition, Plan- und Profilkurvatur, etc. (KIENZLE, 2004), und diesen Derivaten kommt besondere Bedeutung bei der Schätzung von Bodenparametern zu (THOMPSON ET AL., 2001).

Die Ausgangsauflösung des vorhandenen Höhenmodells (siehe Kapitel 4.2) war mit 1x1m für die Verwendung in den Interpolationsmodellen zu fein. Das durch die hohe Auflösung wiedergegebene Mikrorelief bedingte eine Vielzahl kleinräumiger lokaler Artefakte, die einerseits keinen Einfluss auf bodenbildende Prozesse haben, und andererseits die Rechenzeiten stark erhöht hätten. Dazu kommt, dass für den Einsatz in der Precision Agriculture eine Auflösung von 1x1 Meter viel zu genau wäre, da diese Auflösung im Feld mit den eingesetzten Maschinen nicht erreicht werden kann. Ein Düngestreuer etwa bedient eine Breite von 15-20m.

Auf der anderen Seite bewirken zu große Auflösungen, dass auch übergeordnete Reliefstrukturen verschwinden oder zumindest stark abgeschwächt werden. Für die Ableitung und Analyse von Reliefparametern wird eine Auflösung benötigt, welche die Variabilität des Reliefs und die Mehrheit der morphologischen Elemente optimal repräsentiert (KIENZLE, 2004).

Basierend auf eigenen Tests mit unterschiedlichen Auflösungen, und beziehend auf Arbeiten zur optimalen Rasterauflösung für die Schätzung von Bodenparametern (THOMPSON ET AL., 2001; WEIHUA & MONTGOMERY, 1994; LIANG ET AL., 2004) wurde für das vorliegende Untersuchungsgebiet eine optimale Auflösung von 5x5m ermittelt. Ausschlaggebend war dabei der uneingeschränkte Erhalt bodenbeeinflussender Geländestrukturen im Arbeitsgebiet, bei gleichzeitiger Auflösung bzw. Verringerung von Mikroreliefstrukturen sowie des durch die Erstellungsmethode bedingten Pixel-Rauschens (Noise) (siehe auch Kapitel 4.2). Um die sehr feinen Absenkungen im Arbeitsgebiet gut abbilden zu können, wurde die vertikale Auflösung von 0,1m beibehalten.

5.4. Ableitungen aus dem digitalen Geländemodell

Basierend auf dem optimierten Geländemodell wurden die Reliefparameter abgeleitet. Dazu wurden meist mehrere Softwarepakete getestet, da sich hier durchaus große Unterschiede in Anhängigkeit vom verwendeten Modell ergeben (siehe Kapitel 2.6).

Für die weitere Verwendung in den Interpolationsmodellen wurde immer jene Modelle ausgewählt, die im Rahmen der Korrelationsanalysen (siehe Kapitel 6.2) die besten Zusammenhänge mit den Ackerzahlen aufwiesen.

5.4.1. Hangneigung

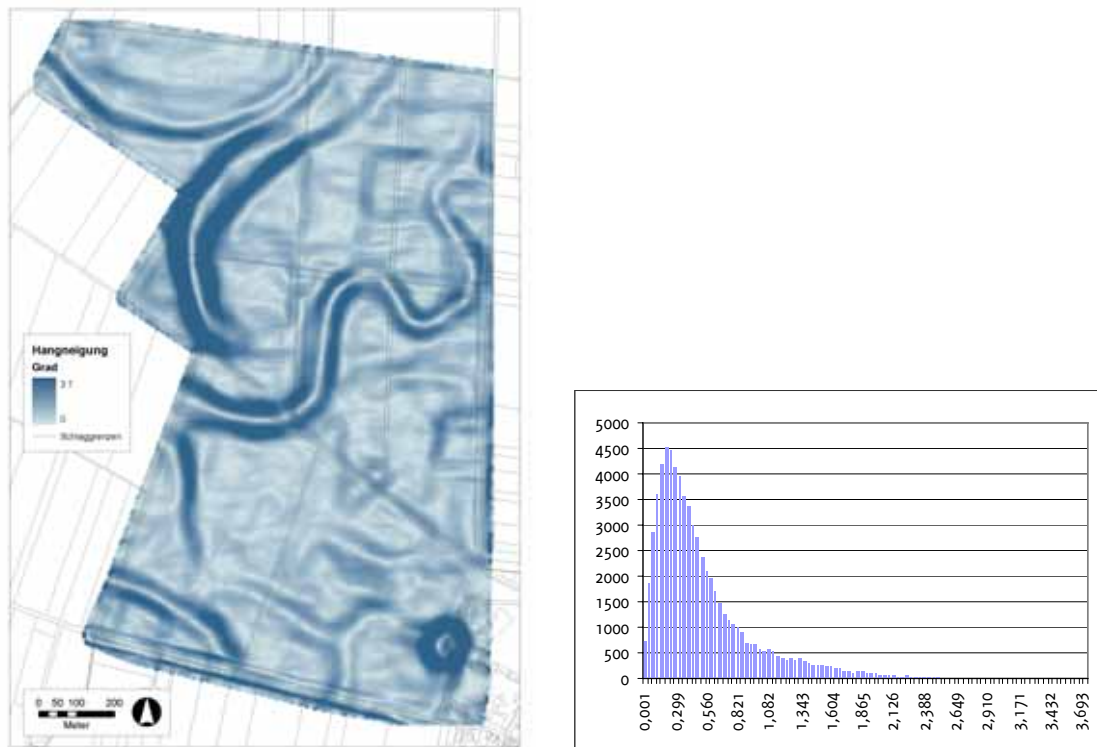


Abb. 57: Hangneigungen

Die Hangneigung eines Rasters wurde mit Hilfe eines 3x3-Zellen Moving Window in ArcGIS berechnet. Die Steigungen im Arbeitsgebiet variieren zwischen 0 und 3,7 Grad Steigung, formal betrachtet kann man bei diesen Verhältnissen also kaum von Hängen sprechen. Das Histogramm zeigt darüber hinaus, dass nur ein sehr geringer Anteil an Rasterzellen Werte besitzt, die größer als 1 Grad sind. Bei den ausgewiesenen Hangbereichen handelt es sich im Bearbeitungsgebiet ausschließlich um die Uferbereiche der ehemaligen Gewässerläufe.

5.4.2. Plan- und Profilkurvatur

Für die Berechnung der Kurvatur wurden verschiedene Programme getestet (siehe Kapitel 2.8), da sich bei Anwendung der Kurvatur-Funktion in ArcGIS methodenbedingte Artefakte (siehe Kapitel 2.6.2) in der Kurvatur-Oberfläche fanden. Ein Workaround in der ESRI Knowledgebase bestätigte das mögliche Auftreten von Anomalien¹, da die Funktion nach ZEVENBERGEN & THORNE (1987) sehr sensibel auf lokale Variationen reagiert. Als möglicher Ansatz wird eine sehr starke Glättung des Höhenmodells empfohlen (z.B. ein Median-Filter mit einem Radius von 3-5 Zellen), was im Fall des Untersuchungsgebietes allerdings zu einer sehr starken Generalisierung führen würde.

¹ Diskussion in der ESRI Knowledge Base unter forums.esri.com/Thread.asp?c=93&f=995&t=86902#238268 [Verfügbar: 28.3.2007]

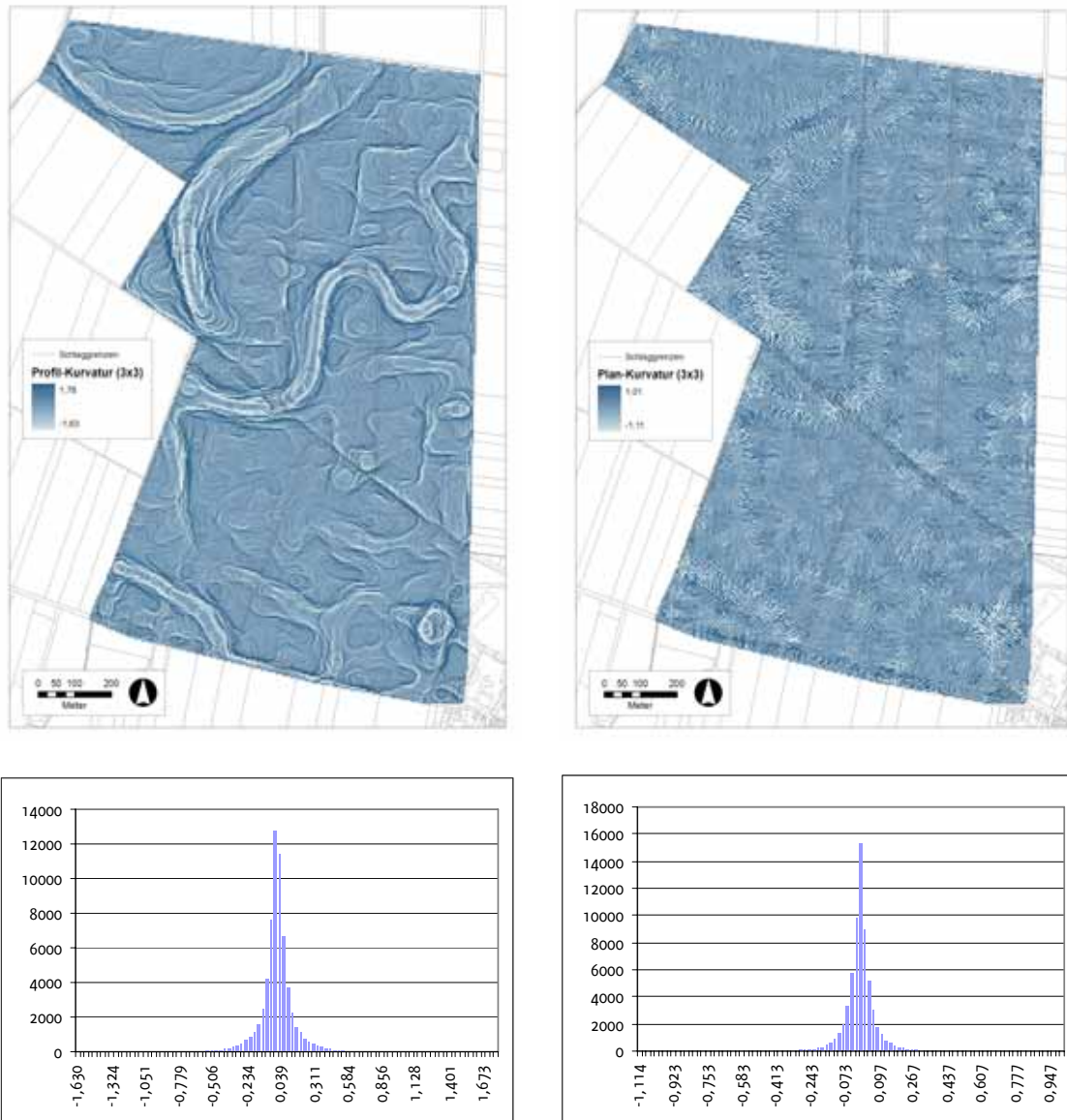


Abb. 58: Profil- und Plankurvature nach ZEVENBERGEN & THORNE (1987) mit teilweise starker Artefaktbildung

Zur Verbesserung der Kurvatureberechnung wurden verschiedene Verfahren und Software-Pakete getestet, wobei das beste Ergebnis mit der Open Source Anwendung Landserf (siehe Kapitel 2.8.1) erzielt wurde, da mit diesem Programm das Moving Window beliebig vergrößert werden kann, während andere GIS-Applikationen auf ein 3x3-Zellen Moving Window für die Berechnung der Kurvature begrenzt sind.

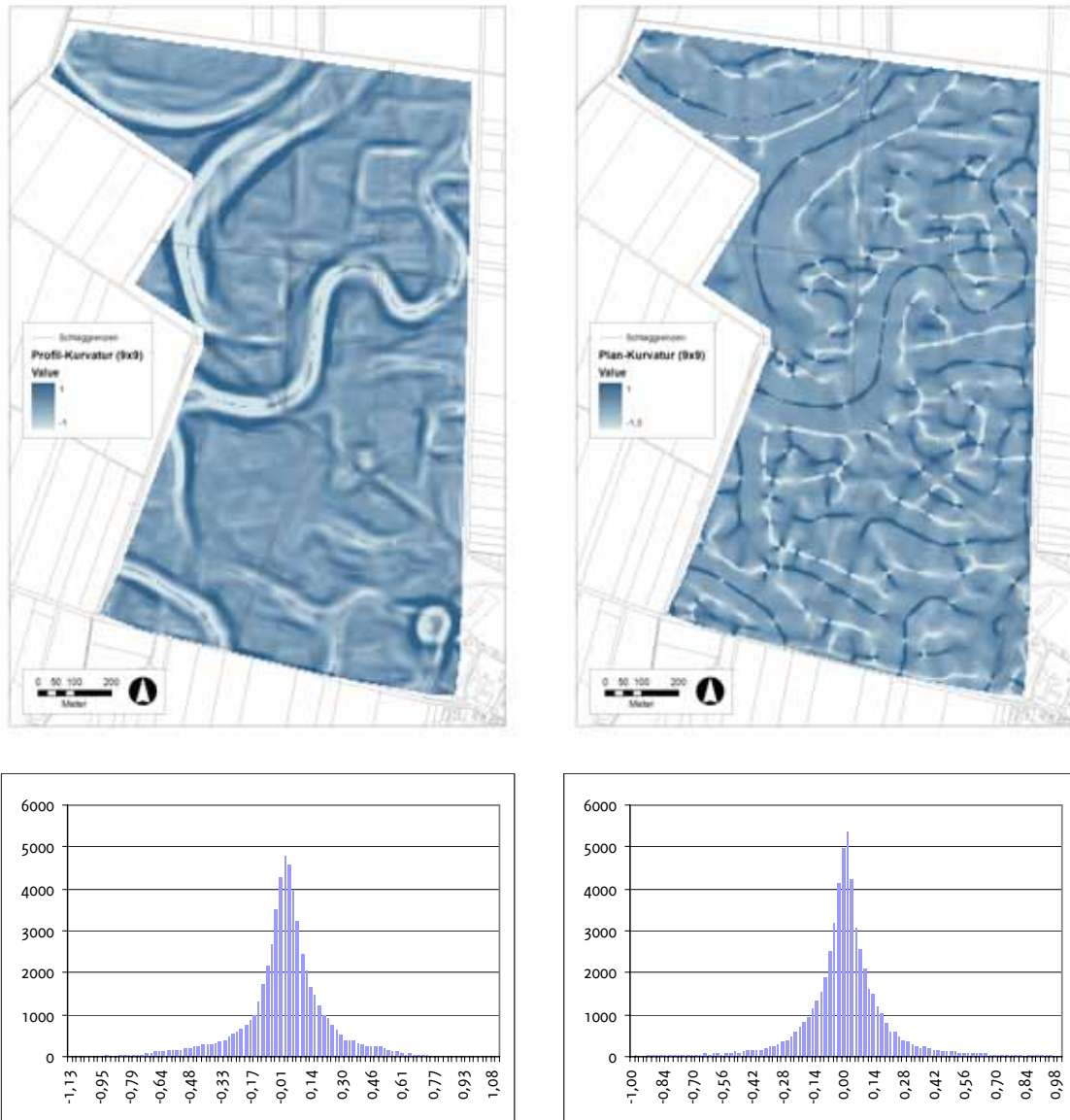


Abb. 59: Profil- und Plankurvature nach Wood (1996) mit einem 9x9 Moving Window

Während die Kurvatureberechnung nach ZEVENBERGEN & THORNE (1987) teilweise starke Artefakte bedingt (siehe Abb. 58), zeigt die Methode nach EVANS (1980) ein deutlich homogeneres Ergebnis (siehe Abb. 59). Die Berechnung erfolgt mit einer modifizierten Methode nach Wood (1996) mit einem 9x9 Moving Window im Programm Landserf (siehe Kapitel 2.8.1).

5.4.3. Relative Höhe

Die relative Höhe wurde mit Hilfe einer fokalen Funktion ermittelt, indem für jeden Punkt des Höhenmodells eine Mittelwerthöhe für ein Fenster der Größe 100x100m berechnet wurde, welche dann von der tatsächlichen Höhe subtrahiert wurde.

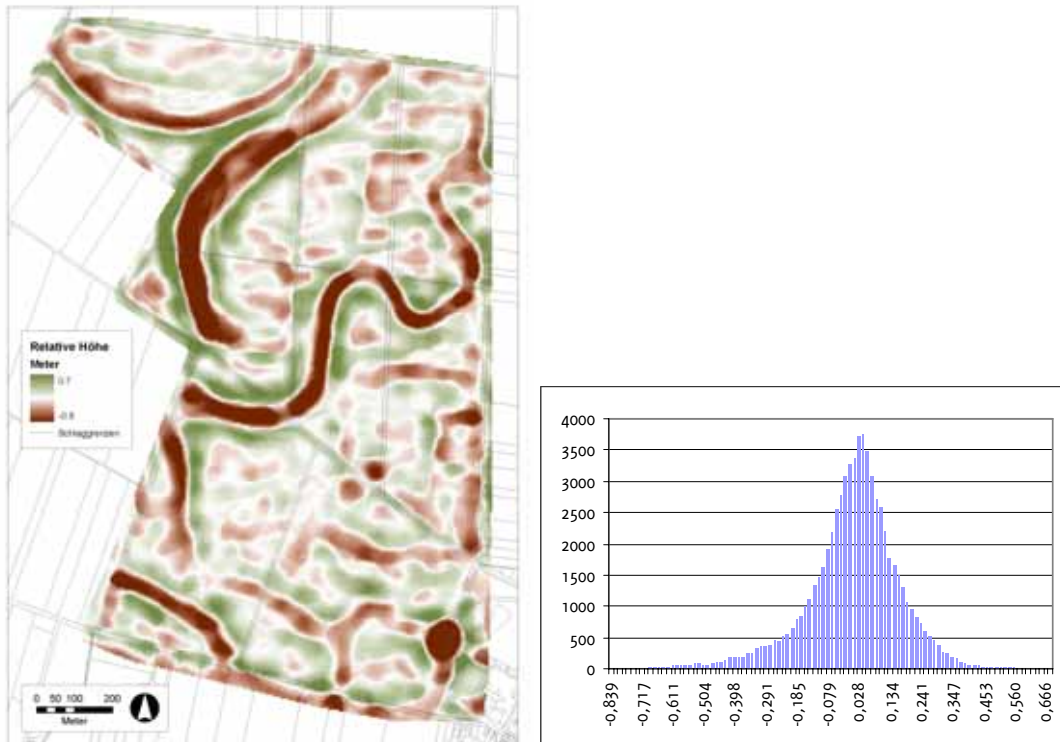


Abb. 60: Relative Höhe

Aufgrund der generell sehr geringen Höhenunterschiede schwankt die relative Höhe für die 100x100m Referenzfläche nur zwischen -0,8 und 0,6 Metern. Die roten Bereiche in der Karte zeigen relative Tieflagen, in denen tiefgründigere Böden mit höherem Feinanteil und damit höheren Ackerzahlen erwartet werden. Grüne Bereiche zeigen hingegen relative Hochlagen, an denen expositionsbedingt geringere Horizontmächtigkeiten und damit geringere Erträge erwartet werden.

5.4.4. Landformen

Die Ausweisung von Landformen bedeutet eine Segmentierung der Landschaft in einheitliche Landformenklassen, wobei je nach Methode (siehe Kapitel 2.6.5) verschiedene Landformen ausgewiesen werden können. Die Segmentierung basiert auf der Analyse von Reliefparametern und kann auf verschiedenen Maßstabsebenen durchgeführt werden.

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Landformenmodell basiert auf der Auswertung von Höhe, Hangneigung, Profil- und Plankurvatur.

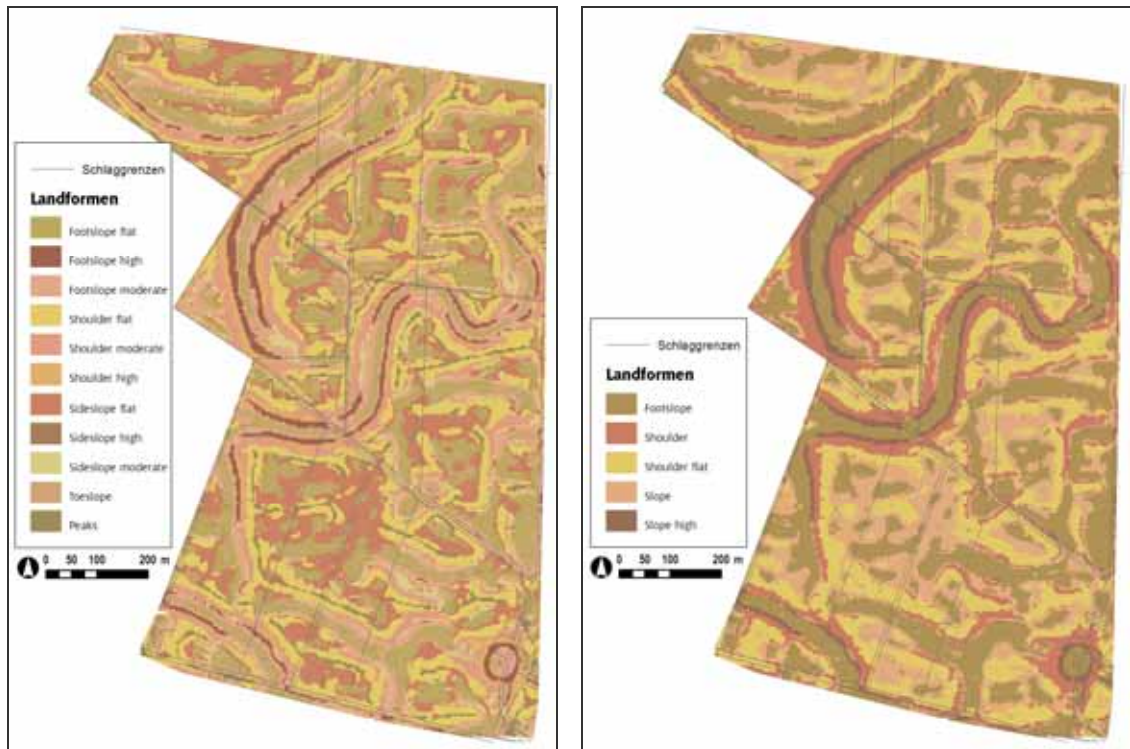


Abb. 61: Vollständiges Landformenmodell (links) und ausgewiesenen Landformengruppen (rechts) für die weitere Bearbeitung

Für den Aggregationsschritt zur Vereinfachung des Landformenmodells (siehe Abb. 61 – rechts) wurden die statistischen Zusammenhänge zwischen Ackerzahlen und Landformen untersucht, um Klassen gleicher Eigenschaften zusammenzufügen.

Das nachfolgende Boxplot-Diagramm zeigt die Verteilung der Ackerzahlwerte innerhalb der einzelnen Landformen (1=Peaks, 2=Shoulder flat, 3=Shoulder moderate, 5=Footslope flat, 6=Footslope high gradient, 7=Footslope Moderate, 8=Shoulder high gradient, 9=Side Slope flat, 10=Side Slope high gradient, 11=Side Slope moderate, 12=Toeslope).

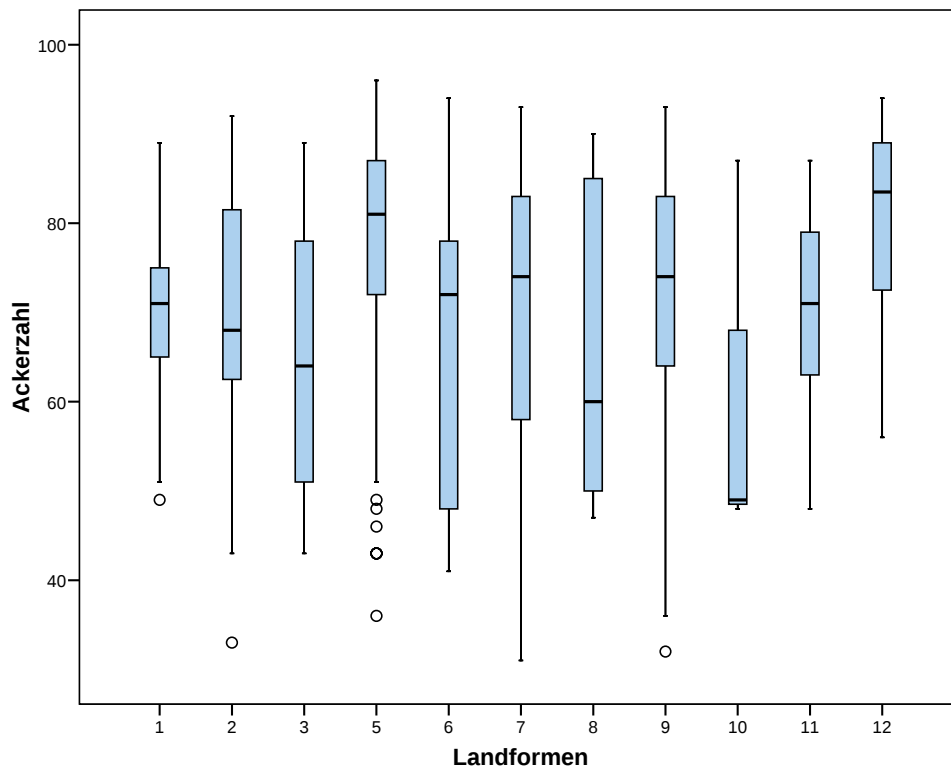


Abb. 62: Box-Plot Darstellung der Ackerzahlen-Verteilung innerhalb einzelner Landformen

Die fehlende Klasse 4 in obiger Darstellung bezeichnet die Background Klasse, also Bereiche in denen keine Geländeinformation vorliegt. Da alle Probenpunkte am Höhenmodell liegen, ist diese Klasse leer. Die Peak-Klasse (1) wurde zwar an wenigen Positionen ausgewiesen (16 Punkte liegen in dieser Landform), ist aber von der Charakteristik der Shoulder, also Hangoberkante zuzurechnen, zumal sie auch eine Längsausdehnung besitzt (siehe Kapitel 2.6.5). Die Landform Side Slope high (10) betrifft nur drei Messpunkte, wodurch sich auch der stark verzerrte Box-Plot erklärt.

ID-Landform	Landform	ID-Gruppe	Landform-Gruppe
4	Background	0	Background
5	Footslope flat	1	Footslope
7	Footslope Moderate	1	Footslope
12	Toeslope	1	Footslope
3	Shoulder moderate	2	Shoulder
8	Shoulder high	2	Shoulder
6	Footslope high	3	Slope high
10	Side Slope high	3	Slope high
1	Peaks	4	Shoulder flat & Peaks
2	Shoulder flat	4	Shoulder flat & Peaks
9	Side Slope flat	5	Sideslope
11	Side Slope moderate	5	Sideslope

Tab. 12: Landformen und deren Zuweisung zu Landformengruppen

5.4.5. Topographischer Feuchtigkeitsindex

Der topographische Feuchtigkeitsindex (Topographic Wetness Index, TWI) wurde mit SAGA berechnet und definiert sich als Gewichtung der Fließakkumulation (Catchment Area) des Reliefs mit der Hangneigung (siehe Kapitel 2.6.6).

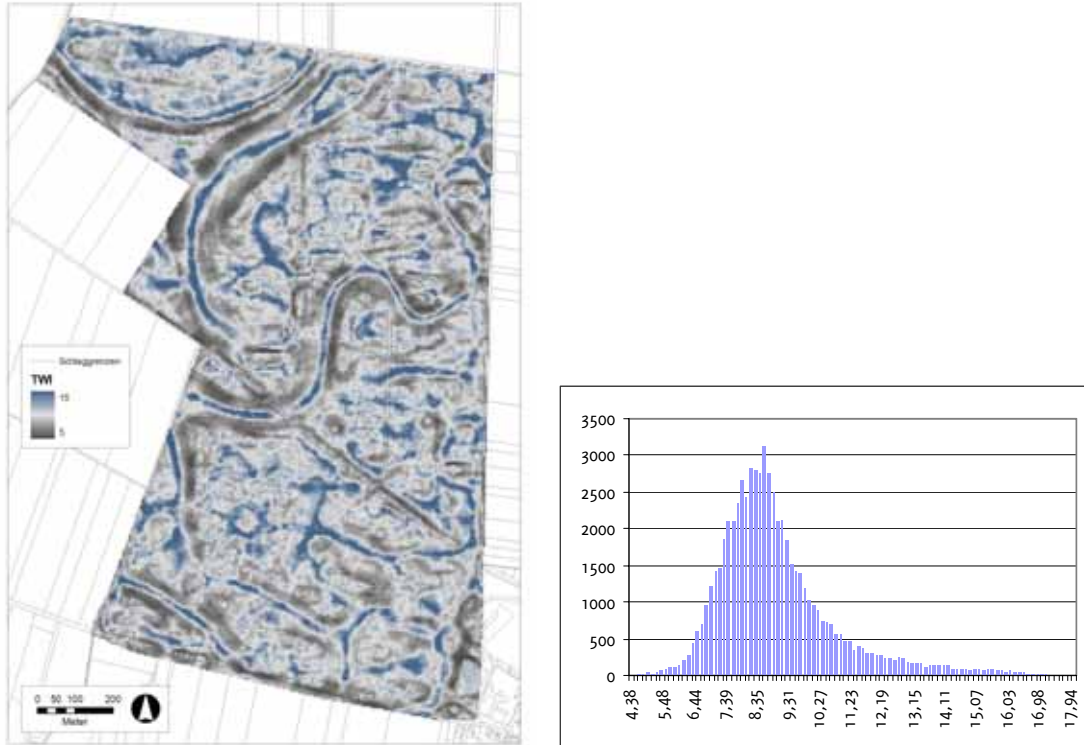


Abb. 63: Topographischer Feuchtigkeitsindex (TWI)

Höhere Werte zeigen Gebiete mit höherer Bodenfeuchte an. Das Modell (siehe Abb. 63) zeigt hier sehr gut die tendenziell bessere Wasserversorgung am Grund der ehemaligen Gewässerläufe. Als, hinsichtlich der Wasserversorgung, ungünstigste Areale werden die Hangoberkanten identifiziert.

6. Ergebnisse

Das Kapitel 6 umfasst eine Darstellung aller im Rahmen dieser Arbeit erstellten Modelle und Analysen. In Kapitel 6.2 und 6.3 werden die statistischen Zusammenhänge zwischen Ackerzahlen und Reliefparametern sowie den Ertragsdaten in tabellarischer und graphischer (Diagramme) Form dargestellt. Im Anschluss daran werden die Interpolationsergebnisse erläutert. Dabei wird der Arbeitsablauf, die verwendeten Daten Softwarepakete erläutert. Am Ende steht jeweils eine, auf Basis des verwendeten Interpolationsmodells erstellte Rasterkarte. In Kapitel 6.6 folgt eine Gegenüberstellung der einzelnen Interpolationsmodelle im Rahmen verschiedener Validierungsansätze.

6.1. Darstellung der Interpolationsergebnisse

Auf Basis der verwendeten Interpolationsmodelle werden aus Punktdaten kontinuierliche Oberflächen erzeugt (siehe Kapitel 2.7), die mit Hilfe eines geographischen Informationssystems kartographisch als Vektor-Konturlinien (Isoplethen), diskrete reguläre Rasteroberflächen oder als irreguläre Kachel-Fläche (trianguliertes irreguläres Netzwerk, TIN) dargestellt werden können (BURROUGH & McDONNELL, 1998).

Aufgrund der im Rasterformat vorliegenden Eingangsdaten mit einer Raster-Auflösung von 5x5m wird für die Darstellung der Ergebniskarten auch das Rasterformat mit einer Auflösung von 5x5m verwendet. Die Darstellung der Ackerzahlen erfolgt in Klassen mit konstanter Klassenbreite von 5 Ackerzahl-Einheiten.

Über den interpolierten Ergebniskarten werden die Flächen der manuellen Ausweisung (siehe Kapitel 4.1.2) zum Vergleich dargestellt. Die Zahlenangaben in den Karten geben die jeweils kumulierte Ackerzahl der manuell ausgewiesenen Flächeneinheiten an. Die Ackerzahlen der Probennahmepunkte werden mit einer konstanten Klassenbreite von 10 Ackerzahl-Einheiten als skalierte Punktsymbole dargestellt. In Kapitel 6.7 findet sich eine Übersicht aller erstellten Interpolationsmodelle.

6.2. Zusammenhänge zwischen der Ackerzahl und Reliefparametern aus dem digitalen Geländemodell

Die Zusammenhänge zwischen Ackerzahlen und verschiedenen Reliefparametern wurde im Statistikpaket SPSS¹ mit Hilfe von bivariaten Korrelationsanalysen und Streudiagrammen (Scatterplots) durchgeführt. Ziel dieser Analysen war es, jene Parameter, welche die Ackerzahl beeinflussen, für die nachfolgenden Interpolationsmodelle zu identifizieren.

Die Korrelationsanalyse nach Pearson brachte dabei folgendes Ergebnis:

		rel. Höhe	Hangneigung	Profilkurv.	Plankurv.	Exposition	TWI
Ackerzahl	Pearson-Korr.	-0,192	-0,216	-0,234	0,056	-0,119	0,233
	Sig. (2-s.)	0,000	0,000	0,000	0,193	0,005	0,000
	N	542	542	542	542	542	542

Tab. 13: Korrelationsanalyse nach Pearson

¹ SPSS ist ein umfangreiches kommerzielles Statistikpaket, der Firma SPSS Inc. www.spss.com [Verfügbar: 12.04.2007]

Die oben stehende Tabelle (Tab. 13) zeigt signifikante Zusammenhänge zwischen Ackerzahl und Hangneigung, Profilkurvatur, Exposition, relativer Höhe sowie dem topographischen Feuchtigkeitsindex (TWI). Was die sehr niedrigen Korrelationskoeffizienten vermuten lassen, zeigt sich in der Darstellung dieser Zusammenhänge in Form von Streudiagrammen (siehe Abb. 64). Die Zusammenhänge streuen sehr stark (siehe dazu auch MERGILI ET AL., 2006), was auch die Ursache für das schwache Bestimmtheitsmaß des Regressionsmodells ist (siehe Kapitel 2.7.1).

Bedingt durch das weitgehend ebene Arbeitsgebiet zeigt sich auch bei allen Reliefparametern eine unverhältnismäßig starke Punkt-Konzentration um die jeweiligen Null-Werte (ebene Lagen), da diese anteilsmäßig dominieren.

Die Exposition lässt an sich keine Struktur für die Ausgleichsgerade erkennen und ist fast horizontal. Dazu kommt, dass in den ebenen Lagen die Exposition durch Mikro-Reliefstrukturen sehr stark variiert. Aus diesen Gründen wurde die Exposition nicht in die weiteren Interpolationsmodellen integriert.

Der Topographische Feuchtigkeitsindex (TWI) zeigt zwar signifikante Zusammenhänge, ist in seiner Aussagekräftigkeit jedoch genau so unsicher wie die anderen Reliefparameter. Da der Index auf der Hangneigung und relative Höhenunterschieden aufbaut liefert er keine zusätzlichen Informationen zur Modellerstellung und wurde aus diesem Grund nicht weiter verwendet.

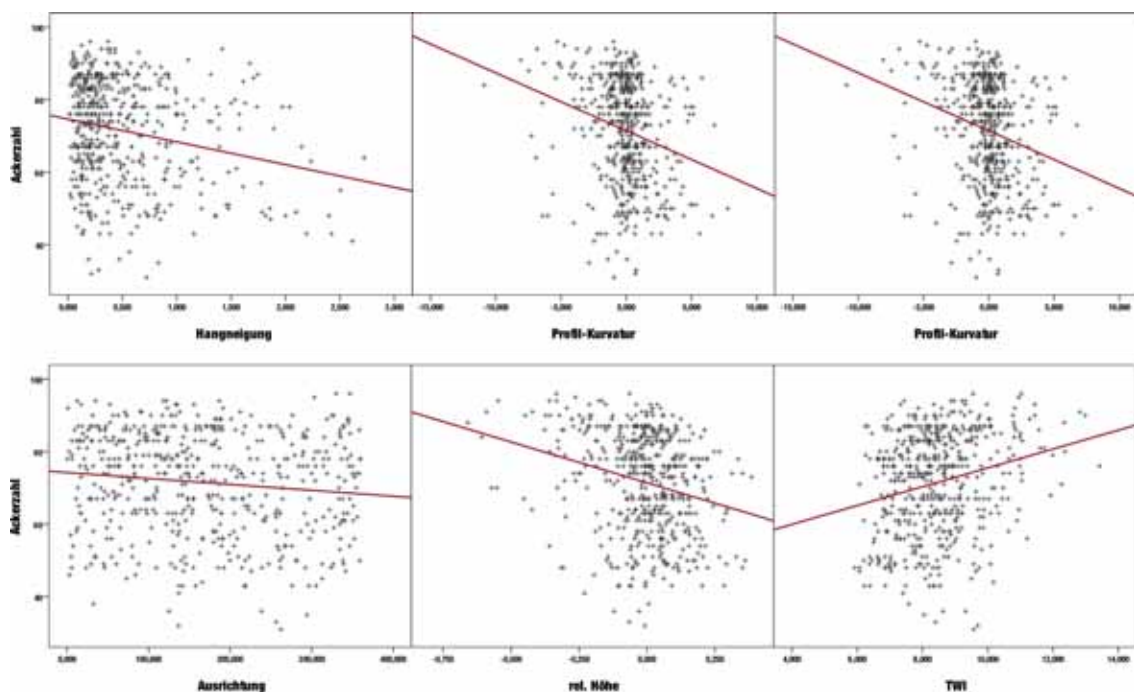


Abb. 64: Streudiagramme mit Ausgleichsgeraden zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen Ackerzahl und den einzelnen Reliefparametern (N=542)

6.3. Zusammenhänge zwischen der Ackerzahl und GPS-Daten der Ertragsmessung

Die Ackerzahl beschreibt als Komplexgröße die natürliche Ertragsfähigkeit eines Bodens (siehe Kapitel 2.5). Umgekehrt kann davon ausgegangen werden, dass mit Hilfe von Ertragsdaten (siehe Kapitel 4.3) die Qualität (ausgedrückt durch die Ackerzahl) eines Bodens beschrieben werden kann. Dieser angenommene Zusammenhang wurde für die Evaluierung der Interpolationsmodelle genutzt.

Aufgrund der nicht flächendeckend aufgenommenen Ertragsdaten (siehe Kapitel 4.3) konnte jeweils nur eine Auswahl der Bodenprobenpunkte für die Untersuchung der Zusammenhänge herangezogen werden. Da die Ertragsmessungen in Punktdatenform vorlagen, wurden die Daten der Ertragsmessungen interpoliert (siehe Kapitel 5.2.5), um Sie mit den Bodenproben vergleichen zu können. Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Zusammenhänge zwischen Ackerzahlen und Ertragsdaten, aufgeschlüsselt nach Bearbeitungsschlag und Aufnahmejahr.

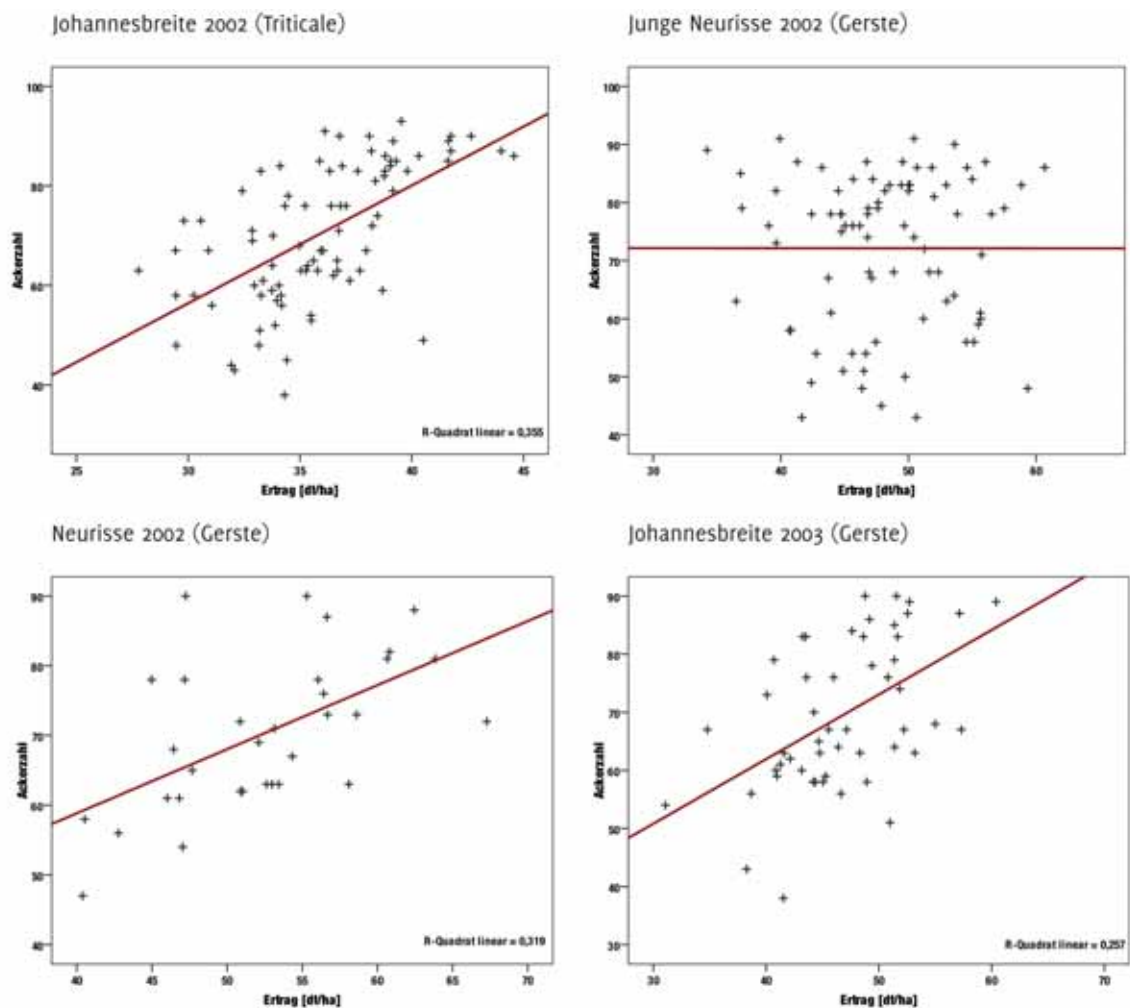


Abb. 65: Zusammenhänge zwischen Ackerzahlen und Ertragsdaten aufgeschlüsselt nach Bearbeitungsschlag und Aufnahmejahr (1/2)

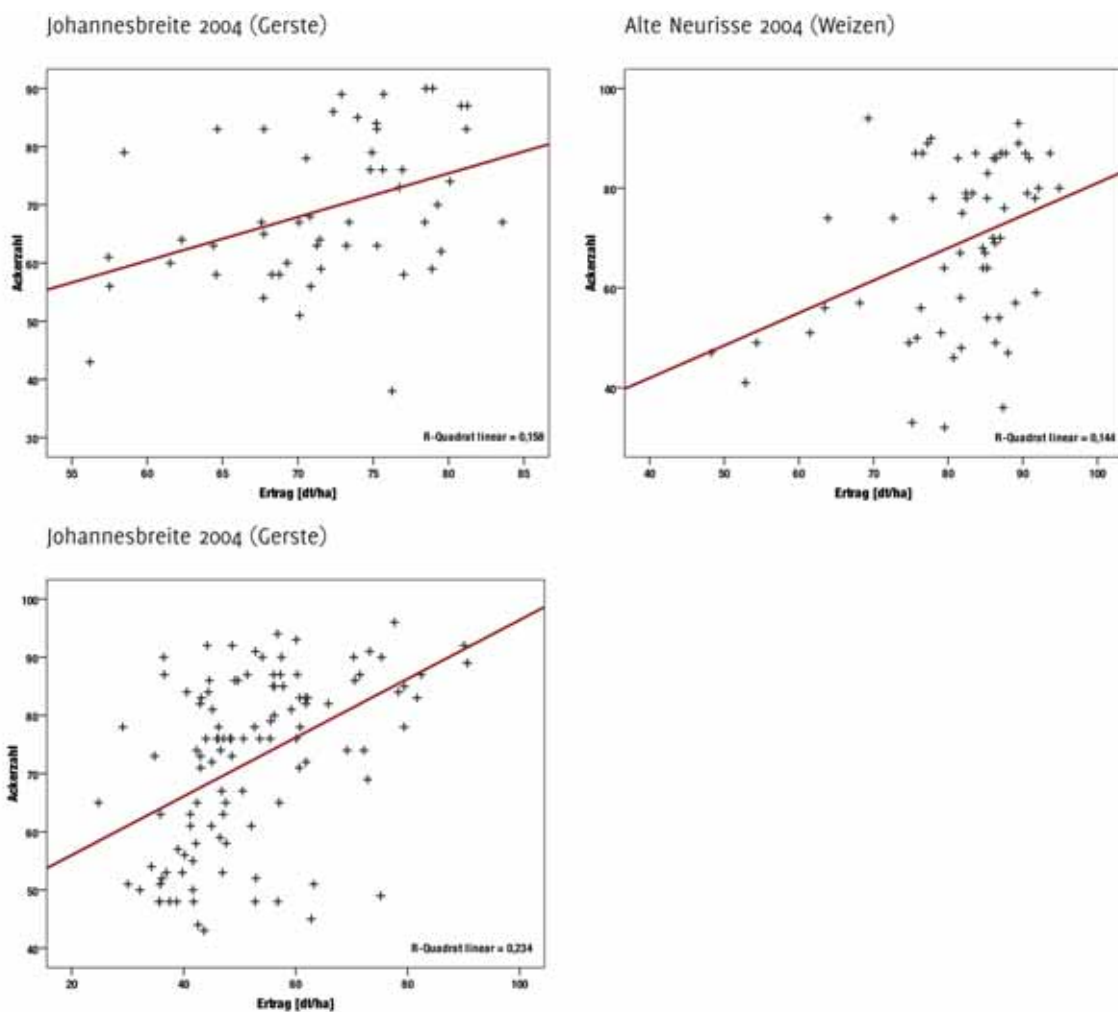


Abb. 66: Zusammenhänge zwischen Ackerzahlen und Ertragsdaten aufgeschlüsselt nach Bearbeitungsschlag und Aufnahmejahr (2/2)

	2002			2003	2004		2005
	Johannesbr.	J. Neurisse	Neurisse	Johannesbr.	Johannesbr.	A. Neurisse	Johannesbr.
Pearson-Korrelation	0,597	-0,001	0,596	0,507	0,380	0,397	0,483
Sig. (2-s.)	0,000	0,996	0,000	0,000	0,002	0,004	0,000
N	80	82	85	51	63	51	112

Tab. 14: Korrelationsanalyse nach Pearson für die einzelnen Aufnahmejahre und Bearbeitungsschläge

Mit Ausnahme der Ertragsmessung auf dem Bearbeitungsschlag „Junge Neurisse“ aus dem Jahr 2002 bestehen signifikante Zusammenhänge zwischen der Ackerzahl an einem Punkt und dem an dieser Stelle gemessenen Ertrag. Das Bestimmtheitsmaß liegt je nach Aufnahmejahr und Bearbeitungsschlag zwischen 15% und 35%. Ausgeschlossen wurde der Schlag „Junge Neurisse“ für das Jahr 2003, da sich hier durch Aussparung der Versuchsflächen sehr viele nicht korrigierbare Fehler befanden (siehe Kapitel 5.2).

Das teils nicht besonders ausgeprägte Bestimmtheitsmaß zeigt an, dass der Ertrag selbst nicht ausschließlich von der Ertragsfähigkeit des Bodens, sondern auch von anderen Faktoren mitbestimmt

wird. Wesentlich wirken sich hier Düngung sowie klimatische Bedingungen aus. Dazu kommt, dass einjährige Messreihen trotz Fehlerbereinigung (siehe Kapitel 5.2) eine Vielzahl fehlerhafter Werte beinhalten können, die sich nur durch mehrjährige Aufnahmezyklen bereinigen lassen (VITHARANA ET AL. 2008).

6.4. Nichträumliche Interpolation auf Basis eines linearen Regressionsmodells

Auf Basis nichträumlicher Statistik wurde ein lineares Regressionsmodell mit externen Hilfsvariablen aus dem Geländemodell aufgebaut.

Ablauf

Da für die Umsetzung des Regressionsmodells das Statistikpaket SPSS verwendet wurde, kam als Schnittstellenformat das dBase-Tabellenformat zum Einsatz, welches sowohl von ArcGIS als auch SPSS verarbeitet werden kann. Vor der Durchführung der multiplen Regressionsanalyse in SPSS mussten den Punktdaten der Finanzbodenschätzung die jeweiligen Reliefparameter (Hangneigung, Krümmung, etc.) zugeordnet werden. Dies wurde mit Hilfe von ArcGIS umgesetzt, die Tabelle wurde anschließend für die weiteren Analysen in SPSS exportiert.

Auf Basis der vorangegangenen Korrelationsanalyse (siehe Kapitel 2.7.1) wurden die Parameter Hangneigung, Profilkurvature und relative Höhe für die Erstellung des linearen Regressionsmodells ausgewählt.

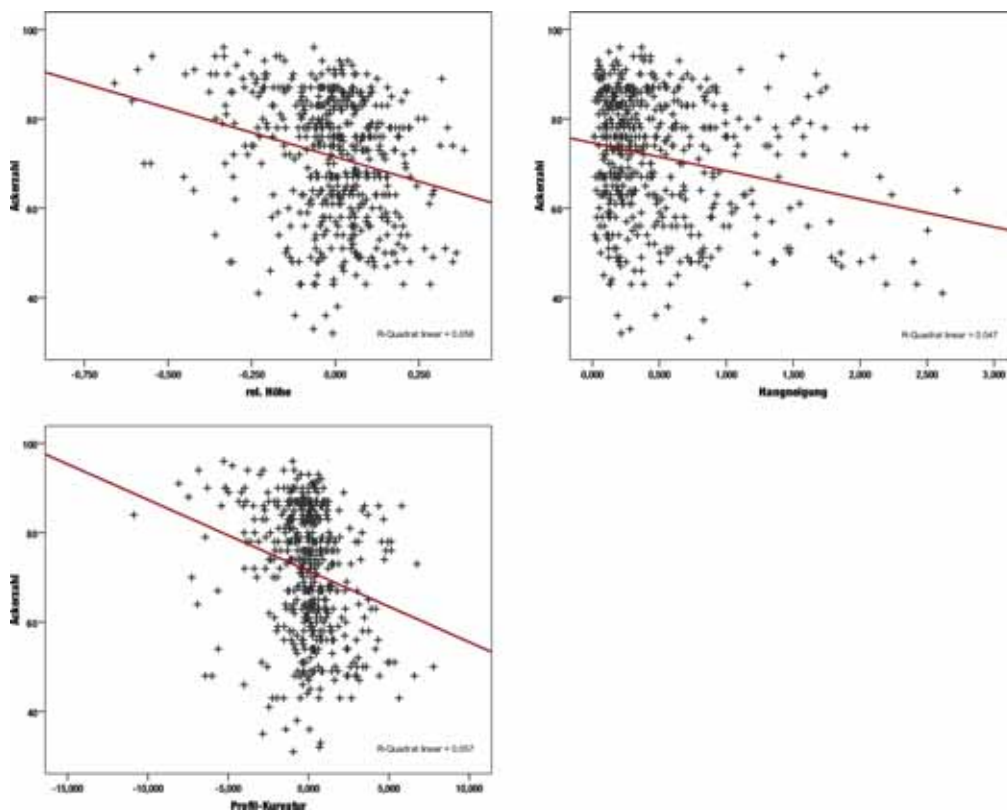


Abb. 67: Zusammenhänge zwischen Ackerzahlen und den für das Regressionsmodell ausgewählten Regressoren

Die Zusammenhänge zwischen den Ackerzahlen und den ausgewählten Reliefparametern sind signifikant. Die Streudiagramme (siehe Abb. 67) zeigen jedoch nur einen sehr losen Zusammenhang zwischen den Ackerzahlen und den für das Regressionsmodell ausgewählten Geländeparametern. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) erreicht gerade 5%. Großen Einfluss daran haben vor allem die ebenen Bereiche, die einen sehr großen Anteil am Untersuchungsgebiet haben und deren Bodenvariabilität sich nicht oder nur wenig durch Geländeparameter beschreiben lassen. Dies zeigt sich auch in der Zuverlässigkeit des Regressionsmodells, dessen R^2 nur ca. 10% erreicht. Eine Integration weiterer Geländeparameter brachte keine Verbesserung des Modells. Dazu kommt, dass zwischen vielen Reliefparametern Interaktionen bestehen, was bei einer Integration im Modell zu Verzerrungen führen kann (BACKHAUS ET AL. 2006).

Modellzusammenfassung			
R	R^2	Korrigiertes R^2	Standardfehler
0,320	0,103	0,098	13,223

Tab. 15: Modellzusammenfassung – Bestimmtheitsmaß

	Koeffizienten	Standardfehler	Sig.
(Konstante)	74,509	0,819	0,000
rel. Höhe	-3,409	6,635	0,061
Hangneigung	-6,224	1,200	0,000
Profilkurvatur	-1,352	0,497	0,007

Tab. 16: Regressionsmodell - Koeffizienten

Das geringe Bestimmtheitsmaß wurde auch im Rahmen anderer Studien zur Modellierung von Bodeneigenschaften gemacht (MERGILI ET AL., 2006, TSAI ET AL., 2001). Trotz signifikanter Zusammenhänge ist das geringe Bestimmtheitsmaß ein Schwachpunkt der multiplen linearen Regression als Methode zur Modellierung von Bodeneigenschaften. Dies hängt von verschiedenen Umständen ab (verändert und ergänzt nach MERGILI ET AL., 2006):

Viele Zusammenhänge in der Natur folgen keinem linearen Verlauf (z.B. Exponential, Polynomial, etc.)

Viele Bodenparameter folgen keiner symmetrischen Verteilung, sondern besitzen eine Schiefe, die das Ergebnis der Regression beeinflusst.

Während die Modellierung einzelner messbarer Bodenvariablen durchaus höhere Bestimmtheitsmaße ermöglicht (siehe MERGILI ET AL., 2006), ist die Ackerzahl als Komplexgröße von sehr vielen verschiedenen Faktoren abhängig.

Ein großes Problem ist die unzureichende Kenntnis über die bodenbeeinflussenden Variablen. Während topographische Attribute üblicherweise in ausreichender Qualität verfügbar bzw. herstellbar sind, ist dies für Einflussfaktoren wie das Substrat oder die Intensität des anthropogenen Einflusses nur schwer möglich.

Bedingt durch die starke Streuung der Zusammenhänge zwischen Ackerzahl und Geländeparametern, zeigt sich das Regressionsmodell stark geglättet, was dazu führt, dass relief-bedingte Unterschiede in der Ertragsfähigkeit des Bodens zwar gut abgebildet werden, es aber vor allem bei sehr niedrigen und/oder sehr hohen Ackerzahlen starke Differenzen zwischen den aufgenommenen Werten und den Schätzungen des Regressionsmodells gibt.



Abb. 68: Multiples Regressionsmodell basierend auf Hangneigung, relativer Höhe und Profilkurvatur als Regressoren

6.5. Geostatistische Interpolation

6.5.1. Ordinary Kriging

Ordinary Kriging ist im Gegensatz zu komplexeren Interpolationsmodellen in sehr vielen GIS-Anwendungen implementiert. Für die Umsetzung wurde das Programm ArcGIS verwendet, in dem Ordinary Kriging über die Extension „Geostatistical Analyst“ durchführbar ist.

Ablauf

Der Arbeitsablauf ist wizard-gesteuert und beginnt mit der Auswahl des zu interpolierenden Datensatzes über die Einstellung des Semivariogramms und des Suchbereiches, bis hin zur Kreuzvalidierung und Fertigstellung des Modells. Als Ergebnis wird eine interpolierte Oberfläche als Daten-Ebene (Layer) im GIS-Projekt eingefügt. Der große Vorteil von ArcGIS gegenüber anderen Anwendungen, die ebenfalls Ordinary Kriging implementiert haben, ist der Umstand, dass das erstellte Interpolationsmodell editierbar bleibt, was eine einfache nachträgliche Änderung und Feinabstimmung der Kriging-Parameter ermöglicht.

Die Definition eines Suchbereiches ist beim Kriging üblich, um die Daten für die Interpolation an einer unbeprobten Position einzugrenzen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, den durch Festlegung eines Suchradius (siehe Kapitel 2.7.2) entstandenen Suchkreis in Segmente zu unterteilen, um einen systematischen Fehler in einer bestimmten Richtung auszuschließen.

Für die Segmente wird die Anzahl der Punkte angegeben, die verwendet werden sollen. Für Bereiche mit geringerer Punktdichte empfiehlt sich die Angabe einer Mindestpunkteanzahl. Sollten dann in einem Segment weniger Punkte liegen, werden die nächstgelegenen Punkte für das Kriging verwendet.

Da Ordinary Kriging jeweils nur eine Variable verarbeiten kann, wurden für die Interpolation ausschließlich die als Punktdaten erhobenen Ackerzahlen für die Berechnung verwendet.

Ergebnisse

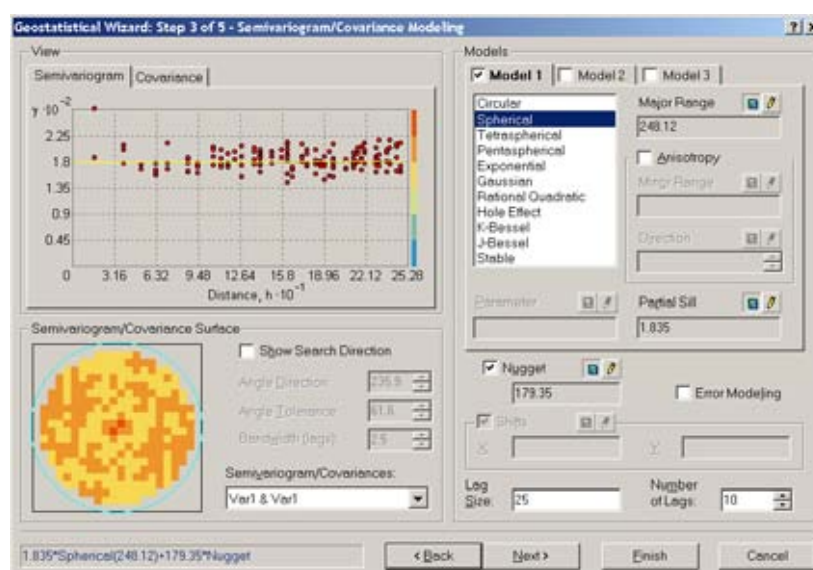


Abb. 69: Geostatistical Analyst in ArcGIS für die Definition des Semivariogramms

Die oben stehende Abbildung (Abb. 69) zeigt das empirische Semivariogramm der Ackerzahl. Das Diagramm zeigt einen reinen Nugget Effekt („Pure Nugget Effect“). Dies bedeutet, dass keine räumliche Autokorrelation nachgewiesen werden kann, was drauf schließen lässt, dass die Anwendung einer geostatistischen Methode gegenüber einer rein statistischen Methode keinen zusätzlichen Informationsgewinn bringt.

Der Umstand fehlender Autokorrelation liegt jedoch nicht darin begründet, dass die Verteilung der Bodenqualität nicht grundsätzlich autokorreliert, sondern an dem Umstand, dass der Punktabstand von 40-50m zu groß ist, um eine räumliche Autokorrelation festzustellen.

Modell	Ordinary Kriging
Anzahl der Messpunkte	542
Semivariogramm-Modell	$1,835 * \text{Spherical}(248,12) + 179,35 * \text{Nugget}$
Lag Size	25
Suchradius	80m, 4 Sektoren
Interpolationspunkte/Sektor	5, mindestens 2

Tab. 17: Modellübersicht Ordinary Kriging

Validierung der Ergebnisse

Mit Hilfe der Kreuzvalidierung (Cross-Validation) ist es möglich, ein Bild davon zu bekommen, wie gut das Modell die unbekannten Punkte vorhersagt.

Bei der Kreuzvalidierung wird jeder Messpunkt testweise exkludiert und unter Zuhilfenahme der verbleibenden Datenpunkte geschätzt. Das Schätzergebnis wird dann dem tatsächlichen Messwert gegenüber gestellt, und als Diagramm (siehe Abb. 70) visuell dargestellt.

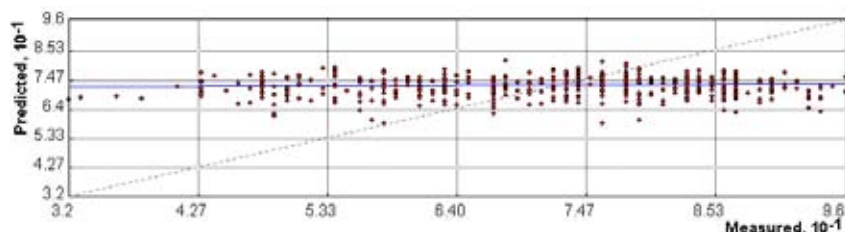


Abb. 70: Kreuzvalidierung des Ordinary Kriging-Modells

Idealerweise liegt die Best-Fit Linie (blau durchgezogen) nahe der 1:1-Linie (grau strichliert), was bedeutet, dass die interpolierten Werte sehr nahe den tatsächlichen Messwerten liegen. Im vorliegenden Fall zeigt sich jedoch, dass sehr große Abweichungen vorhanden sind.

Weitere statistische Messwerte unterstreichen dieses Ergebnis. Zwar liegt der Mean-Error mit 0,06 sehr nahe bei 0 und der standardisierte Root-Mean-Square-Error mit 0,99 sehr nahe bei 1, der Root-Mean-Square-Error und der Average Standard Error liegen aber mit 13,71 bzw. 13,79 sehr hoch. Dies zeigt sich auch in der Ergebniskarte (siehe Abb. 71), die kaum etwas von den kleinräumigen Strukturen des Reliefs abbildet.

Für die Anwendung als Interpolations-Methode für die Ackerzahl, aus den Messwerten der Finanzbodenschätzung, ist die Ordinary Kriging-Methode damit ungeeignet: Das Ergebnis ist aufgrund fehlender Autokorrelation ungenau, der Standard-Fehler sehr hoch.

Ein Vergleich mit den weiteren Modellen erfolgt in Kapitel 6.6.

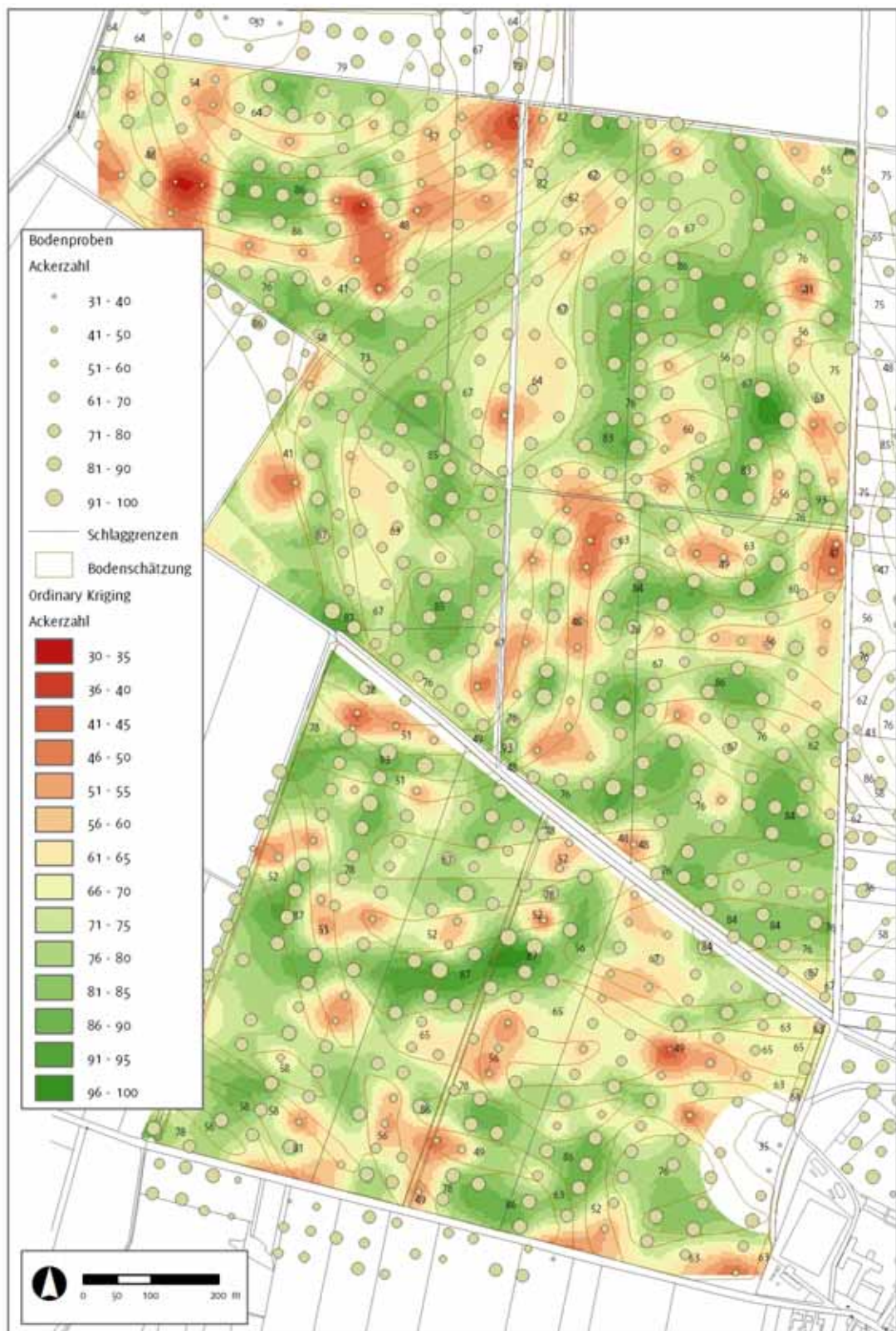


Abb. 71: Ergebniskarte des Ordinary Kriging-Modells

6.5.2. Cokriging

Für die praktische Anwendung des Cokriging-Modells wurde ArcGIS verwendet. Cokriging ist wie Ordinary Kriging ebenfalls über die Extension „Geostatistical Analyst“ durchführbar. Das Cokriging-Modul ist ebenfalls wizard-gesteuert und kann neben der abhängigen Variable (Ackerzahl-Punktdaten) bis zu drei weitere Datensätze als Co-Variablen verarbeiten.

Bedingt durch die zusätzlichen Co-Variablen ist der Anpassungsbedarf für die Variogramme höher als beim Ordinary Kriging. Dazu kommt, dass auch die Berechnung der interpolierten Oberfläche viel aufwändiger ist, was sich mitunter in sehr langen Wartezeiten für die Modellerstellung niederschlägt. Dies fällt besonders dann ins Gewicht, wenn mehrere Varianten getestet werden sollen, bzw. eine große Anzahl an Messpunkten im Suchradius (siehe Kapitel 2.7.2) herangezogen wird.

Ablauf

Der Wizard für die Erstellung des Cokriging-Modells ist grundsätzlich gleich aufgebaut wie jener für das Ordinary Kriging (siehe Kapitel 6.5.1), mit dem Unterschied, dass über ein Pull-down-Menü die einzelnen Crosscovariogramme ausgewählt und in weiterer Folge angepasst werden können.

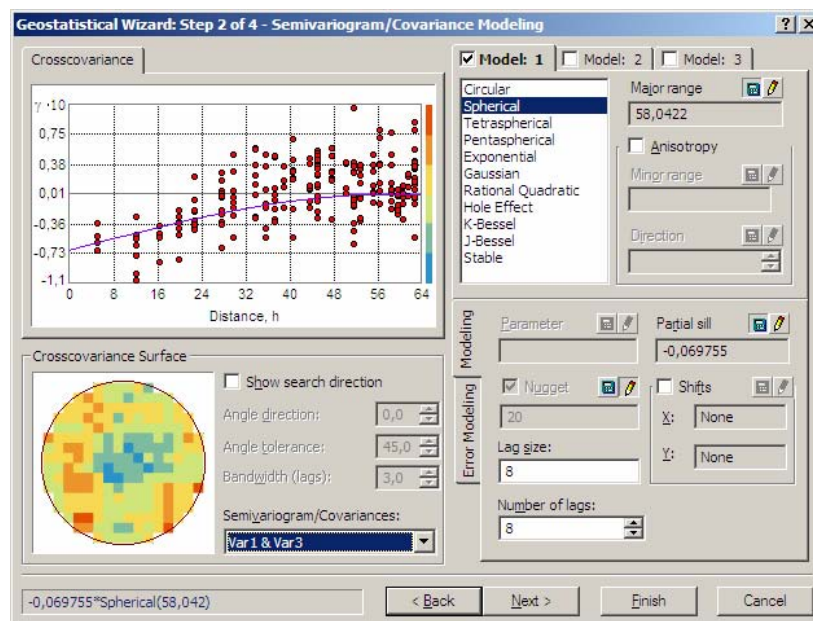


Abb. 72: Geostatistical Analyst in ArcGIS für die Definition des Semivariogramms und der Crosscovariogramme

Da das Cokriging-Modell in ArcGIS die Integration von maximal drei Co-Variablen ermöglicht, wurden jene Relief-Parameter mit den signifikantesten Zusammenhängen verwendet (siehe Kapitel 6.2): Hangneigung, relative Höhe und Profilkurvatur.

Für diese Co-Variablen wurden anschließend die Crosscovariogramme (siehe Kapitel 2.7.2) angepasst.

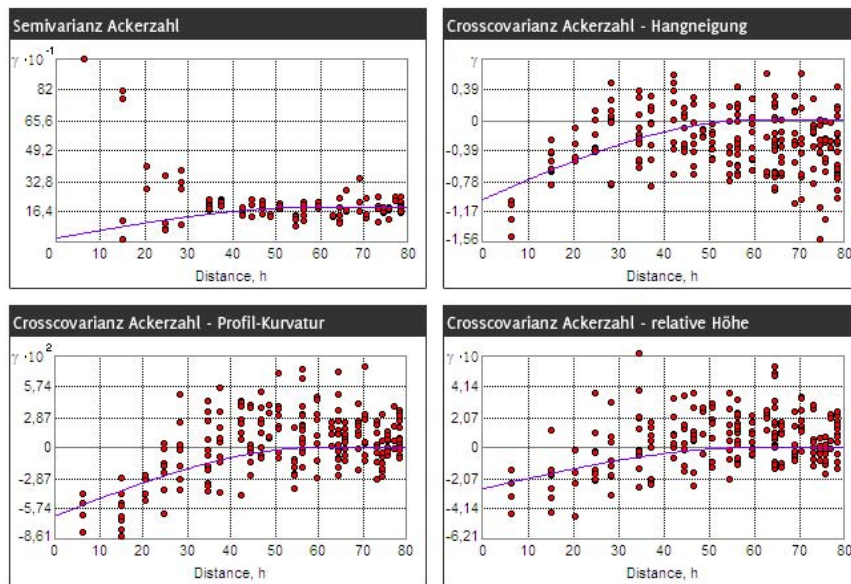


Abb. 73: Semivariogramm für die Variable Ackerzahl sowie die Crosscovarianzen für die Co-Variablen Hangneigung, Profilkurvatur und relative Höhe

Nach Erstellung der Variogramme wurden für jeden Datensatz der Suchradius sowie die Anzahl der für die Berechnung herangezogenen Messpunkte definiert (siehe Abb. 74). Für den Punktdatensatz mit den Ackerzahlen wurden zwei Punkte je Viertelkreis definiert. Für die, durch den 5x5m Raster höher aufgelösten, Co-Variablen wurden 10 Punkte je Viertelkreis definiert, was einer räumlichen Ausdehnung von 50m entspricht, was sich wiederum mit der räumlichen Ausdehnung der Autokorrelation deckt (siehe Abb. 73).

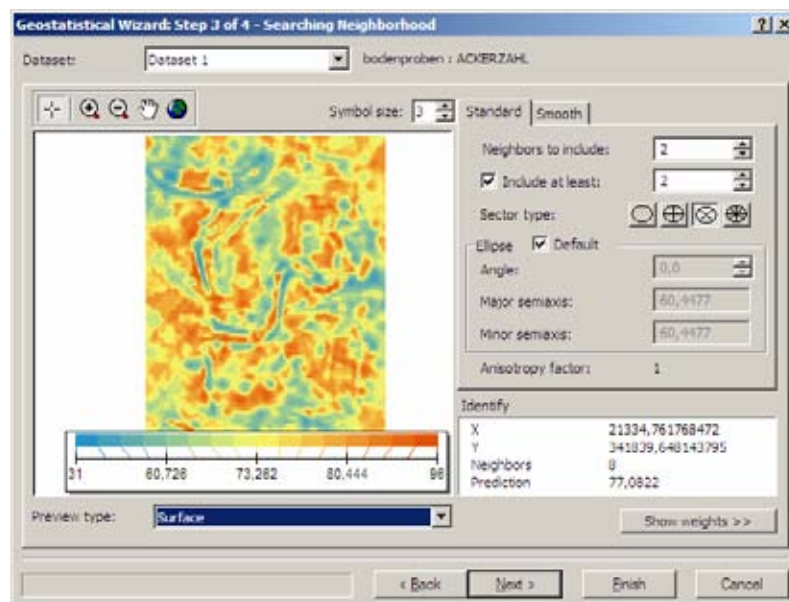


Abb. 74: Festlegung der Suchradien und Vorschau des Interpolationsergebnisses

Der Wizard endet wie beim Ordinary Kriging auch mit einer Kreuzvalidierung des Modells und einer tabellarischen Auflistung der Fehlerresiduen.

Validierung der Ergebnisse

Auch das Cokriging-Modell erlaubt die Kreuzvalidierung (Cross-Validation) am Ende der Modellerstellung.

Zwar wird die Struktur des Reliefs durch die Integration von Co-Variaten viel besser abgebildet, aufgrund der nicht sehr stark ausgeprägten Crosscovarianzen (siehe Abb. 73) ist auch hier der Fehler sehr hoch.

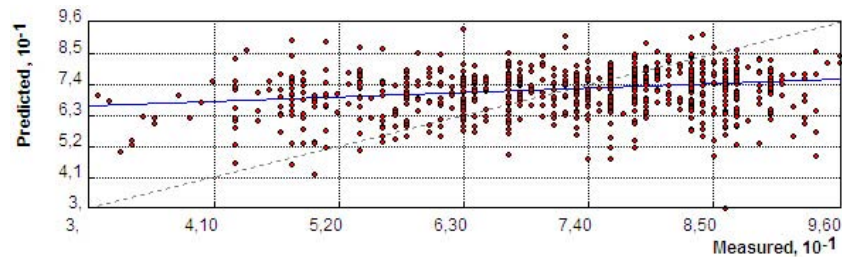


Abb. 75: Kreuzvalidierung des Cokriging-Modells

Weitere statistische Messwerte unterstreichen dieses Ergebnis. Der Mean-Error liegt bei 0,05 und der standardisierte Root-Mean-Square-Error bei 1,067, der Root-Mean-Square-Error und der Average Standard Error liegen mit 12,49 bzw. 12,82 ebenfalls sehr hoch.

Ein Vergleich mit den weiteren Modellen erfolgt in Kapitel 6.6.

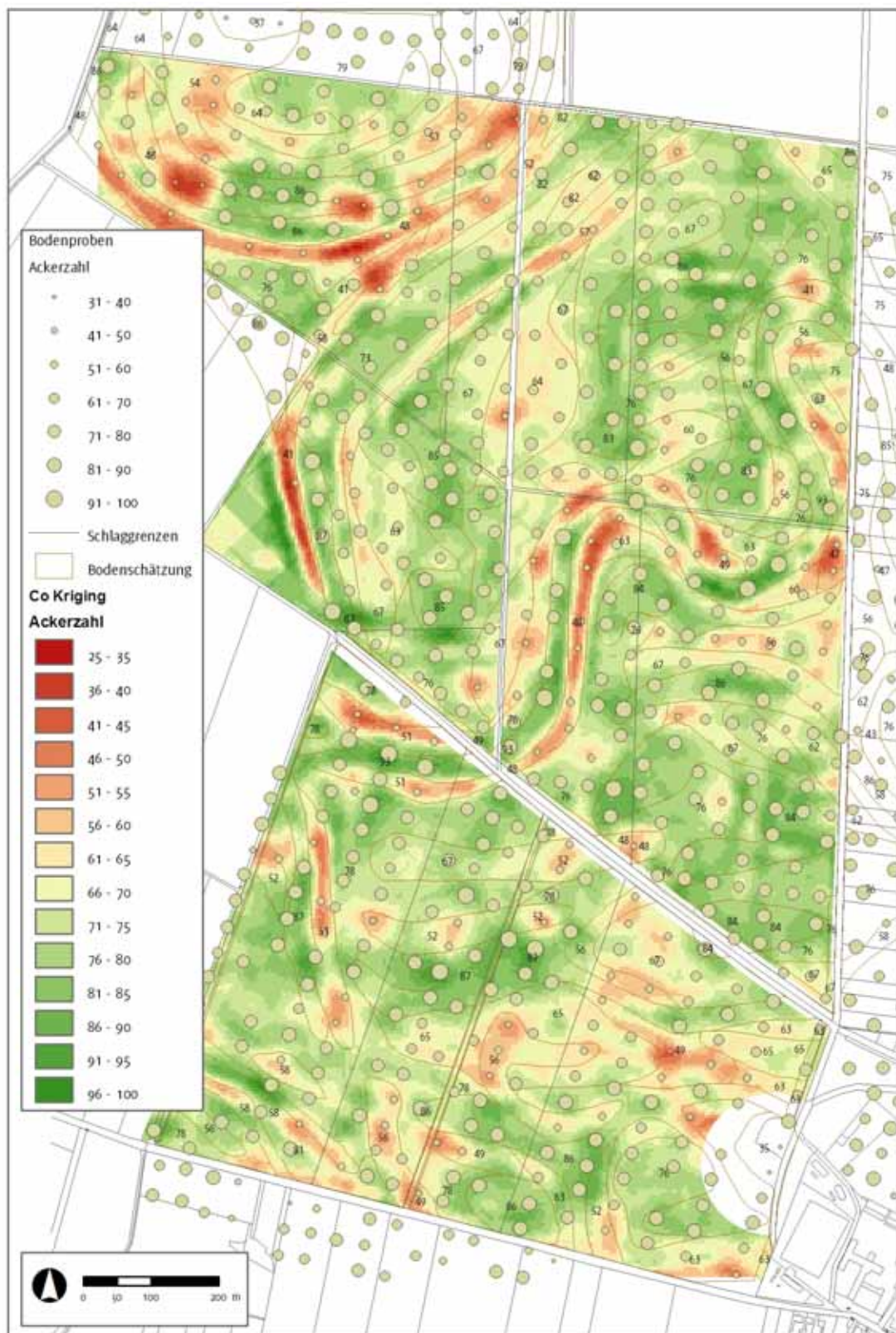


Abb. 76: Ordinary Cokriging-Modell mit Hangneigung, relativer Höhe und Profilkurvatur als Co-Variablen

6.5.3. Universal Kriging

Für das Universal Kriging-Modell wurde anstelle von ArcGIS das Programm SAGA (siehe Kapitel 2.8.2) verwendet, da ArcGIS in der aktuellen Version (siehe Kapitel 2.8.3) kein Modul für Universal Kriging mit externen Variablen besitzt (HENGL. ET AL., 2007). SAGA verarbeitet 2D-Vektor Daten im Shape-Format und kann Rasterdaten im text-basierten ASCII-Rasterformat importieren. SAGA hat seinen Schwerpunkt in der Analyse von Geländemodellen für hydrologische Auswertungen und besitzt ein umfangreiches Set an geowissenschaftlichen Algorithmen (OLAYA, 2004), weshalb es auch für die Ableitung einiger Reliefparameter aus dem digitalen Höhenmodell eingesetzt wurde (siehe Kapitel 5.4.).

Ablauf

Die Eingabe der Daten erfolgt wizard-gesteuert durch Auswahl des Punktdatensatzes mit dem zu interpolierenden Attribut und den für die Trendberechnung benötigten Rasterdatensätzen. Weiters werden in diesem Wizard die Variogramm-Parameter für das Kriging definiert (siehe Abb. 77)

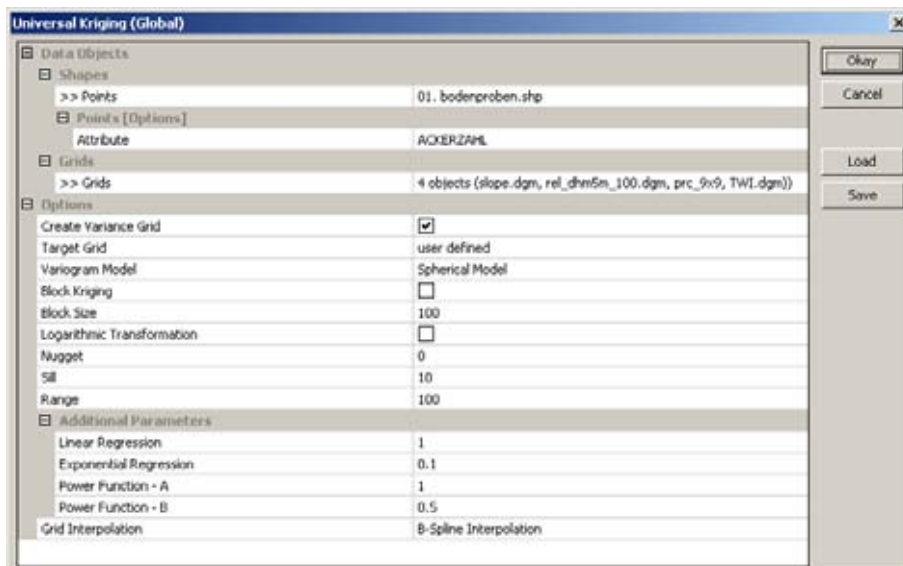


Abb. 77: Eingabe-Wizard aus SAGA für das Universal Kriging

Universal Kriging ist, wie andere Kriging-Modelle auch, als lokalisierte oder globale Funktion durchführbar (siehe Kapitel 2.7.2). Bei der lokalisierten Funktion werden die für die Berechnung an einer unbeprobten Position Messpunkte über einen Suchradius und die Anzahl der zu verwendeten Messpunkte definiert (siehe Kapitel 2.7.2). Da bei der lokalisierten Funktion das Variogramm-Modell global bleibt, kann es in Abhängigkeit vom Suchradius zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen und Artefakten kommen (HENGL, 2007). Aus diesem Grund wurde für die Berechnung das globale Universal Kriging verwendet.

Neben einem Universal Kriging-Modell, welches auf Hangneigung, Profilkurvatur und relativer Höhe als Sekundärvariablen beruht (siehe Abb. 78) wurde ein weiteres Modell auf Basis der Landformen (siehe Kapitel 5.4.4) berechnet (siehe Abb. 79).

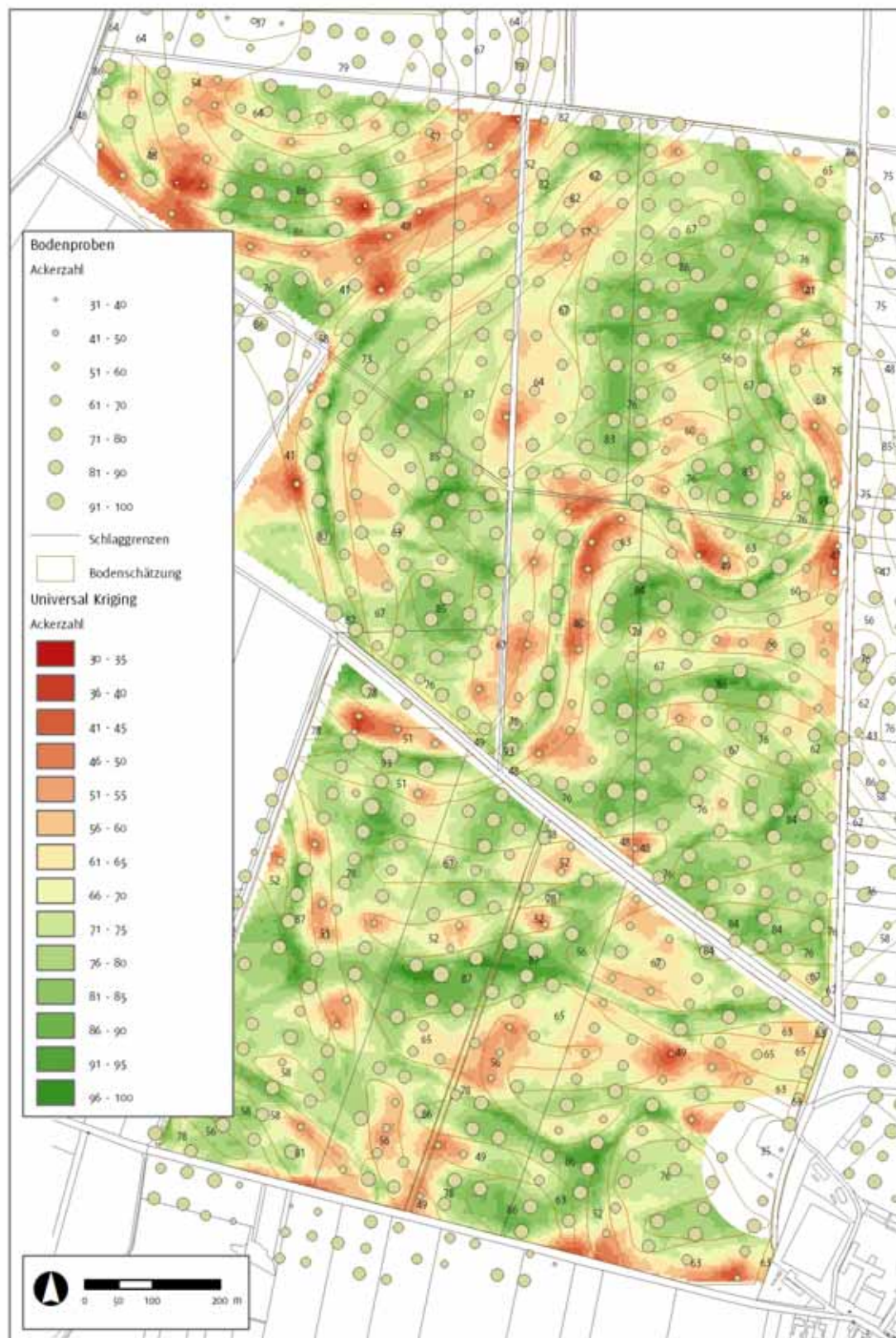


Abb. 78: Universal Kriging-Modell mit Hangneigung, Profilkurvatur und relativer Höhe als Sekundärvariablen

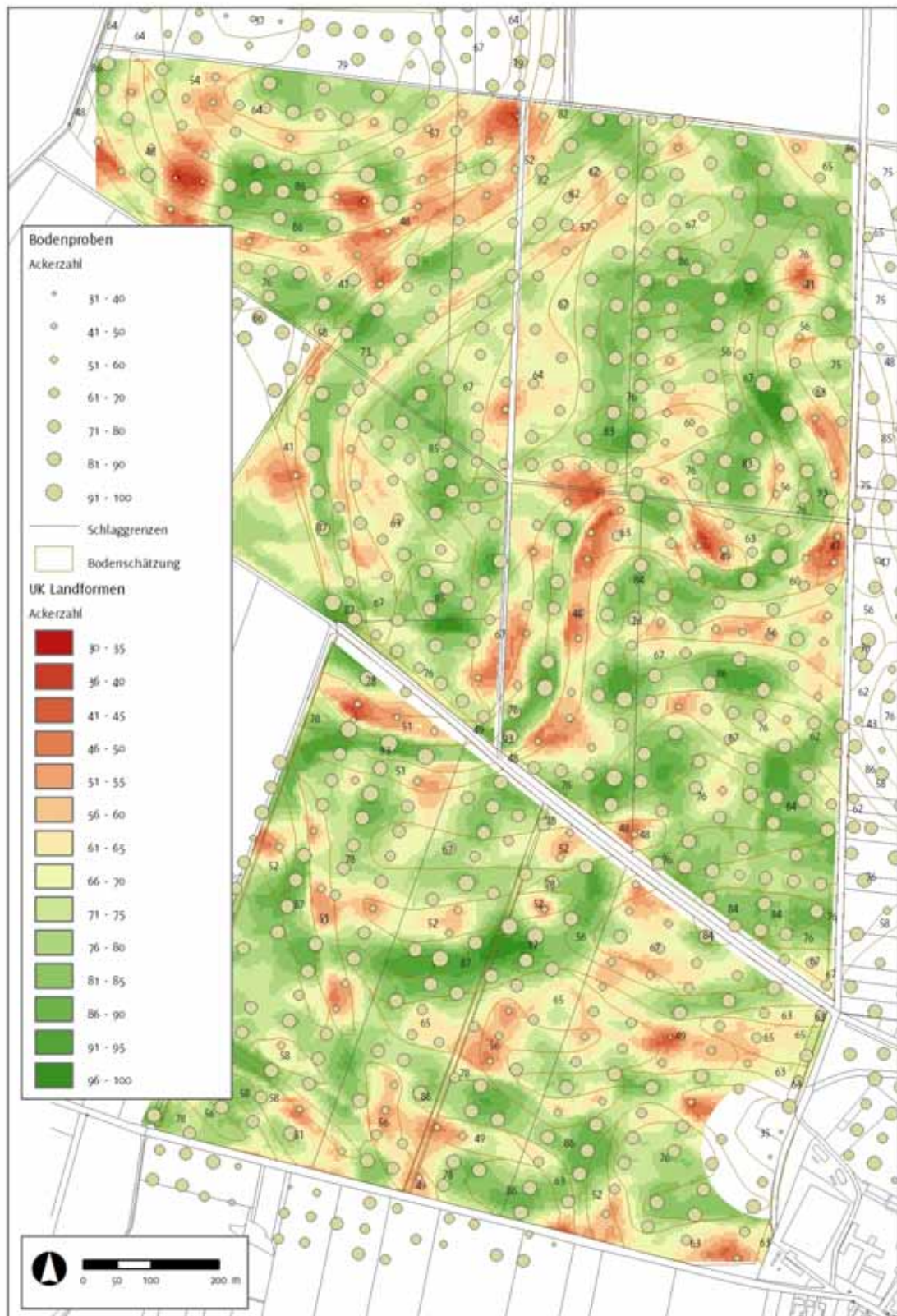


Abb. 79: Universal Kriging-Modell basierend auf Landformen

Die Ergebnisse sind von vergleichbarer Qualität, dass Landformen-Modell zeichnet jedoch ein etwas gröberes Bild, da durch die Festlegung der Landformen Informationen aus dem Mikrorelief verschwinden.

6.5.4. Regression Kriging

Regression Kriging ist bislang in keinem Softwarepaket umfassend integriert (HENGL ET AL., 2007), das Programm SAGA bietet jedoch die Möglichkeit, mit Hilfe von Universal Kriging ein Regression Kriging durchzuführen. Andere GIS-Programme können Regression Kriging mit Hilfe von Simple Kriging der Residuen aus dem Regressionsmodell und anschließender Rasteraddition umsetzen.

SAGA besitzt zwar die theoretische Möglichkeit für die direkte Erstellung eines Regressionsmodells, dieses Modul konnte in eigenen Tests aufgrund einer Fehlermeldung (Speicherverletzung) jedoch nicht zum Laufen gebracht werden. Getestet wurde auf 3 verschiedenen Computern (2x Windows XP, 1x Windows 2000) mit den Programmversionen 2.0.0, 2.0.1 und 2.0.2, sowie verschiedenen Datensätzen, um fehlerhafte Daten als Problemursache auszuschließen. In keiner Kombination war die fehlerfreie Ausführung des Moduls möglich, weshalb für die statistischen Regressionsanalysen auf SPSS zurückgegriffen werden musste.

Aufgrund dieser Erfahrungen wurde das Kriging in ArcGIS als Simple Kriging-Modell umgesetzt, was den Vorteil hatte, dass die interpolierte Oberfläche hinsichtlich der Modellparameter editierbar blieb.

Ablauf

Das Regressionsmodell der Ackerzahlen wurde in SPSS als lineare Regression erstellt (siehe Kapitel 2.7.1 und 6.4). Dabei wurden die Fehlerresiduen in der Datentabelle gespeichert und in ArcGIS mit den räumlichen Punktdaten verknüpft, um die räumliche Verteilung der Residuen für die Erstellung des Semivariogramms abzubilden. Anschließend wurde für die Residuen ein Simple Kriging-Modell (Annahme: Residuenmittelwert = 0) berechnet.

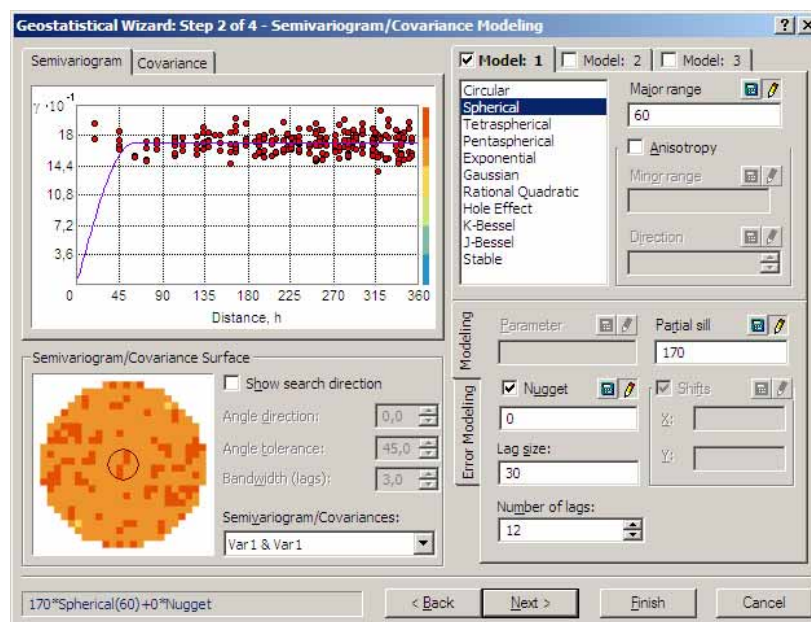


Abb. 80: Semivariogrammodellierung im Geostatistical Wizard von ArcGIS

Da für die Residuen keine räumliche Autokorrelation festgestellt werden konnte, wurde ein theoretisches Variogramm (siehe 2.7.2) angenommen (Nugget=0, Sill = 170, Range = 60).

Das berechnete Simple Kriging-Modell entspricht der räumlichen Verteilung der Fehlerresiduen aus dem Regressionsmodell.

Die Kombination der beiden Datensätze (Regressionsmodell der Ackerzahl (siehe Kapitel 6.4) und Simple Kriging-Modell der Fehlerresiduen) wurde in ArcGIS durch eine einfache Rasteraddition realisiert.



Abb. 81: Simple Kriging-Modell der Regressionsresiduen

Wie in Abb. 81 gut zu erkennen ist, schwankt die Spannweite der Residuen zwischen -40 und +35. Ein Großteil der Werte liegt jedoch zwischen -10 und +10.

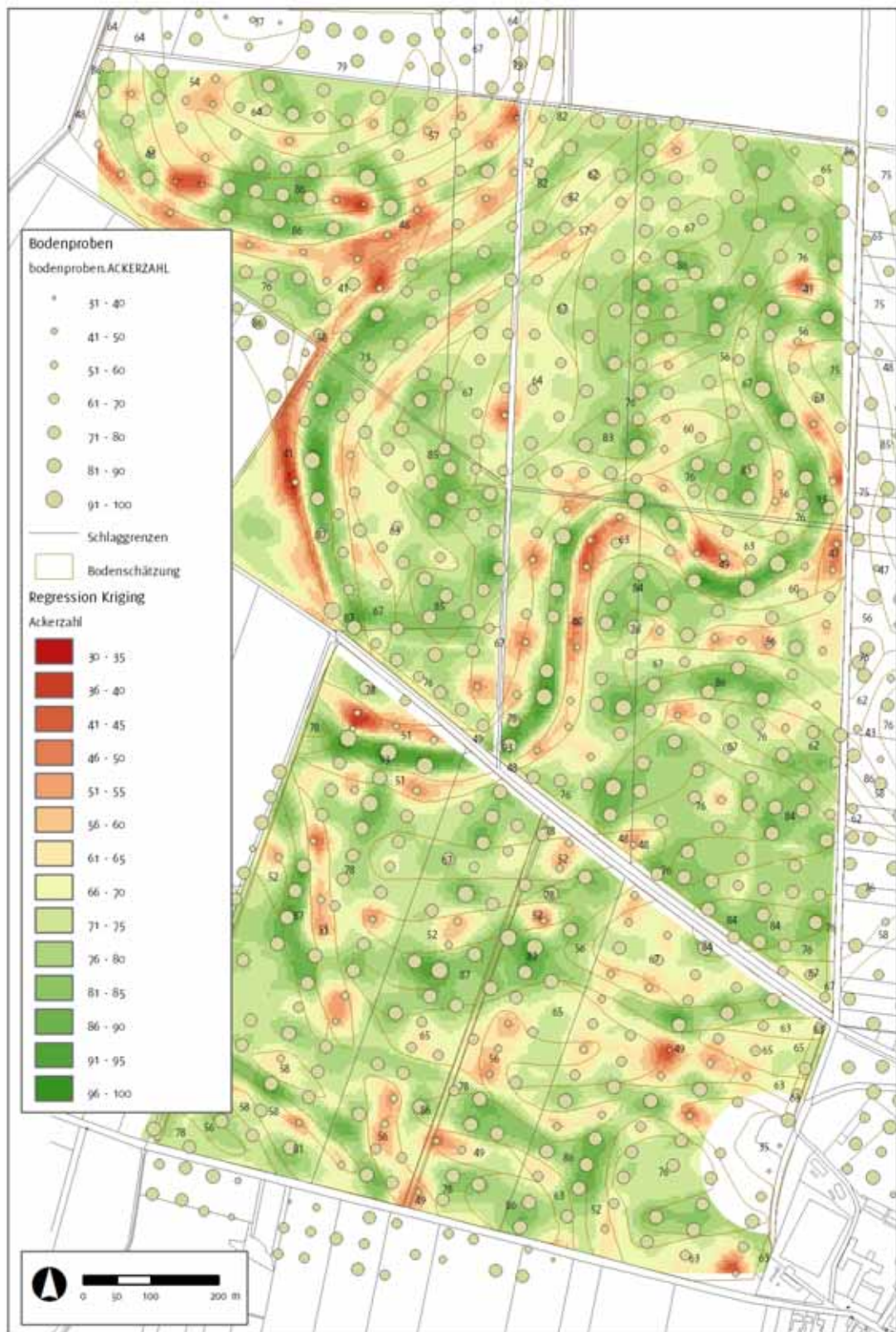


Abb. 82: Regression Kriging-Modell mit Hangneigung, relativer Höhe und Profilkurvatur als Sekundärdaten

6.6. Validierung der Ergebnisse

Wie in Kapitel 2.7 angemerkt sind alle Interpolationsmodelle mehr oder weniger in der Lage die realen Verhältnisse abzubilden (Box & DRAPER, 1987). Bei der praktischen Anwendung stellt sich demnach die Frage, welches Modell das beste Ergebnis liefert (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

Für die Validierung der Ergebnisse stehen in Abhängigkeit von der verwendeten Interpolationsmethode unterschiedliche Validierungs-Algorithmen zur Verfügung.

Vielfach wird der Einsatz der Kreuzvalidierung propagiert (ROBINSON & METTERNICHT, 2005) zumal diese Technik in vielen Softwarepaketen implementiert ist.

Die zuverlässigste Prüfung eines Modells besteht in der Nutzung eines unabhängigen Testdatensatzes, der an den jeweiligen Modellen geprüft wird (KNOTTERS ET AL., 1995). Diese Testdaten können entweder vollkommen separat erhoben, oder aus der Stichprobe für die Modellentwicklung extrahiert werden (ROBINSON & METTERNICHT, 2005), was jedoch eine entsprechend große Stichprobe voraussetzt.

Grundsätzlich steht hinter allen Validierungsmodellen die Motivation, die statistische Zuverlässigkeit zu prüfen, indem der interpolierte Wert an einer Position mit dem tatsächlichen Messwert verglichen wird. Um diese Aussage für das gesamte Untersuchungsgebiet treffen zu können, wird der Root Mean Squared Error (RMSE) berechnet (WEBSTER & OLIVER, 2001; ROBINSON & METTERNICHT, 2005).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{z(x_i) - \hat{z}(x_i)\}^2}$$

Formel: 28

$z(x_i)$ entspricht dabei dem Messwert und $\hat{z}(x_i)$ dem Schätzwert. Je besser das Modell, d.h. je besser sich die interpolierten Werte den tatsächlichen Messwerte übereinstimmen, desto kleiner ist der *RMSE* (ROBINSON & METTERNICHT, 2005).

6.6.1. Validierung auf Basis der Ertragsdatenmessung

Basierend auf der Annahme, dass sich die durch die Ackerzahl ausgedrückte Bonität des Bodens direkt in den Ertragsdaten nachweisen lässt, wurden die Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Interpolationsmodelle und den für mehrere Jahre erhobenen Ertragsdaten untersucht.

Trotz intensiver Fehlerbereinigung (siehe Kapitel 5.2) sind die Ertragsdaten nur bedingt für die Validierung der Interpolationsmodelle geeignet, da sie von vielen Faktoren beeinflusst werden (temporäre Klimaschwankungen, Düngung, Mikroklima, etc.) und so eine nicht unbeträchtliche Unschärfe beinhalten. Es wird empfohlen, mehrere Aufnahmen aus verschiedenen Jahren für zuverlässigere Ertragsdaten zu verwenden (VITHARANA ET AL. 2008).

Für die vorliegende Arbeit standen zwar Ertragsdaten aus insgesamt vier Jahren zu Verfügung, allerdings für meist unterschiedliche Flächenausschnitte (siehe Kapitel 4.3).

Eine Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Ackerzahl und den Ertragsmessungen erfolgte in Kapitel 6.3. Dabei wurde festgestellt, dass abhängig von Aufnahmejahr und Bearbeitungsschlag teils große Unterschiede in den Zusammenhängen bestehen. Für den Bearbeitungsschlag „Junge Neurisse“ konnte für das Aufnahmejahr 2002 kein Zusammenhang festgestellt werden, weshalb er für die weitere

Verwendung ausgeschieden wurde. Für das Jahr 2003 wurde dieser Bearbeitungsschlag ebenfalls ausgeschieden, da sich durch die Umfahrung und Aussparung von Versuchsflächen keine konstanten Aufnahmebedingungen herstellen ließen.

Die nachfolgenden Streudiagramm-Sets zeigen die Zusammenhänge zwischen den Interpolationsmodellen und Ertragsdaten aus dem Jahr 2002 (Johannesbreite) und 2004 (Alte Neurisse). Die Erstellung des Datensatzes erfolgte durch Generierung eines gleichmäßigen Punktrasters (Auflösung von 20x20m) über dem gesamten Arbeitsgebiet. Diesen Punktdaten wurden einerseits die Ergebnisse der Interpolationsmodelle und andererseits die Daten der Ertragsmessung zugewiesen.

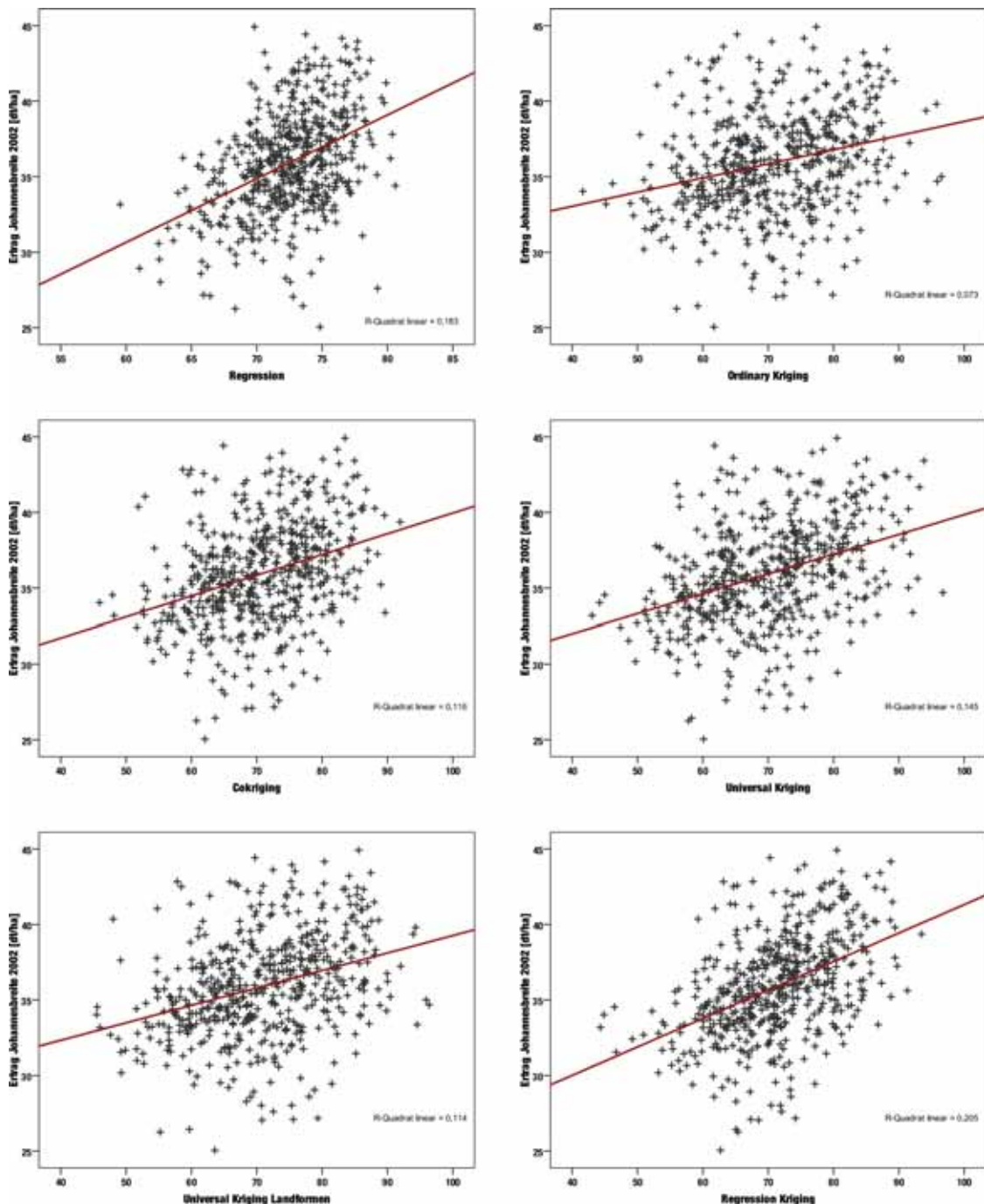


Abb. 83: Gegenüberstellung der Ertragsdaten (Johannesbreite, 2002) mit den Interpolationsmodellen (N=536)

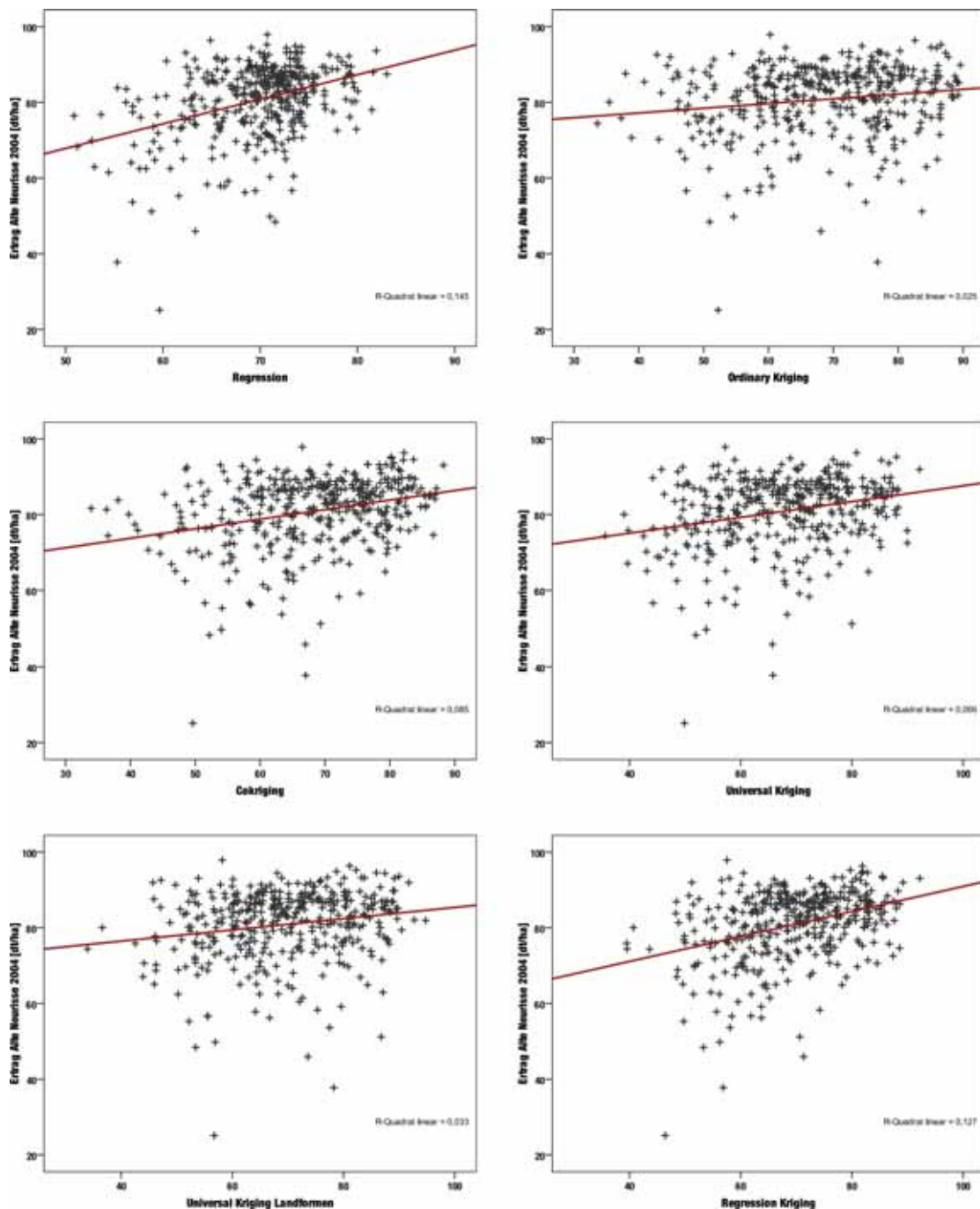


Abb. 84: Gegenüberstellung der Ertragsdaten (Alte Neurisse, 2004) mit den Interpolationsmodellen (N=387)

		Universal Kriging (UK)	UK Landformen	Regression Kriging	Cokriging	Ordinary Kriging	Regression
Johannesbreite 2002	Pearson-Korr.	0,380	0,338	0,453	0,341	0,270	0,428
	Sig. (2-s.)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	536	536	536	536	536	536
Alte Neurisse 2004	Pearson-Korr.	0,258	0,182	0,357	0,291	0,165	0,386
	Sig. (2-s.)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
	N	387	387	387	387	387	387

Tab. 18: Korrelationsanalyse (nach Pearson) der einzelnen Modelle mit den Ertragsdaten

Die Streudiagramme und Korrelationsanalysen zeigen, dass vor allem für die Ertragsaufnahme Johannesbreite 2002 signifikante Zusammenhänge zwischen den Interpolationsmodellen und den Ertragsdaten bestehen. Erwartungsgemäß liegt das Ordinary Kriging-Modell hinter den anderen Modellen, wobei das Regression Kriging sowie das nicht-räumliche Regressionsmodell die Verteilung der Ertragsdaten am besten beschreiben. Generell streuen alle Zusammenhänge aber sehr stark, die Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen sind nicht besonders ausgeprägt.

6.6.2. Kreuzvalidierung

Die Kreuzvalidierung ist ein gängiges Verfahren bei vielen Kriging-Modellen und ermöglicht eine Validierung ohne Erstellung eines Stichprobensubsets (ROBINSON & METTERNICHT, 2005).

Dabei wird jeder Messpunkt einmal aus dem Modell entfernt und mit Hilfe der umliegenden Punkte berechnet. Das Ergebnis dieses Prozesses wird dann als Diagramm und/oder Tabelle dargestellt. Diese Methode wurde für das Kriging-Modell sowie das Cokriging-Modell angewendet, da die Kreuzvalidierung für diese Methoden in der verwendeten Software (ArcGIS) direkt implementiert ist.

Die Kreuzvalidierung wurde nur für das Ordinary Kriging und Cokriging durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Validierung sind bei den jeweiligen Modellen genauer beschrieben (siehe Kapitel 6.5.1 und 6.5.2).

6.6.3. Validierung der Ergebnisse durch Bildung von Stichprobensubsets

Die Validierung der Modelle durch Bildung von Stichprobensubsets basiert auf der Idee der Kreuzvalidierung, die zwar beim Ordinary Kriging und Cokriging direkt möglich ist, nicht aber bei Regressionsmodellen sowie beim Universal/Regression Kriging-Modellen.

Aus allen Bodenprobenpunkten wurden Kontrollpunkte als geschichtetes Subset (ca. 5% der gesamten Stichprobe, siehe Abb. 85) entfernt. Mit der um die Kontrollpunkte reduzierten Stichprobe wurden dann die einzelnen Interpolationsmodelle noch einmal berechnet. Zur Validierung der Ergebnisse wurde für jeden Kontrollpunkt die bei der Interpolation errechnete Ackerzahl mit dem bei der Bodenschätzung ermittelten Wert verglichen.

Durch die Notwendigkeit der nochmaligen Berechnung des Interpolationsmodells erhöht sich bei dieser Form die Rechenzeit bei manchen Modellen erheblich.

Diese Form der Validierung ist nötig, wenn entweder kein eigener Datensatz für die Modellprüfung vorliegt oder die gewählte Methode bzw. Software keine andere Form der Zuverlässigkeitsprüfung ermöglicht.

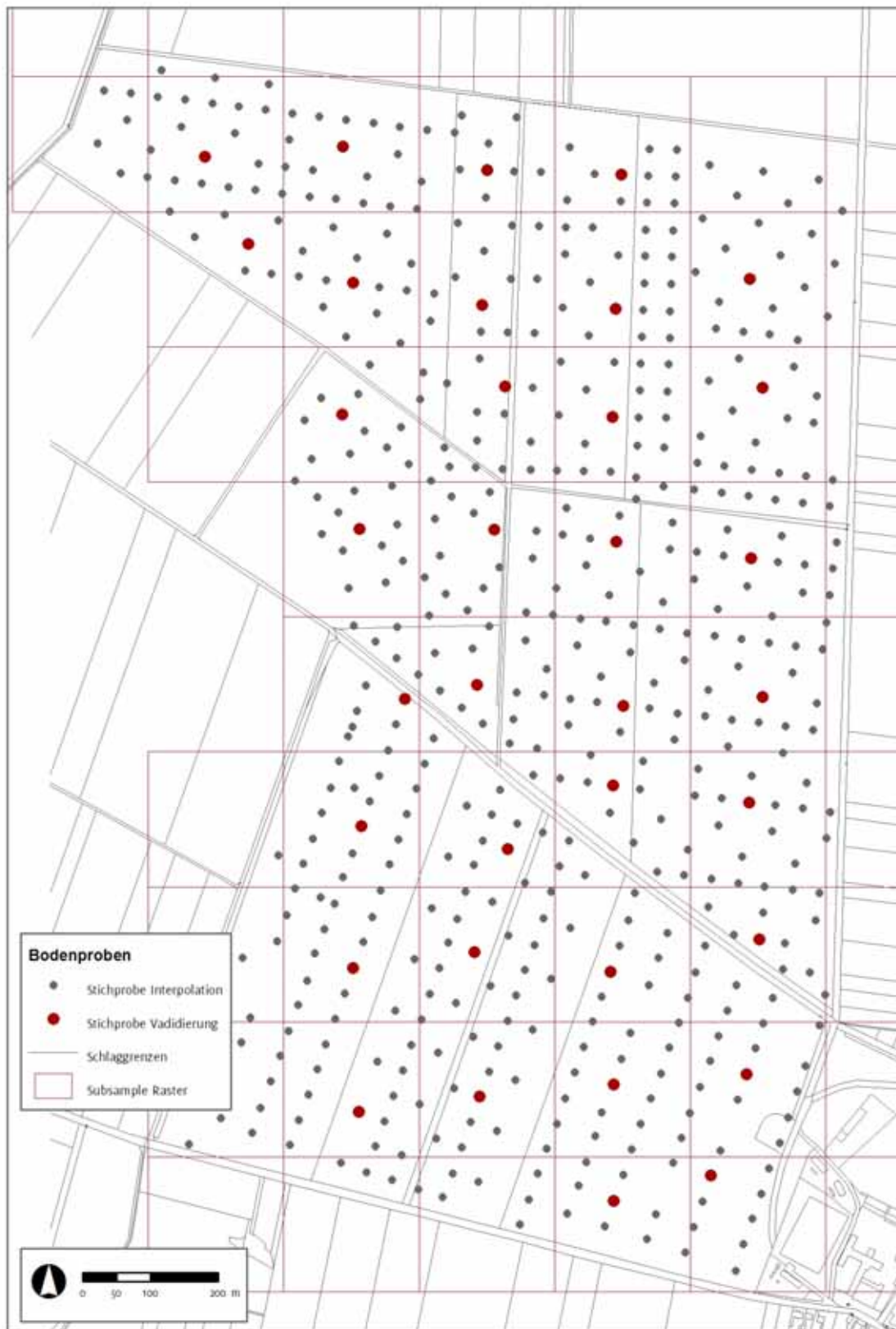


Abb. 85: Validierungspunkte (rot) in der Gesamtstichprobe (Die Auswahl ist geschichtet mit einem Auswahlraster von 200x200m)

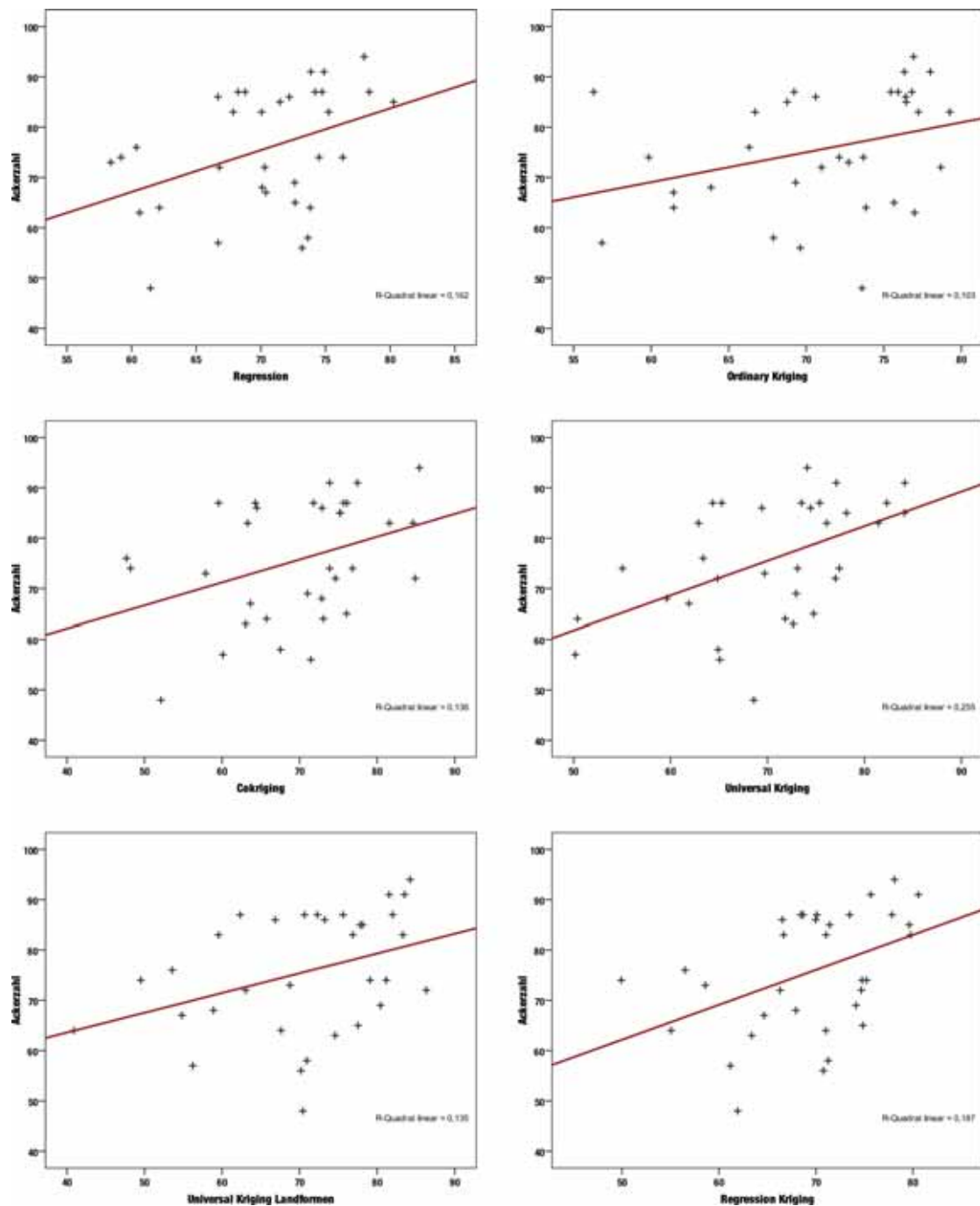


Abb. 86: Gegenüberstellung der Ackerzahlen mit den Interpolationsmodellen auf Basis einer aus der Modellberechnung exkludieren Substichprobe (N=33)

		Universal Kriging (UK)	UK Landformen	Regression Kriging	Cokriging	Ordinary Kriging	Regression
Ackerzahl	Pearson-Korr	0,368	0,505	0,433	0,368	0,321	0,402
	Sig. (2-s.)	0,035	0,003	0,012	0,035	0,069	0,020
	N	33	33	33	33	33	33

Tab. 19: Korrelationsanalyse (nach Pearson) der einzelnen Modelle mit der Ackerzahl (Substichprobe)

Die Analysen zeigen, dass das Ordinary Kriging-Modell keinen signifikanten Zusammenhang mit den tatsächlichen Messwerten besitzt. Alle anderen Modelle zeigen signifikante Zusammenhänge.

6.7. Modellübersicht

Der Plan auf der nachfolgenden Seite zeigt alle berechneten Modelle in einer übersichtlichen Darstellung für den direkten visuellen Vergleich der Modelle.

7. Diskussion

“...phenomena in nature are not fully predictable.”

(MERGILI ET AL., 2006)

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertationsarbeit haben gezeigt, dass die Daten der österreichischen Finanzbodenschätzung grundsätzlich für die Erstellung fein aufgelöster Bodenqualitätskarten geeignet sind. Durch den starken Einfluss von Reliefeigenschaften auf den Bodenbildungsprozess (GLINKA, 1927; MILNE, 1935; JENNY, 1941; HUDSON, 1992) ist zur Abbildung der Variabilität die Verwendung zusätzlicher Sekundärdaten aus eine Höhenmodell jedoch hilfreich.

Für die Erstellung der Bodenkarten mit externen Hilfsvariablen kann entweder auf multiple Regressionsmodelle (TSAI ET AL., 2001; ZIADAT, 2005; MERGILI ET AL., 2006; BÖHNER & SELIGE, 2006) oder aber auf geostatistische Methoden wie Cokriging (ODEH ET AL., 1995; LARK, 2002; ERHASIN, 2003) oder Universal- bzw. Regression Kriging (KNOTTERS ET AL., 1995; ODEH ET AL., 1995; HENGL, 2004; HENGL ET AL, 2007) zurückgegriffen werden.

Diese Methoden wurden für das Untersuchungsgebiet umgesetzt und verglichen, wobei sich zeigte, dass die geo-statistischen Modelle den nicht-räumlichen Regressionsmodellen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit überlegen waren.

Aufgrund der unterschiedlichen Voraussetzungen, was Reliefenergie und klimatische sowie geologische Voraussetzungen für die Bodenbildung anbelangt, ist eine Interpolation nur für kleinere, geologisch und klimatisch homogene, Regionen zu empfehlen, da die externen Hilfsvariablen und deren Zusammenhänge mit der Ackerzahl an die jeweils speziellen Bedingungen angepasst werden müssen.

Die Genese der Landschaft hat großen Einfluss auf die Auswahl der externen bodenbeeinflussenden Faktoren. Die hier vorgestellten Bedingungen und Zusammenhänge in einer alluvialen Landschaft des pannonischen Trockenraums sind nicht direkt auf andere Regionen umlegbar.

Es darf auch nicht übersehen werden, dass im vorliegenden Fall, trotz umfassender Auswahl und Analyse bodenbeeinflussender Reliefparameter, unabhängig vom Modell nur etwa 20% der Variabilität der Ackerzahl erklärt werden können. Dies erscheint nicht besonders hoch, ist aber größtenteils auf die spezifische Situation in der Untersuchungsregion zurückzuführen. Auch andere Studien belegen dieses teils sehr geringe Bestimmtheitsmaß (MERGILI ET AL., 2006; TSAI ET AL., 2001). Die teils starke Überschwemmungs- und Erosionsdynamik im Zuge der Landschaftsgenese hat zwar enormen Einfluss auf bodenbildende Prozesse, kann aber vielfach nicht im Relief nachgewiesen werden. Besonders stark wirkt sich hier die Nivellierung des Geländes durch Sedimentation nach Überschwemmungen aus (siehe Kapitel 3.3).

Von besonderer Bedeutung im Untersuchungsgebiet ist auch die Bodentextur, da vorhandene, höhere anstehende Schotterbänke großen Einfluss auf den Wasserhaushalt und damit auf die Ertragsfähigkeit haben, diese in den Geländeparametern jedoch ebenfalls nicht zum Ausdruck kommen.

Diesen Faktor der Unsicherheit im Bestimmtheitsmaß beschreiben auch andere Studien (MERGILI ET AL., 2006), dennoch lassen sich auch Beispiele finden, die sehr ausgeprägte Zusammenhänge zwischen Bodeneigenschaften und Reliefparametern ausweisen (BÖHNER & SELIGE, 2006).

Gute Ergebnisse lassen sich demnach besonders bei hügeligen Reliefbedingungen erzielen, da dort bodenbildende Prozesse sehr stark vom Relief geprägt werden (BÖHNER & SELIGE, 2006).

Eignung der Daten aus der österreichischen Finanzbodenschätzung

Aufgrund des flächendeckend bundesweiten Vorliegens als mehrheitlich geschichtete Stichprobe (bezogen auf die landwirtschaftlich genutzten Flächen Österreichs), sowie der standardisierten Aufnahmemethode, bieten die Daten der österreichischen Finanzbodenschätzung eine ausgezeichnete Datengrundlage für die Erstellung hoch aufgelöster Bodenkarten, wie sie beispielsweise im Precision Farming oder in der Versuchsplanung benötigt werden. Bislang wird dieser Datenschatz jedoch kaum für solche Anwendungen genutzt, obwohl die Ackerzahlen eine gute Ausgangsbasis für die Entwicklung von Bewirtschaftungsstrategien sind.

Zu beachten ist jedoch, dass für eine räumliche Interpolation ohne externe Hilfsvariablen die Rasterbreite von 50x50m Raster zu groß ist, um brauchbare Ergebnisse zu erhalten. Im Untersuchungsgebiet konnte keine räumliche Autokorrelation zwischen den einzelnen Probenpunkten nachgewiesen werden.

Weiters muss festgestellt werden, dass die Ackerzahl eine aus vielen Einzelfaktoren gewonnene Information ist (siehe Kapitel 2.5), und damit auch die Ertragsfähigkeit eines Bodens als Ganzes beschreibt (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2002). Es können deshalb ohne weitere Datengrundlagen keine Aussagen über einzelne Bodenparameter wie Horizontmächtigkeiten oder das Bodengefüge gemacht werden.

Zieht man andere, im Rahmen der Finanzbodenschätzung erhobenen Kenngrößen (z.B. Horizontmächtigkeiten, Bodentextur) für eine Interpolation heran, reduziert sich die zur Verfügung stehende Punkteanzahl sehr stark, da diese Informationen jeweils nur für einen Punkt einer Schätzeinheit erhoben werden (siehe Kapitel 4.1.1).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Rahmen dieser Arbeit für das Untersuchungsgebiet keine relevanten räumlichen Korrelationen, die eine geostatistische Interpolation anderer Kenngrößen gerechtfertigt hätten, nachgewiesen werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese sehr stark vom Gelände geprägt sind und sich in Gebieten mit höherer Reliefenergie eindeutige Zusammenhänge zwischen einzelnen Boden- und Reliefparametern nachweisen lassen (BÖHNER & SELIGE, 2006).

Anwendung von Derivaten aus einem digitalen Geländemodell als Sekundärinformationen

Die Verwendung von Ableitungen aus einem digitalen Geländemodell für die Abgrenzung von Bodenparametern wurde in Kapitel 2.6 diskutiert. Ein Zusammenhang zwischen Boden und Landschaftsform, wie er im Rahmen des Boden-Landschafts-Paradigma (HUDSON, 1992) definiert wurde, ist unbestritten.

Auch im Rahmen dieser Arbeit konnten signifikante Zusammenhänge zwischen der Ackerzahl eines Bodens und verschiedenen Reliefparametern ermittelt werden. Im Untersuchungsgebiet dieser Arbeit zeichnet sich das Relief jedoch durch eine sehr geringe Reliefenergie aus. Dies ist jedoch zu einem großen Teil auf die Spezifika des Untersuchungsraumes zurückzuführen.

Die Daten der GPS-gestützten Ertragsmessung wurden für die Validierung der Bodenkarten eingesetzt. Dabei wurden die Zusammenhänge der einzelnen Modellergebnisse mit den Ertragsdaten untersucht. Es bestehen zwar signifikante Zusammenhänge zwischen den Variablen, die Streuung dieser Zusammenhänge ist dennoch sehr groß und erfordert deshalb eine vorsichtige Betrachtung (siehe Kapitel 6.3).

Die Ursachen dafür liegen einerseits in den Ertragsdaten selbst, die für die meisten Flächen lediglich für ein Aufnahmejahr vorliegen, was zu starken Abweichungen durch temporäre Ereignisse (z.B.: besondere Wetterverhältnisse im Aufnahmejahr) führen kann. Dazu kommen Datenfehler, die in vielen Fällen nicht oder nur teilweise korrigiert werden können.

Auch ist der Zusammenhang zwischen Ackerzahl und Ertrag nicht sehr eng, da vor allem betriebswirtschaftliche Faktoren den Ertrag sehr stark beeinflussen (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2002). Dies zeigte sich auch bei der Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Ackerzahl und Ertragsdaten.

Besonders gut zeigt sich der Einfluss temporärer Klimabedingungen auf die Ergebnisse der Ertragsmessung. So war etwa das Jahr 2002 von extremer Trockenheit geprägt (siehe Kapitel 3.2), was sich durch teilweise enorme Ertragsunterschiede in Abhängigkeit von der Lage innerhalb eines Bearbeitungsschlages zeigte. Im Jahr 2004 hingegen fiel eine für diese Region relative beachtliche Niederschlagsmenge, was vielfach zu einer Nivellierung bodenbedingter Ertragsdifferenzen führte.

Dazu kommt, dass der Ertrag neben der Bonität des Bodens und den Wasserverhältnissen auch stark von Managementmaßnahmen beeinflusst wird, die sich weder in der Ackerzahl noch in Reliefparametern widerspiegeln. So ist im vorliegenden Fall häufig der Einfluss von düngungsbedingten Ertragsunterschieden zu identifizieren (siehe Kapitel 5.2.4), die sich als Streifenstrukturen mit tendenziell höheren Erträgen in den Daten finden. Ähnliche Effekte mit negativem Vorzeichen lassen sich durch lineare Bodenverdichtungen nachweisen.

Problematisch ist auch der Umstand, dass die genaue Schnittbreite (siehe Kapitel 5.2) an einer Messposition nicht bekannt ist. Das führt dazu, dass bei verringerter Schnittbreite auch geringere Erträge gemessen werden.

Ertragsdaten sind eine wesentliche Datengrundlage für schlagbezogenen Produktionsmitteleinsatz im Rahmen der Precision Agriculture (siehe Kapitel 2.3). Die Untersuchungen an den vorhandenen Daten haben allerdings gezeigt, dass bei der Aufnahme der Daten sehr viele Fehler passieren können, die das Ergebnis dieser Karten möglicherweise stark beeinflussen. Viele dieser Fehler können zwar im Rahmen automatisierter Bearbeitung eliminiert oder zumindest abgeschwächt werden (siehe Kapitel 5.2), dennoch bleiben viele Fehler im Datensatz erhalten, die nicht korrigiert werden können.

Die Verwendung mehrjähriger Aufnahmen bietet hier zwar eine Möglichkeit, durch Mittelwertsbildung temporäre Effekte, wie außergewöhnliche Klimaereignisse oder auch Messfehler, zu verringern (VITHARANA ET AL., 2008). Dies führt jedoch unter Umständen zu einer Abschwächung der tatsächlichen Ertragsdynamik, außerdem ist die Aufnahme und Verarbeitung mehrjähriger Daten sehr zeit- und kostenintensiv. Dazu kommt, dass bei Anwendung dieser Methode erst nach einigen Jahren eine brauchbare Datengrundlage für die schlagbezogene Bewirtschaftung vorliegt.

Praktische Umsetzung der Modelle

Die praktische Umsetzung der verschiedenen Interpolationsmodelle, sowie die Ableitung relevanter Reliefparameter erfolgte in verschiedenen Statistik- und GIS-Programmen, da eine umfassende Implementierung geostatistischer Methoden und Modelle in einem kompakten Softwareprodukt bislang nicht zur Verfügung steht.

Während Simple Kriging und Ordinary Kriging in den gängigsten GIS- und Statistikprogrammen mittlerweile Standard geworden sind, ist die Integration geostatistischer Methoden, die eine Interpolation auf Basis mehrerer externer Datensätze ermöglichen, noch rar oder nur eingeschränkt möglich. Cokriging wird beispielsweise in ArcGIS im Rahmen der Erweiterung „Geostatistical Analyst“ angeboten, allerdings beschränkt auf drei sekundäre Datensätze.

Regression Kriging ist nur über Umwege mit Universal Kriging (z.B. in SAGA) oder Kriging with external Drift möglich, was bedeutet, dass die Regressionsanalysen zuvor in anderen Statistikpaketen (z.B. R oder SPSS) erfolgen müssen. Der/Die BearbeiterIn muss also Kenntnis von mehreren Softwarepaketen haben, und die Daten über Austauschformate wieder zusammenführen. Bei der praktischen Anwendung geostatistischer Modelle über mehrere Programme hinweg ergeben sich jedoch häufig Probleme mit den Austauschformaten durch unzureichende Umsetzung der Daten-Spezifikationen und landestypische Unterschiede.

Beim Austausch von Vektordaten kann zwar fast immer das Shape-Format angewendet werden, häufig wird jedoch nur die 2D-Variante dieses Formats unterstützt, was eine zusätzliche Konvertierung nötig macht (siehe Kapitel 2.8). Als Rasterformat hat sich das text-basierte ASCII-Rasterformat für den Datenaustausch etabliert, welches jedoch häufig Probleme mit der landestypischen Interpretation von Kommazahlen verursacht. Während im deutschsprachigen Raum das Komma als Dezimaltrennzeichen verwendet wird, kommt im englischsprachigen Raum stattdessen der Punkt zum Einsatz. Für den Datenaustausch bedeutet dies, dass oft eine Zeichenumwandlung in einem Texteditor nötig ist, was besonders bei großen Dateien auch sehr viel Zeit beanspruchen kann, und häufig zu Programmabstürzen führt.

Diese Hindernisse sind sicher auch Gründe dafür, warum Methoden wie das Regression Kriging trotz guter Ergebnisse in der Anwendungspraxis eher selten zu finden ist (HENGL ET AL., 2007).

Zusätzliche Probleme bei der praktischen Umsetzung wurden durch Software-Fehler verursacht. So konnte in SAGA das Modul für multiple Regressionsmodelle in eigenen Tests auf Windows-Betriebssystemen nicht zum Laufen gebracht werden, was den Einsatz eines zusätzlichen Programmpakets nötig machte. ArcGIS hingegen zeigte in der aktuellen Version schwere Schwächen bei der Manipulation von Tabelleninformationen (Hinzufügen, Löschen und Berechnen von Tabellenspalten) was sich in häufigen Programmabstürzen manifestiert und die Bearbeitungszeit signifikant erhöht.

Zusammenfassend kann angemerkt werden, dass vor allem die Implementierung komplexerer Modelle wie Cokriging sowie Universal Kriging und Regression Kriging in vielen Programmen nicht oder nur rudimentär umgesetzt ist. Daraus ergibt sich für viele Aufgabenstellungen die Notwendigkeit, auf mehrere Programmpakete zurückzugreifen, was zeitaufwändig ist und detaillierte Anwendungskenntnis für mehrere Softwarepakete voraussetzt. Dazu kommt, dass viele Austauschformate im GIS- und Statistikbereich von verschiedenen Programmen in unterschiedlichem Maße unterstützt werden, was häufig zu Import/Export-Schwierigkeiten führen kann und so den Gesamtprozess verlangsamt und

fehleranfälliger macht. Viele Softwarefehler erhöhen darüber hinaus die Bearbeitungszeit und Gefahr von Datenverlusten bei Programmabstürzen.

Zuverlässigkeit der Modelle

Die Qualität der Modelle wurde anhand einer geschichteten Sub-Strichprobe aus den Punktdaten der Finanzbodenschätzung ermittelt (siehe Kapitel 6.6.3). Der Vorteil dieser Methode ist, dass keine zusätzliche Probennahme für die Validierung der Modelle nötig ist. Nachteilig wirkt sich jedoch aus, dass durch Entfernen dieser Submenge aus der Stichprobe Daten bei der Modellberechnung fehlen. Dies kann vor allem an Positionen mit sehr kleinräumiger Bodenvariabilität oder größeren Punktabständen zu größeren Abweichungen führen.

Die geostatistischen Modelle liefern mit Ausnahme des Ordinary Kriging vergleichbare Ergebnisse. Durch die Integration von Sekundärinformation aus dem Höhenmodell werden bodenbildungsrelevante Reliefstrukturen gut abgebildet. Das Ordinary Kriging-Modell ist aufgrund fehlender Sekundärinformation kaum in der Lage, die relief-bedingte Verteilung der Ackerzahl abzubilden.

Das nicht-räumliche Regressionsmodell bildet zwar die Reliefstrukturen ab, aufgrund der großen Streuung der Ackerzahl mit den Regressoren ergibt sich jedoch ein sehr stark um den Mittelwert geglättetes Modell (siehe Kapitel 6.4). Dadurch werden Bereiche mit sehr hohen bzw. sehr niedrigen Ackerzahlen abgeschwächt und nicht entsprechend repräsentiert.

Die geostatistischen Modelle sind, mit Ausnahme des Ordinary Kriging, dem Regressionsmodell bei der Darstellung der Ackerzahl überlegen. Ordinary Kriging ist aufgrund fehlender Autokorrelation der Probenpunkte (siehe Kapitel 6.5.1) für eine Modellierung der Ackerzahlen nicht geeignet, da keine Sekundärinformation verarbeitet werden können.

Das Regression Kriging als Hybridmodell verringert die regressionsbedingte Glättung durch eine Berücksichtigung der Regressionsresiduen im Modell und liefert tendenziell die besten Ergebnisse, wenngleich die Unterschiede zu Cokriging und Universal Kriging marginal sind.

8. *Ausblick*

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Daten der Finanzbodenschätzung großes Potential für die Erstellung fein aufgelöster Bodenqualitätskarten besitzen. Die ausschließliche Verwendung von Relief-Informationen als Sekundardaten für die Interpolationsmodelle zeigt jedoch für Gebiete mit schwacher Reliefenergie deutliche Informationsdefizite, da neben dem Relief weitere Faktoren eine entscheidende Rolle für die Ausbildung der Böden und die Bodenqualität spielen.

Aus diesem Grund ist die Identifikation und Einbindung weiterer bodenbeeinflussender Parameter ein wesentlicher Schritt zur Verbesserung zukünftiger Modelle.

Großen Einfluss auf die Ertragsfähigkeit des Bodens im Untersuchungsgebiet hat die Wasserspeicherkapazität, die wiederum in großem Maße von der Korngrößenzusammensetzung abhängig ist. Während große Korngrößen das Wasser schnell versickern lassen, können kleine Korngrößenfraktionen Wasser sehr gut speichern. Entscheidend sind dabei die Mittelporen mit einem Durchmesser von 10 und 0,2 μm , die das Wasser einerseits gegen die Schwerkraft halten können, es aber andererseits auch pflanzenverfügbar halten. In alluvialen Landschaften kann die Korngrößenverteilung aufgrund permanenter Um- und Ablagerungen bei Überschwemmungen stark variieren. So kann eine Unterlage aus Schotter unmittelbar neben sandigen oder lehmigen Schichten zum Liegen kommen. Im Relief ist dies nicht oder kaum erkennbar, der Einfluss auf die Ertragsfähigkeit des Bodens ist jedoch enorm. Eine signifikante Verbesserung der Interpolationsmodelle kann also durch Kenntnis und Einbeziehung der Korngrößenverteilung erreicht werden.

Diese Information kann indirekt durch fernerkundliche Untersuchungen der Pflanzenvitalität mit Hilfe des NDVI-Index generiert werden. NDVI steht für "Normalized Differenced Vegetation Index" (normalisierter differenzierter Vegetationsindex) und ist ein Vegetationsindex, der auf Basis von Satellitenbildern berechnet wird. Der NDVI misst die Reflexion von Pflanzen im nahen Infrarot-Bereich (700-1300nm), die ein Maß für die Vitalität darstellt (HENGEL ET AL., 2002). Je mehr reflektiert wird, desto vitaler die Pflanze.

Die Vitalität einer Pflanze ist neben der Mächtigkeit der Auflagehorizonte und der darin enthaltenen organischen Substanz (HENGEL ET AL., 2002) stark von der Wasserversorgung abhängig, weshalb der NDVI auch geeignet ist, Information über die Trockenheit eines Gebiets zu liefern (SOJA ET AL. 2004).

Ein weiterer bodenbeeinflussender Faktor ist das Klima. Für kleinere Gebiete, wie etwa das Versuchsgut Rutzendorf, kann zwar von einer einheitlichen Klimazone ausgegangen werden, dennoch hat das Mikroklima großen Einfluss auf lokale Bodeneigenschaften. Windschutzhecken etwa, verringern lokal die Windgeschwindigkeit sehr stark, und reduzieren so Bodenerosionsprozesse und wind-bedingte Verdunstung am Boden. Durch die verminderte Windexposition ist im Bereich von Windschutzhecken auch mit tendenziell höheren lokalen Temperaturen am Boden zu rechnen. All diese Faktoren beeinflussen den Ertrag, finden aber keinen Niederschlag im Relief.

Im Bereich der Software-Entwicklung sind auf jeden Fall Fortschritte in den Bereichen Vollintegration komplexer Modelle, Datenaustausch und Benutzerfreundlichkeit (Usability) nötig, um vor allem multivariate Modellentwicklung einem breiteren NutzerInnenkreis zugänglich zu machen. Dazu kommt, dass die Fehleranfälligkeit der Programme teilweise beträchtliche Ausmaße annimmt, was einen wirtschaftlichen Einsatz unter Umständen erschwert bzw. unmöglich macht.

9. Referenzen

- Auernhammer, H. (2002): The Role of Mechatronics in Crop Product Traceability. Agricultural Engineering International: The CIGR Journal of Scientific Research and Development Vol. IV. Invited Overview Paper. 10/2002. Presented at the Club of Bologna meeting, July 27, 2002. Chicago, IL, USA.
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., Weiber, R. (2006): Multivariate Analysemethoden - eine anwendungsorientierte Einführung. 11. Auflage. Springer Verlag. Berlin.
- Band, L.E., Moore, I.D. (1995): Scale - Landscape attributes and geographical information systems. Hydrological Processes 9. S. 401-422.
- Behrens, T. (2003): Digitale Reliefanalyse als Basis von Boden-Landschafts-Modellen – Am Beispiel der Modellierung periglazialer Lagen im Ostharz. Boden und Landschaft: Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskultur und Landschaftsökologie 42. Justus-Liebig-Universität. Gießen.
- Beissmann, H., Hengsberger, R., Kiss, A., Peterseil, J., Plutzer, Ch., Schmitzberger, I., Schneider, W., Suppan, F., Szerencsits, E., Thurner, B., Tutsch, G., Wrška, T. (2003): Landschaftsökologische Strukturmerkmale als Indikatoren der Nachhaltigkeit. Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur. Wien.
- Beste, A. (2005): Bodenqualität als Grundlage für Produktqualität im ökologischen Landbau. In: Einsiedel, R., SIGÖL (Hrsg.): XXXI. Fortbildungskurs der Interessensgemeinschaft Ökologischer Landbau e.V. "Boden, Pflanze, Tier, Vermarktung" Heft 15/2005. S. 15-26.
- Beven, K., Kirby, M.J. (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Bulletin of Hydrologic Sciences, 24 (1). S. 43-69.
- Bird, E. C. F. (1957): The Use of the Soil Catena Concept in the Study of the Ecology of the Wormley Woods, Hertfordshire. The Journal of Ecology 45 (2). S. 465-469.
- Bishop, T.F.A., McBratney, A.B. (2001): A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. Geoderma 103 (1-2), S. 149-160.
- Blackmore, S., Moore, M. (1999): Remedial correction of yield map data. Precision agriculture 1. S. 53-66.
- Blanquet, J., Pallmann, H., Bach, R. (1960): Pflanzensoziologische und Bodenkundliche Untersuchungen im Schweizerischen Nationalpark und Seinen Nachbargebieten II. Vegetation und Boden der Wald und Zwergstrauchgesellschaften (Vaccinio-Piceetalia). The Journal of Ecology 48 (3). S. 748-749.
- Blühberger, G. (1996): Wie die Donau nach Wien kam – Von den Quellen bis zur Hainburger Pforte. Böhlau Verlag. Wien, Köln, Weimar
- Blum, W.E.H., Wenzel, W.W. (1989): Bodenschutzkonzeption – Bodenzustandsanalyse und Konzept für den Bodenschutz in Österreich, Arbeitsgruppe Bodenschutz der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft. Wien.
- Blum, W.E.H., Englisch, M., Freudenschuß, A., Nelhiebel P., Pock, H., Schneider, W., Schwarz, S., Wagner, J. Wandl, M. (2005): Soil Survey and Soil Data in Austria. European Soil Bureau – Research Report 9. Luxemburg. S. 47-60.
- Bocchi, S., Castrignanò, A. (2007): Identification of different potential production areas for corn in Italy through multitemporal yield map analysis. Field Crops Research 102. S. 185-197.
- Böhner, J., Selige, T. (2006): Spatial Prediction of Soil Attributes using Terrain Analysis and Climate Regionalisation. In: Böhner, J., McCloy, K.R., Strobl, J. (Hrsg.) (2006): SAGA – Analysis and Modelling Applications. Göttinger Geographische Abhandlungen. Heft 115. Georg-August-Universität Göttingen. S. 13- 28.
- Box, G.E.P., Draper, N.R. (1987): Empirical Model-Building and Response Surfaces. Wiley series in probability and mathematical statistics: Applied probability and statistics. Wiley. New York.
- Bragato, G. (2004): Fuzzy continuous classification and spatial interpolation in conventional soil survey for soil mapping of the lower Piave plain. Geoderma 118. S. 1-16.
- Brinkmann, J. (2002): Räumliche Variabilität von Böden und Bodeneigenschaften auf dem Landwirtschaftlichen Versuchsgut Frankenforst im Pleiser Hügelland. Dissertation an der Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität. Bonn.
- Brus, D.J., Heuvelink, G.B.M. (2007): Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. Geoderma 138 (1-2). S. 86-95.

- Bundesanstalt für Bodenwirtschaft (Hrsg.) (1993): Erläuterungen zur Bodenkarte 1:25.000 Kartierungsbereich Groß-Enzersdorf Niederösterreich KB 7. 2. Auflage. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft. Wien
- Burrough, P.A., McDonnell, R.A. (1998): Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press. New York
- Chiles, J.P., Delfiner, P. (1999). Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley-Interscience. New York.
- Clarke, K.C. (1995): Analytical and Computer Cartography. 2. Auflage. Prentice Hall Series in Geographic Information Science. New Jersey.
- Conrad, J. (1992): Umweltprobleme der Landwirtschaft - Politik um Nitrat. Deutscher Universitätsverlag. Wiesbaden.
- Corwin, D.L., Lesch, S. M. (2005): Characterizing Soil Spatial Variability. In: Lehr, J. (Hrsg.): The Encyclopedia of Water Volume 5. John Wiley & Sons, Inc. New York. S. 465-471.
- Davis, J.C. (1986): Statistics and data analysis in geology. 2. Ausgabe. John Wiley & Sons. New York.
- Dikau, R. (1989): The application of digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: Raper, J. (Hrsg.): Three dimensional applications in Geographic Information Systems. Taylor & Francis. London. S. 51-77.
- Dobesch, H., Neuwirth, F. (1982): Wind in Niederösterreich, insbesondere im Wiener Becken und im Donautal. Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Wien Heft 54. Wien.
- Dragut L., Blaschke, T. (2006): Automated classification of landform elements using object-based image analysis, Geomorphology 81. S. 330-344.
- Ersahin, S. (2003): Comparing Ordinary Kriging and Cokriging to Estimate Infiltration Rate. Soil Science Society of America Journal 67. S. 1848-1855.
- Evans, I.S. (1980): An integrated system of terrain analysis and slope mapping. Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl-Bd 36. Berlin, Stuttgart. S. 274-295.
- Feng, Q., A-Xing Z. (2004): Knowledge discovery from soil maps using inductive learning. International Journal of Geographical Information Science 17 (8). S. 771-795.
- Fink, J. (1969): Nomenklatur und Systematik der Bodentypen Österreichs. Mitteilungen der österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft Heft 13.
- Fink, J., Wader, R., Rerych, W. (1979): Böden und Standortsbeurteilung. In: Österreichischen Akademie der Wissenschaften - Kommission für Raumforschung (Hrsg.): Österreichatlas. Freytag & Berndt. Wien.
- Fink, J., Nestroy, O., Nagl, H. (1998): Bodenkarte von Österreich. Mitteilungen der österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft, Heft 57.
- Fink, M., Reiche, E.-W. (1999): Erprobung und Anwendung einer Methode zur digitalen flächenhaften Übertragung von Punktbezogenen Bodeninformationen. In: Strobl, J., Blaschke, T. (Hrsg.): Angewandte Informationsverarbeitung XI – Beiträge zum AGIT- Symposium Salzburg 1999. Wichmann. Heidelberg. S. 212 – 222.
- Florinsky, I.V. (1998): Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. International Journal of Geographical Information Science 12. S. 47-61.
- Fortin, M.J., Dale, M., Ver Hoef, J. (2002): Spatial analysis in ecology. In: El-Shaarawi, A., Piegorisch, W. (Hrsg.): Encyclopedia of Environmetrics. Volume 4. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester. S. 2051-2058.
- Fraisse, C.W., Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Fridgen, J.J. (1999): Use of unsupervised clustering algorithms for delineating within-field management zones. ASAE International Meeting, Toronto, Ontario, Canada. July 18-21 1999.
- Frazier, B.E., Rodgers, T.M., Rupp, R. (2005): Modeling Soil Distribution in Wilderness Areas of Washington State. In: 2005 ESRI User Conference Proceedings (5.11.2005). Washington State University. Verfügbar: gis2.esri.com/library/userconf/proco5/papers/pap1862.pdf [14.02.2008].
- Freyer, B. (Hrsg.) (2006): Monitoring der Umstellung auf den biologischen Landbau (MUBIL) - Abschlußbericht. Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien
- Friedrich, K. (1996): Digitale Reliefgliederungsverfahren zur Ableitung bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten. Frankfurter geowissenschaftliche Arbeiten, Serie D Physische Geographie Band 21. Frankfurt.
- Gandorfer, M. (2006): Bewertung von Precision Farming dargestellt am Beispiel der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung. Dissertation am Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues der Technischen Universität München. München.

- Ganssen, R. (1972): Bodengeographie – mit besonderer Berücksichtigung der Böden Mitteleuropas. Koehler. Stuttgart.
- Gerrard, A.J. (1980): Soil and Landforms. An Interaction of Geomorphology and Pedology. George Allen & Unwin. Boston.
- Gessler, P.E., Moore, I.D., McKenzie, N.J., Ryan, P.J. (1995): Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. Special issue: Integrating GIS and Environmental Modelling. International Journal of Geographical Information Systems 9 (4). S. 421-432.
- Gessler, P.E., Chadwick, O.A., Chamran, F., Althouse, L., Holmes, K. (2000): Modeling Soil-Landscape and Ecosystem Properties Using Terrain Attributes. Soil Science Society of America Journal 64. S. 2046-2056.
- Giasson, E., Clarke, R.T., Junior, A.V.I., Merten, G.H., Tornquist, C.G. (2006): Digital soil mapping using multiple logistic regression on terrain parameters in southern Brazil. Sci. agric. (Piracicaba, Braz.), 63 (3). S. 262-268. Verfügbar: www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162006000300008&lng=en&nrm=iso [14.02.2008].
- Glinka, K. D. (1927): The Great Soil Groups of the World and their Development. Edwards Bros. Ann Arbor, Michigan.
- Goodman, A. (1999): Trend surface analysis in the comparison of spatial distributions of hillslope parameters. Dissertation an der Deakin University. Melbourne. Verfügbar: www.deakin.edu.au/~agoodman/masters/index.html [14.02.2008].
- Goovaerts, P. (1999): Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity. Catena 34 (3-4). S. 227-242.
- Graßl, H. (1997): Brisante Mischung – Böden und globaler Wandel. In: Kümmerer, K., Schneider, M., Held, M. (Hrsg.): Bodenlos – Zum nachhaltigen Umgang mit Böden. Politische Ökologie 15, Sonderheft 10. Ökom-Verlag. München. S. 12-16.
- Grausgruber, G. (2003): Precision agriculture - Die Landwirtschaft von morgen (Eine Auswertung und Zusammenfassung von hochtechnologischen Unterstützungssystemen im Fütterungsmanagement und Tierhaltung im Bereich Precision livestock am Beispiel des Rindes sowie Precision farming). Dissertation am Institut für Land-, Umwelt- und Energietechnik der Universität für Bodenkultur. Wien
- Haas, T.C. (1990): Kriging and automated semivariogram modelling within a moving window. Atmospheric Environment 24A (7). S. 1759-1769.
- Hadatsch, S., Kratochvil, R., Vabitsch, A., Freyer, B., Götz, B. (2000): Biologische Landwirtschaft im Marchfeld - Potenziale zur Entlastung des Natur- und Landschaftshaushaltes. Umweltbundesamt. Wien
- Halbfass, S., Grunewald, K. (2003): Spatial variability of phosphorus contents in topsoils of two small catchments under agricultural use. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 166. S.197-203
- Harlfinger, O., Knees, G. (1999): Klimahandbuch der österreichischen Bodenschätzung. Mitteilungen der österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft, Heft 58.
- Hengl T., Rossiter D.G., Husnjak S. (2002): Mapping soil properties from an existing national soil data set using freely available ancillary data. Conference Proceedings. 17th World Congress of Soil Science. IUSS, Bangkok, Thailand.
- Hengl, T., Heuvelink, G.B.M., Stein, A. (2003): Comparison of kriging with external drift and regression-kriging. Technical report, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), Enschede. Verfügbar: www.itc.nl/library/Papers_2003/misca/hengl_comparison.pdf [14.02.2008].
- Hengl, T., Heuvelink, G.B.M., Stein, A. (2004): A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. Geoderma 120(1-2). S. 75-93.
- Hengl, T., Heuvelink G.B.M. (2004): New challenges for predictive soil mapping. Global Workshop on Digital Soil Mapping, September 14-17, Montpellier AGRO-M/INRA campus (CD-ROM).
- Hengl, T., Heuvelink, G.B.M., Rossiter, D.G. (2007): About regression-kriging: From equations to case studies. Computers & Geosciences 33 (10). S. 1301-1315.
- Hengl, T. (2007): A practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables. European Commission Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. Luxembourg.
- Heuvelink, G.B.M., Brus, D.J., de Gruijter, J.J. (2007): Optimization of Sample Configurations for Digital Soil Mapping of Properties with Universal Kriging. Developments in Soil Science 31. S. 137-151.
- Hoffmann, H. (2002): Stochastisch-Deterministische Modelle zur Analyse und Prognose räumlicher und zeitlicher Ozonimmissionsstrukturen in Sachsen. Dissertation an der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der TU Bergakademie Freiberg. Freiberg.
- Hudson, B. D. (1992): The soil survey as paradigm-based science. Soil Science Society of America Journal 56. S. 836-841.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): Climate Change 2007 – The physical Science Basis. Verfügbar: www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm [16.01.2008].

- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M. (1989): An Introduction to applied Geostatistics. Oxford University Press. New York
- Jaborek, Ch. (2003): Grundlagen zum Aufbau einer Standort-Güte-Karte für den österreichischen Weinbau unter besonderer Berücksichtigung der Ergebnisse der Landwirtschaftlichen Bodenkartierung sowie der Amtlichen Österreichischen Bodenschätzung mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) am Beispiel des Pilotprojekts Retz-Altstadt. Dissertation am Institut für Pflanzenschutz der Universität für Bodenkultur. Wien
- Janus, U. (1988): Löss der südlichen Niederrheinischen Bucht. Kölner Geographische Arbeiten. Heft 49.
- Jenny, H. (1941): Factors of Soil Formation - A System of Quantitative Pedology. McGraw-Hill. New York.
- Jenny, H. (1961): E.W. Hilgard and the Birth of Modern Soil Science. Collana Della Rivista, Agrochimica. Pisa.
- Johnston, K., Ver Hoef, J.M., Krivoruchko, K., Lucas, N. (2001): Using ArcGIS Geostatistical Analyst. ESRI. New York.
- Kienzie, S. (2004): The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. Transactions in GIS 8 (1). S. 83-112.
- Knotters, M., Brus, D.J., Oude Voshaar, J.H. (1995): A comparison of kriging, co-kriging and kriging combined with regression for spatial interpolation of horizon depth with censored observations. Geoderma 67 (3-4). S. 227-246.
- Köthe, R., Bock, M. (2006): Development and Use in Practice of SAGA Modules for high quality Analysis of Geodata. In: Böhner, J., McCloy, K.R., Strobl, J. (Hrsg.) (2006): SAGA – Analysis and Modelling Applications. Göttinger Geographische Abhandlungen Heft 115. Georg-August-Universität Göttingen. S. 85-96.
- Kravchenko, A., Bullock, D.B. (1999): A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. Agronomy Journal 91 (3) S. 393-400.
- Krige, D.G. (1951): A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society 52. S.119-139.
- Kuderna, M. (1999): Bodenindikatoren für eine nachhaltige Landwirtschaft. In: Umweltindikatoren für Österreich - Regionale und nationale Maßzahlen zur Dokumentation der Umweltsituation auf dem Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung. Workshop, 16.-17. November 1998, Schloß Wilhelminenberg. Wien. Umweltbundesamt. S. 125-130.
- Kuzyakova, I.F., Kuzyakov, Y.V., Thomas, E. (1997): Effect of microrelief on the spatial variability of carbon content of a Podzoluvisol in a long term field trial. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 160, S. 555-561.
- Lamsal, S., Grunwald, S., Bruland, G.L., Bliss, C.M., Comerford, N.B. (2006): Regional hybrid geospatial modeling of soil nitrate-nitrogen in the Santa Fe River Watershed, Geoderma, 135. S. 233-247.
- Lark, R.M. (2002): Robust estimation of the pseudo cross-variogram for cokriging soil properties. European Journal of Soil Science 53 (2), S. 253-270.
- Liang, X., Guoa, J., Leung, R. (2004): Assessment of the effects of spatial resolutions on daily water flux simulations. Journal of Hydrology 298 (1-4). S. 287-310.
- Ludowicy, Ch., Swaiberger, R., Leithold, P. (2002): Precision Farming – Handbuch für die Praxis. DLG-Verlag. Frankfurt
- Marsily, G. (1986): Quantitative Hydrogeology. Academic Press. New York.
- Matheron, G. (1963): Principles of geostatistics. Economic Geology 58. S. 1246-1266.
- Matheron, G. (1969): Le krigeage universel (Universal kriging) Vol. 1. Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau.
- McBratney, A.B., Walvoort, D. (2001): Generalised linear model kriging: A generic framework for kriging with secondary data. In: Meirvenne, M.V. (Hrsg.): 4th Conference of the Working Group on Pedometrics. University of Ghent. Ghent.
- McBratney, A.B., Mendonca Santos, M.L., Minasny, B. (2003): On digital soil mapping. Geoderma, 117(1-2). S. 3-52.
- McDonald, R.C., Isbell, R.F., Speight, J.G., Walker, J., Hopkins, M.S. (1990): Australian Soil and Land Survey - Field Handbook. Inkata Press. Melbourne.
- Mergili, M., Geitner, C., Moran, A. & Stötter, J. (2006): SOILSIM, a GIS-based framework for data-extensive modelling of the spatial distribution of soil hydrological characteristics in small alpine catchments. In: Strobl, J., Blaschke, T., Griesebner, G. (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2006 - Beiträge zum 18. AGIT-Symposium Salzburg. S. 444-453.
- Milne G. (1935): Some suggested units of classification and mapping particularly for East African soils. Journal of Soil Research 4. S. 183-198.

- Muhar, A., Schauppenlehner, T. (2005): Ableitung detaillierter Bodeninformation aus Daten der Finanzbodenschätzung und Geländeparametern mit Hilfe von geostatistischen Methoden. Mitteilungen der österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft Heft 72. S.103-109
- Mzukua, M., Khoslab, M., Reichd, R., Inmanc, D., Mithe, F., MacDonald, L. (2005): Spatial Variability of Measured Soil Properties across Site-Specific Management Zones. Soil Science Society of America Journal 69. S. 1572-1579.
- Nestroy, O. (1973): Landschaftsökologische Untersuchungen im Gebiete des Marchfeldes. Österreichischer Agrarverlag. Salzburg
- Nestroy, O., Gessl, A. (1998): Veränderung von Böden in den letzten 20 Jahren durch menschliche Tätigkeiten. Paper 183. 16th World Congress of Soil Science. Montpellier, France, August 20-26, 1998.
- Nestroy, O. (1999): Die Bodenkarte Österreichs als Beitrag zur Europa-Bodenkarte 1:1 Mio. Mitteilungen der österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft, Heft 57. S. 93-101.
- Odeh, I. O.A., McBratney, A.B., Chittleborough, D. (1995): Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. Geoderma 67 (3-4). S. 215-226.
- Odeh, I.O.A., Triantafyllis, J., McBratney, A.B. (2001): Are quantitative methods useful for regional soil inventories?. Proceedings of the 5th Annual Symposium Geospatial Information Agriculture. Australian Technology Park, Eveleigh, Sydney, Juli 17-19. S. 17-29.
- Olaya, V. (2004): A gentle introduction to SAGA GIS. Edition 1.1. Madrid. Verfügbar: ioc.unesco.org/oceanteacher/OceanTeacher2/02_InfTchSciCmm/01_CmpTch/05_OcSoft/01_Toolbox/Saga/SagaManual.pdf [28.03.2007].
- Pachepsky, Y.A., Timlin, D.J., Rawls, W.J. (2001): Soil water retention as related to topographic variables. Soil Science Society of America Journal 65. S. 1787-1795.
- Payer, M. (Hrsg.) (2001): Entwicklungsländerstudien Teil I: Grundgegebenheiten. -- Kapitel 3: Gelände und Böden / zusammengestellt von Alois Payer. Verfügbar: www.payer.de/entwicklung/entwo3.htm [14.02.2008].
- Pehamberger, A. (1998): 50 Jahre Österreichische Bodenschätzung. Mitteilungen der österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft, Heft 56. S. 69-78.
- Pehamberger, A. (2001): Bodenschätzung in Österreich. Mitteilungen der österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft, Heft 63. S. 55-58.
- Peschier, J. (1996): Characterisation of Topographic Surfaces on a Triangulated Irregular Network (TIN). Universiteit Utrecht. Verfügbar: www.jarno.demon.nl/gavh.htm [27.03.2007].
- Pfeiffer, E.M., Sauer, S., Engel, E. (Hrsg.) (2003): Bodenschätzung und Bodenbewertung - Nutzung und Erhebung von Bodenschätzungsdaten. Chmielorz Verlag. Wiesbaden.
- Prairie Agricultural Machinery Institute (1999): A Comparison of Three Popular Yield Monitors & GPS Receivers. Research Update 745. Verfügbar: pami.ca/pdfs/reports_reasearch_updates/745_a_comparison_of_three_popular_yield_monitors_and_gps_receivers.pdf [14.02.2008].
- Richter, G. (Hrsg.) (1998): Bodenerosion - Analyse und Bilanz eines Umweltproblems. Wiss. Buchgesellschaft. Darmstadt.
- Robinson, T.P., Metternicht, G. (2005): Comparing the performance of techniques to improve the quality of yield maps. Agricultural Systems 85. S. 19-41.
- Rögl, F., Steininger, F. (1993): Vom Zerfall der Tethys zu Mediterran und Paratethys. Ann. Naturhist. Mus. Wien 85 (A). S. 135-163
- Rossiter, D.G. (2007): Co-kriging with the gstat package of the R environment for statistical computing. Technical Note. International Institute for Geo-information Science & Earth Observation (ITC). Enschede.
- Ruhe, R.V. (1956): Geomorphic surfaces and the nature of soils. Soil Science 82. S. 441-455.
- Sartori, F. (1830): Wiens Tage der Gefahr und die Retter aus der Noth, Band 1. Gerold. Wien.
- Schauppenlehner, T., Muhar, A. (2004): Analysen der Zusammenhänge zwischen Kleinrelief und landwirtschaftlichen Ertragsdaten in einer alluvialen Landschaft zur Erstellung verbesserter Bodenkarten. In: Strobl, J., Blaschke, T., Griesebner, G. (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2004, Salzburg. Wichmann. Heidelberg. S. 585-594.
- Scheffer, F., Schachtschnabel, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage. Enke Verlag. Stuttgart.
- Schmidt, W. (2003): Nachhaltiger Bodenschutz in der landwirtschaftlichen Praxis. In: Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (Hrsg.) (2003): Bodenschutz und Nachhaltigkeit - 5. Sächsische Bodenschutztage, 26. und 27. Juni 2003. Dresden. S. 114-157.

- Schneider, W. (2001): Die Böden der Donauterrassen östlich von Wien. Mitteilungen der österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft, Heft 63. S. 93-107.
- Schneider, W., Nelhiebel, P., Aust, G., Wandl, M., Danneberg, O.H. (2001): Die landwirtschaftliche Bodenkartierung in Österreich. Mitteilungen der österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft, Heft 63. S. 39-68.
- Schwarz, S., Englisch, M., Aichberger, K., Baumgarten, A., Blum, W., Danneberg, O., Glatzl, G., Huber, S., Kilian, W., Klaghofer, E., Pehamberger, A., Wagner, J., Gerzabek, M. (2001): Bodeninformati on in Österreich – Aktueller Stand und Ausblick. In: Österreichische Bodenkundliche Gesellschaft, Umweltbundesamt (Hrsg.): Bodenaufnahmesysteme in Österreich. Wien. S. 185-216.
- Shary, P.A., Sharaya, L.S., Mitusov, A.V. (2002): Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma* 107. S. 1-32.
- Sinowski, W. (1995): Die dreidimensionale Variabilität von Bodeneigenschaften – Ausmaß, Ursachen und Interpolation. FAM-Bericht 7. Shaker. Aachen.
- Sinowski, W.K., Auerswald. (1999): Using relief parameters in a discriminant analysis to stratify geological areas with different spatial variability of soil properties. *Geoderma* 89. S. 113-128.
- Soja, G., Soja, A.M., Eitzinger, J., Gruszczynski, G., Trnka, M., Kubu, G., Formayer, H., Schneider, W., Suppan, F., Koukal, T. (2004): Analyse der Auswirkungen der Trockenheit 2003 in der Landwirtschaft Österreichs – Vergleich verschiedener Methoden. Projektbericht StartClim 2004. Wien.
- Souza Z., Marques Júnior, J.M., Pereira, G.T., Barbieri, D.M. (2006): Small relief shape variations influence spatial variability of soil chemical attributes. *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)*. Vol. 63, Nr. 2. S. 161-168. Verfügbar: www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162006000200008&lng=en&nrm=iso [14.02.2008].
- SRU (Rat von Sachverständigen für Umweltfragen) (1985): Umweltprobleme der Landwirtschaft. Gutachten März 1985. Verlag Kohlhammer. Stuttgart, Mainz.
- Stein, A., Corsten, L.C.A. (1991): Universal Kriging and Cokriging as a Regression Procedure. *Biometrics* 47(2): S. 575-587.
- Steinmayr, T. (2002): Fehleranalyse und Fehlerkorrektur bei der lokalen Ertragsermittlung im Mährescher zur Ableitung eines standardisierten Algorithmus für die Ertragskartierung. Dissertation am Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung der Technischen Universität München. München.
- Stolt, M.H., Genthner, M.H., Daniels W.L., Groover, V.A. (2001): Spatial Variability in Palustrine Wetlands. *Soil Science Society of America Journal* 65. S. 527-535.
- Straub, R., Holmes, B., Silbernagel, C. (1998): Computer controlled manure spreader. Technical Report, College of Agricultural and Life Sciences, University of Wisconsin-Madison.
- Thomas, A. L., King, D., Dambrine, E., Couturier, A., Roque., J. (1999): Predicting soil classes with parameters derived from relief and geologic materials in a sandstone region of the Vosges mountains (Northeastern France). *Geoderma* 90. S. 291-305.
- Thompson, J.A., Bell, J.C., Butler, C.A. (2001): Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. *Geoderma* 100. S. 67-89.
- Tobler, W. R. (1970): A computer model simulation of urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46(2). S. 234-240.
- Triantafyllis, J., Odeh, I.O.A., McBratney, A.B. (2001): Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton. *Soil Science Society of America Journal* 65. S. 869-878.
- Tsai, C.-C., Chen Z.-S., Duh, C.-T., Horng, F.-W. (2001): Prediction of Soil Depth Using a Soil-Landscape Regression Model: A Case Study on Forest Soils in Southern Taiwan. *Proceedings of the National Science Council, Republic of China. (B)*. 25(1). S. 34-39.
- Umweltbundesamt (2007): Umweltsituation in Österreich - Achter Umweltkontrollbericht des Umweltministers an den Nationalrat. Umweltbundesamt. Wien.
- Vitharana, U.W.A., Van Meivenne, M., Simpson, D., Cockx, L., De Baerdemaeker, J. (2008): Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. *Geoderma* 143. S. 206-215.
- Wackernagel, H. (2003): Multivariate geostatistics: An introduction with applications. 3. Auflage. Springer Verlag. Berlin.
- Wagner, J. (2001): Bodenschätzung in Österreich. In: Bodenaufnahmesysteme in Österreich: Mitteilungen der österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft, Heft 62. Umweltbundesamt. S. 69 -104.
- Wagner, J. (2005): Die Österreichische Bodenschätzung. Mitteilungen der österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft, Heft 72. S. 189-191.
- Webster, R., Oliver, M.A. (2001): Geostatistics for Environmental Scientists. Wiley. Brisbane.

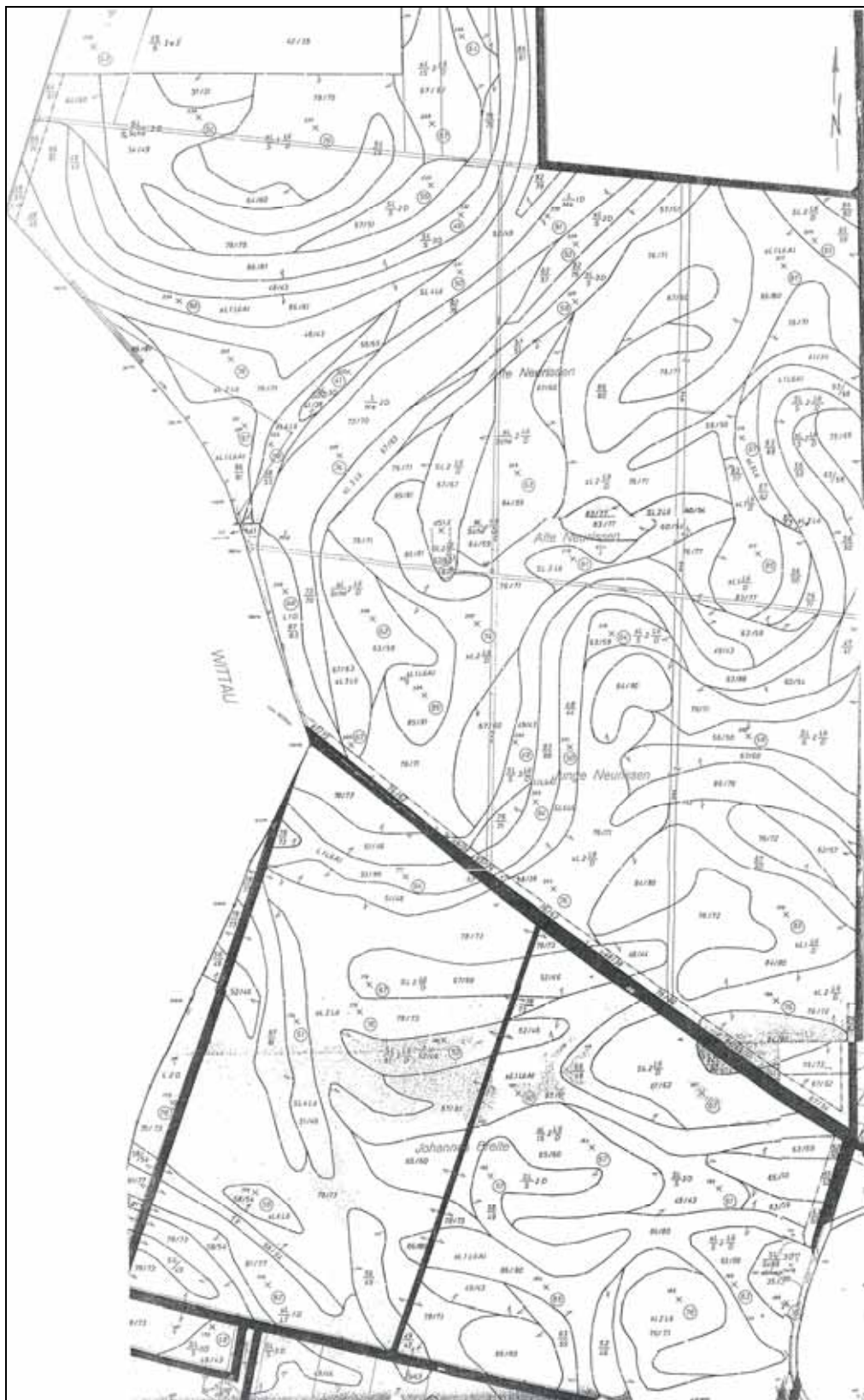
- Weihua, Z., Montgomery, D. (1994): Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resources Research* 30. S. 1019-1028.
- Wood, J. (1996): The geomorphological characterisation of Digital Elevation Models. Dissertation. University of Leicester, UK. Leicester. Verfügbar: www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd/ [14.02.2008].
- WWK (Wasserwirtschaftskataster), UBA (Umweltbundesamt) (1997): Wassergüte in Österreich. Jahresbericht 1996. Wasserwirtschaftskataster & Umweltbundesamt. Wien.
- Young F.J., Hammer, R.D. (2000): Defining Geographic Soil Bodies by Landscape Position, Soil Taxonomy, and Cluster Analysis. *Soil Science Society of America Journal* 64. S. 989-998.
- Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (2006): Klimadaten von Österreich 1971 – 2000. Verfügbar: www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klimaz000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm [14.02.2008].
- Zevenbergen, L. W., Thorne, C. R. (1987): Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms* 12. S. 47-56.
- Zhu, A.X., Hudson, B., Burt, J., Lubich, K., Simonson, D. (2001): Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. *Soil Science Society of America Journal* 65. S. 1463-1472.
- Xu, W., Tran, T.T., Srivastava, R.M., Journel, A.G. (1992): Integrating seismic data in reservoir modeling: the collocated cokriging alternative. *Society of Petroleum Engineers*. Nr. 24742.
- Ziadat, F.M. (2005): Analyzing Digital Terrain Attributes to Predict Soil Attributes for a Relatively Large Area. *Soil Science Society of America Journal* 69. S. 1590-1599.

10. Anhang

Anhang 1: Attributbeschreibung der Bodenprobendatenbank

Spaltenname	Beschreibung
Tabelle Vergleichsstücke	
Gemeinde	Name der Gemeinde in sich das Vergleichsstück befindet
Seehöhe	Seehöhe [m]
Exposition	Ausrichtung
Relief	Angabe zur Landform in der sich das Vergleichsstück befindet
Lage	Angabe zur Lage des Vergleichsstückes
V_Bodentyp	Bodentyp
V_Klasse	Bodenklasse
V_Bodenzahl	Bodenzahl am Grabloch
V_Ackerzahl	Ackerzahl (=Bodenzahl am Grabloch mit Zu-/Abschlägen)
Ausgangsmaterial	Ausgangsmaterial für die Bodenbildung
Gründigkeit	Angabe zur Gründigkeit des Bodens
Wasserverhältnisse	Angabe zu den Wasserverhältnissen des Bodens
Bearbeitbarkeit	Angabe zur Bearbeitbarkeit des Bodens
V_Gelände	Zu-/Abschlag für Gelände [%]
V_Klima	Zu-/Abschlag für Klima [%]
V_Wind	Zu-/Abschlag für Wind [%]
V_WassÜberschw	Zu-/Abschlag für Überschwemmung bei Starkregen [%]
Tabelle Profile	
P_Nr	Profilnummer
P_Sf	Sonderfläche
P_H_Nr	Profilhorizontnummer
BezugsVst	Bezugsvergleichsstück (Vst)
VSt_Erg	Bezugs-Vst Ergänzung
Vst_Code	Nummer des Bezugs-Vst.
P_Bodentyp	Bodentyp
P_Klasse	Bodenklasse
P_Bodenzahl_Grabloch	Bodenzahl am Grabloch
P_Bodenzahl_Klasse	Bodenzahl der Klasse
P_Ackerzahl	Ackerzahl (=Bodenzahl am Grabloch mit Zu-/Abschlägen)
P_Gelände	Zu-/Abschlag für Gelände [%]
P_Klima	Zu-/Abschlag für Klima [%]
P_Wind	Zu-/Abschlag für Wind [%]
P_Verschießen	Zu-/Abschlag für schlechtere Bodenprobe [%]
P_WassÜberschw	Zu-/Abschlag für Überschwemmung bei Starkregen [%]
P_Wed_O	Zu-/Abschlag für Wald im Osten [%]
P_Wed_S	Zu-/Abschlag für Wald im Süden [%]
P_Wed_SO	Zu-/Abschlag für Wald Südosten [%]
Tabelle Horizonte	
P_H_Nr	Profilhorizontnummer
H-Nr	Horizontnummer
Symbol	Horizontbezeichnung (z.B. A, Ap, E,...)
Mächtigkeit_von	Horizontbeginn von der Bodenoberkante gerechnet [cm]
Mächtigkeit_bis	Horizontende von der Bodenoberkante gerechnet [cm]
Humus	Angabe zum Humusgehalt
Bodenart	Angabe zur Bodenart
Karbonat	Angabe zum Karbonatgehalt
Me	Angabe zum Mergelgehalt

Anhang 2: Analoge Schätzungsreinkarte mit Flächenausweisungen



Anhang 3: Beispielseite aus dem Schätzbuch, mit detaillierten Angaben zu Horizontmächtigkeiten, Bodenklasse, Ackerzahl sowie den Zu- und Abschlägen

Schätzungsbuch				Überprüfung Nachschätzung				Kat. Gemeinde Rützenhof		Tag der Schätzung 16. 4. 1991			
Profil Nr.	Horizont		Mächtigkeit	Bodengefüge	Bodentyp	Bezugs- Vst	Kulturart	Klasse	Boden- bzw. Grün- landgrundzahl		Abweichungen bzw. Besonderheiten	Acker- bzw. Grün- land- zahl	Hinweise u. Erläuterungen
	Sym- bol	2							Grab- loch	Klasse			
31	Ap	0-25	h f - f ₂ L ka	4	TS	2	A	SL 2 D	62	64	Gel	58	
	A	45/50	h f - f ₂ L ka			Gli					Kli	-4	
	Ac	-60	h' - h ₂ f ₂ L ka								Wi	-5	
	C	-80	I ₂ F ₂ ka										
	CD	-1	I' F ₂ - S ka										
32					TS	3	A	SL 3 D	47	45	Gel	39	
				line x1		Gli					Kli	-6	
											Wi	-2	
33	Ap	0-25	h I ₂ F ₂ ka		TS	2	A	SL 3 D	56	54	Gel	49	
	Ac	-40	h - h' I ₂ F ₂ ka								Kli	-4	
	C	-1	I - I ₂ F ₂ ka								Wi	-6	
34					TS	2	A	SL 2 D	64	67	Gel	61	
				line x1 2 Fra		Fra					Kli	-4	
											Wi	-5	
35					TS	3	A	SL 3 D	45	45	Gel	39	
				line x1		Gli					Kli	-6	
											Wi	-6	
											ver	-1	

Schätzungsbuch

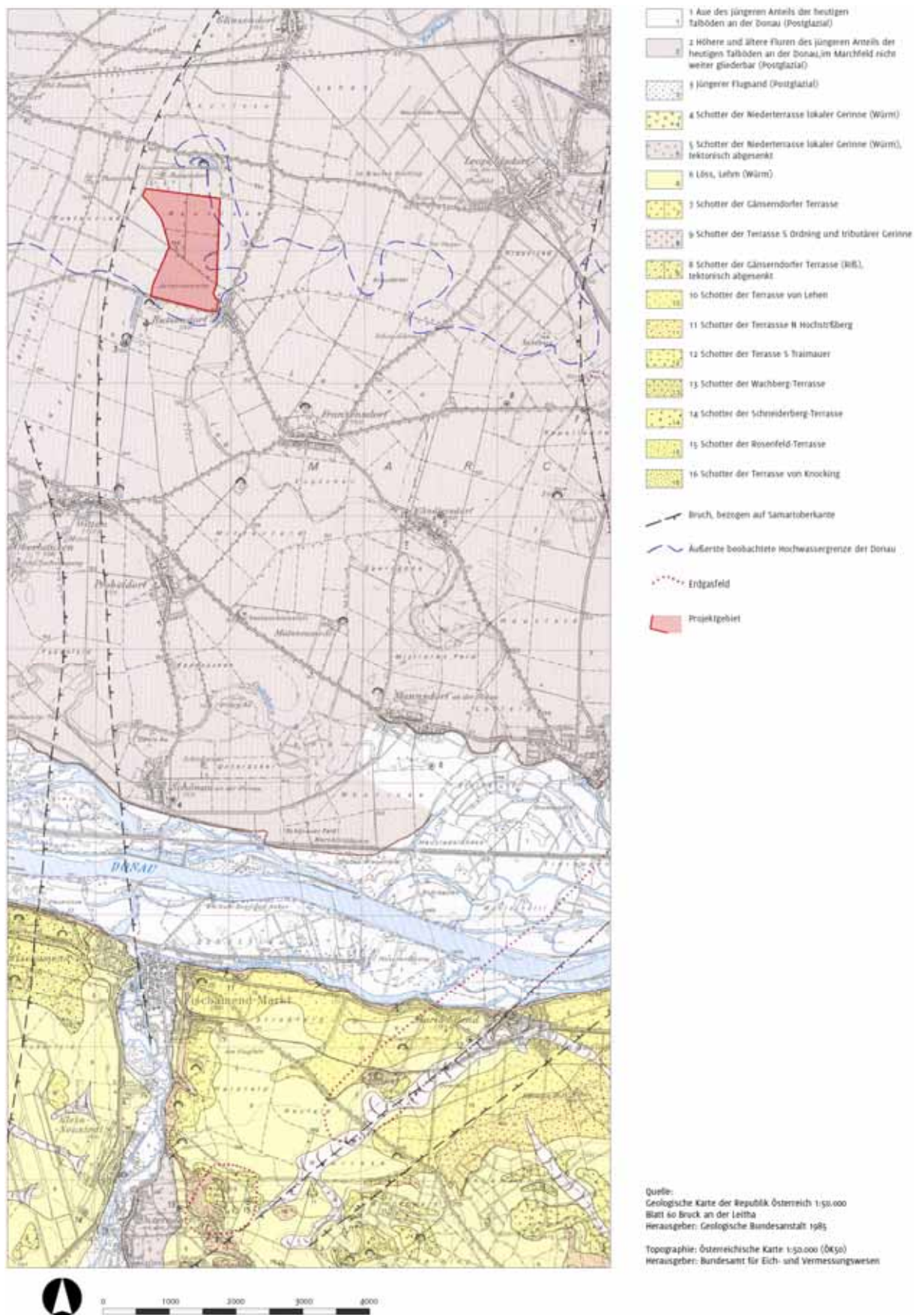
Lager-Nr. Bo 11 FLD 1 Wien, Niederösterreich u. Burgenland - 5, 84, 10 000 (Unveränderlicher Nachdruck) - Österreichische Statistikdruckerei, 3051 7 g4/0

Anhang 4: Aufnahmebogen für ein Vergleichsstück

[illegible]

Bodenkundliche Beschreibung (auszugsweise)																
Horizonte Symbol	Wäch- tigkeit	Humus	Boden- art	Grobanteil	Karbo- nat	Lagerung	Konsi- stenz	Struktur	Hohl- räume	Sonstige Merkmale (z.B. Flecken, Konkretionen, Durch- wurzelung, Übergänge)	Vorgabenverhältnis in Gew.-%			p.H		
											S	Z	T			
Ap	0 - 30	h	II 2	-	k _a	norm	pl kl	krü + blok	pör	g-durchw, abs	14	68	18	7,4		
AC	30 - 40/50	hf1	I 2	-	k _a	norm	pl kl	krü + blok	pör	H-füllungen in Regenwurmröhren, deu Ka-Mycel, g-durchw, a.Überg	13	69	18	7,7		
C	40/50-	-	I 2	-	k _a	norm	pl n,kl	-	f.pör	deu Ka-Mycel, Durchw ausl	15	73	12	7,9		
Ausgangsmaterial: L08											Gründigkeit: tiefgründig		Wasserverhältnisse des Standortes: mäßig trocken		Bearbeitbarkeit: sehr gut	

Anhang 5: Geologische Karte des Marchfeldes



10.1. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Analog erstellte Bodenkarte (links) mit scharfen Grenzen, und eine Auflösung der Grenzen durch kontinuierliche Übergänge.....	5
Abb. 2: Digitale Bodenkarte Österreichs mit scharfen Abgrenzungen der einzelnen Bodentypen	9
Abb. 3: Ausschnitt aus der analogen Feldschätzungskarte für das Versuchsgut Rutzendorf	10
Abb. 4: Precision Agriculture und die Unterteilung in Teildisziplinen (nach AUERNHAMMER, 2002)	11
Abb. 5: Grabloch der österreichischen Finanzbodenschätzung	14
Abb. 6: Faktoren und Kriterien bei der Bestimmung der Acker- bzw. Grünlandzahl (nach JABOREK, 2003)	14
Abb. 7: Einteilung der Bodenarten im Texturdreieck (nach WAGNER, 2001)	17
Abb. 8: Zustandstufen mit Zuordnungsbeispielen (nach SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2002).....	18
Abb. 9: Ackerschätzungsrahmen (WAGNER, 2001)	19
Abb. 10: Schematische Darstellung eines <i>Moving Window</i> (3x3 Rasterzellen) über einem Rasterdatensatz (nach BEHRENS, 2003; CLARKE, 1995)	21
Abb. 11: Koeffizienten für die Berechnung von Reliefparametern auf Basis eines 3x3-Zellen Fensters.....	22
Abb. 12: Darstellung der Hangneigung in einem Rastermodell	23
Abb. 13: Unterschiedliche Krümmungsradien einer Kurve	24
Abb. 14: Die aus der Plan- und Profilkurvatur abgeleiteten Landformen (Vertikal: Plankurvatur, Horizontal: Profilkurvatur) (nach PESCHIER, 1996; DIKAU, 1989)	25
Abb. 15: Lössunterboden, der durch Pflugarbeit an die Oberfläche transportiert wird, und damit der Winderosion ausgesetzt ist.....	29
Abb. 16: Beispielbild einer interpolierten Karte (Aufgrund der feinen Abstufungen wird eine Genauigkeit suggeriert, die möglicherweise in dieser Form nicht gegeben ist)	30
Abb. 17: Verschiedene Arten der Auswahl von Probennahmepunkten (nach BURROUGH & McDONNELL, 1998)	31
Abb. 18: Schätzung eines Punktes unter Berücksichtigung gemessener Punkte in der Umgebung und Definition eines Suchradius	34
Abb. 19: Komponenten der Theorie der regionalisierten Variablen: Mittelwertniveaus (oben) bzw. Trends (unten), räumlich korrelierte aber unregelmäßigen (zufällige) Varianzen sowie unkorrelierte lokale Varianzen bedingt durch Messungenauigkeiten und kleinräumigen Variationen (nach BURROUGH & McDONNELL, 1998)	34
Abb. 20: Experimentelles und theoretisches Semivariogramm (nach WACKERNAGEL, 2003).....	35
Abb. 21: Verschiedene gebräuchliche Semivariogrammmodelle (nach WACKERNAGEL, 2003 und JOHNSTON ET AL., 2001)	37
Abb. 22: Theoretisches Kovarianz-Diagramm	38
Abb. 23: Darstellung von Probenpunkten in einer Raumdimension mit dem Mittelwert μ und dem Schätzfehler $E(x)$ (nach JOHNSTON ET AL., 2001)	39
Abb. 24: Darstellung von Probenpunkten zweier Stichproben in einer Raumdimension mit dem Mittelwerten μ_1 , μ_2 und den jeweiligen Schätzfehlern $E_1(x)$ und $E_2(x)$ (nach JOHNSTON ET AL., 2001)	40
Abb. 25: Darstellung von Probenpunkten einer Stichproben in einer Raumdimension mit dem Mittelwert μ als polynomiale Trendfunktion zweiter Ordnung und dem Schätzfehler $E(x)$ (nach Johnston et al., 2001).....	42
Abb. 26: Modell des Regression Kriging am Beispiel eines Querprofils und der Bodenvariable Ackerzahl (nach HENGL ET AL., 2004)	43
Abb. 27: Benutzeroberfläche von Landserf 2.2	45
Abb. 28: Benutzeroberfläche von SAGA 2.0.2	46
Abb. 29: Benutzeroberfläche von ArcMap (ArcGIS 9.2).....	48
Abb. 30: Benutzeroberfläche (Daten Editor) von SPSS	49
Abb. 31: Übersichtskarte Ostösterreich (Datenquellen: ArcAustria, Corine Landcover)	51
Abb. 32: Versuchsgut Rutzendorf (Orthofoto und Schlaggrenzen).....	52
Abb. 33: Klimaräume Österreichs (nach HARLFINGER & KNEES, 1999)	53

Abb. 34: Linkes Diagramm: Windrichtungen (%-Anteil nach Windrichtungen); Rechtes Diagramm: Windgeschwindigkeiten (in m/s) und Starkwindtage mit Beaufort (Bft) > 6 bzw. > 8	54
Abb. 35: Ausdehnung der Paratethys und des Mittelmeers und die Entstehung des Wiener Beckens (nach RÖGL & STEININGER, 1983)	55
Abb. 36: Tschernosemprofil	57
Abb. 37: a. tiefgründiger Tschernosem in Muldenlage auf tertiären Sedimenten, b. Tschernosem (Rumpf-Tschernosem) auf Lößuntergrund in leichter Hanglage, trocken gefallene Feuchtschwarzerde in Muldenlage auf tertiären Ablagerungen.....	58
Abb. 38: Beispiel für eine typische Catena (Bodenabfolge) des Trockenraums	58
Abb. 39: Landnutzung im Marchfeld auf Basis der Corine Landcover Daten 2000 (Copyright EEA, Copenhagen, 2007)	59
Abb. 40: Übersicht des Großraums um das Untersuchungsgebiet auf Basis Landschaftsökologischen Strukturmerkmale als Indikatoren der Nachhaltigkeit (SINUS) (BEISSMANN ET AL., 2003)	60
Abb. 41: Statistische Kennwerte der Punktdaten und das Histogramm der Ackerzahl (n=500).....	61
Abb. 42: Digitales Geländemodell, Auflösung 1m	62
Abb. 43: Übersicht der aufgenommen Ertragsdaten von 2002 bis 2005.....	63
Abb. 44: Darstellung der Access-Datenbank als Entitätsmengen mit Attributen und Beziehungen.....	66
Abb. 45: Digitalisierte Bodenprobenpunkte und die manuell ausgewiesenen Flächeneinheiten vor dem Hintergrund der analogen Schätzkarte	67
Abb. 46: Darstellung der ASCII-Rohdaten als kommaseparierte Werte im Texteditor	68
Abb. 47: Ertragsmessung Johannesbreite 2002 mit Markierung der Extremwerte.....	69
Abb. 48: Ertragsmessung Johannesbreite 2002; Detailansicht der Extremwerte im Wendebereich.....	70
Abb. 49: Ertragsmessung Johannesbreite 2002; Detailansicht der Extremwerte bei Punktverdichtungen.....	70
Abb. 50: Ertragsmessung Johannesbreite 2002 mit gut zu erkennenden Düngungsbedingten Streifenstrukturen	72
Abb. 51: Semivariogramm der Ertragsdatenmessung vom Schlag Johannesbreite (Erntejahr 2002; Lagsize=8m).....	72
Abb. 52: Profilvergleich der gemessenen Erträge (blaue Linie) mit den Ergebnisdaten des gerichteten Ordinary Kriging (orange Linie). Die rote Linie zeigt das Höhenprofil.	73
Abb. 53: Vergleich der Ertragsdaten (Ausschnitt Johannesbreite, 2002) vor und nach der Datenkorrektur auf Basis der Mittelwertanpassung.....	74
Abb. 54: Automatische Selektion der Bearbeitungsreihen, durch Berechnung des Quadranten, den eine Line zwischen zwei aufeinander folgenden Messpunkten durchläuft.	75
Abb. 55: Semivariogrammmodellierung der Ertragsdaten in ArcGIS.....	76
Abb. 56: Interpolation der Ertragsdaten durch Ordinary Kriging.....	76
Abb. 57: Hangneigungen.....	78
Abb. 58: Profil- und Plankurvatur nach ZEVENBERGEN & THORNE (1987) mit teilweise starker Artefaktbildung	79
Abb. 59: Profil- und Plankurvatur nach WOOD (1996) mit einem 9x9 Moving Window	80
Abb. 60: Relative Höhe	81
Abb. 61: Vollständiges Landformenmodell (links) und ausgewiesenen Landformengruppen (rechts) für die weitere Bearbeitung.....	82
Abb. 62: Box-Plot Darstellung der Ackerzahlen-Verteilung innerhalb einzelner Landformen.....	83
Abb. 63: Topographischer Feuchtigkeitsindex (TWI).....	84
Abb. 64: Streudiagramme mit Ausgleichsgeraden zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen Ackerzahl und den einzelnen Reliefparametern (N=542).....	86
Abb. 65: Zusammenhänge zwischen Ackerzahlen und Ertragsdaten aufgeschlüsselt nach Bearbeitungsschlag und Aufnahmejahr (1/2).....	87
Abb. 66: Zusammenhänge zwischen Ackerzahlen und Ertragsdaten aufgeschlüsselt nach Bearbeitungsschlag und Aufnahmejahr (2/2).....	88
Abb. 67: Zusammenhänge zwischen Ackerzahlen und den für das Regressionsmodell ausgewählten Regressoren	89

Abb. 68: Multiples Regressionsmodell basierend auf Hangneigung, relativer Höhe und Profilkurvatur als Regressoren	91
Abb. 69: Geostatistical Analyst in ArcGIS für die Definition des Semivariogramms	92
Abb. 70: Kreuzvalidierung des Ordinary Kriging-Modells.....	93
Abb. 71: Ergebniskarte des Ordinary Kriging-Modells	94
Abb. 72: Geostatistical Analyst in ArcGIS für die Definition des Semivariogramms und der Crosscovariogramme.....	95
Abb. 73: Semivariogramm für die Variable Ackerzahl sowie die Crosscovarianzen für die Co-Variablen Hangneigung, Profilkurvatur und relative Höhe.....	96
Abb. 74: Festlegung der Suchradien und Vorschau des Interpolationsergebnisses	96
Abb. 75: Kreuzvalidierung des Cokriging-Modells	97
Abb. 76: Ordinary Cokriging-Modell mit Hangneigung, relativer Höhe und Profilkurvatur als Co-Variablen.....	98
Abb. 77: Eingabe-Wizard aus SAGA für das Universal Kriging.....	99
Abb. 78: Universal Kriging-Modell mit Hangneigung, Profilkurvatur und relativer Höhe als Sekundärvariablen	100
Abb. 79: Universal Kriging-Modell basierend auf Landformen.....	101
Abb. 80: Semivariogrammmodellierung im Geostatistical Wizard von ArcGIS	102
Abb. 81: Simple Kriging-Modell der Regressionsresiduen	103
Abb. 82: Regression Kriging-Modell mit Hangneigung, relativer Höhe und Profilkurvatur als Sekundärdaten	104
Abb. 83: Gegenüberstellung der Ertragsdaten (Johannesbreite, 2002) mit den Interpolationsmodellen (N=536).....	106
Abb. 84: Gegenüberstellung der Ertragsdaten (Alte Neurisse, 2004) mit den Interpolationsmodellen (N=387).....	107
Abb. 85: Validierungspunkte (rot) in der Gesamtstichprobe (Die Auswahl ist geschichtet mit einem Auswahlraster von 200x200m).....	109
Abb. 86: Gegenüberstellung der Ackerzahlen mit den Interpolationsmodellen auf Basis einer aus der Modellberechnung exkludieren Substichprobe (N=33).....	110

10.2. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: MUBIL I: Teilprojekte und ausführende Institute	4
Tab. 2: Bodeninformationen in Österreich (verändert nach SCHWARZ ET AL., 2001).....	13
Tab. 3: Klassifikation geomorphometrischer Reliefparameter hinsichtlich ihrer Funktion mit ausgewählten Beispielen (verändert nach BEHRENS, 2003)	20
Tab. 4: Definition von Landformen über die relative Höhe (MCDONALD ET AL., 1990)	27
Tab. 5: Geländeformen für bodenkundliche Erhebungen (BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT, 1993)	28
Tab. 6: Methodenübersicht (nach BURROUGH & MCDONNELL, 1998)	44
Tab. 7: Softwareüberblick	50
Tab. 8: Monatsmitteltemperatur in Grad Celsius	54
Tab. 9: Niederschlag in l/m	54
Tab. 10: Windgeschwindigkeiten in m/s.....	54
Tab. 11: Anteil der je Bewirtschaftungsschlag ausgeschiedenen Messpunkte gruppiert nach dem Aufnahmejahr	71
Tab. 12: Landformen und deren Zuweisung zu Landformengruppen	83
Tab. 13: Korrelationsanalyse nach Pearson	85
Tab. 14: Korrelationsanalyse nach Pearson für die einzelnen Aufnahmejahre und Bearbeitungsschläge.....	88
Tab. 15: Modellzusammenfassung – Bestimmtheitsmaß	90
Tab. 16: Regressionsmodell - Koeffizienten	90
Tab. 17: Modellübersicht Ordinary Kriging.....	93
Tab. 18: Korrelationsanalyse (nach Pearson) der einzelnen Modelle mit den Ertragsdaten.....	107
Tab. 19: Korrelationsanalyse (nach Pearson) der einzelnen Modelle mit der Ackerzahl (Substichprobe)	110