

Regionalisierung bodenphysikalischer Eigenschaften in Reislandschaften für räumlich differenzierte Wasserhaushalts- und Ertragsmodellierung

**Untersuchungen zur Anwendung von Fernerkundungsdaten für
Bodenregionalisierungen am Beispiel eines Einzugsgebietes in der
Jiangxi-Provinz/China**

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

von

Kay Sumfleth

aus

Hamburg

Referenten:

Prof. Dr. Rainer Duttmann

Prof. Dr. Horst Sterr

Tag der Anmeldung: 1. August 2004

Tag der Abgabe: 28. Mai 2008

Prof. Dr. Rainer Duttmann (Referent):

Prof. Dr. Horst Sterr (Korreferent):

Tag der mündlichen Prüfung:

Zum Druck genehmigt: Kiel,

.....

Der Dekan

Eidesstattliche Versicherung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich meine Dissertation

„Regionalisierung bodenphysikalischer Eigenschaften in Reislandschaften für räumlich differenzierte Wasserhaushalts- und Ertragsmodellierung Untersuchungen zur Anwendung von Fernerkundungsdaten für Bodenregionalisierungen am Beispiel eines Einzugsgebietes in der Jiangxi-Provinz /China“

selbstständig und ohne fremde Hilfe, abgesehen von der Beratung durch meinen Betreuer, angefertigt habe. Die vorliegende Arbeit wurde weder ganz noch in Teilen bereits an einer anderen Stelle im Rahmen eines Prüfungsverfahrens vorgelegt, veröffentlicht oder zur Veröffentlichung eingereicht. Alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen, wie auch die sich an die Gedanken anderer Autoren eng anlehrenden Ausführungen meiner Arbeit, habe ich besonders gekennzeichnet und die Quellen nach den mir gegebenen Richtlinien zitiert.

.....
Kay Sumfleth, Kiel, 27.5.2008

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Rainer Duttmann für seine fachliche Betreuung, anhaltende Diskussionsbereitschaft und stets aufmunternde Unterstützung während der Anfertigung dieser Arbeit. Herrn Prof. Horst Sterr möchte ich ebenfalls meinen Dank für die Übernahme des Korreferates aussprechen.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen wissenschaftlichen, administrativen und technischen Mitarbeitern sowie den Diplomanden und studentischen Hilfskräften des Geographischen Instituts, ohne deren unermüdliche Hilfe und Mitarbeit während der Geländearbeit und der Laborarbeit die Anfertigung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Im Besonderen möchte ich mich bei Frau Berger, Frau Bock, Frau Boller, Michael Blaschek und Daniela Ulbrich an dieser Stelle bedanken.

Einen großen Dank möchte ich an meine Kollegen und Freunde Michaela Bach, Alexander Herzig, Ulrike Klein, Karsten Krüger, Ben Schmehe und Bianca Willié richten. Ohne ihre Hilfe wäre diese Arbeit nicht so zustande gekommen. Ihnen sei gedankt für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und die konstruktiven Diskussionen.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Ohne meine Familie hätte ich diese langen Stunden am Schreibtisch sicherlich nicht unbeschadet überstanden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XII
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung und Ausgangsüberlegung	3
1.2 Hypothesen und Ziele dieser Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Forschungsstand	6
2.1 Regionalisierung von Bodeneigenschaften und bodenhydraulischen Eigenschaften	8
2.1.1 Pedotransferfunktionen <i>PTF</i>	8
2.1.2 State-factor (clorpt) Ansätze	9
2.1.3 Geostatistische Ansätze unter Verwendung von Sekundärinformationen .	10
2.2 Die räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften in Reisanbausystemen	11
2.3 Der Einsatz von bodenhydrologischen Modellen in Reisanbausystemen	14
2.4 Einsatz von Fernerkundung zur Erfassung von spektralen Parametern in Reisanbausystemen	15
3 Grundlagen von Nassreisanbausystemen	20
3.1 Bodeneigenschaften von Nassreisböden	22
3.2 Spektrale Eigenschaften von Nassreis	24
4 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes	27
4.1 Geologie und Geomorphologie	27
4.2 Klimatische Verhältnisse	28
4.3 Böden	31
4.4 Landnutzung	38
5 Methoden	39
5.1 Beprobungsstrategie und Labormethoden	40
5.2 Sekundärinformationen und Ableitung der Regionalisierungsgrundlage	42
5.2.1 Morphometrische Informationen	42
5.2.2 Multispektrale Informationen	43
5.2.2.1 Vegetationsindizes	44

5.2.2.2	Klassifizierung der Vegetationsindizes und multispektrale Landnutzungsklassifizierung	45
5.3	Verwendete statistische Verfahren	48
5.3.1	Regressionsmodellierung	48
5.3.2	Geostatistische Verfahren	49
5.3.3	Hauptkomponententransformation	55
5.3.4	Multivariate Geostatistik	56
5.4	Abschätzung bodenhydrologischer Parameter in Reisanbausystemen	58
5.4.1	Bodenwasserhaushalt	58
5.4.2	Pedotransferfunktionen	59
6	Ergebnisse der Bodenregionalisierung	63
6.1	Ergebnisse der Regionalisierung von Bodeneigenschaften auf der Landschafts- skala, der catenaren Skala sowie der Feldskala	63
6.1.1	Landschaftsskala	63
6.1.2	Catenare Skala	72
6.1.3	Feldskala	81
6.1.4	Skalenübergreifende Betrachtung der räumlichen Korrelationsstrukturu- ren von ausgewählten Bodenparametern	86
6.2	Räumliche Variabilität und Korrelationsstrukturen pedohydrologischer Parame- ter auf unterschiedlichen Skalen	88
6.2.1	Landschaftsskala	89
6.2.2	Catenare Skala	93
6.2.3	Feldskala	98
6.2.4	Skalenübergreifende Betrachtung der räumlichen Korrelationsstrukturu- ren von ausgewählten bodenhydraulischen Parametern	99
6.3	Zusammenhänge zwischen der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Pflugsohle, der nutzbaren Feldkapazität des Oberbodens und Fernerkundungs- daten	100
6.4	Räumliche Variabilität der Wuchs- und Ertragseigenschaften für das Untersu- chungsgebiet Liu Jia Zhan	105
6.5	Vergleich der verwendeten Regionalisierungsstrategien <i>IFCL</i> und <i>CFIL</i> . . .	108
7	Diskussion der Ergebnisse	112
7.1	Unsicherheiten in der Regionalisierungsgrundlage	113
7.2	Die Regionalisierung von Bodeneigenschaften unter Verwendung von Sekundär- informationen auf unterschiedlichen Skalen	116
8	Zusammenfassung	119
9	Summary	121
	Literaturverzeichnis	123

Verzeichnis der wichtigsten Symbole	149
Verzeichnis der Akronyme	150
Anhang	151

Abbildungsverzeichnis

1.1	Trend des jährlichen Reisertrages und der Anbaufläche für die Provinzen Jiangsu, Jiangxi sowie Gesamt-China. Die Segmente stellen die wichtigsten Agrarreformen dar. c = „the government subsidy adjustment period“; d = „the rural labor force migration from rural area to urban and suburban areas period“; e = „governors grain bag responsibility system“, CSBC (various issues), CNRRI (2004)	2
2.1	a) Darstellung der spektralen Reflexion von Nassreis, tonigem Boden und getrübttem Wasser, geglättete Daten. b) Exemplarische Darstellung der Reflexionsgrade von gesundem Reis, trockengestresstem Reis und Weizenstoppeln, geglättete Daten. Diese Spektren zeigen den Effekt der Dehydration im Signal der spektralen Reflexion, aus: VAN NIEL & McVICAR (2004), verändert. . . .	17
3.1	Grundsätzliche Klassifikation möglicher Anbauvarianten von Reis in Bezug auf das vorherrschende Wasserdargebot nach YOSHIDA (1981), verändert.	20
3.2	Schematische Darstellung der Prozesse in einem Reisfeld nach BOUMAN ET AL. (2001), verändert	24
3.3	Darstellung verschiedener Vegetationsindizes bezüglich Nassreis und Winterweizen im Jahresverlauf, aus: XIAO ET AL. (2005), verändert.	25
4.1	Lage des Liu Jia Zhan Untersuchungsgebietes in der Jiangxi-Provinz/China. . .	28
4.2	Trendgrafiken der Station Nanchang Airport für a) mittleren Jahresniederschlag, b) Starkregenereignisse größer 20 mm, c) trockene Tage kleiner 1 mm, d) feuchte Tage größer 1 mm, Quelle: Surface Station Climatology of NOAA, USA	29
4.3	Klimadiagramme nach Walter und Lieth zeigen die klimatischen Gegebenheiten, die ein Pflanzenwachstum zulassen (Vegetationsperiode). Dargestellt ist die Summe der Monate innerhalb eines Jahres, deren Monatsmitteltemperaturen (T _m) über 5°C liegen und deren Niederschläge (NS) doppelt so hoch wie die entsprechenden Monatsmittel der Temperatur sind.	30
4.4	Allgemeine Charakterisierung des Bodenprofils Standort A und ausgewählte Bodenkennwerte des im Untersuchungsgebiet typischen Gleyic Hydragric Anthrosols aus alluvialen Depositaten. Kennzeichnung der Korngrößenfraktionen nach KA5	32

4.5	Allgemeine Charakterisierung des Bodenprofils Standort B und ausgewählte Bodenkennwerte des im Untersuchungsgebiet typischen Stagnic Cambisols auf rotem Sandstein. Kennzeichnung der Korngrößenfraktionen nach KA5	33
4.6	Allgemeine Charakterisierung des Bodenprofils Standort C und ausgewählte Bodenkennwerte des im Untersuchungsgebiet typischen Gleyic Hydragric Anthrosols aus quartärem rotem Ton. Kennzeichnung der Korngrößenfraktionen nach KA5	34
4.7	Allgemeine Charakterisierung des Bodenprofils Standort D und ausgewählte Bodenkennwerte des im Untersuchungsgebiet typischen Haplic Acrisol aus quartärem rotem Ton. Kennzeichnung der Korngrößenfraktionen nach KA5	35
4.8	Bewirtschaftungsverhalten im Untersuchungsgebiet. Dargestellt sind zwei Managementfaktoren und das approximierte Alter der Reisfelder bezogen auf die relative Position innerhalb der Toposequenz. Die Breite der Säulen ist in Abhängigkeit der absoluten Anzahlen der betrachteten Felder dargestellt, t = traditionell; m = maschineller Einsatz	38
5.1	Methodisches Vorgehen zur Regionalisierung von Bodeneigenschaften unter Verwendung von Sekundärinformationen und der Betrachtung von Unsicherheiten in der Regressionsmodellierung	39
5.2	Die Beprobungsstrategie in der Übersicht. Die Landschaftsskala, catenare Skala und die Feldskala	40
5.3	Clusteranalyse der Korngrößenverteilung des Oberbodens und der Pflugsohle für die gesamten Beprobungspunkte auf Grundlage des Tongehaltes <i>Gew. – %</i> , Landschaftsskala.	41
5.4	Darstellung der Vegetationsindizes der Szenen Landsat ETM+ (9/2000); SPOT5 (10/2005); ASTER/Terra (10/2001). Zusätzlich dargestellt sind die klassifizierten <i>NDVI</i>	46
5.5	Multispektrale Landnutzungsklassifizierung auf Grundlage der SPOT5-Szene (10/2005) mit einer Auflösung von 20 m. Dargestellt sind die Flächen, die als Anbaufrucht Nassreis aufweisen	47
5.6	Beispiel für ein sphärisches Variogramm inklusive der experimentell abgeleiteten Datenpaare. Dargestellt sind der Schwellenwert, die Nuggetvarianz sowie die Reichweite. Darstellung der Einteilung in Abstandsklassen (Lags).	51
5.7	Retentionsfunktionen und Leitfähigkeitsfunktionen des Oberbodens und der Pflugsohle für die betrachtete Toposequenz. Pedotransferfunktionen nach WÖSTEN ET AL. (2001); VAN GENUCHTEN (1980)	62
6.1	Darstellung der Variogramme für ausgewählte Bodeneigenschaften des Oberbodens für die Landschaftsskala	68
6.2	Darstellung der Variogramme für ausgewählte Bodeneigenschaften der Pflugsohle für die Landschaftsskala	69

6.3	Räumliche Verteilung des Gesamtkohlenstoffgehalts und des Schluffgehalts für die Pflugsohle im Untersuchungsgebiet Liu Jia Zhan. Dargestellt sind die Ergebnisse des RK C Modells nur für Gebiete mit Reis als Anbaufrucht (vgl. Kapitel 5.2.2.2)	71
6.4	Bodenarten des gepuddelten Horizontes der Toposequenz A	73
6.5	Darstellung der Variogramme für ausgewählte Bodeneigenschaften des gepuddelten Horizontes für die Toposequenz	76
6.6	Mittels Regression Kriging im indirekten Verfahren errechnete bodenphysikalische Parameter: Tongehalt [Gew.-%] (a), Schluffgehalt [Gew.-%] (b) und Sandgehalt [Gew.-%] (c) für den Oberboden. Räumliche Muster der vorhergesagten Oberbodentiefe [cm] (d), die Pflugsohlen-Tiefe [cm] (e) und der Gesamtkohlenstoffgehalt [Gew.-%] (f). Klassifiziert mittels Quantile	79
6.7	Regionalisierung des Schluffgehalts und des Gesamtkohlenstoffgehaltes sowie die Darstellung der Eintrittswahrscheinlichkeit unter Verwendung der Krigingvarianz. Es werden Zonen relativer Unsicherheit abgebildet	80
6.8	Boxplot zur Bodentextur in den betrachteten Feldern, Signifikanzen (ANOVA) sind durch entsprechende Buchstaben gekennzeichnet	82
6.9	Die Verteilung der Bodenarten in den betrachteten Hangbereichen	83
6.10	Boxplot zum Gesamtkohlenstoffgehalt in den betrachteten Feldern, Signifikanzen (ANOVA) sind durch entsprechende Buchstaben gekennzeichnet	84
6.11	Flächenhafte Darstellung ausgewählter bodenphysikalischer Eigenschaften und pedohydrologischer Parameter der Pflugsohle für das untere Feld der Toposequenz A	85
6.12	Korrelationskreise für die Zusammenhänge zwischen Bodenparametern und den ersten zwei Hauptkomponenten für die Feldskala, die catenare Skala und die Landschaftsskala	88
6.13	Zusammenhänge zwischen Bodenparametern, Reliefparametern und den ersten zwei Hauptkomponenten für die catenare Skala und die Landschaftsskala, dargestellt anhand von Korrelationskreisen	89
6.14	Räumliche Verteilung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (K_s) für die Pflugsohle und der nutzbaren Feldkapazität für den Oberboden im Untersuchungsgebiet Liu Jia Zhan. Dargestellt sind die Ergebnisse des RK C Modells nur für Gebiete mit Reis als Anbaufrucht (vgl. Kapitel 5.2.2.2)	92
6.15	Trendbereinigte Variogramme ausgewählter bodenphysikalischer Parameter der Toposequenz für den gepuddelten Horizont	97
6.16	Boxplots der geschätzten und gemessenen hydraulischen Leitfähigkeit (K_s) für die betrachteten Felder der Toposequenz A, signifikante Mittelwertunterschiede (ANOVA) sind durch Buchstaben gekennzeichnet	98
6.17	Boxplots zur ermittelten Trocken-Rochdichte des Oberboden und der Pflugsohle für die betrachteten Felder der Toposequenz A, signifikante Mittelwertunterschiede (ANOVA) sind durch Buchstaben gekennzeichnet	99

6.18	Hauptkomponententransformation pedohydrologischer Parameter und des Reliefs	100
6.19	Kumulierte Häufigkeiten der nutzbaren Feldkapazität in den aus multispektralen Fernerkundungsdaten erfassten <i>NDVI</i> -Klassen	104
6.20	Kumulierte Häufigkeiten der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit in den aus multispektralen Fernerkundungsdaten erfassten <i>NDVI</i> -Klassen	104
6.21	Darstellung der räumlichen Autokorrelation für die Wuchs- und Ertragseigenschaften auf der Toposequenz A	105
6.22	Ertragsabschätzung unter Verwendung der einfachen bodenphysikalischen Parameter a) Gesamtkohlenstoffgehalt; b) Schluffgehalt	106
6.23	Ertragsabschätzung unter Verwendung pedohydrologischer Parameter a) Nutzbare Feldkapazität (für den Oberboden); b) gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (Pflugsohle)	106
6.24	Modelle der Koregionalisierung, Darstellung der berechneten Kreuzvariogramme	107
6.25	Vier Realisationen der sequenziellen gaußschen Ko-Simulation, basierend auf den Modellen der Koregionalisierung für die Toposequenz A	108
6.26	Kumulierte Häufigkeiten des simulierten Ertrages und Unsicherheiten der Semivarianz	109
6.27	Kumulierte Häufigkeiten der simulierten gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten für die Regionalisierungsmethode 1 (a) und die Regionalisierungsmethode 2 (b)	110
6.28	Prozentuale Unterschiede zwischen der Regionalisierungsmethode 1 <i>IFCL</i> und der Regionalisierungsmethode 2 <i>CFIL</i> für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit	111
9.1	Darstellung der Reliefparameter Topographischer Feuchteindex und des LS-Faktors (USLE) für das Untersuchungsgebiet Liu Jia Zhan	153
9.2	Darstellung der Reliefparameter relative Höhe, Höhe über Tiefenlinie, Hangneigung und CDI für das Untersuchungsgebiet Liu Jia Zhan	154
9.3	Flächenhafte Darstellung ausgewählter Bodenkennwerte des Oberbodens für das untere Feld der Toposequenz	161

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht verschiedener Arbeiten mit der Verwendung von Reliefparametern für die Regionalisierung von Boden- und Ertragseigenschaften	12
4.1	Detaillierte Charakterisierung des Bodenprofils anhand ausgewählter bodenphysikalischer Eigenschaften für den Standort A	36
4.2	Detaillierte Charakterisierung der chemischen Bodeneigenschaften des Bodenprofils für den Standort A	36
4.3	Detaillierte Charakterisierung des Bodenprofils anhand ausgewählter bodenphysikalischer Eigenschaften für den Standort B	36
4.4	Detaillierte Charakterisierung der chemischen Bodeneigenschaften des Bodenprofils für den Standort B	36
4.5	Detaillierte Charakterisierung des Bodenprofils anhand ausgewählter bodenphysikalischer Eigenschaften für den Standort C	37
4.6	Detaillierte Charakterisierung der chemischen Bodeneigenschaften des Bodenprofils für den Standort C	37
4.7	Detaillierte Charakterisierung des Bodenprofils anhand ausgewählter bodenphysikalischer Eigenschaften für den Standort D	37
4.8	Detaillierte Charakterisierung der chemischen Bodeneigenschaften des Bodenprofils für den Standort D	37
5.1	Die im Rahmen dieser Untersuchung verwendeten multispektralen Fernerkundungsdaten	44
6.1	Deskriptive Statistiken des Ap-Horizontes (gepuddelter Horizont) und der Pflugsohle (Plough pan) für das Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet	64
6.2	Deskriptive Statistiken des Ap-Horizontes (gepuddelter Horizont) und der Pflugsohle (Plough pan) für das Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet (nur Sandsteinverwitterungsgebiete)	64
6.3	Deskriptive Statistiken des Ap-Horizontes (gepuddelter Horizont) und der Pflugsohle (Plough pan) für das Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet (nur Red-Clay-Gebiete)	65
6.4	Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet für den Ap-Horizont und die Pflugsohle	65

6.5	Regressionsmodelle für einfache bodenphysikalische Parameter und primäre sowie sekundäre Reliefparameter im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet für den Ap-Horizont	66
6.6	Regressionsmodelle für einfache bodenphysikalische Parameter und primäre sowie sekundäre Reliefparameter des Ap-Horizontes und des Pp-Horizontes im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet	67
6.7	Semivariogrammparameter der aus den Regressionsmodellen hervorgegangenen Residuen für die Bodenparameter des Ap-Horizontes	69
6.8	Semivariogrammparameter der aus den Regressionsmodellen hervorgegangenen Residuen für die Bodenparameter der Pflugsohle	70
6.9	Kreuzvalidierung der regionalisierten Parameter (Ap-Horizont) mittels RMSE für das Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet	70
6.10	Kreuzvalidierung der Regionalisierungsmodelle im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet für die Pflugsohle	70
6.11	Deskriptive Statistiken des Oberbodens (puddled layer) im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet für die catenare Skala	72
6.12	Deskriptive Statistik der Reliefparameter im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet der catenaren Skala und Test auf Normalverteilung	72
6.13	Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern für die betrachtete Toposequenz (Ap-Horizont)	74
6.14	Multiple lineare Regressionsmodelle der erfassten Oberbodeneigenschaften des Ap-Horizontes und ausgewählter Reliefparameter, Integration aller Reliefparameter	74
6.15	Multiple lineare Regressionsmodelle der Eigenschaften des gepuddelten Horizontes und ausgewählter Reliefparameter (die Auswahl der integrierten Reliefparameter entspricht der auf der Landschaftsskala)	75
6.16	Multiple lineare Regressionsmodelle der erfassten Eigenschaften des gepuddelten Horizontes und ausgewählter Reliefparameter, Integration der Reliefparameter mittels „stepwise criteria“ (es werden nur Reliefparameter integriert, die eine signifikante Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes gewährleisten)	75
6.17	Variogrammparameter der catenaren Skala des gepuddelten Horizontes für das Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet	77
6.18	Variogrammparameter der Residuen der catenaren Skala des gepuddelten Horizontes für das Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet	77
6.19	Kreuzvalidierung der regionalisierten Parameter (Ap-Horizont) mittels <i>RMSE</i> für die catenare Skala im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet	78
6.20	Vergleich des Nugget-Sill-Ratios für die untersuchten Skalen. Zusätzliche Darstellung der für die Variogramm-Modellierung relevanten Parameter der räumlichen Autokorrelation	86
6.21	Deskriptive Statistiken bodenphysikalischer Parameter des Oberbodens (puddled layer) auf der Landschaftsskala des im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebietes	90

6.22	Deskriptive Statistiken bodenphysikalischer Parameter der Pflugsohle (Plough pan) auf der Landschaftsskala des Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebietes	90
6.23	Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern für die betrachtete Landschaftsskala (Ap- und Pp-Horizont)	91
6.24	Deskriptive Statistiken bodenphysikalischer Parameter des Oberbodens (puddled layer) für die catenare Skala im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet	93
6.25	Deskriptive Statistiken bodenphysikalischer Parameter der Pflugsohle für die catenare Skala im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet	94
6.26	Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern für die betrachtete Toposequenz (Ap- und Pp Horizont)	94
6.27	Regressionen zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern für die betrachtete Toposequenz (Ap-Horizont)	95
6.28	Regressionen zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern für die betrachtete Toposequenz (Pp-Horizont)	96
6.29	Variogrammparameter der Residuen der Bodeneigenschaften des gepuddelten Horizontes (trendbereinigt) für die catenare Skala	96
6.30	Variogrammparameter der Residuen der Bodeneigenschaften des gepuddelten Horizontes (nicht trendbereinigt) für die catenare Skala	97
6.31	Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern sowie Fernerkundungsdaten im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet für den Ap-Horizont . . .	101
6.32	Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und Fernerkundungsdaten für die Landschaftsskala (Ap- und Pp-Horizont)	101
6.33	Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und Fernerkundungsdaten für die betrachtete Toposequenz (Ap- und Pp-Horizont)	102
6.34	Regressionen zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern sowie primären und sekundären Reliefparametern und spektraler Information aus Fernerkundungsdaten für die Toposequenz A	103
6.35	Deskriptive Statistik der Wuchs- und Ertrageigenschaften für die Toposequenz A auf der catenaren Skala	105
9.3	Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern und dem <i>NDVI</i> im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet für den Ap-Horizont	151

9.4	Regressionsmodelle für bodenphysikalische Parameter, Reliefparameter sowie <i>NDVI</i> für den Ap-Horizont im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet	152
9.5	Semivariogrammparameter zur Beschreibung der räumlichen Autokorrelation auf der Landschaftsskala für den Ap-Horizont und den Plough pan	153
9.6	Deskriptive Statistiken des Oberbodens Feldskala	155
9.7	Deskriptive Statistiken der Pflugsohle (Plough pan) Feldskala	156
9.8	Variogrammparameter Feldskala ohne Transformation	157
9.9	Variogrammparameter Feldskala BoxCox	159

1 Einführung

Der Ursprung des Reisanbaus geht auf das 6. Jahrtausend v. Chr. zurück. Durch Studien, insbesondere durch Radiocarbonatierungen von Rückständen auf Reisterrassen, ist der Anfang des Reisanbaus in Asien in das Neolithikum datiert worden (ZONG ET AL., 2007).

In heutiger Zeit ist Reis das Grundnahrungsmittel für fast die Hälfte der Weltbevölkerung (MACLEAN ET AL., 2002). Reis wird unter verschiedenen klimatischen und hydrologischen Bedingungen zwischen 35° südlicher Breite bis hin zu 50° nördlicher Breite angebaut. Es existieren verschiedene Anbauvarietäten, so der Tiefwasserreis im Delta des Ganges und Hochlandreisvarietäten, vorwiegend Westafrikas und Brasiliens. Reis wird bis in 2500 m Höhe ü. NN angebaut.

Mehr als 86 % der globalen Reisproduktion stammen entweder aus bewässertem oder regenbewässertem Anbau. Die übrigen 14 % entfallen auf die Tiefwasseranbausysteme wie beispielsweise im Delta des Ganges. Weltweit wird auf ca. 79 Mio. ha bewässerter Tieflandreis angebaut (MACLEAN ET AL., 2002), was einem Anteil von 75 % der globalen Reisproduktion entspricht. Ungefähr 56 % der weltweiten Bewässerungslandwirtschaft befinden sich in Asien, wo Reis einen Anteil von 40-46 % an der Bewässerungslandwirtschaft einnimmt (DAWE, 2005). In Südostasien hat Reisanbau einen Anteil von 64-83 % an der bewässerten Landwirtschaft. Dabei entfallen 46-52 % auf Ostasien und 30-35 % auf Südasien (CNRRI, 2004; IRRI, 2004).

Im globalen Vergleich besitzt China mit einem Anteil von 50 % an der gesamten kultivierten Anbaufläche den größten Flächenanteil mit Bewässerungslandwirtschaft (FAO, 2004). Chinas Nahrungssicherung hängt demnach stark von der Bewässerungswirtschaft ab. Im Vergleich zu anderen Getreidearten verbraucht Reis jedoch ca. doppelt so viel Wasser. Die zunehmende Verknappung von Wasserressourcen bedroht die Nachhaltigkeit der Reisproduktionssysteme und die Existenz der Reisproduzenten und Konsumenten. Für das Jahr 2025 wird genannt, dass in Asien 17 Mio. ha Reisanbaufläche unter extremem Wassermangel bzw. Dürreperioden leiden werden. Von ökonomischer Wasserknappheit werden 22 Mio. ha betroffen sein (BOUMAN & TUONG, 2001).

Nicht erst seit der aktuellen Diskussion über die Nahrungsmittelknappheit in Entwicklungsländern existieren ökonomisch attraktive Alternativen zum Reisanbau, wie beispielsweise Cashrops oder aber auch Pflanzen zur Energiegewinnung. Generell ist die Effizienz des Reisanbaus zu steigern, um die Nahrungsversorgung mittel- bis langfristig zu sichern.

Eine Vielzahl an Untersuchungen wurde durchgeführt, um Strategien zu entwickeln, die Effizienz der Wassernutzung zu steigern, wie z. B. durch „saturated soil culture“ (BORRELL ET AL., 1997), „alternate wetting and drying“ (LI & BARKER, 2004; TABBAL ET AL., 2002), „ground cover systems“ (TAO ET AL., 2006) und „aerobic rice“ (BOUMAN ET AL., 2005).

Der steigende Wasserverbrauch (s. Abbildung 1.1) und der Anstieg der bewässerten kultivierten Anbaufläche und die Verknappung der Wasserreserven bedrohen die Bewässerungswirtschaft massiv. Vor allem in den intensiv bewässerten Reislandschaften Chinas müssen Strategien entwickelt werden (BOUMAN ET AL., 2007; DAWE, 2005), die eine ressourcenschonende Bewirtschaftung bei gleichbleibenden Ertragsleistungen erlauben.

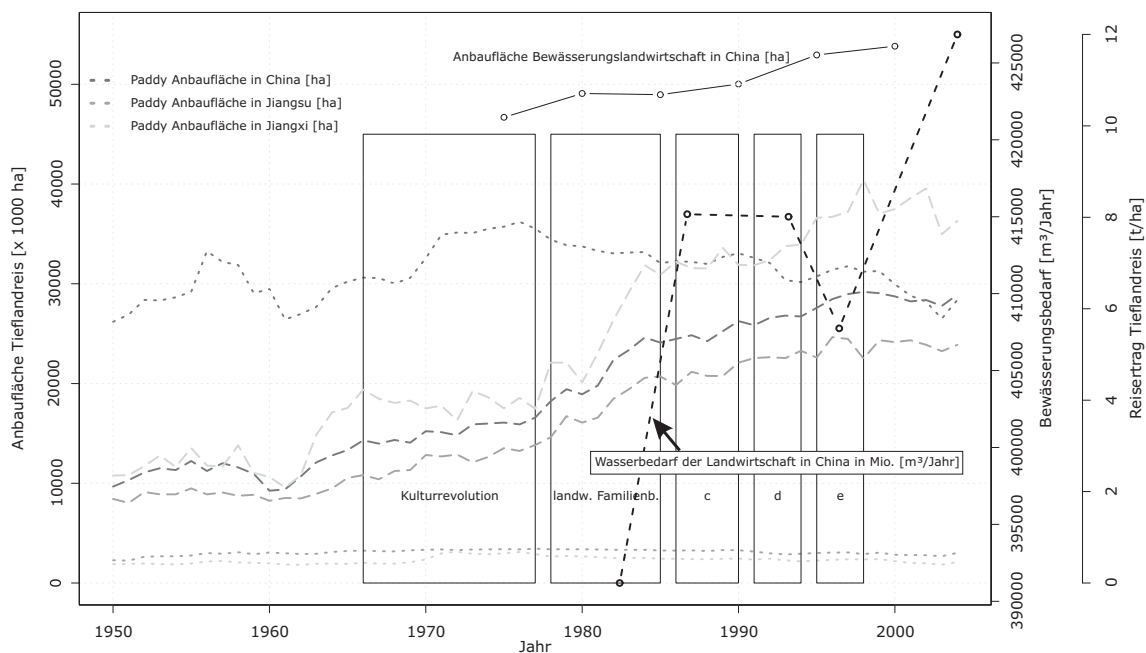


Abbildung 1.1: Trend des jährlichen Reisertrages und der Anbaufläche für die Provinzen Jiangsu, Jiangxi sowie Gesamt-China. Die Segmente stellen die wichtigsten Agrarreformen dar. c = „the government subsidy adjustment period“; d = „the rural labor force migration from rural area to urban and suburban areas period“; e = „governors grain bag responsibility system“, CSBC (various issues), CNRRI (2004)

In der Konsequenz sind folgende aktuelle großflächige Trends in den Bewässerungssystemen Asiens zu beobachten:

1. Änderungen im Bewässerungsmanagement zur Reduzierung des Wasserverbrauchs,
2. Diversifizierung der Reis-Monokultur (2-3 Reisernten pro Jahr) bis hin zu Rotationen mit Reis und einer ungefluteten Anbauform, z. B. mit Mais, Weizen, Gemüse etc.,
3. Erhöhung des Ertrages pro eingebrachter Bewässerungsmenge,
4. Entwicklung von wasserstressresistenten Reissorten,

5. Niederschlageffiziente Anbaumethoden (WASSMANN ET AL., 2007; BOUMAN ET AL., 2007; BELDER ET AL., 2007; FENG ET AL., 2007; LI & BARKER, 2004; TUONG TP, 2003; BARKER ET AL., 2001).

Für diese Forschungsfelder und die damit verbundene Modellierung von beeinflussenden Prozessen wird es immer wichtiger, verlässliche Bodeninformationen zu erhalten.

Angesichts des Mangels an flächenhaft verfügbaren Bodeninformationen zur Etablierung nachhaltiger Nutzungs- und Bewirtschaftungsformen und des hohen Kostenaufwandes, der mit der Bereitstellung von Bodeninformationen verbunden ist, soll in dieser Arbeit untersucht werden, in welchem Maße die Integration von Sekundärinformationen aus Geländemodellen und Fernerkundungsdaten für die Regionalisierung von Bodeneigenschaften geeignet ist.

1.1 Problemstellung und Ausgangsüberlegung

Die Regionalisierung von Bodeneigenschaften ist schon seit jeher Thema aktueller Forschungsfragen (KLEEBERG, 2000). Für Fragen des Ressourcenschutzes, der Landnutzungsplanung, aber auch des Bewässerungsmanagements existiert eine Vielzahl von Modellen, deren Aussagekraft durch die Qualität der Eingangsdaten und unzureichender Bodeninformationen limitiert wird. In diesem Zusammenhang ist die Erfassung der skalenabhängigen räumlichen Variabilität von bodenphysikalischen und pedohydrologischen Eigenschaften entscheidend. Auf allen hydrologischen Skalen ist die Kenntnis der räumlichen Variabilität der pedohydrologischen Eigenschaften von zentraler Bedeutung.

Die vorliegende Arbeit zielt unter Integration von Sekundärinformationen auf die räumliche Vorhersage und Bereitstellung flächenhafter Bodeninformationen und die Abschätzung korrespondierender Unsicherheiten für die in Reisanbausystemen bodenhydrologisch relevanten Horizonte. Zusätzlich steht die Identifikation von Zusammenhängen zwischen Reliefeigenschaften, multispektraler Information aus Fernerkundungsdaten und der räumlichen Ausprägung von Bodeneigenschaften sowie Wuchs- und Ertrageigenschaften von Reis im Vordergrund dieser Arbeit. Die Hypothesen und Ziele dieser Arbeit sind im Folgenden dargestellt.

1.2 Hypothesen und Ziele dieser Arbeit

Diese Arbeit basiert auf folgenden Hypothesen:

1. Die räumliche Variabilität von Boden- und Pflanzeigenschaften spiegelt sich in den Wuchs- und Ertragsleistungen wider. Da sich beide mit Hilfe multispektraler Fernerkundungsdaten erfassen lassen, bietet sich die Anwendung eines aus Fernerkundungsdaten

abgeleiteten Indizes als Kovariable im Regionalisierungsmodell an. (Forschungsfrage 1 und 2).

2. Die Integration von aus Fernerkundungsdaten und Geländemodellen abgeleiteten Kovariablen führt zu einer Verbesserung der Schätzgenauigkeit von Bodeneigenschaften. (Forschungsfrage 3 und 4).

Im Rahmen dieser Arbeit werden die nachstehenden spezifischen Forschungsfragen behandelt:

1. Welche Gesetzmäßigkeiten bestehen zwischen der räumlichen Abfolge bzw. der räumlichen Verteilung der untersuchten bodenphysikalischen Parameter und den zentralen prozessbeeinflussenden Reliefkennwerten in Reisanbausystemen Chinas auf unterschiedlichen Raumskalen?
2. Welche Gesetzmäßigkeiten bestehen zwischen der räumlichen Ausprägung von Pflanzenertrags- sowie Wuchseigenschaften und den untersuchten Boden- und Reliefeigenschaften?
3. Inwieweit führt eine Integration höher auflösender morphometrischer und multispektraler Sekundärinformationen zu einer Verbesserung der Schätzgenauigkeit bei der flächendifferenzierten Abbildung von Bodenparametern auf der Feld- und Landschaftsskala?
4. Inwieweit wirkt sich die Reihenfolge innerhalb des Regionalisierungsprozesses bzw. die Methodik des „Interpolate first calculate later“ und vice versa auf die Schätzgenauigkeit aus? Welchen Einfluss übt dieser Ansatz auf die prädikativen Methoden wie Universal Kriging (UK), Ordinary Kriging (OK) oder aber auch das hier verwendete Regression Kriging (RK) aus?

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beginnt mit einem einführenden Kapitel zur Problematik des bewässerungsintensiven Reisanbaus in China. Die wissenschaftliche Relevanz des Themas wird anhand von Beispielen aufgezeigt. In Kapitel 1 werden die Hypothesen und Ziele der Arbeit beschrieben. In Kapitel 2 wird der Forschungsstand dargestellt. Der umfasst zum einen allgemein den Stand der Forschung im Bereich der Bodenregionalisierung sowie die Betrachtung der räumlichen Variabilität von Bodeneigenschaften in Reislandschaften Asiens. Des Weiteren wird der Einsatz von Bodenwasserhaushaltsmodellen in Reislandschaften gezeigt. Zusätzlich wird die Integration von Fernerkundungsdaten in die Modellierung von Mensch-Boden-Vegetations-Interaktionen betrachtet. Kapitel 3 gibt einen Überblick über die physisch-geographischen Aspekte der Reislandwirtschaft mit einem besonderen Schwerpunkt auf die Voraussetzungen im Untersuchungsgebiet. In Kapitel 4 werden die verwendeten Methoden und die für die-

se Arbeit entscheidende Methodenentwicklung dargestellt. Kapitel 5 stellt das Liu-Jia-Zhan-Untersuchungsgebiet des Projektes und im Speziellen die Geologie und Geomorphologie dar. Die klimatischen Verhältnisse sowie die typische Bodenverbreitung innerhalb des Gebietes werden charakterisiert. Neben physisch-geographischen Aspekten werden auch Charakteristika des Landmanagements betrachtet. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Diesbezüglich wird zum einen die Regionalisierung von Bodenparametern und zum anderen die Regionalisierung von bodenphysikalischen Parametern auf unterschiedlichen Skalen betrachtet. Die Parameterschätzung auf den betrachteten Skalen wird analysiert und der Vergleich zwischen den verwendeten Methoden präsentiert. Ausgehend von den vorhergesagten Verteilungen der pedohydrologischen Parameter werden die für den Reisertrag wesentlichen Bodeneigenschaften (nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Pflugsohle) räumlich analysiert. Zusätzlich werden die Zusammenhänge zwischen den Vegetationsindizes aus LANDSAT ETM+, SPOT5 und ASTER-Szenen und den abgeleiteten pedohydrologischen Eigenschaften bzw. deren räumlichen Verteilungsmuster dargestellt. Eine abschließende Bewertung und Diskussion der Ergebnisse sowie die Betrachtung von Unsicherheiten im Modellierungsprozess beinhaltet Kapitel 7.

2 Forschungsstand

Die Regionalisierung von Bodeneigenschaften ist seit jeher Forschungsfeld in den Geowissenschaften. Grundlegende Arbeiten stammen u. a. aus dem Schwerpunktprogramm „Regionalisierung in der Hydrologie“ der DFG (KLEEBERG, 2000). Die Arbeiten von GEROLD ET AL. (1999) und DIEKKRÜGER ET AL. (1999) sind diesbezüglich von Bedeutung und beschäftigen sich sowohl mit der Regionalisierung von diskreten Raumeinheiten (Gerold) wie auch von kontinuierlichen Raumeinheiten (Dieckkrüger). Neben den verwendeten Modellsystemen unterscheiden sich die Ansätze vor allem hinsichtlich diskreter und kontinuierlicher Einheiten der beiden Arbeitsgruppen. Diskrete Raumeinheiten beschreiben Geofaktoren, die Prozessbereiche repräsentieren. Das Einzugsgebiet wird zunächst in kleinste gemeinsame Geometrien diskretisiert und anschließend werden Ansätze entwickelt, um die Anzahl der Simulationseinheiten zu reduzieren und somit eine regionale Simulation mit Hilfe physikalisch basierter Modelle zu ermöglichen. Die kontinuierliche Abbildung von Bodenmerkmalen ist nach BÖHNER & KÖTHE (2003) dem diskreten Ansatz vorzuziehen.

Das Schwerpunktprogramm „Regionalisierung in der Hydrologie“ versucht, die klassischen Wissenschaften Hydrologie und Bodenkunde zu integrieren. International aufgegriffen von LIN ET AL. (2006) wird der Begriff der „Hydropedologie“ formuliert. Dieser Begriff steht für die synergetische Integration der klassischen Bodenkunde und der Hydrologie. Dabei sollen die Elemente und Beziehungen zwischen Böden, Landschaft und Hydrologie miteinander verknüpft werden. Vielversprechende Ansätze sind u. a. integrierende Methoden für Boden-Landschaftsanalysen, in denen hierarchische Expertensysteme genutzt und hochvariate Daten fusioniert bzw. integriert werden (SOMMER ET AL., 2003). Diese können aus digitaler Reliefanalyse, geophysikalischen Messungen und Fernerkundungsdaten stammen. Darüber hinaus ist die Kombination aus Faktoren der Bodenbildung nach JENNY (1941) und dem wichtigen multiskaligen Ansatz nach VOGEL & ROTH (2003) zu nennen. Die Betrachtung der jeweiligen über- bzw. untergeordneten Skala trägt entscheidend zum Prozessverständnis bei. Ein weiterer Ansatz hinsichtlich der Entwicklung von Boden-Landschaftsmodellen ist die Kombination von Geographischen Informationssystemen (GIS), Expertenwissen und *fuzzy logic*. Ein diesbezüglich wichtiges Modell ist das *soil – land – inference – model* (SOLIM) (ZHU ET AL., 2001). Dieses Modell basiert auf repräsentativen Bodentypen, Zusammenhängen zwischen funktionalen Bodeneigenschaften und Parametern zur Charakterisierung von Bodenlandschaften. Darüber hinaus integriert dieses Boden-Landschafts-Modell Expertenwissen mit GIS und so genannten Zugehörigkeitsfunktionen (*fuzzy logic*). Der Begriff „*Scorpan*“ (MCBRATNEY

ET AL., 2003) steht mnemonisch (codiert) für die empirisch-quantitativen Zusammenhänge zwischen Boden- und Umweltfaktoren, um diese für eine Vorhersage von Bodeneigenschaften im Rahmen des Digital-Soil-Mappings zu nutzen. „*Scorpan*“ steht ebenfalls in enger Anlehnung an die von JENNY (1941) proklamierten Bodenbildungsfaktoren. Es sollen jedoch die starken empirischen Komponenten hervorgehoben und zur räumlichen Vorhersage von Bodeneigenschaften genutzt werden. Sieben Faktoren stehen für das Scorpan-Konzept:

$$S = f(c,o,r,p,a,n), \text{ wobei}$$

S = soil (Boden)

c = climate (klimatische Eigenschaften)

o = organisms (Bodenbedeckung, natürliche Vegetation (Fauna) und menschliche Aktivität)

r = topography (topographische Eigenschaften)

p = parent material (Ausgangsgestein)

a = age (Zeitfaktor)

n = spatial or geographic position (räumliche oder geographische Position)

Diese oben beschriebenen Ansätze sind in das sogenannte Pedometric Mapping einzuordnen. Generell handelt es sich dabei um die quantitative, (geo)statistische Erfassung von Boden-Geoinformationen. Analog dazu sind Beschreibungen wie Predictive Soil Mapping (SCULL ET AL., 2003) oder Digital Soil Mapping (MCBRATNEY ET AL., 2003), je nach methodischer Integration von Informationstechnologien, gebräuchlich. Um den Begriff des Digital Soil Mappings aufzugreifen, gibt der Review-Artikel von BEHRENS & SCHOLTEN (2006) einen guten Einstieg in diese Thematik. Ihr Beitrag fasst die deutschen Bestrebungen im Rahmen des Digital Soil Mappings zusammen. Entscheidend bei der Anwendung ist die Ableitung bodenökologisch relevanter Inhalte wie beispielsweise das C/N-Verhältnis oder Parameter zum Bodenwasserhaushalt etc. (DOBOS ET AL., 2006; BOUMA, 1989).

Darüber hinaus beeinflusst die räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften die Verlässlichkeit der Resultate von logistischen, empirischen und physikalischen Modellen von Boden- und Landschaftsprozessen (BURROUGH, 1991) und beeinflusst die Güte von Modellergebnissen. Von entscheidender Bedeutung ist dabei die Frage, ob die Vorhersage oder die Simulation von Bodeneigenschaften grundlegend zur Beantwortung der entsprechenden Forschungsfrage im Vordergrund steht (GOOVAERTS, 2000) (vgl. Kapitel 7.1). Über die Anwendungen des Digital Soil Mappings (DSM) gibt es Erweiterungen, die im Digital Soil Assessment (DSA) münden (CARRÉ ET AL., 2007). Die Methoden des DSM sind etabliert (LAGACHERIE ET AL., 2007), entscheidend ist jetzt der entsprechende thematische Rahmen für die entwickelten und erfolgreich angewendeten Methoden. Dies führt zum sogenannten Digital Soil Assessment (DSA)

und Digital Soil Risk Assessment (DSRA). Hierbei steht die Bewertung von Unsicherheiten, die Modellierung von schwer messbaren Bodeneigenschaften und die Bewertung von Gefahren im Rahmen des Bodenschutzes im Vordergrund. Durch die Integration von DSM, DSA und DSRA lassen sich vielversprechende Ansätze ableiten und initiieren.

2.1 Regionalisierung von Bodeneigenschaften und bodenhydraulischen Eigenschaften

Bei der räumlich differenzierten Erfassung von Bodeneigenschaften stellt sich die Frage, nach geeigneten Methoden, mit denen einerseits die Variabilität abgebildet werden kann, und andererseits Bodeneigenschaften unter Verwendung von Sekundärinformationen bei Betrachtung der Variabilität und der spezifischen Skalenabhängigkeit der untersuchten Bodeneigenschaften regionalisiert werden können. Diesbezüglich ist das Forschungsfeld der *Pedometrics* (GRUNWALD ET AL., 2005) zu nennen. Die Regionalisierung von Bodeneigenschaften umfasst drei grundlegende Ansätze, deren entsprechenden Forschungsstände nachfolgend dargestellt werden:

- Pedotransferfunktionen,
- geostatistische Ansätze,
- State-Faktor-(clorpt)-Ansätze.

2.1.1 Pedotransferfunktionen *PTF*

In den vergangenen Jahren hatten viele Untersuchungen die Entwicklung von Pedotransferfunktionen zum Inhalt. Der Kern bestand darin, aus der Übertragung von Regressionsmodellen funktionale Zusammenhänge von Bodeneigenschaften, wie Textur, Humusgehalt und Lagerungsdichte zu bodenhydrologischen Eigenschaften, wie der hydraulischen Leitfähigkeit und Wasserretentionskurven, abzuleiten z. B. (SCHAAP ET AL., 2001; WÖSTEN ET AL., 1999; MINASNY ET AL., 1999; VEREECKEN ET AL., 1990; BOUMA, 1989; BOUMA & VAN LANEN, 1986; RAWLS & BRAKENSIEK, 1985; BRAKENSIEK ET AL., 1984). In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl von Pedotransferfunktionen mit unterschiedlichen mathematischen Konzepten, Vorhersageeigenschaften und Eingangsparametern entwickelt. Dabei handelt es sich sowohl um empirische Pedotransferfunktionen, die auf MUALEM (1976) und VAN GENUCHTEN (1980) basieren, als auch um physikalisch-basierte Pedotransferfunktionen wie bei RIEU & SPOSITO (1991), HAVERKAMP & PARLANGE (1986); CAMPBELL (1985), ARYA & PARRIS (1981) und BRUTSAERT (1967). Die häufigsten *PTF* sind jedoch empirisch basiert und wurden unter Verwendung von linearen und nicht-linearen Regressionsmodellen bzw. Regres-

sionsgleichungen entwickelt. Diese empirisch basierten *PTF*, beispielsweise zur Ableitung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, beinhalten die Verwendung von multiplen und nichtlinearen Regressionsansätzen, wie sie auch abgeleitet in WÖSTEN ET AL. (2001), VERECKEN ET AL. (1990), COSBY ET AL. (1984) und BRAKENSIEK ET AL. (1984) zur Anwendung kommen. Eingangsparameter sind hauptsächlich Sand-, Schluff-, Ton- und Humusgehalt sowie die Lagerungsdichte. Entscheidend für die Entwicklung von Pedotransferfunktionen ist der statistische Daten-Pool. Aktuelle Bodendatenbanken wie die HYPRES-Datenbank (WÖSTEN ET AL., 2001) oder UNSODA (NEMES ET AL., 2001) stellen einen umfangreichen Daten-Pool zur Verfügung.

Die physikalisch begründeten *PTF* benutzen den funktionalen Zusammenhang zwischen einfachen Bodeneigenschaften und beispielsweise der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. Beispiele hierfür finden sich in CAMPBELL (1985) und RAWLS ET AL. (1993). Aufgrund von heterogenen Bodeneigenschaften und der hohen spezifischen Bodenvariabilität (SCHAAP & LEIJ, 1998) müssen alle Pedotransferfunktionen an bestehenden Daten kalibriert werden, um eine korrekte Anwendung zu gewährleisten (TIETJE & HENNINGS, 1993). So können *PTF*, die auf Grundlage einer einzelnen Grundgesamtheit von Bodendaten entwickelt wurden, nicht automatisch auf andere Bodeneigenschaften bzw. auf andere Untersuchungsgebiete übertragen werden (SCHAAP & LEIJ, 1998). Unsicherheiten in Werten zur hydraulischen Leitfähigkeit liegen an der zugehörigen Variabilität der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, resultierend hauptsächlich aus der räumlichen Variabilität der Bodeneigenschaften und dem Maß des Beprobungs- und Messfehlers (TIETJE & HENNINGS, 1996). Die Entwicklung von *PTF* für entsprechende Horizonte ist sinnvoll und verbessert die Schätzgenauigkeit (PACHEPSKY ET AL., 1996).

Eine Übersicht und entsprechende Bewertung von Pedotransferfunktionen findet sich z.B. in SCHAAP ET AL. (2004), SCHAAP & LEIJ (1998) und TIETJE & TAPKENHINRICHS (1993). Eine Übersicht von Pedotransferfunktionen für tropische Böden (z.B. Oxisols) geben TOMASELLA ET AL. (2000), HODNETT & TOMASELLA (2002) sowie SPOHRER ET AL. (2006). Die Entwicklung von Pedotransferfunktionen für tropische Böden (hoher Tongehalt) ist nicht ausreichend repräsentiert und es besteht Forschungsbedarf (HODNETT & TOMASELLA, 2002). Pedotransferfunktionen speziell für Reisböden existieren nicht. Aktuelle Untersuchungen zur Entwicklung von Pedotransferfunktionen geben NEMES ET AL. (2005, 2006).

2.1.2 State-factor (clorpt) Ansätze

Bereits MOORE ET AL. (1993) und BIAN & WALSH (1993) verwendeten zur Ableitung von Boden-Landschaftsmodellen Methoden der Regressionsanalyse (multiple lineare Regression), um eine Anzahl von Bodeneigenschaften (Oberbodentiefe, organischer Kohlenstoffgehalt, Phosphor, pH, Sand, Ton) zu schätzen. GESSLER ET AL. (1995) benutzten flexiblere Ansätze bzw. generalisierte lineare Modelle (GLM) zur Ableitung von Horizontmächtigkeiten u. a. Weitere Arbeiten von GESSLER ET AL. (1995) bauen auf die Flexibilität der GLM

auf und setzen generalisierte additive Modelle ein, die erlauben, dass geglättete Funktionen im linearen Bestandteil des generalisierten linearen Modells eingeschlossen werden. Arbeiten von MCKENZIE & RYAN (1999) verwenden CART-Methoden (Classification and Regression Trees), um Bodentiefe und Gesamtkohlenstoffgehalt zu modellieren. Ähnliche Ansätze zur Vorhersage von Bodeneigenschaften verwenden MERTENS ET AL. (2002); PARK & VLEK (2002) und SELLE ET AL. (2006). Grundsätzlich ist die Regressionsmodellierung ein wichtiger Bestandteil des state-factor Ansatzes. Es ist jedoch möglich, dass der erklärende Anteil der bodenbildenden Faktoren sehr gering ist und die Verwendung von anderen horizontspezifischen Bodeneigenschaften als Kovariablen wichtiger wird (PHILLIPS, 2001). Darüber hinaus gibt es weitere Ansätze zur Modellbildung von state-factors, wie die Integration von *fuzzy sets* (ZHU ET AL., 2001) oder der Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen (*KNN*) (LAFFAN & LEES, 2004; PARK & VLEK, 2002) oder *wavelets* (LARK, 2006) zur Vorhersage von Bodeneigenschaften. Eine Verbesserung bzw. die Fortführung herkömmlicher state-factor Ansätze ist die Kombination aus klassischen Regressionsansätzen und geostatistischen Verfahren, welche im Folgenden vorgestellt werden sollen.

2.1.3 Geostatistische Ansätze unter Verwendung von Sekundärinformationen

Grundlegende Theorien zur Geostatistik finden sich in Arbeiten von MATHERON (1965) sowie GOOVAERTS (1997), DEUTSCH & JOURNAL (1992), ISAAKS & SRIVASTAVA (1989) und WEBSTER & OLIVER (2000). Des Weiteren sind für den Forschungsstand ausschließlich ausgewählte Artikel genannt, die die Integration von Sekundärinformationen zum Thema haben. Frühe Anwendungen des Ko-Krigings unter Verwendung von Sekundärinformationen sind in dem Aufsatz von MYERS (1982) zu finden. Wegen der Schwierigkeiten bei der Modellierung von Kreuzvariogrammen ist das Ko-Kriging bisher nur selten eingesetzt worden. Es stellt sich die Frage, ob der räumliche Zusammenhang wichtiger ist oder aber der intervariable Zusammenhang für Fragen der Interpolation. Hierzu bemerken JOURNAL & HUIJBREGTS (1978), dass das Ko-Kriging hauptsächlich Anwendung findet, wenn eine Variable in einer geringeren Auflösung beprobt ist und ein enger Zusammenhang zwischen Primär- und Sekundärvariablen besteht. Wenn jedoch die Probleme der Modellierung von Kreuzvariogrammen gelöst werden können, bietet das Ko-Kriging eine verlässliche Methode für die Kombination von Kartierung und Sekundärinformationen (Fernerkundungsdaten) (ATKINSON ET AL., 1994). Die grundlegende Idee basiert auf der Annahme, dass Boden, Vegetation und spektrale Reflexion räumlich im Zusammenhang zueinander stehen (auto-korreliert) und entsprechend miteinander korreliert (kreuz-korreliert) sind (ATKINSON ET AL., 1994). Ein weiterer Ansatz ist die Nutzung von kategorialen Sekundärinformationen wie Landnutzung, Bodentypen oder geologische Einheiten, um beispielsweise das Untersuchungsgebiet zu stratifizieren und den Datenumfang zu reduzieren (GOOVAERTS, 1999). Ein interessanter Ansatz für die Bodenregionalisierung stellt das Regression Kriging dar. Die Integration der Residuen aus einer räumlich abhängigen Regression in ein geostatistisches Verfahren wird auch als hybrides Verfahren oder Methode bezeichnet.

Dieser Ansatz ist umfassend in der Literatur dargestellt und wird in ODEH ET AL. (1995) als Regression Kriging (RK) bezeichnet. GOOVAERTS (1997) spricht in diesem Zusammenhang von trendbereinigtem Kriging. Dem RK liegt die Annahme zugrunde, dass die Ausprägung der deterministischen Komponente der Zielvariablen im Regressionsmodell beschrieben wird, während die räumlich variable und abhängige Komponente durch die mittels Kriging interpolierten Modellresiduen erfasst wird (ODEH ET AL., 1995; MCBRATNEY ET AL., 2000). Auf diese Weise kann der Schätzfehler bei der Vorhersage der räumlichen Ausprägung der Bodeneigenschaften mitberücksichtigt werden. Erfolgreiche Anwendungen des trendbereinigten Krigings zur Vorhersage der Oberbodentiefe und Abschätzung des Tongehalts für tropische Böden sind in YEMEFACK ET AL. (2005) beschrieben, für bodenwasserhaushaltliche Parameter in HERBST ET AL. (2006). Eine Übersicht über aktuelle Untersuchungen, in denen Methoden mit Integration von Sekundärinformationen zum Einsatz kommen, ist in Tabelle 2.1 zu sehen. Die mit „hybrid“ gekennzeichneten Veröffentlichungen wurden unter Anwendung hybrider Verfahren durchgeführt.

Wichtige Untersuchungen bezüglich hybrider Verfahren werden in HENGL ET AL. (2007a), RIVERO ET AL. (2007) und HENGL ET AL. (2004), BOURENNANE & KING (2003), BISHOP & MCBRATNEY (2001), ODEH & MCBRATNEY (2000) sowie ODEH ET AL. (1995) aufgeführt. Zusätzlich sind Anwendungen hybrider Methoden in SUMFLETH & DUTTMANN (2008a) sowie DUTTMANN & SUMFLETH (2007) veröffentlicht.

2.2 Die räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften in Reisanbausystemen

Die Arbeiten zur räumlichen Variabilität von Bodeneigenschaften auf Reisfeldern sind überschaubar. Aktuelle Arbeiten in Reisanbausystemen Südost-Chinas geben LIU ET AL. (2008, 2004d). Verantwortlich für die Ausprägung des räumlichen Zusammenhanges sind sowohl intrinsische Faktoren (Bodenbildungsfaktoren wie Ausgangssubstrat und Relief, vgl. Kapitel 4.3), als auch extrinsische Faktoren (Bodenmanagementfaktoren, wie Düngung und Bewässerung etc.). Es zeigt sich, dass die Managementfaktoren, wie Bodenbearbeitung (Levelling, Puddling), Düngung und Bewässerung, maßgeblich an der räumlichen Verteilung von Bodeneigenschaften beteiligt sind (DOBERMANN ET AL., 1997; DOBERMANN, 1994; DOBERMANN ET AL., 1994; MARX ET AL., 1988). Hinzu kommt, dass die feldinterne Variabilität von Wuchs- und Ertrags-eigenschaften auch direkt von der feldinternen Bodenheterogenität abhängig ist (DOBERMANN ET AL., 1995). Bereits DOBERMANN (1994) bestimmt die faktorielle Abhängigkeit zwischen Bodeneigenschaften und Ertrags-eigenschaften. Die Arbeit analysiert anhand russischer, maschinell bearbeiteter Reisfelder den Zusammenhang zwischen Managementfaktoren, Bodeneigenschaften und Reisertrag. Hervorzuheben ist die Aussage, dass die Parameter Mikrorelief, pH und Pflughorizonttiefe entscheidende Parameter zur Betrachtung des Reisertrages sind. Vonsel-

Tabelle 2.1: Übersicht verschiedener Arbeiten mit der Verwendung von Reliefparametern für die Regionalisierung von Boden- und Ertrageigenschaften

Zielvariable	Kovariablen(n)	Methode	Quelle
Corg [%]	$H_r, H_{Ch}, NDVI$	Hybrid, Reg. $R^2 = 0.38$	KRÜGER (2008)
P total [%]	$NDVI_g$	Hybrid, Reg. $R^2 = 0.71$	RIVERO ET AL. (2007)
C total [%]	$H_r, H_{Ch}, NDVI$	Hybrid, Reg. $R^2 = 0.41$	SUMFLETH & DUTTMANN (2008a)
Schluffgehalt [%]	$H_r, TWI, NDVI$	Hybrid, Reg. $R^2 = 0.29$	SUMFLETH & DUTTMANN (2008a)
Ertrag [$kg\ ha^{-1}$]	H_r	Reg. $R^2 > 0.50$	KRAVCHENKO & ROBERTSON (2007)
C total [%]	H_r, H_{Ch}, β	Hybrid, Reg. $R^2 = 0.59$	DUTTMANN & SUMFLETH (2007)
OM [%]	H_r, CTI, EVI	Hybrid, Reg. $R^2 = 0.39$	HENGL ET AL. (2007a)
Tongehalt [%]	H_r, TWI, β	Reg. $R^2 = 0.62$	IQBAL ET AL. (2005a)
Tongehalt [%]	H_r	Reg. $R^2 = 0.50$	YEMEFACK ET AL. (2005)
OM [%]	H_r, TWI, β, CTI	Hybrid, Reg. $R^2 = 0.33$	HENGL ET AL. (2004)
C total [%]	H_r, H_{Ch}, β	Reg. $R^2 = 0.61$	MUELLER & PIERCE (2003)
Corg [%]	C_v, C_h, β	Reg. $R^2 = 0.37$	FLORINSKY ET AL. (2002)
Tiefe [cm] A-Horizont	$C_v, Wt, a/\beta$	Reg. $R^2 = 0.59$	THOMPSON ET AL. (2001)
Tiefe [cm] A-Horizont	$\ln(a)$	Reg. $R^2 = 0.46$	RYAN ET AL. (2000)
Sandgehalt [%] 0-20 cm	β, C_h, C_v	Reg. $R^2 = 0.64$	LARK (1999)
Tongehalt [%] 0-20 cm	β, C_h, C_v	Reg. $R^2 = 0.16$	LARK (1999)
Sandgehalt [%] 40-70 cm	β, C_h, C_v	Reg. $R^2 = 0.26$	LARK (1999)
Tongehalt [%] 40-70 cm	β, C_h, C_v	Reg. $R^2 = 0.17$	LARK (1999)
Corg [%] 0-20 cm	β, C_h, C_v	Reg. $R^2 = 0.11$	LARK (1999)
Corg [%] 20-80 cm	β, C_h, C_v	Reg. $R^2 = 0.08$	LARK (1999)
Skelettge. [%] Oberboden	$\beta, C_h, C_v, u.a.$	Reg. $R^2 = 0.83$	ODEH ET AL. (1994)
Tongehalt [%] Unterboden	$\beta, C_h, C_v, u.a.$	Reg. $R^2 = 0.42$	ODEH ET AL. (1994)
Tiefe [cm] Boden	$\beta, C_h, C_v, u.a.$	Reg. $R^2 = 0.47$	ODEH ET AL. (1994)
Tiefe [cm] Solum	$\beta, C_h, C_v, u.a.$	Reg. $R^2 = 0.41$	ODEH ET AL. (1994)
Schluffgehalt [%]	$\beta, \ln(a/\tan\beta), C_v$	Reg. $R^2 = 0.64$	MOORE ET AL. (1993)
Sandgehalt [%]	$\beta, \ln(a/\tan\beta), C_v$	Reg. $R^2 = 0.50$	MOORE ET AL. (1993)
Corg [%] Oberboden	$\ln(a/\tan\beta), a, \tan\beta$	Reg. $R^2 = 0.48$	MOORE ET AL. (1993)
Tiefe [cm] A-Horizont	$\beta, \ln(a/\tan\beta)$	Reg. $R^2 = 0.50$	MOORE ET AL. (1993)

nach HERBST (2001); McBRATNEY ET AL. (2003), verändert und erweitert, ohne Anspruch auf Vollständigkeit
 H_r = relative Höhe; β = Hangneigung; C_v = Vertikalkrümmung; C_h = Horizontalkrümmung;
 H_{ch} = Höhe über Tiefenlinie; CDI = Divergenz/Konvergenz Index; TWI = Topographischer Wetness Index;
 a = spezifisches Einzugsgebiet; OM = Organic Matter

ten des IRRI (International Rice Research Institute) und anderer Agrarforschungsinstitute liegt das Hauptaugenmerk auf der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung von Reisfeldern. Ein umfassendes Projekt hierzu wurde von DOBERMANN ET AL. (2002) veröffentlicht: Methoden der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung wurden hier auf Flächen in Südasien und Süd-Ostasien angewendet und das SSNM (Site Specific Nutrient Management) auf unterschiedlichen Standorten dargestellt (DOBERMANN ET AL., 1995; DOBERMANN, 1994). Teilflächenspezifisches Nährstoffmanagement für bewässerten Reis zur Optimierung der Produktivität, Profitabilität und zur ressourcenschonenden Nutzung von Reisanbausystemen ist erfolgreich getestet worden und wird in der Praxis von Landwirten angewandt (HAEFELE & WOPEREIS, 2005).

Weitere Ansätze zur Abbildung der räumlichen Variabilität von Nährstoffen und Reiserträgen durch unterschiedliche Bewirtschaftungsmaßnahmen (*levelling*: Einebnung von Reisfeldern) sind durch WALKER ET AL. (2003) für den Süden der USA veröffentlicht worden. Darüber hinaus existieren ebenfalls Arbeiten aus Japan (ISHIDA & ANDO, 1994b,a) und Australien (VAN NIEL & McVICAR, 2004), welche Methoden der Präzisionslandwirtschaft im Reisanbau erfolgreich einsetzen. In diesem Zusammenhang stellt sich die grundsätzliche Frage nach einer sinnvollen Umsetzung der Präzisionslandwirtschaft in ärmeren Regionen Asiens. DOBERMANN ET AL. (2002) kommen hier zu einem eindeutig positiven Ergebnis: In intensiv bewirtschafteten Reisanbausystemen finden chemische Düngemittel und synthetische Pestizide übermäßig Anwendung. Das spezifische Management kann die Gefahr des übermäßigen chemischen Gebrauches vermindern und die Gefahr der Umweltbelastung verringern (KYUMA, 2004). Die räumliche Variabilität von N_2O -Emissionen und Bodeneigenschaften ist in den Arbeiten von YANAI ET AL. (2003) untersucht worden. Sie kommen zu dem Fazit, dass durch die Integration von geostatistischen Methoden und multivariater Analyse die N_2O -Emissionen abgeschätzt werden können. Die Kontrolle von Humusgehalt und Bewässerungsintensität/Frequenz sowie die Applizierung von anorganischem Dünger steuert im Rahmen eines flächenspezifischen Managements die N_2O -Emissionen (MORITSUKA ET AL., 2004). In Japan gibt es diesbezüglich Bestrebungen, kleine Reisfelder zusammenzulegen und mit modernsten Methoden der Präzisionslandwirtschaft zu bewirtschaften (INAMURA ET AL., 2004; TORIYAMA ET AL., 2003; YANAI ET AL., 2001, 2000).

Bis heute existieren wenige bis keine Methoden des digital soil mappings in Reisanbausystemen. Einige wenige Anwendungen des *fuzzy mappings* für Reisanbaugebiete sind in DOBERMANN ET AL. (1997) veröffentlicht. Untersuchungen zum Einsatz von Fernerkundungsdaten, Reliefeigenschaften und hybriden geostatistischen Verfahren zur Bodenvorhersage in Reisanbausystemen sind von DUTTMANN & SUMFLETH (2007) beschrieben. Verschiedene Arbeiten zur zeitlichen Variabilität des Reisertrages im Kontext des Klimawandels wurden von LIU ET AL. (2004c), BACHELET & GAY (1993) und KAR ET AL. (2004) veröffentlicht.

Untersuchungen innerhalb von Toposequenzen beschreiben folgende Arbeiten: Variabilität der hydromorphologischen Eigenschaften innerhalb einer Toposequenz in HSEU & CHEN (2001). Wichtige Zusammenfassung hinsichtlich der räumlichen Variabilität innerhalb einer Toposequenz und deren Auswirkungen auf die Verzögerung im Rahmen von Managementmaßnahmen wie Transplanting und Ernte in SAMSON ET AL. (2004). Je höher die Position innerhalb der Toposequenz, desto größer das Potenzial an Wasserverlust aufgrund von höherer Perkolations- und lateralem Wasserabfluss in Tsubo ET AL. (2005). Bei Betrachtung einer Toposequenz wurde festgestellt, dass die Wasserflüsse im oberen Bereich der Toposequenz hangabwärts gerichtet sind, dagegen im unteren Hangbereich der Bodenwasserhaushalt maßgeblich durch den lateralen Wasserfluss geprägt ist (Tsubo ET AL., 2007b). Die Variabilität der Produktivität innerhalb des regenbewässerten Reisanbaus innerhalb einer Toposequenz hängt maßgeblich von der Wasserverfügbarkeit bei Beginn der Reisblüte ab (Tsubo ET AL., 2006). Die Variabili-

tät von Bodeneigenschaften zwischen Dorflagen ist größer als die Variabilität innerhalb einer Toposequenz. Es wird proklamiert, dass die Anwendung von Managementfunktionen nicht toposequenzabhängig durchgeführt werden sollte, sondern feld- und zeitspezifisch (BOLING ET AL., 2008). Wichtige Arbeiten bezüglich der räumlichen Variabilität von Bodeneigenschaften in Reisanbausystemen sind in TRANGMAR ET AL. (1985, 1986a,b, 1987), WOPEREIS ET AL. (1996) sowie OBERTHUR ET AL. (1999) publiziert.

2.3 Der Einsatz von bodenhydrologischen Modellen in Reisanbausystemen

Modelle für Reisanbausysteme werden hauptsächlich im Rahmen von Wassermanagementaufgaben (ARORA, 2006), zur Modellierung des Wasserhaushaltes (TOURNEBIZE ET AL., 2006) und zur Optimierung der Reisproduktivität (BOUMAN & TUONG, 2001; CASSMAN & PINGALI, 1995) eingesetzt. Der besondere Schwerpunkt liegt hierbei auf der Modellierung von Infiltrationsverlusten, hydraulischen Leitfähigkeiten (WOPEREIS ET AL., 1994b; BOUMAN ET AL., 1994; SINGH ET AL., 2001; LIU ET AL., 2003) und der Grundwasserneubildung (LIU ET AL., 2003, 2004b, 2005a). Resultate verschiedener Simulationen zeigen, dass die Wasserbewegung hauptsächlich durch vertikale Infiltration (verglichen mit lateralem Fluss) innerhalb eines Reisfeldes erfolgt. Die verringerte Infiltrationsrate der Pflugsohle (vgl. Kapitel 3.1) ist die maßgebliche Steuergröße der Infiltrationsrate von Nassreisböden (JANSSEN & LENNARTZ, 2007; CHEN ET AL., 2002; CHEN & LIU, 2002). LIU ET AL. (2005b) stellen ebenfalls die Wichtigkeit der Pflugsohle innerhalb von Reisanbausystemen heraus. Die Pflugsohle vermindert die Infiltration. Dabei sind jedoch die alternierenden gesättigten und ungesättigten Zustände der Pflugsohle und die Prozesse der Quellung und Schrumpfung bei tonreichen Böden von entscheidender Bedeutung und tragen zur Problematik des kaum modellierbaren Wasserflusses in Nassreisanbausystemen bei (LIU ET AL., 2003).

Untersuchungen von JANSSEN & LENNARTZ (2007) und JANSSEN (2008) zeigten, dass die Infiltrationsrate in Abhängigkeit zur Bewirtschaftungsdauer zu interpretieren ist. Die Dauer der Bewirtschaftung hat einen direkten positiven Einfluss auf die wasserrückhaltende Funktion der Pflugsohle.

Bodenwasserhaushaltsmodelle werden für unterschiedliche Fragestellungen eingesetzt. Modelle zum Nährstoffmanagement wie GLEAMS-PADDY sind von CHUNG ET AL. (2003) untersucht. Stickstoff- und Wasserhaushaltsmodelle unter überstauten Bedingungen sind von CHOWDARY ET AL. (2004) zusammengefasst. Für die Modellierung des Pestizidtransportes in Reisböden schlugen MIAO ET AL. (2003) ein angepasstes gekoppeltes Modell namens RICEWQ-VADOFT (WILLIAMS ET AL., 1999) vor. RICEWQ simuliert den Stofftransport bzw. den Pestizidtransport, VADOFT den Wasserhaushalt. Komplexe Modelle basieren auf dem Darcy-Gesetz (ODHIAMBO & MURTY, 1996). Standortmodelle für Reisböden sind u. a. das SAWAH-Modell

(LIU ET AL., 2004a; OLEJNIK ET AL., 2001; WOPEREIS ET AL., 1994b), ORYZA2000, (CHEN ET AL., 2002; BOUMAN & TUONG, 2001; BOUMAN & VAN LAAR, 2006) und das in ORYZA2000 integrierte Bodenwasserhaushaltsmodell PADDY sowie CERES-RICE (SINGH & RITCHIE, 1993). Als Beispiele für 2D- und 3D-Modelle seien hier PADIWATER (BOLTON & ZANDSTRA, 1981) und das FEMWATER-Modell (CHEN ET AL., 2002; KHEPAR ET AL., 2000; LIN ET AL., 1997) genannt.

Ein wichtiger Punkt im Zusammenhang mit der hydrologischen Modellierung von Wasserflüssen in Reisböden ist die Quantifizierung des präferenziellen Flusses (SANDER & GERKE, 2007; WOPEREIS ET AL., 1994a). Die Ursachen von präferenziellen Fließwegen und hydrologischen Regimen u. a. wurden von LIN ET AL. (2006) anhand von Untersuchungen von Tonfilmen, Coatings, Bodenstruktur, Wurzelverteilung, Makroporen und hydromorphen Eigenschaften erforscht. Diesbezüglich sei auf die bereits genannte Literatur verwiesen. Arbeiten existieren von ISHIDA ET AL. (2003), DOBERMANN ET AL. (2002) und WOPEREIS ET AL. (1994a). Diese Studien belegen, dass intensives Puddling und effektives Bewässerungsmanagement zu einer bedeutenden Verringerung der Infiltrationsrate führt (ARORA ET AL., 2006), siehe auch SHOJI ET AL. (2005).

2.4 Einsatz von Fernerkundung zur Erfassung von spektralen Parametern in Reisanbausystemen

Mit Hilfe von Fernerkundungsdaten können flächendeckende Informationen über den Zustand von Vegetation mit vergleichsweise geringem Aufwand bereitgestellt werden. Die diesbezüglichen Einsatzgebiete sind vielseitig und umfassen verschiedenste Anwendungsmöglichkeiten innerhalb des Bewässerungsmanagements (HAFEEZ ET AL., 2007; SINGH ET AL., 2006; VAN NIEL & McVICAR, 2004; AMBAST ET AL., 2002; BASTIAANSEN, 2000; FEDDES ET AL., 1993), des Forstmanagements (SKIDMORE ET AL., 1997) u. a., des Precision Farmings und der regionalen Ertragsvorhersage (LEBLON ET AL., 1991). In der Landwirtschaft finden Fernerkundungsdaten auf unterschiedlichen Skalen in Europa bereits seit den frühen 80er Jahren Anwendung (LAMP & SCHRÖDER, 1981).

Die Assimilation von Fernerkundungsdaten für hydrologische Modelle ist auch aktuell ein wichtiges Forschungsfeld (INES & HONDA, 2005; BOUMAN, 1992; LEBLON ET AL., 1991). Der Einsatz der Fernerkundung in vergleichsweise großen Projekten wie dem Danube und dem GLOWA ist mit unterschiedlichsten Sensoren und Methoden etabliert. Zur Parametrisierung von hydrologischen Modellen sowie zur Optimierung von Landnutzungsentscheidungen und im Rahmen des Ressourcenschutzes (INES ET AL., 2006) werden Fernerkundungsdaten eingesetzt. Besonders die auf Fernerkundungsdaten basierte, modellierte aktuelle Evapotranspiration über thermale Informationen des Bodens eignet sich zur Bildung flächenhafter Indikatoren für die Bewertung der Effizienz und Produktivität von Bewässerungssystemen sowie für Nachhaltig-

keitsstudien in Reisanbausystemen (BASTIAANSEN & BOS, 1999). Durch die Kombination mit weiteren hydrologischen Daten können auf diese Weise Wasserbilanzen und Performancindikatoren für Bewässerungssysteme berechnet werden (BOS ET AL., 2005). Die Potenziale zur Nutzung dieser objektiven flächenhaften Informationsebenen für das Wassermanagement (beispielsweise in Mittelasien) wurden erst ansatzweise erschlossen (CHEMIN ET AL., 2004).

Die Grundlage für die Nutzung von Fernerkundungsdaten im Rahmen von Vegetationsuntersuchungen ist die Arbeit von MONTEITH (1972). Sein Konzept beschreibt die Berechnung der Netto-Primärproduktion aus der vorhandenen Biomasse. Dieser Zusammenhang ist allgemein als Funktion der absorbierten photosynthetisch aktiven Strahlung (APAR = absorbed photosynthetically active radiation) zu sehen. Experimentelle Untersuchungen validierten dieses Modellkonzept u. a. für Reis (CASANOVA ET AL., 1998; WIEGAND ET AL., 1991, 1989). Die Fernerkundung ermöglicht flächenhaft, die Netto-Primärproduktion von Biomasse direkt als lineare Funktion des NDVIs zu schätzen (ASRAR ET AL., 1992). BASTIAANSEN & ALI (2003) berechneten die Biomasseproduktion von Reis, indem sie die experimentellen Modellergebnisse von Mais und Sojabohnen (DAUGHTRY ET AL., 1992), Sonnenblumen (JOEL ET AL., 1997) und Getreide (MYNENI ET AL., 1997) nutzten. Ein weiteres Fernerkundungsverfahren zur Ableitung effektiver hydrologischer Kenngrößen in der Bewässerungswirtschaft ist beispielsweise der Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) (BASTIAANSEN & BOS, 1999). Dieser Algorithmus ist ein fernerkundungsbasierter Ansatz zur Quantifizierung tatsächlich verdunsteter Wassermengen an der Erdoberfläche. Wie sein Name impliziert, löst dieses Modell die Energiebilanzgleichung an der Erdoberfläche durch die Integration meteorologischer Größen und thermaler sowie optischer Fernerkundungsdaten (BASTIAANSEN, 2000; BASTIAANSEN ET AL., 2000; BASTIAANSEN & BOS, 1999). Der Aufsatz von BASTIAANSEN & ALI (2003) stellt ein durch SEBAL parametrisiertes Ertragsmodell vor.

Für die Zustandsbeschreibung bzw. die Erfassung von Bestandesheterogenitäten sind spezifische spektrale Signaturen für die Vegetationseinheiten erforderlich. Die spektralen Bereiche des sichtbaren Lichts (VIS = 400 - 700 nm) und des nahen Infrarots (NIR = 700 - 1300 nm) nehmen zur Charakterisierung von Biomasseentwicklung und Ertragseigenschaften eine zentrale Rolle ein. Aus diesen spektralen Bereichen werden meist Ratios gebildet, die den sogenannten „Red Edge“ integrieren. Weitere Ausführungen geben JENSEN (2006) und CASANOVA ET AL. (1998). Die charakteristische Reflexion eines Blattes stimmt nicht mit den Reflexionseigenschaften eines Pflanzenbestandes überein. Dies gilt auch in Reisanbausystemen. Aufgrund der dreidimensionalen Struktur eines Bestandes werden die Reflexionseigenschaften der einzelnen Blätter durch die Blattstellung, die Pflanzendichte und -höhe, die Reflexionsanteile von Stängeln, Blüten und Knospen, den Schatten im Bestand sowie durch den Einfluss des Bodens verändert (YANG & CHEN, 2004; ASRAR ET AL., 1992; GUYOT, 1990).

Durch die Existenz mehrerer Blattschichten kann die Reflexion im Bereich des NIR Werte über 55 % annehmen, da in diesem Wellenlängenbereich ein Teil der Strahlung durch das obere Blatt transmittiert und dann an den darunter liegenden Blättern reflektiert wird (BELWARD,

2.4 Einsatz von Fernerkundung zur Erfassung von spektralen Parametern in Reisanbausystemen

1991). Ebenso wird das typische Reflexionsverhalten vitaler Vegetation durch verschiedene Einflussgrößen, wie z.B. den phänologischen Verlauf bzw. die Alterung der Blätter (WAHID ET AL., 2003; YANG & SU, 1998; CASANOVA ET AL., 1998; GUYOT, 1990), den Wassergehalt im Blatt (CHANG ET AL., 2005; GUYOT, 1990), die Höhe der Nährstoffversorgung (ZHU ET AL., 2007; WAHID ET AL., 2003; INOUE ET AL., 1998; PATEL ET AL., 1985) oder durch den Befall mit unterschiedlichen Krankheitserregern (YANG ET AL., 2007) beeinflusst. Für die Erfassung von teilflächenspezifischen (Reis-)Pflanzenschäden aus Fernerkundungsdaten spielen diese Veränderungen der Reflexion eine entscheidende Rolle (BOLUDA ET AL., 1993). Darüber hinaus existieren Unsicherheiten in der Messung von spektralen Eigenschaften am Boden durch atmosphärische Effekte wie Wind oder Schatteneinflüsse (LEBLON ET AL., 2001).

Generell führen Stressfaktoren zu einem Rückgang der Blattpigmente (vor allem Chlorophyll) YANG & SU (2000), woraus eine Zunahme der Reflexion im blauen und roten Bereich des sichtbaren Lichtes resultiert. Die Reflexion im grünen Wellenlängenbereich nimmt dagegen leicht ab (KOCH ET AL., 1990; HOQUE ET AL., 1988). Zudem führen unterschiedliche Stressfaktoren häufig zu einer Zerstörung der inneren Zellstruktur, so dass der Luftanteil im Blattinnern reduziert wird. Als Folge der Zerstörung der Blattstruktur nimmt die Reflexion im NIR ab (ALDAKHEEL & DANSON, 1997). Die Abbildung 2.1 zeigt deutlich den Einfluss der Wasser- verfügbarkeit auf den spektralen Reflexionsgrad von Nassreis. Der Zusammenhang zwischen

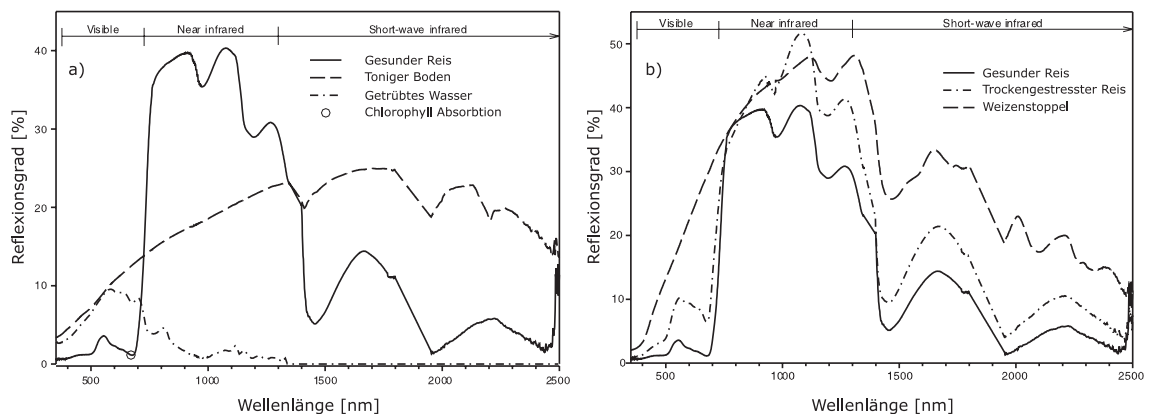


Abbildung 2.1: a) Darstellung der spektralen Reflexion von Nassreis, tonigem Boden und getrübbtem Wasser, geglättete Daten. b) Exemplarische Darstellung der Reflexionsgrade von gesundem Reis, trockengestresstem Reis und Weizenstoppeln, geglättete Daten. Diese Spektren zeigen den Effekt der Dehydration im Signal der spektralen Reflexion, aus: VAN NIEL & McVICAR (2004), verändert.

NDVI und Bodenwassergehalt korreliert laut YANG & SU (2000, 1999, 1998) signifikant. Eine Erhöhung des Wasserstresses führt folglich zu einer Reduzierung der spektralen Reflexion im NIR bzw. dem NDVI (vgl. Kapitel 5.2.2.).

Darüber hinaus belegen VAESSEN ET AL. (2001), dass das Bewässerungswasser kurz vor der Ernte die Beziehung zwischen *LAI* und spektralen sowie biophysikalischen Parametern nur bedingt beeinflusst. Das stimmt mit den Erkenntnissen aus BEGET & DI BELLA (2007) überein. In dieser Untersuchung wurde von keiner Veränderung der spektralen Reflexion von Grasbe-

ständen bei einer Überstauung von 5 cm berichtet. CASANOVA ET AL. (1998) beschreiben, dass mit 15 cm überstaute Reisfelder die spektrale Eigenschaft von vegetationsfreiem Boden aufweisen. VAESSEN ET AL. (2001) berichtet von keiner Beeinträchtigung des spektralen Reflexionsgrades durch Reissorte, Farbe des Bodens, Stickstoffdüngung, Wassertrübung und -tiefe. ASRAR ET AL. (1992) kommen ebenfalls zu dem Schluss dass Vegetationsindizes auch bei überstauten Reisfeldern in Abhängigkeit des agrarphänologischen Zustandes eingesetzt werden können. Untersuchungen von GILABERT & MELIÁ (1990a,b) und PATEL ET AL. (1985) zeigen, dass generell ein Zusammenhang zwischen Kornertrag und spektraler Reflexion besteht. Darüber hinaus wird bekräftigt, dass ein direkter Zusammenhang nicht nur zwischen *LAI* und spektraler Reflexion erkennbar ist, sondern auch zwischen allgemein leichter zu erfassenden Vegetationsparametern wie Wuchshöhe und Biomasse (CURRAN, 1980). Untersuchungen von TENNAKOON ET AL. (1992) geben Korrelationskoeffizienten von $r = 0.92$ zwischen Kornertrag und dem Kanal 7 des Landsat-TM-Sensors an.

In Arbeiten von VAESSEN ET AL. (2001) weist der *NIR*-Kanal einen höheren Erklärungsanteil bei der Berechnung des *LAI* auf als andere verfügbare Kanäle des ETM-Sensors. INOUE ET AL. (2008, 1998) geben an, dass der *fPAR* eine enge Korrelation mit den Vegetationsindizes *NDVI* und *SAVI* aufweist. Zusätzlich stellen sie heraus, dass kein Vegetationsindex über die gesamte Vegetationsperiode hinweg gute Korrelationen zum *fPAR* wie auch zum *LAI* aufweist. Nach CASANOVA ET AL. (1998) stellt sich bei Reispflanzen die Reflexion im roten Kanal invers proportional zum grünen Kanal dar. Wenn der Chlorophyllgehalt, der Bedeckungsgrad oder der *LAI* mäßige bis hohe Werte erreichen, ist der *NDVI* für diese biophysikalischen Parameter weniger empfindlich (BUSCHMANN & NAGEL, 1993; GITELSON & MERZLYAK, 1994; APARICIO ET AL., 2000). GITELSON ET AL. (1996) fanden heraus, dass unter diesen Bedingungen der grüne Kanal (*GRN*) sensitiver ist als der rote (*RED*) und schlugen vor, den grünen normalisierten Vegetationsindex (*NDVI_{green}*) zu verwenden.

Untersuchungen von CHANG ET AL. (2005) zeigen, dass die Ratios *NIR/RED* und *NIR/GRN* signifikant mit den Kornerträgen im Stadium des Rispen-schwellens (booting stage) korrelieren. Aus den Untersuchungen von CHANG ET AL. (2005) ergibt sich, dass über mehrere Jahre hinweg keine robuste einfache Gleichung eines linearen Zusammenhanges zwischen Kornertrag und Kanalkombination von *NIR/RED* oder *NIR/GRN* im Stadium des Rispen-schwellens aufgestellt werden kann und eine Vorhersage deshalb nur schwer möglich ist. Es sollte unbedingt darauf hingewiesen werden, dass die entwickelten Modelle nur für eine Varietät und unter diesen speziellen Umwelteinflüssen gelten (CHANG ET AL., 2005).

Einfache Verfahren zur Vorhersage von Reiserträgen durch Vegetationsindizes aus Fernerkundungsdaten basieren auf empirisch-statistischen Modellen. Für die Vorhersage von Reiserträgen unter Verwendung von Vegetationsindizes sind zwei grundlegende Annahmen zu formulieren: 1. der Vegetationsindex korrespondiert direkt mit dem *LAI* und der Biomasse; 2. der *LAI* und die Biomasse korrespondieren direkt mit dem Kornertrag. Wichtige Publikationen, die die Zusammenhänge herausgearbeitet haben, sind Studien von GILABERT & MELIÁ (1990b),

PATEL ET AL. (1985) und CASANOVA ET AL. (1998).

Andere Ansätze für den Einsatz von Fernerkundungsverfahren zielen auf die Quantifizierung von Reisanbauflächen (YOSHIKAWA & SHIOZAWA, 2006). Seit Beginn der 90er Jahre sind viele Studien diesbezüglich durchgeführt worden (XIAO ET AL., 2005; ISHIDA ET AL., 2004; ISHIGURO ET AL., 1993; BOUMAN, 1992; LEBLON ET AL., 1991), u. a. auch mit Radardaten (XIN ET AL., 2006; SHAO ET AL., 2001; RIBBES & LE TOAN, 1999), die zur Erfassung des Reisertrages in den Tropen erfolgreich eingesetzt wurden (LI ET AL., 2003). Die Zusammenhänge zwischen Radardaten und biophysikalischen Parametern werden umfassend in INOUE ET AL. (2002) beschrieben.

3 Grundlagen von Nassreisanbausystemen

Je nach Wasserverfügbarkeit, Grundwasserstand und Anbauvariante unterscheidet man unterschiedliche Arten des Reisanbaus (s. Abbildung 3.1). Die Differenzierung von bewässertem und regenbewässertem Tieflandreis ist jedoch meist aufgrund der sich überschneidenden Anbausysteme und der mangelnden Datengrundlage problematisch. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Begriff des Nassreis verwendet. Grundsätzlich klassifiziert man in folgende Anbauformen:

- Hochlandreis,
- regenbewässerter Nassreis,
- bewässerter Nassreis,
- unkontrolliert bewässerter Nassreis.

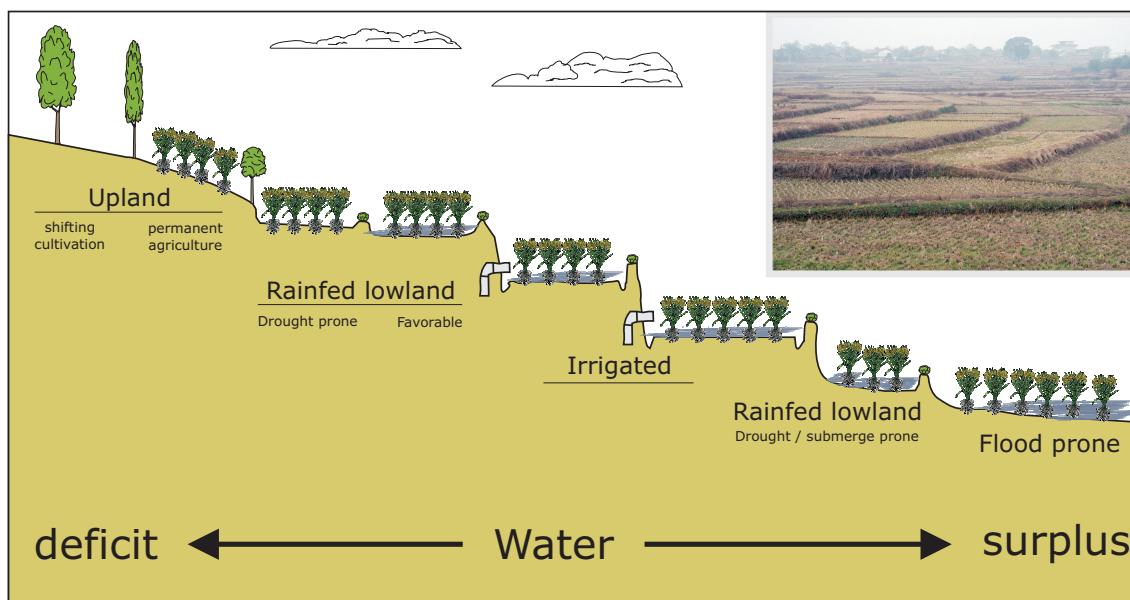


Abbildung 3.1: Grundsätzliche Klassifikation möglicher Anbauvarianten von Reis in Bezug auf das vorherrschende Wasserdargebot nach YOSHIDA (1981), verändert.

Die zeitliche Dynamik der Bewirtschaftungsphasen differenziert man in drei entscheidende Perioden, diese sind im Einzelnen:

- die Pflanz-Periode des Umsetzens (Transplanting), der Überschwemmung und des Setzens der Reissaat,
- die Wachstums-Periode (das vegetative Stadium, das reproduktive sowie das reife Stadium),
- die Bracheperiode nach der Ernte (LETOAN ET AL., 1997).

Während der Pflanz-Periode des Umsetzens zeichnet sich die Oberflächenbedeckung eines typischen Nassreisfeldes durch Strukturen der grünen jungen Reispflanze und des gestauten Oberflächenwassers aus, mit Wassertiefen normalerweise zwischen 2 und 15 cm. Etwa 50 bis 60 Tage nachdem die Reispflanze verpflanzt wurde, ist ein Bedeckungsgrad von 100 % erreicht. Zum Ende der Wachstumsperiode, kurz vor der Ernte, tritt eine Abnahme des Blatt- und Stängelwassergehaltes sowie eine Reduzierung der Blattzahl ein. Im kontrolliert bewässerten Nassreisanbau werden die Felder einige Tage vor dem Pflanzen der Reissetzlinge geflutet und ungefähr 20 bis 30 Tage vor der Ernte wieder trockengelegt. Die Landwirte nutzen unterschiedliche Bewässerungszyklen sowie allgemein unterschiedliche Bearbeitungstermine. Grundlegende ertragsvariierende Faktoren von Nassreis werden im Folgenden kurz dargestellt:

There are a number of biological, environmental and socioeconomic reasons for large differences in rice yield. Low rice yields are associated with upland rice, rainfed lowland rice, deepwater rice and the poor socioeconomic conditions in the tropics, whereas high yields are associated with irrigated lowland rice and the good socioeconomic conditions in the temperate regions. In both the tropics and the temperate regions, rice yield per hectares is primarily determined by the level of incident solar radiation. In the tropics, when adequately managed, the dry season crop usually produces higher yields than the wet season crops because it receives more sunlight (YOSHIDA, 1981, S. 177ff.).

Klimatische Einflüsse beeinflussen die Bodenfeuchtigkeit bzw. die Wasserverfügbarkeit der Reiszurzel. Die Wasserverfügbarkeit und vor allem die vorherrschende Temperatur sind hauptverantwortlich für die Ursachen des abiotischen Stresses bei Reispflanzen bzw. das Pflanzenwachstum. Die Entleerung und die Anreicherung der Bodennährstoffspeicher und das Auftreten von Schädlingen und Krankheiten führen zusätzlich zu bedeutenden Variabilitäten der Wuchs- und Ertragsleistung. Gleichzeitig weisen unterschiedliche Positionen entlang von Hängen innerhalb der Landschaft unterschiedliche Wasserverfügbarkeiten und unterschiedliche Zustände des Bodennährstatus auf. Gründe hierfür sind u. a. die natürliche Bodenvariabilität (DOBERMANN, 1994) und der laterale Wasser-Nährstoff-Fluss. Mit zunehmendem Wissen um räumliche und zeitliche Variabilitäten hat das teilflächenspezifische Management hinsichtlich Ertrags- und Gewinnmaximierung und Reduzierung der Bodendegradation immens an Einfluss gewonnen

(BURROUGH, 1993; MATTHEWS, 2002a,b; YU, 1985; DeDATTA, 1981). Ein umfassender Überblick hinsichtlich ertragbeeinflussender Managementfaktoren ist von INAMURA ET AL. (2004) sowie YING ET AL. (1998) publiziert. Speziell das Puddling, die Bewässerungsintensität und die zeitlichen Effekte der Bodenbearbeitung auf die Ertragsleistung eines Reis-Weizen-Anbausystems für einen lehmig-sandigen Standort in Indien sind bei ARORA ET AL. (2006) veröffentlicht. Es gilt als allgemein bekannt, dass die Temperatur maßgeblich zur Ertragsvariabilität beiträgt: Temperaturen von mehr als 31°C während der Blütezeit führen zu einer Abnahme von fruchtbaren bzw. gefüllten Ähren. Ebenfalls wird von einer Verkleinerung der gefüllten Ähren sowie einer verringerten Biomasse bzw. Reduzierung des Ernteindex berichtet (KOBATA & UEMUKI, 2004; MATSUI ET AL., 1997; ZISKA ET AL., 1997; YOSHIDA, 1981).

3.1 Bodeneigenschaften von Nassreisböden

Die Vorbereitung eines Reisfeldes (Saatbettvorbereitung) erfolgt durch das sogenannte Puddling, das traditionell mit Hilfe von Wasserbüffeln oder aber auch maschinell durchgeführt wird. Das Puddling reduziert den vertikalen Wassertransport (Perkolation) durch Entwicklung eines Pflugsohlenhorizontes (Ploug pan) und führt zur Zerstörung von Bodenaggregaten und erhöht gleichzeitig den Mikroporenraum im gepuddelten Pflughorizont (BOUMAN & TUONG, 2001).

Puddling highly influences the physical, chemical, and microbiological properties of soils (SHARMA ET AL., 1988, S. 32 ff.)

Der Puddlingprozess führt zu Verschmierungen auf der Oberfläche der Pflugsohle. Zusätzlich wird durch das Puddling die Lagerungsdichte der Pflugsohle erhöht (SAMSON ET AL., 2002). Die Pflugsohle erschwert das Wurzelwachstum in die Tiefe und reduziert die Wasserbewegung zwischen den Horizonten (KUKAL & AGGARWAL, 2002) (vgl. Abbildung 3.2). Das Wasser wird gestaut. Aufgrund der Tatsache, dass Reis flach und vornehmlich oberhalb der Pflugsohle wurzelt (WADE ET AL., 1999), sind die Pflanzen hohen Bodenwassergehaltsschwankungen ausgesetzt. So wechseln sich Phasen völliger Überstauung mit Phasen des Wassermangels ab. Während der Phasen des Wassermangels durchdringen die Wurzelsysteme vereinzelt die Pflugsohle und erhalten ihr Wasser aus tiefergelegenen Schichten des Bodens (DOBERMANN ET AL., 2002; DOBERMANN, 1994; FLINN ET AL., 1982). Arbeiten zum Einfluss des Puddlings auf unterschiedliche wasserhaushaltliche Faktoren wie Evaporation und Wasserretention sind zu finden in SINGH ET AL. (2001).

This study demonstrates that intensive puddling and water-economizing schedule caused a significant reduction in seasonal percolation rate primarily due to puddling-induced changes in soil bulk density and hydraulic behavior. Increasing puddling intensity . . . enhanced rice grain yield substantially, but additional pudd-

ling did not improve yield (ARORA ET AL., 2006, S. 219ff.).

Puddling hemmt das Unkrautwachstum und dient der Herstellung eines leicht durchwurzelbaren Oberbodens. Erst ab Tongehalten von über 20 % werden Reisböden üblicherweise gepuddelt (DEDATTA, 1981). Die Pflugsohle reduziert die Gefahr des Wasserverlustes. Ein großer Nachteil des Puddlings ist dagegen der große Wasserbedarf als Folge der Bodenbearbeitung. Bereits Untersuchungen von SHARMA ET AL. (1988) zeigen, dass der tägliche Wasserbedarf bei gepuddelten Böden dreimal höher ist als bei nicht gepuddelten Böden. Der tägliche Wasserbedarf bei gepuddelten Böden liegt bei 9.28 mm pro Tag und bei nicht gepuddelten Böden bei 3.37 mm pro Tag. Die Eigenschaften des gepuddelten Oberbodens sind abhängig von der Art des Managements. Je mehr Pflanzenmaterial auf die Fläche gebracht wird, desto höher ist demnach auch die Akkumulation von organischer Substanz und entsprechend die Mächtigkeit des Oberbodens.

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Pflugsohle steuert den vertikalen Wasser- und Stofffluss im Nassreisfeld (BOUMAN ET AL., 2007). Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wird hauptsächlich durch Bodenbeschaffenheit (TIETJE & HENNINGS, 1996), Bodenstruktur und die Porosität beeinflusst. Grundwasserbeeinflusste hydraulische Leitfähigkeiten liegen im Bereich von 0-3 $mm\ d^{-1}$, für grundwasserferne Böden sind hydraulische Leitfähigkeiten von 5 $mm\ d^{-1}$ zitiert (TSUBO ET AL., 2007a). Weitere Literaturangaben zur gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit befinden sich in Kapitel 5.4.1. Untersuchungen zur Infiltration in terrassierten Reisanbausystemen und zum Einfluss von Schrumpfungsrissen auf die Infiltration in Paddies sind von LIU ET AL. (2004a, 2003); BOUMAN ET AL. (1994); WOPEREIS ET AL. (1994b) veröffentlicht. Der Einfluss der Dämme wird durch Arbeiten von CHEN & LIU (2002) dargestellt. Der kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser in terrassierten Reisanbausystemen und die Berechnung bzw. Modellierung der potenziellen Verdunstung in Reisanbausystemen werden in den Arbeiten von LIU ET AL. (2004a) behandelt. Die chemischen Bedingungen im Nassreisboden werden maßgeblich von den anaeroben Phasen während der überstauten Perioden bestimmt. Nach der Überstauung des Reisfeldes wird Sauerstoff im Ap-Horizont innerhalb von 1 bis 2 Tagen durch Oxidation und durch aerobe Mikroorganismen aufgebraucht. Während der Überstauung ist die Intensität des Sauerstoffverbrauchs durch aerobe Mikroorganismen vom organischen Gehalt des Bodens und der im Boden vorherrschenden Temperatur abhängig (LINDAU ET AL., 1990). So wird der größte Teil des Nassreisbodens anoxisch. Durch Diffusion von Sauerstoff aus dem Bewässerungswasser bleibt allerdings der oberste Bodenbereich oxisch (FRENZEL ET AL., 1992). Auch eine dünne Zone um die Reiswurzel und unterhalb der Pflugsohle bleibt, durch Sauerstoffdiffusion durch das Wurzelsystem der Reispflanze, oxisch (DEDATTA, 1981).

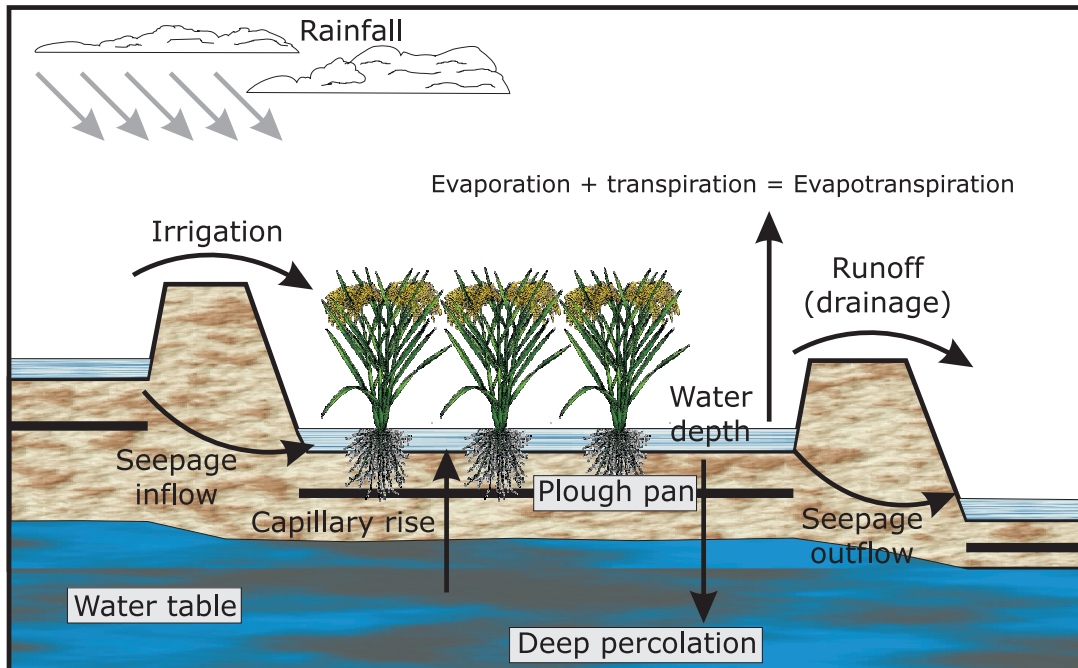


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Prozesse in einem Reisfeld nach BOUMAN ET AL. (2001), verändert

3.2 Spektrale Eigenschaften von Nassreis

Ein grundlegendes Verständnis der Physiologie und der spektralen Eigenschaft von Nassreis ist die Grundvoraussetzung erfolgreicher Fernerkundungsanwendungen. Dieses Wissen spielt eine entscheidende Rolle in der Planung von Feldkampagnen zur Erhebung von Ground-truth-Informationen, aber auch für den optimalen Aufnahmezeitpunkt der Satellitenszene sowie für die Schätzung der phänologischen Wachstumsstadien (RIBBES & LE TOAN, 1999; LETOAN ET AL., 1997).

Phänologische Stadien können in zwei Zyklen bezüglich der Auswertung von Fernerkundungsdaten getrennt werden: ein vegetatives und in ein reproduktives Stadium (CASANOVA ET AL., 1998; RIBBES & LE TOAN, 1999). Die BBCH-Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien von Reis gibt gesamthaft die Reisentwicklung vom Makrostadium der Keimung bis hin zum Makrostadium der Frucht- und Samenreife wieder (LANCASHIRE ET AL., 1991).

Das vegetative Stadium schließt den Teil des Wachstumszyklus ein, in dem sich die oberirdische Biomasse entwickelt. Dieses Stadium wird durch eine Zunahme der Wuchshöhe und der Biomasse gekennzeichnet. Das reproduktive Stadium beginnt, wenn das Höhenwachstum beendet und nachdem der Reifeprozess inklusive der Kornentwicklung abgeschlossen ist (RIBBES & LE TOAN, 1999). Gelegentlich wird das reproduktive Stadium in zwei Kategorien getrennt. In das reproduktive Preheading und das reproduktive Postheading. Der Wachstumszyklus für

3.2 Spektrale Eigenschaften von Nassreis

tropische Reisvarietäten umfasst ca. 110-120 Tage, während er in gemäßigten Klimaten ungefähr 140-150 Tage erreicht (LETOAN ET AL., 1997). Allerdings können diese Zyklen je nach Varietät zeitlich differieren. So sind auch Reissorten gezüchtet worden, die einen sehr kurzen Wachstumszyklus von weniger als 90 Tagen aufweisen (SENANAYAKE ET AL., 1994). Diese Unterschiede bezüglich der Wachstumszykluslänge liegen in der unterschiedlichen Dauer des vegetativen Stadiums begründet, das 40 bis 120 Tage beträgt (SENANAYAKE ET AL., 1994). Ungeachtet der Kulturvarietät beträgt die Dauer des reproduktiven Preheadings ca. 23-25 Tage, die Phase des reproduktiven Postheadings 30-35 Tage (SENANAYAKE ET AL., 1994).

Bewässerter Nassreis kann im gefluteten Zustand mit Hilfe von Fernerkundungsmethoden differenziert werden. Unsicherheiten existieren bzw. resultieren aus einer nicht vorhandenen multitemporalen Analyse des Systems. Die zeitliche Erfassung des Vegetationszustandes bei einer

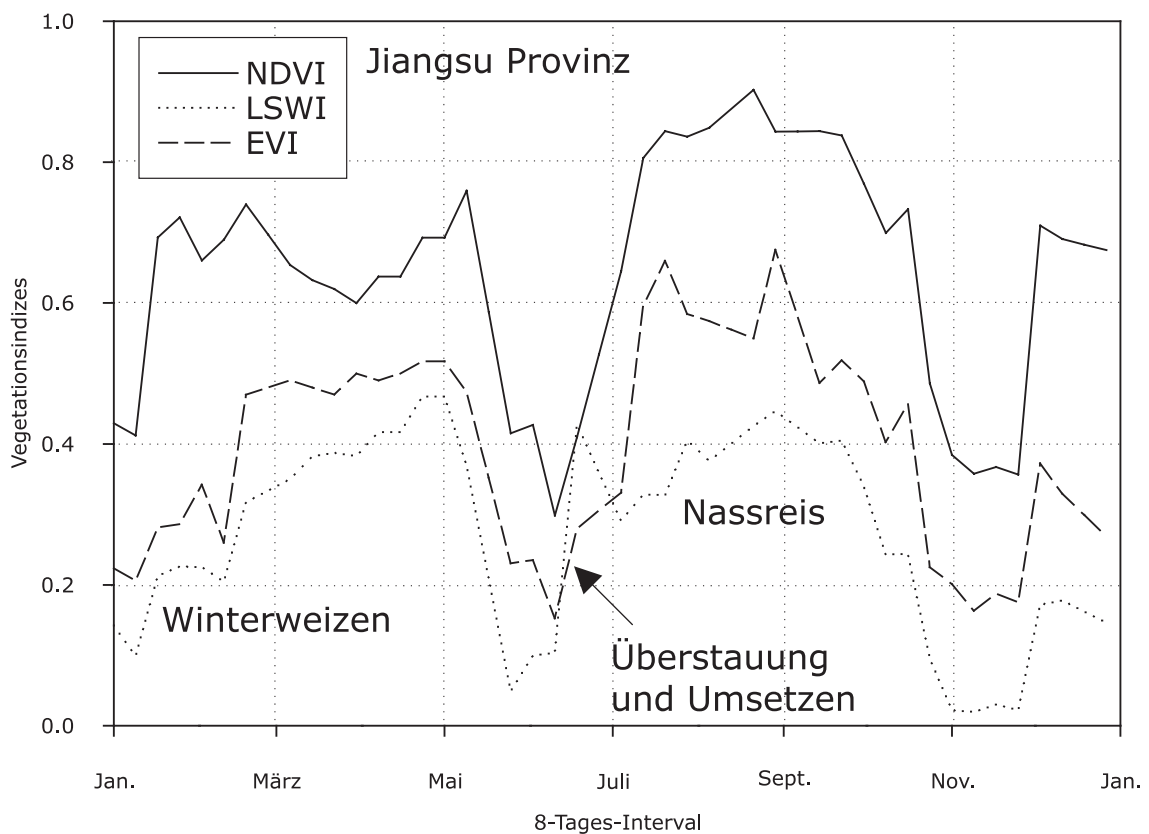


Abbildung 3.3: Darstellung verschiedener Vegetationsindizes bezüglich Nassreis und Winterweizen im Jahresverlauf, aus: XIAO ET AL. (2005), verändert.

nicht vorhandenen Überstauung, ist jedoch jedem anderen Zeitpunkt vorzuziehen, vor allem bei kleinskaligen Klassifikationen der Landnutzung (BARRS & PRATHAPAR, 1996; MCCLOY ET AL., 1987). Die spektrale Reflexion im sichtbaren und nahen Infrarot von Reis ist vergleichbar mit anderen Getreidesorten (MARTIN & HEILMAN, 1986). Bei der Erfassung von spektralen Eigenschaften ist ausschließlich der Einfluss der Überstauung zu berücksichtigen. Zusätzlich gibt es jedoch Reisvarietäten, die aufgrund ihrer Wasserabsorptionseigenschaften von Getreidearten zu differenzieren sind. Der Grund hierfür liegt in dem höheren Reflexionsgrad im Bereich

des mittleren Infrarots (1400-1800 nm) (MARTIN & HEILMAN, 1986; THENKABAIL ET AL., 1994). Die meisten Vegetationsindizes nutzen die Beziehung zwischen Biomasse oder *LAI* und dem nahen Infrarot bzw. dem roten Spektralbereich, dem sogenannten „*Red Edge*“. Das Reflexionsvermögen von Reis im nahen Infrarot hängt direkt mit der Entwicklung der grünen Biomasse zusammen. Das Reflexionsvermögen beträgt im frühen Entwicklungsstadium des Schossens ungefähr 15 %. Im Bereich des Postheadings erhöht es sich schrittweise auf ein Maximum von 50 % (CASANOVA ET AL., 1998). Im letzten Wachstumsstadium verringert es sich auf ca. 33 % (CASANOVA ET AL., 1998) und verhält sich umgekehrt proportional mit dem Chlorophyllgehalt grüner Biomasse. Vegetationsindizes erfassen die Interaktion zwischen Biomasse und spektraler Reflexion, wobei das vegetative Stadium als das optimale hinsichtlich der Erfassung durch Fernerkundungsdaten gilt. Im Stadium der reproduktiven Phase neigen die Vegetationsindizes dazu, im zeitlichen Verlauf konstante Werte auszuprägen, und eine direkte lineare Beziehung zwischen Vegetationsindizes und Biomasse bzw. *LAI* lässt sich nicht ableiten (CASANOVA ET AL., 1998). Dieser so genannte „Plateau-effekt“ führt zu einer Limitierung der Verwendbarkeit von Fernerkundungsmethoden im Rahmen der Ertragsmodellierung von Reis bzw. Getreide. Nach Erreichen eines Bedeckungsgrades von 100 % erhöht sich der Reflexionsgrad im nahen Infrarot, während der Reflexionsgrad im roten sichtbaren Spektralbereich sich nur geringfügig ändert (THENKABAIL ET AL., 2000).

4 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet „Liu Jia Zhan“ liegt etwa 3 km nördlich der *Experimental Ecological Research Station of Red Soil, Chinese Academy of Sciences*, nahe der Stadt Yingtan, Jiangxi-Provinz (28°15'N, 116°55'E). Die Größe des untersuchten Gebietes beträgt etwa 12.5 km². Die Hauptanbauprodukte sind Nassreis (*Oriza sativa L.*), gefolgt von Mandarinen (*Citrus reticulata*) und Kastanien (*Castanea mollissima*). Die Bewässerung erfolgt ausschließlich durch Gravitation und mittels eines weit verbreiteten Bewässerungsnetzes. Das Wasser zur Bewässerung stammt aus dem Einzugsgebiet des Poyang Hu und des Xinjiang sowie aus vielen kleinen Bewässerungsreservoirs. Das Untersuchungsgebiet wird von zwei Hauptentwässerungskanälen durchzogen, die in Richtung Nord-West entwässern (s. Abbildung 4.1).

4.1 Geologie und Geomorphologie

Das Untersuchungsgebiet liegt südwestlich des „Poyang Hu“ Sees und ist Teil eines großen intermontanen Beckens. Dieses Becken, ein Grabenbruchsystem, ist von Höhenzügen eingefasst, welche aus devonischen metamorphen Gesteinsformationen bestehen. Bei einer weiteren Unterteilung des Beckens in Teilsysteme ist das Untersuchungsgebiet dem Yingtan Becken zuzuordnen. Die geologischen Formationen innerhalb des Grabenbruchs haben ihren Ursprung in der Kreidezeit und dem darauf folgendem Känozoikum. Dominierend treten hier oberflächennah Konglomerate, vor allem an den Randbereichen kreidezeitlicher Sandstein (Red Sandstone) sowie tertiäre und quartäre rote Tone (Quaternary Red Clays) auf. Intensive Verwitterung und Abtragung haben eine leicht hügelige Landschaft in Höhenlagen unter 100 m ü. NN hinterlassen. Die Landschaft des Untersuchungsgebietes ist von vielen kleinen Einzugsgebieten geprägt, die durch Kuppenbereiche, den sogenannten Upland-Areas, mit durchschnittlichen Höhen von 20-40 m ü. NN voneinander getrennt werden. Das rezente Relief ist stark anthropogen durch die Terrassierung überprägt. Die Kuppen sind infolge intensiver Nutzung stark erodiert. Die Ebenen wurden landwirtschaftlich früher genutzt als die Hang- und Kuppenbereiche. Die Hänge sind terrassiert und unter Anwendung von Bewässerungsmaßnahmen der landwirtschaftlichen Produktion zugänglich gemacht worden. Die durchschnittliche Hangneigung beträgt im Untersuchungsgebiet 5 %.

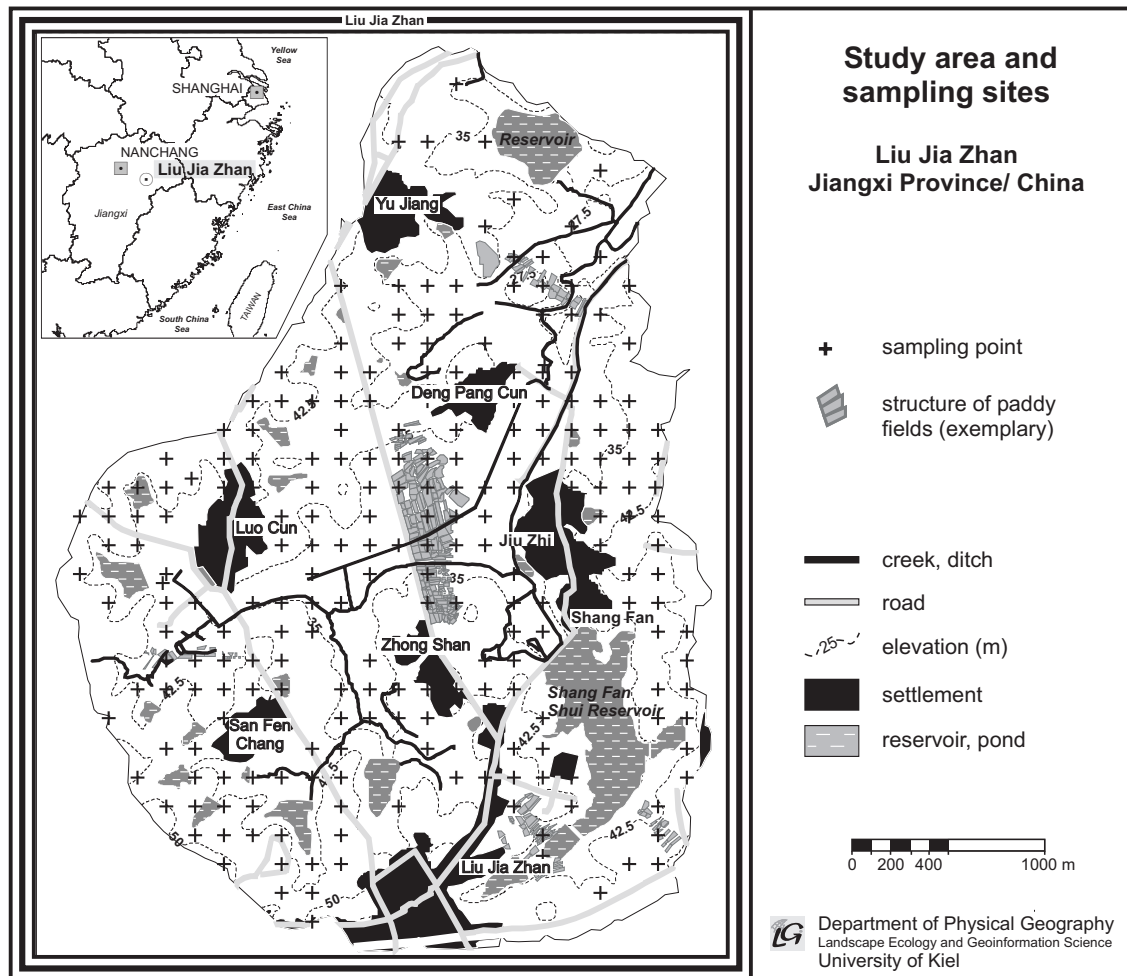


Abbildung 4.1: Lage des Liu Jia Zhan Untersuchungsgebietes in der Jiangxi-Provinz/China.

4.2 Klimatische Verhältnisse

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in einer Übergangszone der immerfeuchten Subtropen zu den sommerfeuchten Tropen. Die Veränderung der mittleren Monatsniederschläge und der Lufttemperatur im Jahresverlauf zeigt das typische Bild eines monsunal geprägten Klimas in Süd-Ostasien. Die Trendgrafiken der Station Nanchang Airport (s. Abbildung 4.2) für den mittleren Jahresniederschlag zeigen keine deutlichen Veränderungen der Niederschlagssummen der letzten 30 Jahre. Es ist jedoch eine recht deutliche interannuelle Variabilität der Starkregenereignisse (täglich Niederschlag > 20 mm) und ein Anstieg ihrer Häufigkeit zu verzeichnen. Die Anzahl trockener Tage mit weniger als 1 mm Niederschlag ist geringfügig gesunken (c), die Anzahl der feuchten Tage (Niederschlag über 1 mm) dagegen leicht gestiegen.

Innerhalb von klimatologisch normalen Jahren führen die aktive innertropische Konvergenzzone (ITC) und die Hadley-Zirkulation zu einem westpazifischen subtropischen Hochdruckgebiet, das sich von Süd- nach Nordostchina ausbreitet (ZHANG & JIANG, 2001). Die Bewegung der

4.2 Klimatische Verhältnisse

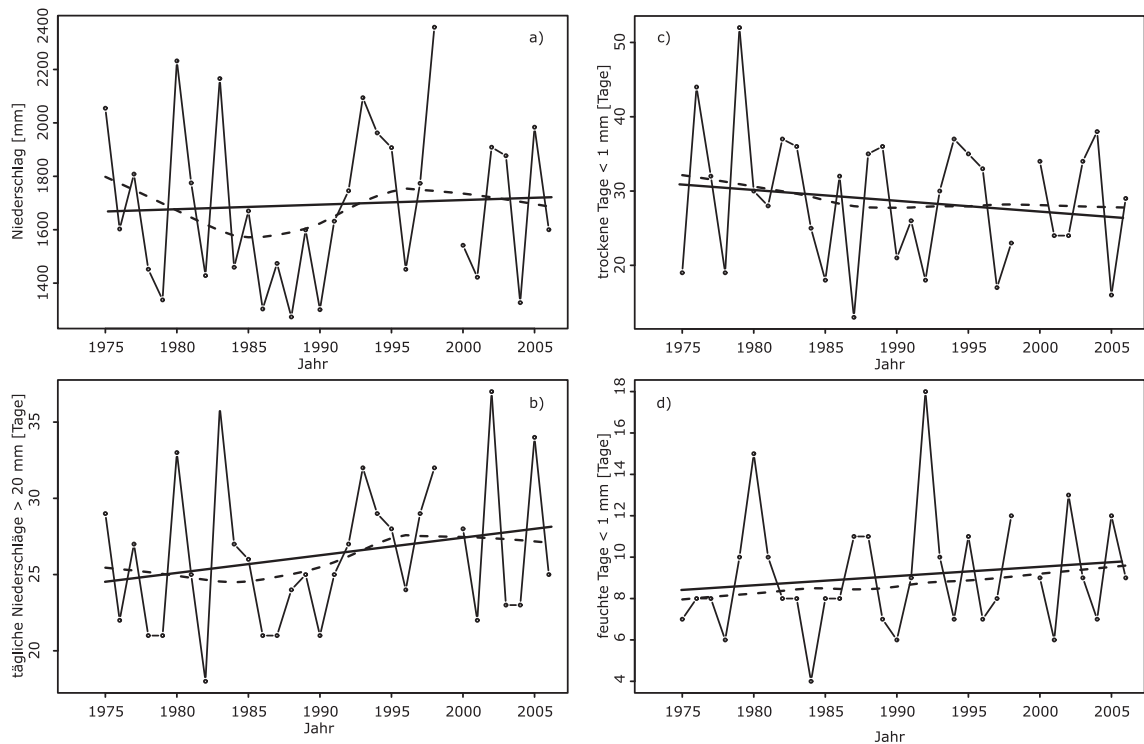


Abbildung 4.2: Trendgrafiken der Station Nanchang Airport für a) mittleren Jahresniederschlag, b) Starkregenereignisse größer 20 mm, c) trockene Tage kleiner 1 mm, d) feuchte Tage größer 1 mm, Quelle: Surface Station Climatology of NOAA, USA

antizyklonalen Zirkulation lässt Südost- und Südwest Monsunwinde entstehen, die Feuchtigkeit nach Süd- und Zentralchina bringen. Im April und Mai normaler Jahre oder aber auch in La-Niña-Jahren verschiebt sich das subtropische Hochdruckgebiet bis 23° nördliche Breite westwärts bzw. nordwärts. Im Juni wird das Einzugsgebiet des Changjiang vom westlichen Rand des subtropischen Hochdruckgürtels kontrolliert. Dieser transportiert warm-feuchte Luftmassen heran. Sobald diese warm-feuchten Luftmassen auf Kaltluftströme aus dem Norden treffen, entstehen stationäre Fronten mit extremen Niederschlägen, die „*plum rain*“ oder „*meiyu*“ genannt werden (SAMEL ET AL., 1995). Anfang Juli oder Mitte Juli eines normalen Jahres wandert das subtropische Hochdruckgebiet weiter nordwärts bis auf eine Höhe von 30° N. Nach dem „Pflaumenregen“ dominiert weiterhin das subtropische Hochdruckgebiet und liefert warme und trockene Luftmassen in die Region. Das Klimadiagramm der ungefähr 180 km nordwestlich der Red Soil Station gelegenen Stadt Nanchang lässt ausgesprochen deutlich die ganzjährige Humidität erkennen (s. Abbildung 4.3). Die Hauptwachstumsphase mit höheren Temperaturen liegt in der Zeit von Mai bis September, die Niederschlagsverteilung und der Temperaturverlauf sind als exemplarisch für die immerfeuchten Subtropen anzusehen. Die Klimadiagramme der Red Soil Station zeigen für die dargestellten Jahre ein ausgeprägtes Wasserdefizit in der zweiten Anbauperiode, wobei der geringe Beobachtungszeitraum nicht als repräsentativ gelten kann. Die Niederschläge erreichen ihr Maximum in den Monaten Mai und Juni bei einer jährlichen Gesamtniederschlagssumme von knapp 1706 mm. Die potenzielle Evapotranspiration beträgt ungefähr 1318 mm (ZHONG & CAI, 2007). Der Temperaturverlauf zeigt den für die monsun-

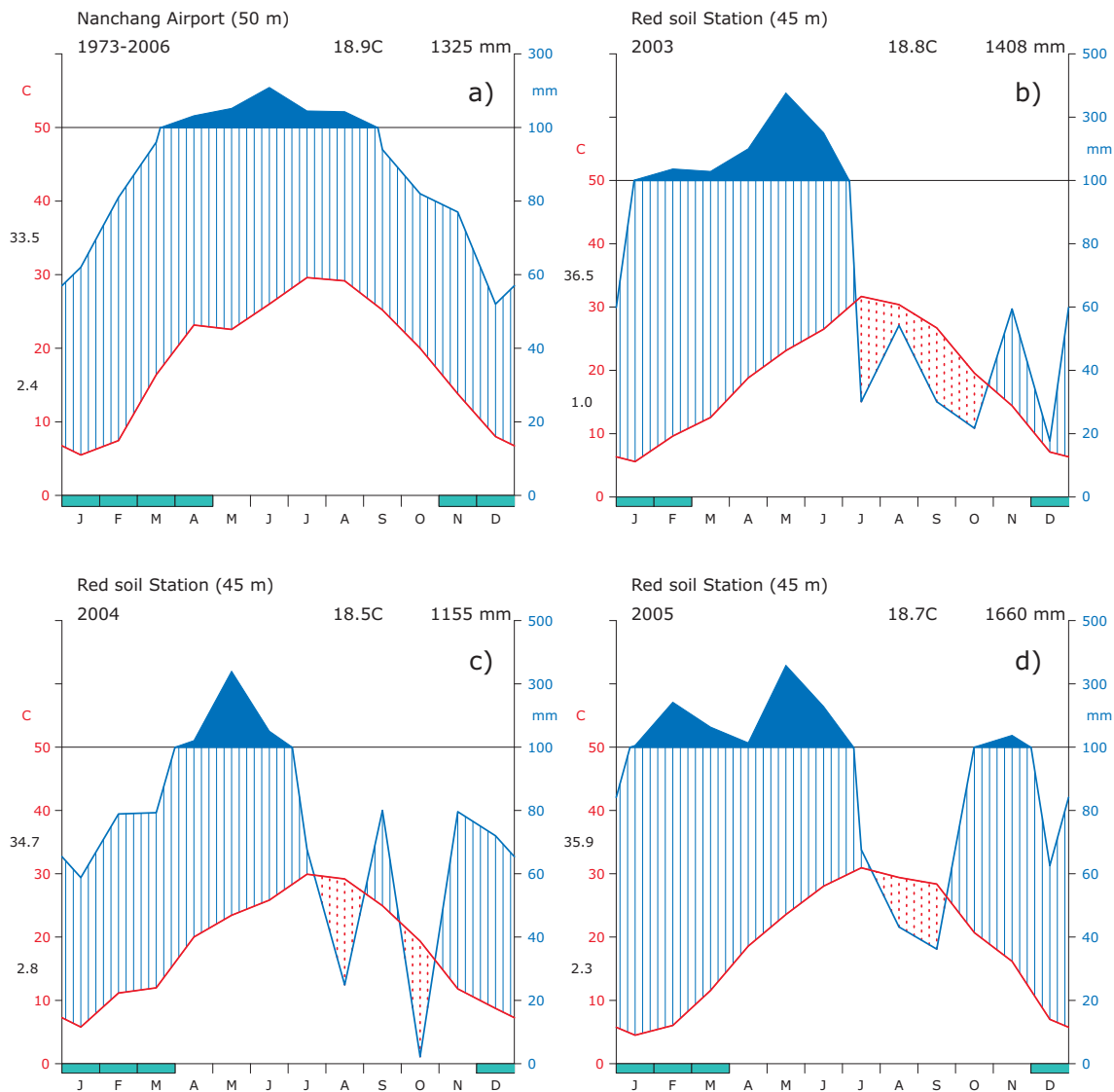


Abbildung 4.3: Klimadiagramme nach Walter und Lieth zeigen die klimatischen Gegebenheiten, die ein Pflanzenwachstum zulassen (Vegetationsperiode). Dargestellt ist die Summe der Monate innerhalb eines Jahres, deren Monatsmitteltemperaturen (T_m) über 5°C liegen und deren Niederschläge (NS) doppelt so hoch wie die entsprechenden Monatsmittel der Temperatur sind.

beeinflussten wechselfeuchten Tropen typischen Jahresgang mit einem Temperaturmaximum im Juni/Juli und einem Absinken der Temperatur zu Beginn der Regenzeit, aber insgesamt nur geringen Jahresschwankungen. Mit dem Rückgang der mittleren Monatsniederschlagssummen geht in der Region der *Red Soil Station* ein erhöhter Bewässerungsbedarf des Nassreises im betrachteten Zeitraum einher. Unglücklicherweise überschneiden sich hier Phasen geringer Niederschläge mit Phasen erhöhten Wasserbedarfs für das Pflanzenwachstum. Dem ist hinzuzufügen, dass der erhöhte Wasserbedarf in der Zeit zwischen Bestockung und Fruchtreife (Juli bis August) liegt. Somit bestehen für die zweite Anbauphase weniger gute Bedingungen hinsichtlich der klimatischen Wasserverfügbarkeit.

4.3 Böden

Die dominierenden Böden des Untersuchungsgebietes sind nach der *World Reference Base for Soil Resources* (WRB) (DECKERS ET AL., 1998; FAO, 1998) **Fluvisols**, **Anthrosols**, **Acrisols** und **Cambisols**. Diese Bodentypen sind überwiegend aus Flussablagerungen (*alluvial deposits*), rotem Sandstein (*Red Sandstone*) und quartären roten Tonen (*Quaternary Red Clay*) hervorgegangen (vgl. Kapitel 4.1) und stark durch die bereits lang andauernde Kultivierung von Nassreis überprägt. **Fluvisole** entwickelten sich vorwiegend im Tieflandbereich des Untersuchungsgebietes aus relativ jungen alluvialen Sedimenten. **Anthrosole** hingegen sind vor allem in den mittleren und unteren Hangpositionen verbreitet. Die aus den roten quartären Tonen/Lehmen hervorgegangenen Böden werden weniger von den Landwirten bevorzugt und sind im Untersuchungsgebiet häufig durch wenig ergiebige Grasland bedeckt. Die **Acrisols** sind in höheren Lagen des quartären roten Tons zu finden. Kennzeichnend sind eine starke Verwitterung, geringe pH-Werte, Tonverlagerung und eine geringe Basensättigung infolge vorherrschender 2-Schicht-Tonminerale. Das humide, subtropische Klima mit einer ganzjährig positiven klimatischen Wasserbilanz trägt deutlich zur Bodenbildung im Untersuchungsgebiet bei. Hinzu kommt als weiterer Faktor der Bodenentwicklung die Kultivierung von Nassreis. Einerseits werden hierbei die Böden zeitweise künstlich bewässert und überstaut, andererseits sorgt das Puddling (vgl. Kapitel 3.1) für die Ausbildung einer verdichteten, wasserstauenden Pflugsohle (vgl. JANSSEN 2008). Im Folgenden werden die für das Untersuchungsgebiet charakteristischen Böden anhand von vier aufgenommenen Leitprofilen (vgl. Abbildungen 4.4, 4.5, 4.6 und 4.7) beschrieben (Leitprofile A-D, Bodenart, Lagerungsdichte und Humusgehalte nach KA5).

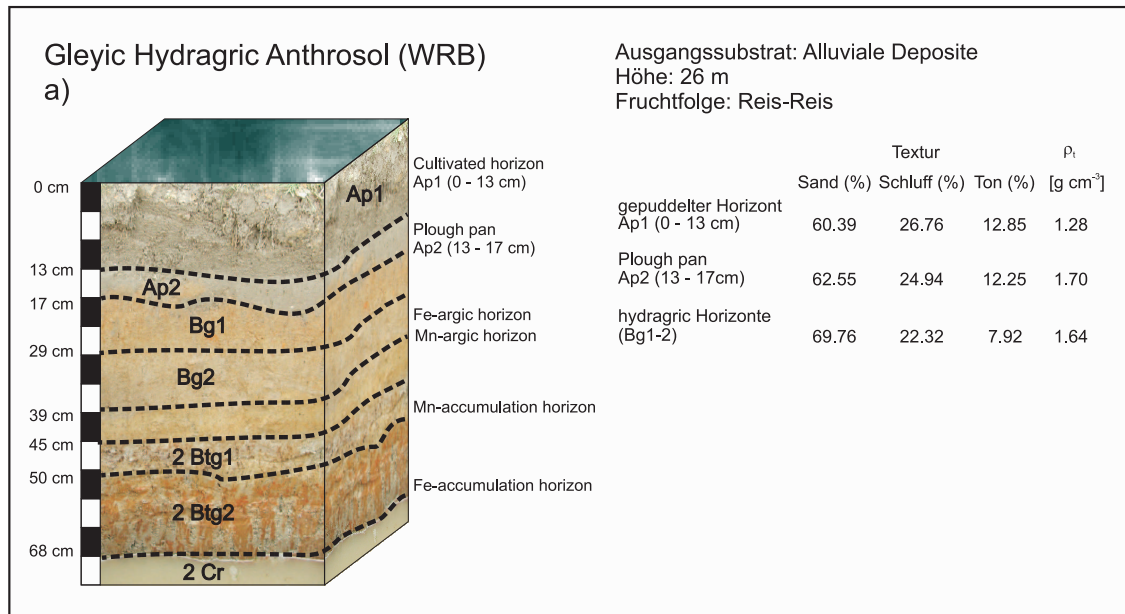


Abbildung 4.4: Allgemeine Charakterisierung des Bodenprofils Standort A und ausgewählte Bodenkennwerte des im Untersuchungsgebiet typischen Gleyic Hydragric Anthrosols aus alluvialen Depositen. Kennzeichnung der Korngrößenfraktionen nach KA5

Leitprofil A: Gleyic Hydragric Anthrosol aus alluvialen Depositen unter ackerbaulicher Nutzung (Reis-Reis-Fruchtfolge)

Das Leitbodenprofil A zeigt die Charakteristik eines typischen *Gleyic Hydragric Anthrosols* (vgl. Abbildung 4.4). Das Ausgangssubstrat der Bodenbildung sind hier jüngere alluviale Flussablagerungen, deren Bodengenese durch eine lang andauernde Nutzung durch Reisanbau geprägt ist. Die Humusgehalte reichen von mittel humos (Ap1 des gepuddelten Oberbodens) bis sehr schwach humos. Unterhalb der verdichteten Pflugsohle treten im oberen Unterboden (schwach bis stark lehmiger Sand) deutlich hydromorphe Merkmale (Eisen- und Manganoxide) infolge der Stauwasserbeeinflussung in Erscheinung. Hervorgerufen werden diese einerseits durch die episodischen Überstauungen der Bewässerungspraxis, andererseits durch den relativ dichten, tonangereicherten unteren Bereich des Unterbodens (Btg1-2; lehmig-schluffiger Sand, bzw. mittel toniger Lehm), der im Einflussbereich des Grundwassers liegt und folglich eine Anreicherung von Eisen- und Manganoxiden aufweist. Gesamtheitlich zeigt das Profil die typischen Merkmale eines Bodens, der maßgeblich durch nasse Kultivierung geprägt wurde (vgl. ZECH & HINTERMAIER-ERHARD 2002 und SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Für die physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften sei auf die Tabellen 4.1 und 4.2 verwiesen.

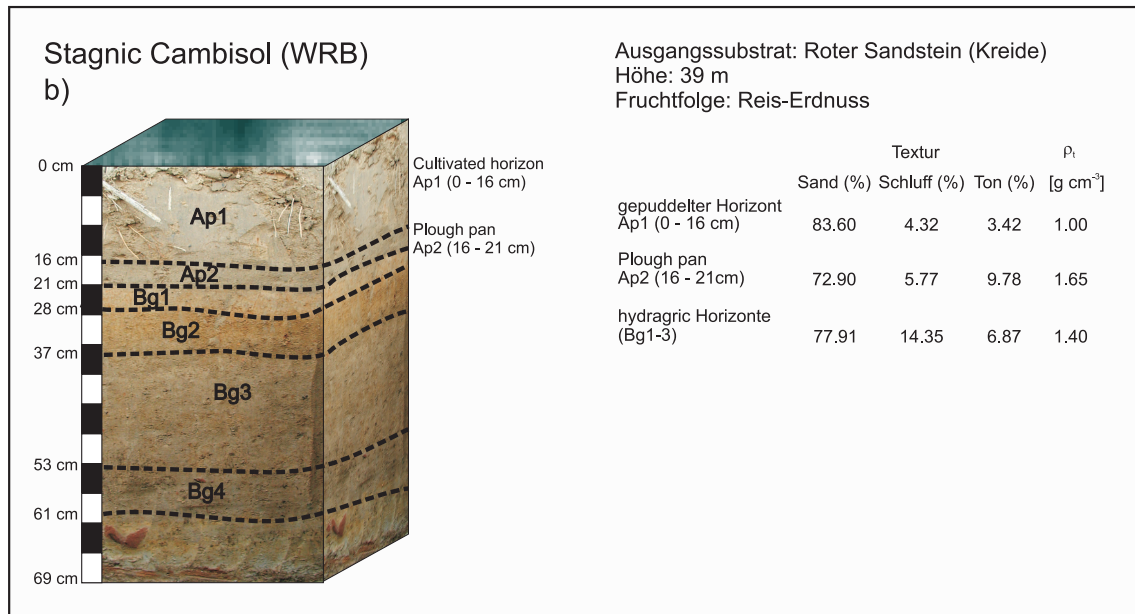


Abbildung 4.5: Allgemeine Charakterisierung des Bodenprofils Standort B und ausgewählte Bodenkennwerte des im Untersuchungsgebiet typischen Stagnic Cambisols auf rotem Sandstein. Kennzeichnung der Korngrößenfraktionen nach KA5

Leitprofil B: *Stagnic Cambisol* auf rotem Sandstein unter ackerbaulicher Nutzung (Reis-Erdnuss-Fruchtfolge)

Das Leitbodenprofil B zeigt die Charakteristik eines *Stagnic Cambisols* (stauwasserbeeinflusste Braunerde). Maßgebliche bodenbildende Prozesse sind die Verbraunung und die damit einhergehende Verlehmung des sandigen Ausgangssubstrates des roten Sandsteins. Der vergleichsweise hohe Sandgehalt der Bodenmatrix (reiner Sand bis schwach toniger, bzw. schwach lehmiger Sand) ist somit als geogen erklärbar. Innerhalb des Profil sind bzgl. der Bodenart keine vertikalen Umlagerungen erkennbar, eine Beeinflussung durch Grundwasser liegt nicht vor. Der Humusgehalt ist durchweg sehr schwach humos, die pH-Werte liegen im schwach bis sehr schwach sauren Bereich. Die zeitweise Nutzung in Form der Nasskultur (Reis im Wechsel mit Erdnuss) haben eine deutlich verdichtete Pflugsohle entstehen lassen. Das Profil zeigt jedoch infolge der hohen Wasserleitfähigkeit des Substrates im Unterboden nur vergleichsweise gering ausgeprägte hydromorphe Eigenschaften. Für die physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften sei auf die Tabellen 4.3 und 4.4 verwiesen.

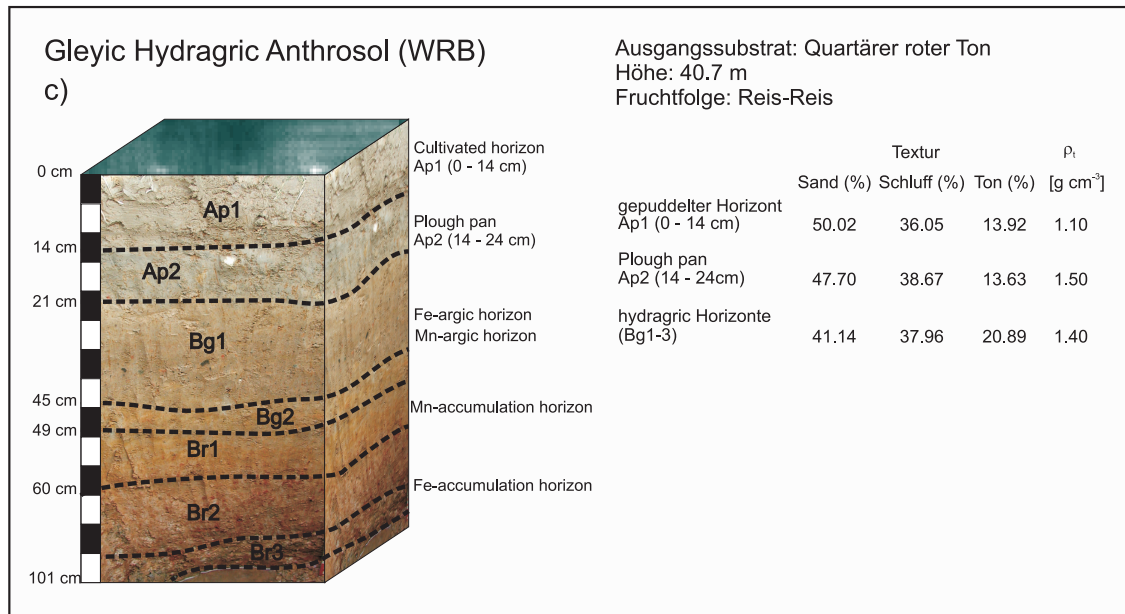


Abbildung 4.6: Allgemeine Charakterisierung des Bodenprofils Standort C und ausgewählte Bodenkennwerte des im Untersuchungsgebiet typischen Gleyic Hydragric Anthrosols aus quartärem rotem Ton. Kennzeichnung der Korngrößenfraktionen nach KA5

Leitprofil C: Gleyic Hydragric Anthrosol aus quartärem rotem Ton unter ackerbaulicher Nutzung (Reis-Reis-Fruchtfolge)

Das Leitprofil C zeigt entsprechend der Horizontfolge des Leitprofils A einen Hydragric Anthrosols (vgl. Abbildung 4.4). Jedoch geht dessen Entstehung auf ein anderes Ausgangssubstrat, den quaternären roten Ton, zurück. Die Verwitterungsprodukte sind entsprechend tonreicher bei geringerem Sandgehalt (stark lehmiger Sand bis schwach toniger Lehm). Kennzeichnende Bodenbildungsprozesse und Merkmale sind auch hier die Tonverlagerung, die durch Stauwasser hervorgerufene Hydromorphie im oberen Unterboden (Bg1 und 2) und der Grundwassereinfluss im tieferen Unterboden (Br1-3). Neben den typischen Eigenschaften von Nasskulturböden tritt auch hier ein Verdichtungshorizont (Pflugsohle) infolge des Puddlings auf. Für weitere physikalische und chemische Bodeneigenschaften wird auf die Tabellen 4.5 und 4.6 verwiesen.

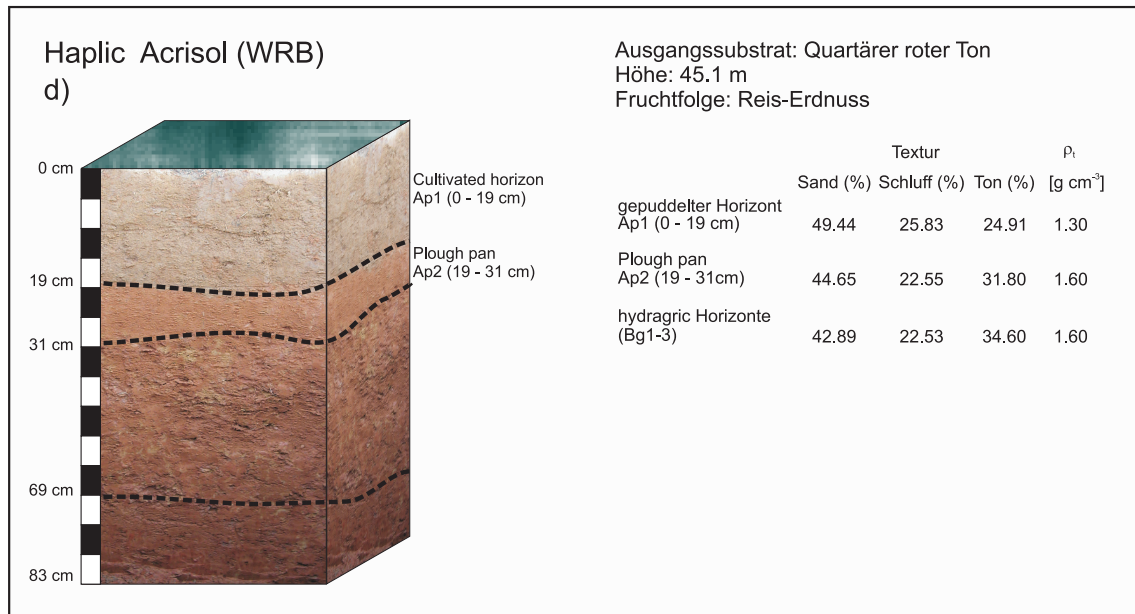


Abbildung 4.7: Allgemeine Charakterisierung des Bodenprofils Standort D und ausgewählte Bodenkennwerte des im Untersuchungsgebiet typischen Haplic Acrisol aus quartärem rotem Ton. Kennzeichnung der Korngrößenfraktionen nach KA5

Leitprofil D: Haplic Acrisol aus quartärem rotem Ton unter ackerbaulicher Nutzung (Reis-Erdnuss-Fruchtfolge)

Das Leitprofil D zeigt die Charakteristik eines typischen *Haplic Acrisol* nach WRB, entstanden aus quartärem rotem Ton wie zuvor beschrieben, jedoch etwas höher gelegen. Der relativ geringe FeO/FeD-Quotient liefert Hinweise auf eine starke tiefgründige Verwitterung der Horizonte. Eine Tonverlagerung ist festzustellen; das Leitprofil verzeichnet die durchschnittlich höchsten Tongehalte der Leitprofile (stark sandiger Lehm bis tonig-sandiger Lehm). Der gepuddelte Oberboden ist sehr schwach humos und weist die geringsten pH-Werte auf (mäßig sauer). Deutlich geringere Hydromorphiemerkmale finden sich Oberboden. Der Unterboden weist keine Hydromorphiemerkmale auf (kein Grundwasser-Einfluss). Es ist anzunehmen, dass es sich um einen sehr jungen Nassreisboden handelt. Eine geringe Basensättigung infolge vorherrschender 2-Schicht-Tonminerale ist gegeben. (vgl. ZECH & HINTERMAIER-ERHARD 2002 und SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Für die physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften ist auf die Tabellen 4.7 und 4.8 verwiesen.

4 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

Tabelle 4.1: Detaillierte Charakterisierung des Bodenprofils anhand ausgewählter bodenphysikalischer Eigenschaften für den Standort A

Horiz.	oT	uT	Munsell	ρ_t	gS	mS	fS	gU	mU	fU	T
	[cm]			[g cm ³]	[Gew. - %]						
Ap1	0	13	2.5Y 3/2	1.28	1.27	14.07	45.06	8.36	12.69	5.71	12.85
Ap2	13	17	2.5Y 4/2	1.70	1.66	15.38	45.51	8.42	12.47	4.05	12.52
Bg1	17	29	7.5 YR 5/8	1.64	2.37	19.19	48.19	7.55	10.57	4.20	7.92
Bg2	29	45	10YR 4/6	1.50	0.75	13.16	34.99	10.59	20.87	4.28	15.36
2 Btg1	45	50	10YR 5/2	1.50	0.54	7.59	34.47	10.84	19.95	9.76	16.86
2 Btg2	50	68	10YR 6/4	1.60	0.00	0.56	16.23	9.92	22.76	13.52	37.01

Tabelle 4.2: Detaillierte Charakterisierung der chemischen Bodeneigenschaften des Bodenprofils für den Standort A

Horiz.	Ctot	Ntot	C/N	pH	P	K	Ca	Mg	K	Na	Al	KAKeff	Feo/Fed
	[Gew. - %]			(CaCl ₂)	[mg/kg]	[mg/kg]	[cmolc/kg]					[mg/kg]	
Ap1	1.554	0.169	9.20	5.22	30.92	40.75	1.94	0.97	0.09	0.03	0.69	3.72	0.12
Ap2	0.547	0.069	7.93	5.25	20.91	43.15	0.99	0.68	0.08	0.02	1.35	3.12	0.19
Bg1	0.223	0.038	5.87	5.56	14.01	52.20	1.22	0.61	0.09	0.01	1.80	3.73	0.04
Bg2	0.215	0.039	5.51	5.60	8.63	51.85	1.50	0.81	0.11	0.02	1.70	4.14	0.02
2 Btg1	0.207	0.044	4.70	5.60	12.71	55.10	1.86	0.89	0.10	0.02	2.04	4.89	0.06
2 Btg2	0.259	0.060	4.32	5.89	14.81	47.95	4.54	1.34	0.10	0.04	1.88	7.90	0.02

Tabelle 4.3: Detaillierte Charakterisierung des Bodenprofils anhand ausgewählter bodenphysikalischer Eigenschaften für den Standort B

Horiz.	oT	uT	Munsell	ρ_t	gS	mS	fS	gU	mU	fU	T
	[cm]			[g cm ³]	[Gew. - %]						
Ap1	0	16	10YR 5/3	1.00	1.02	12.88	69.70	7.97	3.88	1.12	3.42
Ap2	16	21	10YR 4/4	1.65	0.53	10.80	61.57	8.12	6.31	2.89	9.78
Bg1	21	28	10YR 4/3	1.40	0.53	9.90	66.52	7.56	6.49	2.13	6.87
Bg2	28	37	10YR 4/3	1.45	0.43	10.76	68.94	5.01	5.43	2.88	6.55
Bg3	37	53	10YR 5/4	1.50	0.72	9.81	66.12	6.03	4.60	2.86	9.86
Bg4	53	61	5Y 4/6	1.50	0.65	13.88	73.48	3.34	4.09	2.80	1.78

Tabelle 4.4: Detaillierte Charakterisierung der chemischen Bodeneigenschaften des Bodenprofils für den Standort B

Horiz.	Ctot	Ntot	C/N	pH	P	K	Ca	Mg	K	Na	Al	KAKeff	Feo/Fed
	[Gew. - %]			(CaCl ₂)	[mg/kg]	[mg/kg]	[cmolc/kg]					[mg/kg]	
Ap1	0.338	0.045	7.51	4.88	23.23	23.75	0.58	0.12	0.05	0.02	1.67	2.44	0.27
Ap2	0.267	0.038	7.03	5.21	10.18	53.20	1.94	0.52	0.12	0.03	1.74	4.34	0.06
Bg1	0.166	0.029	5.72	5.8	8.83	24.15	2.82	1.01	0.05	0.01	1.32	5.23	0.07
Bg2	0.122	n.n.	-	5.95	10.07	18.55	2.62	1.48	0.04	0.02	0.95	5.11	0.10
Bg3	0.079	n.n.	-	6.09	6.77	30.30	4.42	1.72	0.05	0.04	1.51	7.74	0.07
Bg4	0.066	n.n.	-	6.28	2.47	24.35	5.88	1.49	0.07	0.05	1.28	8.76	0.05

4.3 Böden

Tabelle 4.5: Detaillierte Charakterisierung des Bodenprofils anhand ausgewählter bodenphysikalischer Eigenschaften für den Standort C

Horiz.	oT	uT	Munsel	ρ_t	gS	mS	fS	gU	mU	fU	T
	[cm]			[g cm ³]	[Gew. - %]						
Ap1	0	14	10YR 4/4	1.10	0.70	7.63	41.69	14.56	16.91	4.58	13.92
Ap2	14	24	2.5 Y 4/2	1.50	0.76	9.13	37.81	15.86	16.40	6.41	13.63
Bg1	24	45	10YR 4/6	1.40	1.42	8.99	35.18	14.03	15.67	7.67	17.04
Bg2	45	49	10YR 5/6	1.40	0.31	5.84	35.67	15.68	14.04	8.20	20.25
Br1	49	60	10YR 4/6	1.40	0.33	3.57	32.12	14.05	15.95	8.59	25.38
Br2	60	69	7.5YR 4/6	1.40	0.11	2.90	37.01	10.76	12.59	7.32	29.32
Br3	69	101	7.5YR 5/6	1.50	0.22	4.33	51.27	13.09	9.19	5.84	16.06

Tabelle 4.6: Detaillierte Charakterisierung der chemischen Bodeneigenschaften des Bodenprofils für den Standort C

Horiz.	Ctot	Ntot	C/N	pH	P	K	Ca	Mg	K	Na	Al	KAKeff	Feo/Fed
	[Gew. - %]			(CaCl ₂)	[mg/kg]	[mg/kg]	[cmolc/kg]					[mg/kg]	
Ap1	1.596	0.168	9.50	4.85	10.24	42.95	1.27	0.36	0.08	0.10	1.57	3.38	0.50
Ap2	1.184	0.092	12.87	4.93	11.18	20.80	0.75	0.32	0.04	0.04	2.25	3.40	0.16
Bg1	0.483	0.049	9.86	4.9	34.06	19.70	0.83	0.25	0.04	0.03	2.99	4.14	0.10
Bg2	0.289	0.042	6.88	4.73	11.16	25.10	0.61	0.17	0.05	0.03	3.06	3.91	0.09
Br1	0.229	0.043	5.33	4.93	13.17	50.30	0.83	0.24	0.09	0.04	4.03	5.22	0.06
Br1	0.123	n.n.	-	4.88	14.01	42.95	0.99	0.34	0.11	0.04	4.84	6.32	0.05
Br2	n.n.	n.n.	-	4.76	10.72	42.45	0.59	0.19	0.11	0.03	5.63	6.54	0.05

Tabelle 4.7: Detaillierte Charakterisierung des Bodenprofils anhand ausgewählter bodenphysikalischer Eigenschaften für den Standort D

Horiz.	oT	uT	Munsel	ρ_t	gS	mS	fS	gU	mU	fU	T
	[cm]			[g cm ³]	[Gew. - %]						
Ap1	0	19	7.5YR 4/6	1.30	0.87	10.96	37.44	8.68	10.96	6.19	24.91
Ap2	19	31	2.5 YR 4/6	1.60	1.09	10.84	33.72	6.02	6.57	9.96	31.80
Bt1	31	69	2.5 YR 4/6	1.60	0.87	10.29	31.73	6.82	10.40	5.31	34.60
Bt2	69	83	10YR 4/3	1.60	0.79	10.39	32.52	7.23	9.71	4.07	35.29

Tabelle 4.8: Detaillierte Charakterisierung der chemischen Bodeneigenschaften des Bodenprofils für den Standort D

Horiz.	Ctot	Ntot	C/N	pH	P	K	Ca	Mg	K	Na	Al	KAKeff	Feo/Fed
	[Gew. - %]			(CaCl ₂)	[mg/kg]	[mg/kg]	[cmolc/kg]					[mg/kg]	
Ap1	0.572	0.075	7.63	4.9	2.53	83.8	1.16	0.51	0.30	0.02	2.24	4.22	0.17
Ap2	0.139	0.007	19.86	4.79	n.n.	32.3	1.14	0.59	0.23	0.01	2.53	4.50	0.02
Bt1	0.08	0.035	2.29	4.84	n.n.	20.15	0.76	0.47	0.08	0.01	4.54	5.86	0.02
Bt2	0.092	0.032	2.88	4.63	n.n.	18.3	0.20	0.13	0.04	0.01	4.91	5.28	0.02

4.4 Landnutzung

Der Nassreis wird in den für diese Region typischen Reisfeldern (Paddies) mit Flächengrößen von durchschnittlich 750 m² angebaut. Das Fruchtfolgesystem zeichnet sich durch den zweimaligen Anbau von Reis innerhalb eines Jahres aus. Die erste Anbauphase ist von Mai bis Juli. Die

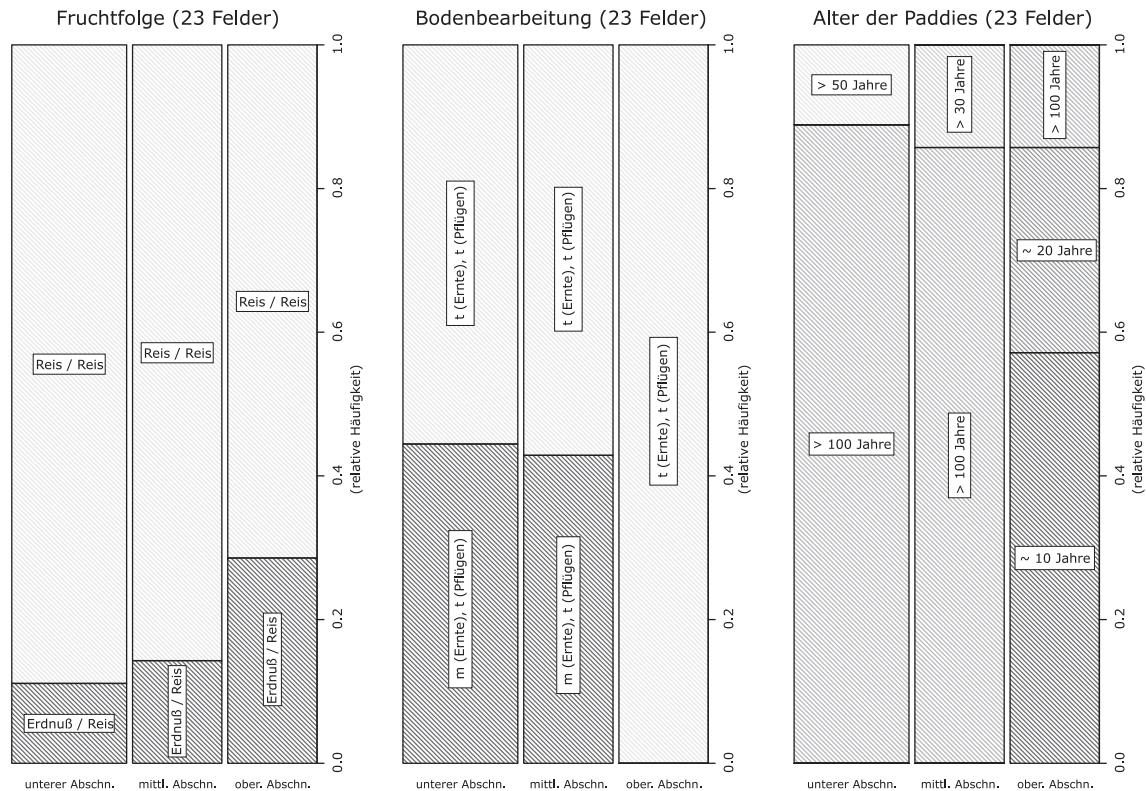


Abbildung 4.8: Bewirtschaftungsverhalten im Untersuchungsgebiet. Dargestellt sind zwei Managementfaktoren und das approximierte Alter der Reisfelder bezogen auf die relative Position innerhalb der Toposequenz. Die Breite der Säulen ist in Abhängigkeit der absoluten Zahlen der betrachteten Felder dargestellt, t = traditionell; m = maschineller Einsatz

zweite Anbauphase von Juli bis Oktober. In der zweiten Anbauphase werden besonders in oberen Hanglagen von Juni bis Oktober neben Reis auch Erdnüsse (*Arachis hypogaea*) angebaut. Zwischen den Reisfeldern wird Soja kultiviert. Die Bodenbearbeitung wird sowohl traditionell, das heißt mit Wasserbüffeln auf den kleineren Feldern, als auch maschinell zum Ernten, Pflügen und Puddeln durchgeführt. Eine maschinelle Bodenbearbeitung wird ausschließlich auf den größeren Feldern durchgeführt (s. Abbildung 4.8). Die Ebenen wurden früher landwirtschaftlich genutzt als die Hänge bzw. die Kuppenbereiche. Die Hänge sind terrassiert und wurden unter Anwendung von Bewässerungsmaßnahmen der landwirtschaftlichen Produktion zugänglich gemacht.

5 Methoden

Die Methodik umfasst die Durchführung und Planung der Beprobungsstrategie sowie die Entwicklung und Erstellung der Regionalisierungsgrundlage für die Feldskala, die catenare Skala und die Landschaftsskala. Darüber hinaus schließt die Methodik die Modellierung bodenhydrologischer Parameter und die Klassifizierung der Landnutzung ein, zudem die Berechnung der Vegetationsindizes $NDVI$ und $NDVI_{green}$. Die Abbildung 5.1 zeigt das methodische Vorgehen inklusive multivariat-statistischer Verfahren und die Bewertung bzw. die Analyse von Unsicherheiten innerhalb der durchgeführten Untersuchung.

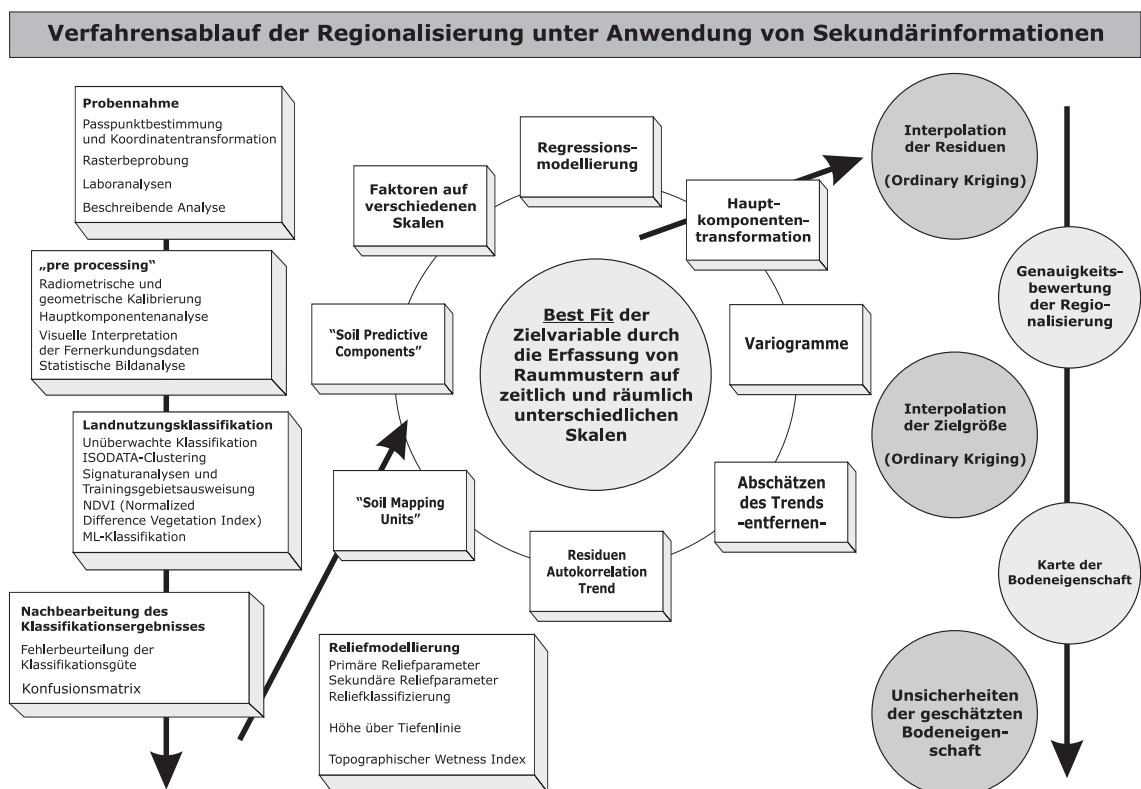


Abbildung 5.1: Methodisches Vorgehen zur Regionalisierung von Bodeneigenschaften unter Verwendung von Sekundärinformationen und der Betrachtung von Unsicherheiten in der Regressionsmodellierung

5.1 Beprobungsstrategie und Labormethoden

Zur Erfassung der räumlichen Variabilität von bodenphysikalischen Eigenschaften auf der Feldskala, der catenaren Skala und der Landschaftsskala (vgl. Abbildung 5.2) wurde jeweils in den Monaten September und Oktober der Jahre 2004, 2005 und 2006 eine Bohrstockkartierung durchgeführt. Als Vorinformation für die Erstellung des Probenrasters konnte auf Kartenmaterial und Fernerkundungsdaten zurückgegriffen werden. Die Horizonte wurden im Rahmen eines genesteten Ansatzes und integrierter geostatistischer Rasterbeprobung mit einer Rasterweite von 150 m für die Landschaftsskala diagnostisch beprobt. Auf als repräsentativ angesehenen Flächen wurde die Beprobung intensiviert. Das sind im Weiteren die Toposequenz A und die drei Hangpositionen auf der Toposequenz A (s. Abbildung 5.2). Der Bodenprobenumfang

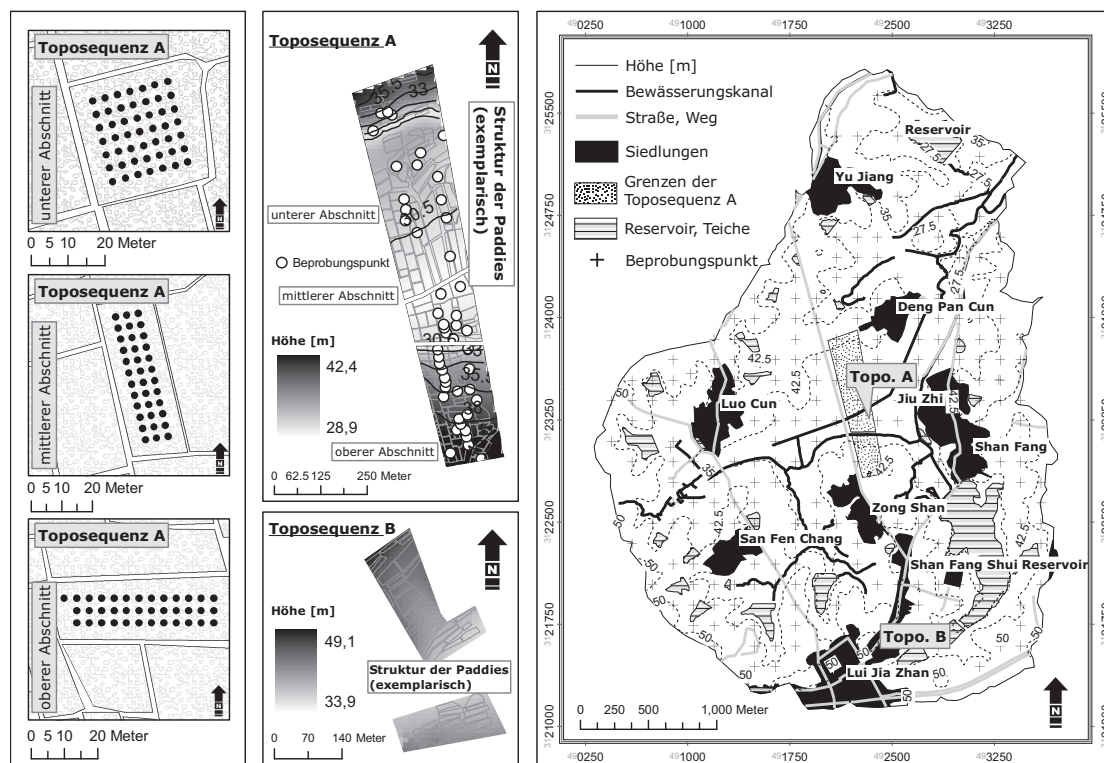


Abbildung 5.2: Die Beprobungsstrategie in der Übersicht. Die Landschaftsskala, catenare Skala und die Feldskala

für die Landschaftsskala umfasst insgesamt 212 Datensätze jeweils für den gepuddelten Horizont und für die Pflugschleife. Die Korngrößenverteilung der Sand-, Schluff- und Tonfraktion des gepuddelten Horizontes und der Pflugschleife wies jeweils eine bimodale Verteilung auf. Die Gründe liegen darin, dass das Ausgangsgestein über das Substrat die Korngrößenverteilung mitbestimmt. Diese Verteilung ist für einfache geostatistische Auswertungen nicht zu verwenden. Für die Differenzierung des Beprobungsdatensatzes wurde eine hierarchische Clusteranalyse nach WARD angewandt. Die angewandte Clusteranalyse separiert den Tongehalt mittels der euklidischen Distanz zum Klassenmittelpunkt. Mit Hilfe des Verfahrens konnte ein Datensatz

gewonnen werden, der das Ausgangssubstrat des roten Sandsteins und den Datensatz des Ausgangssubstrats des quartären Tons repräsentiert (s. Abbildung 5.3). Die maximale Distanz der

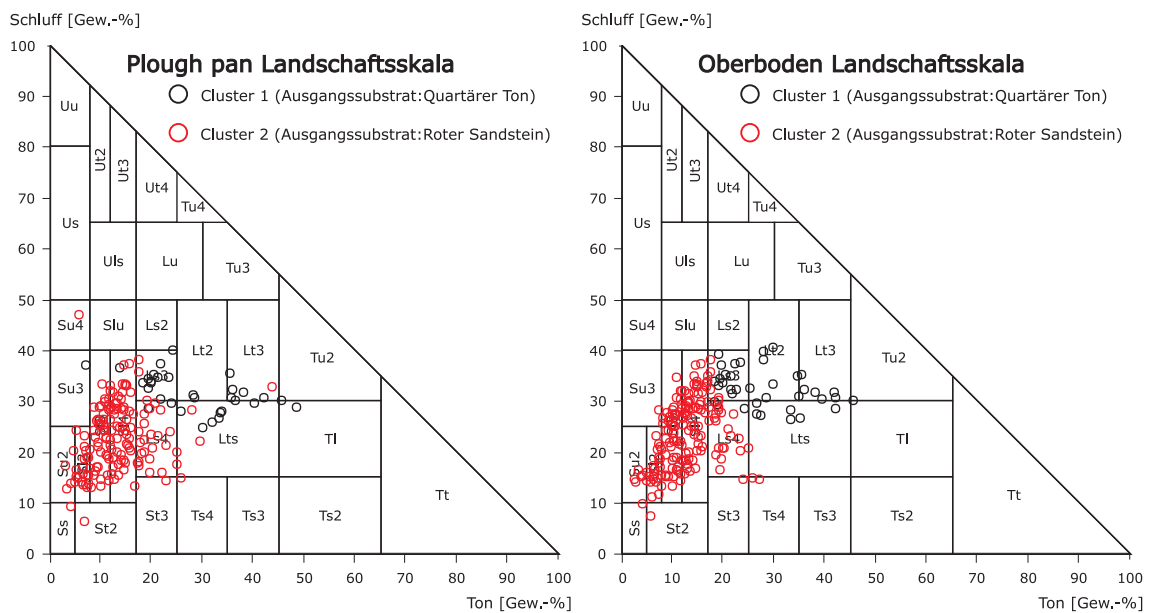


Abbildung 5.3: Clusteranalyse der Korngrößenverteilung des Oberbodens und der Pflugschale für die gesamten Beprobungspunkte auf Grundlage des Tongehaltes Gew. – %, Landschaftsskala.

Beprobung liegt bei 4000 m. Für die Integration der Fernerkundungsdaten und der Reliefmodelle wurden sogenannte Pufferzonen erstellt. Der vorhandene Lagefehler von bis zu 20 m, resultierend aus GPS-Messungen, konnte somit verringert werden. Es hat sich herausgestellt, dass ein Pufferbereich von 20 m verlässliche und an die vorhandene Struktur der Reisfelder angepasste Werte ergab. Die Rasterbeprobung wurde stellenweise entlang von Transekten durch Zwischenpunkte verengt. Die catenare Skala wurde im Rahmen der Beprobungskampagne 2004 und 2005 beprobt. Die Beprobung umfasste sowohl die Verortung von 51 sogenannten Monitorpedozellen auf der Toposequenz A im Gebiet des roten Sandsteins als auch die Erfassung der Toposequenz B in dem tonreichen Gebiet im süd-östlichen Teil des Untersuchungsgebietes. Für die weitere Untersuchung wird jedoch ausschließlich auf die Bereiche des sandreichen Gebietes im zentralen Teil des Untersuchungsgebietes eingegangen (Toposequenz A). Die maximale Ausdehnung der Toposequenz beträgt 1100 m. Die kartierten Felder innerhalb der Toposequenz A umfassen 208 Felder mit einer Fläche von 27.6 m² bis zu 4873.9 m². Die Flächenausdehnung der Reisfelder (Paddies) beträgt im Mittel 765.9 m² mit einer Standardabweichung von 675 m². Dabei ist auffällig, dass die Felder im mittleren Teil der Toposequenz im Vergleich größer sind als im oberen Teil der Toposequenz. Für die Aufnahme der Wuchs- und Ertragseigenschaften wurden pro Feld 5 Monitorpedozellen beprobt. Kurz vor der Ernte im Nov. 2004 wurden auf jedem Reisfeld insgesamt 20 Reispflanzen, d.h vier Reispflanzen pro Monitorpedozelle, 3 cm oberhalb der Geländeoberfläche geerntet. Nachdem zuerst die Wuchshöhe der Reispflanze ermittelt wurde, wurde der Reis anschließend zur Bestimmung des Kornertrages gedroschen. Danach wurden die Reispflanzen im Trockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und zur Ermittlung der Trockenbiomasse auf Basis von 20 Reispflanzen

gewogen. Für die statistische und geostatistische Analyse wurde ausschließlich die Reisvarietät (*Oryza sativa L. Yingzouwan*) verwendet. Die statistische Auswertung und Charakterisierung der Parameterverteilung der Wuchs- und Ertragseigenschaften sind in Kapitel 6.3 zu finden. Die Beprobung der Feldskala erfolgte im Jahr 2005 an drei ausgewählten Positionen innerhalb der Toposequenz A. Es wurden repräsentative Paddies im unteren, im mittleren sowie im oberen Hangbereich ausgewählt. Das im Weiteren als „unteres“ Feld angesprochene Feld hat eine Größe von 1100 m² und wurde mit einer Anzahl von 49 Beprobungspunkten untersucht. Das im Weiteren als „mittleres“ Feld bezeichnete Feld hat eine Größe von 925 m² und wurde mit einer Anzahl von 36 Beprobungspunkten erfasst. Das im Weiteren als „oberes“ Feld definierte Feld hat eine Größe von 961 m² und umfasst 37 Beprobungspunkte. Zusätzlich zu der Bohrstockkartierung sind im Jahre 2006 gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten und Lagerungsdichten für die Pflugsohle und den gepuddelten Horizont innerhalb der Toposequenzen bestimmt worden. Eine Übersicht über die gemessenen gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten und die erfassten Lagerungsdichten liefert Abbildung 6.16. Für alle Proben sind standardisierte Labormethoden verwendet worden. Für die Fraktionen Ton, Grob-, Mittel- und Feinschluff sowie Grob-, Mittel- und Feinsand wurde die Bodenart mit Hilfe eines kombinierten Sieb- und Sedimentationsverfahrens ermittelt (BERNHARDT, 2003). Der Gesamtkohlenstoffgehalt und der Gesamtstickstoffgehalt wurden mittels C/N-Analyzer EURO EA der Firma Hekatech bestimmt (DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2007).

5.2 Sekundärinformationen und Ableitung der Regionalisierungsgrundlage

Die Erzeugung der Regionalisierungsgrundlage basiert auf der für die catenare Skala und Landschaftsskala durchgeführte Beprobungsstrategie. Die Reliefparameter sind mit Hilfe von DIGEM (CONRAD, 2001) berechnet. Die verwendeten Vegetationsparameter wurden innerhalb der Softwareumgebung ENVI/IDL berechnet. Im Folgenden wird kurz auf die Berechnung der verschiedenen Reliefparameter/Reliefindizes (MOORE ET AL., 1993; BEVEN, 2003) eingegangen.

5.2.1 Morphometrische Informationen

Die hier gezeigten geomorphometrischen Parameter wurden unter Verwendung eines Höhenmodells, das aus einer Topographischen Karte (Maßstab 1:10000) erstellt wurde, berechnet. Folgende Parameter sind in die Analyse integriert worden: Primäre Reliefparameter, wie die relative Höhe (H_r), die Hangneigung (β) und der Konvergenz/Divergenz-Index (CDI); darüber hinaus die vertikale Wölbung (C_v), die horizontale Wölbung (C_h) und das spezifische Einzugsgebiet (A_s) je Rasterzelle. Als sekundäre Reliefparameter sind eingeflossen: die Hö-

he über Tiefenlinie (H_{ch}), der topographische Feuchteindex (TWI), der Stream-Power-Index (Ω) und der LS-Faktor (LS). Die folgende Auflistung zeigt die Eigenschaften der verwendeten Reliefparameter in der Übersicht:

- die relative Höhe (H_r) [m] des Untersuchungsgebietes repräsentiert die originären Höhendaten mit Bezug zum tiefsten Punkt (dem Auslass im Einzugsgebiet) im Untersuchungsgebiet,
- die Höhe über Tiefenlinie (H_{ch}) [m] erfasst die Höhendifferenz zwischen Tiefenlinie bzw. dem aus dem Höhenmodell abgeleiteten Fließnetzwerk und der Rasterzelle (CONRAD, 2001),
- die Hangneigung (β) [°] ist der Winkel zwischen Geländeoberkante und der dazugehörigen Oberfläche einer horizontalen Ebene (ZEVENBERGEN & THORNE, 1987),
- die Vertikalkrümmung (C_v) [m^{-1}] definiert die Veränderung in Richtung der größten Neigung (MOORE ET AL., 1992),
- die Horizontalkrümmung (C_h) [m^{-1}] definiert die Veränderung transvers zur größten Neigung (MOORE ET AL., 1992),
- der Konvergenz/Divergenz-Index (CDI) [-] indiziert Konzentration ($CDI > 1$) oder Dispersion ($CDI < 1$) hinsichtlich der Rasterzellenfließwege des Oberflächenabflusses,
- der topographische Feuchteindex (TWI) [-] beschreibt unter Betrachtung der Hangneigung und des spezifischen Einzugsgebietes die reliefabhängigen Feuchtebedingungen im Einzugsgebiet $= \ln\left(\frac{A_s}{\tan\beta}\right)$ (BEVEN & KIRKBY, 1979; MOORE ET AL., 1993),
- der Stream-Power-Index (Ω) [-] betrachtet ebenfalls unter Verwendung der Hangneigung und des spezifischen Einzugsgebietes das erosive Potenzial des Reliefs $= A_s * \tan\beta$ (BEVEN & KIRKBY, 1979; MOORE ET AL., 1993),
- der LS-Faktor (LS) [-] indiziert unter Verwendung der Hangneigung und empirischer Parameter Erosionsprozesse im Einzugsgebiet (vgl. DESMET & GOVERS 1995; MITASOVA ET AL. 1996, $= \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^m \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^n$),
- das spezifische Einzugsgebiet (A_s) beschreibt unter Betrachtung der Fließwege die dazugehörige Größe des (spezifischen) Einzugsgebietes, (vgl. CONRAD 2001).

5.2.2 Multispektrale Informationen

Die multispektralen Informationen umfassen Landsat 7 ETM+, ASTER/Terra und Spot5-Daten. Die Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die Aufnahmezeitpunkte und die entsprechen-

den multispektralen Kanäle der Sensoren. Die Vorverarbeitung der Szenen umfasste eine einfache Atmosphärenkorrektur mit Hilfe einer „Dark object subtraction“ und einer anschließenden Berechnung spektraler Reflexionsgrade für die jeweiligen Szenen. Neben physikalisch basierten

Tabelle 5.1: Die im Rahmen dieser Untersuchung verwendeten multispektralen Fernerkundungsdaten

Satellit/Sensor	Zeitpunkt	Repetitionzeit	Kanäle	Spektrale Auflösung
Spot-5	29. Sep. 2005	2-3 Tage	MS: 10 m	Grün: 500-590 nm Rot: 610-680 nm Nahes IR: 780-890 nm
			SWI: 20 m	Kurzwelliges IR: 1,580-1,750 nm
			Pan: 2.5 m	Pan: 480-710 nm
ASTER/Terra	5. October, 2001	16 Tage	VNIR 1: 10 m	Grün: 0,520 nm - 0,600 nm
			VNIR 2: 10 m	Rot: 0,630 nm - 0,690 nm
			VNIR 3A: 10 m	Nahes IR: 0,780 nm - 0,860 nm
			VNIR 3B: 10 m	Nahes IR: 0,780 nm - 0,860 nm
			SWIR 4-9: 30 m	Kurzwelliges IR: 1,600 nm - 2,430 nm
			TIR 10-14: 90 m	Thermales IR: 8,125 nm - 11,65 nm
Landsat 7 ETM+	23. Sep. 2000	16 Tage	MS: 30 m	Blau-Grün: 450 - 520 nm Grün: 520 - 600 nm Rot: 630 - 690 nm Nahes IR: 760 - 900 nm Kurzwelliges IR: 1,55 - 1,73 μm Kurzwelliges IR: 2,08 - 2,35 μm
			MS: 60 m	Thermales IR: 10,4 - 12,5 μm
			Pan: 15 m	Pan: 0,52 - 0,90 μm
			IR = Infrarot; VNIR = visible near infrared; TIR = thermal infrared; SWIR = short wave infrared	

Atmosphärenkorrekturen wie Atcor, die aufgrund des hohen Datenaufkommens nicht angewendet werden konnten, sind radiometrische Korrekturen auf Grundlage von zeit-invarianten Pixel- bzw. Oberflächenstrukturen durchzuführen. Die Szenen sind koregistriert. Eine genaue Darstellung der Methodik ist in CANTY ET AL. (2004) sowie DU ET AL. (2002) gegeben. Die geometrische Korrektur erfolgte ebenfalls durch Koregistrierung der Szenen zueinander, um einen möglichst geringen Lagefehler in den Daten vorzuhalten. Anschließend erfolgte die Berechnung der spektralen Reflexionsgrade für die Szenen des Untersuchungsgebietes.

5.2.2.1 Vegetationsindizes

Die Vegetationsindizes *Normalized Vegetation Index* und *Normalized Vegetation Index green* (vgl. Gleichung 5.1 und 5.2) (GITELSON ET AL., 1996) liefern die multispektralen Informationen bzw. die Kovariablen für die Bodenregionalisierung. Wie bereits in Kapitel 3.2 betont, können diese Vegetationsindizes genutzt werden, um mögliche abiotischen Stressfaktoren, wie beispielsweise Wasserstress oder Nährstoffmangel, im Reflexionsgrad der Vegetation zu identifizieren. Arbeiten von PETTORELLI ET AL. (2005); YANG & SU (2000, 1999, 1998); ALDAKHEEL & DANSON (1997) bestätigen diesen Zusammenhang. Die Vegetationsindizes werden

genutzt, um übereinstimmende Muster zwischen den pedohydrologischen Eigenschaften des Nassreisbodens und der spektralen Information aus Fernerkundungsdaten zu erfassen.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (5.1)$$

$$NDVI_{green} = \frac{NIR - G}{NIR + G} \quad (5.2)$$

5.2.2.2 Klassifizierung der Vegetationsindizes und multispektrale Landnutzungsklassifizierung

Die Einteilung der Vegetationsindizes in die drei Klassen $NDVI_{high}$, $NDVI_{medium}$ und $NDVI_{low}$, erfolgte auf der Grundlage des Isodata-Klassifizierungsalgorithmus nach TOU & GONZALEZ (1974). Das Isodata-Verfahren basiert auf der Grundlage der euklidischen Distanz zum Klassenmittelwert und separiert die Werte in einem iterativen Prozess hinsichtlich ihrer Klassenmittelwerte (s. Abbildung 5.4). Für die multispektrale Landnutzungsklassifizierung des Jahres 2005 wurde der Maximum-Likelihood-Klassifikations-Algorithmus angewandt (JENSEN, 2006). Die abgeschätzte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Klasse Reis r_i wird mit folgender Gleichung ermittelt:

$$\hat{p}(x|r_i) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}} \hat{\sigma}_i} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(x - \hat{\mu}_i)^2}{\hat{\sigma}_i^2} \right] \quad (5.3)$$

mit:

$\hat{p}(x|r_i)$: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Klasse Reis

$\hat{\sigma}_i$: geschätzte Varianz aller Messungen in der Klasse i

$\hat{\mu}_i$: geschätzter Mittelwert der Klasse i

Die multivariate Form der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$p(X|r_i) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} |V_i|^{\frac{1}{2}}} \exp \left[-\frac{1}{2} (X - M_i)^T V_i^{-1} (X - M_i) \right] \quad (5.4)$$

mit:

$p(X|r_i)$: n-dimensionale multivariat normalverteilte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Klasse Reis

V_i : Kovarianzmatrix

M_i : Mittelwert des Vektors i

$(X - M_i)^T$: transponierter Vektor

Die Vektoren M_i und die Kovarianz (vgl. Gleichung 5.3.2) V_i für jede Klasse werden aus einem

Trainingsdatensatz geschätzt. Die Bewertung der Klassifizierungsgüte wurde nach CONGALTON (1991) durchgeführt. Die Abbildung 5.5 zeigt die klassifizierte, für die weitere statistische Auswertung genutzten Flächen der Reisfelder.

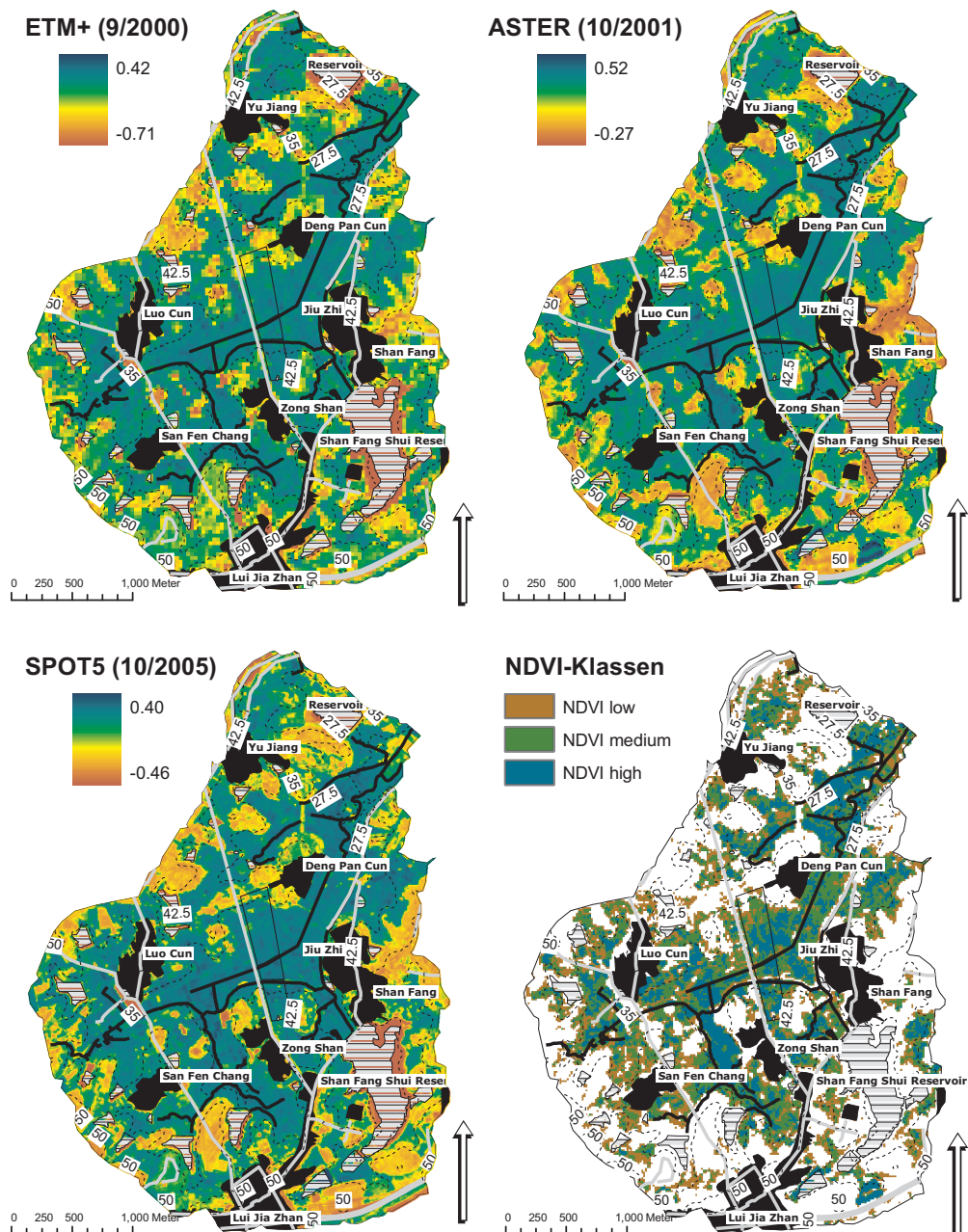


Abbildung 5.4: Darstellung der Vegetationsindizes der Szenen Landsat ETM+ (9/2000); SPOT5 (10/2005); ASTER/Terra (10/2001). Zusätzlich dargestellt sind die klassifizierte NDVI

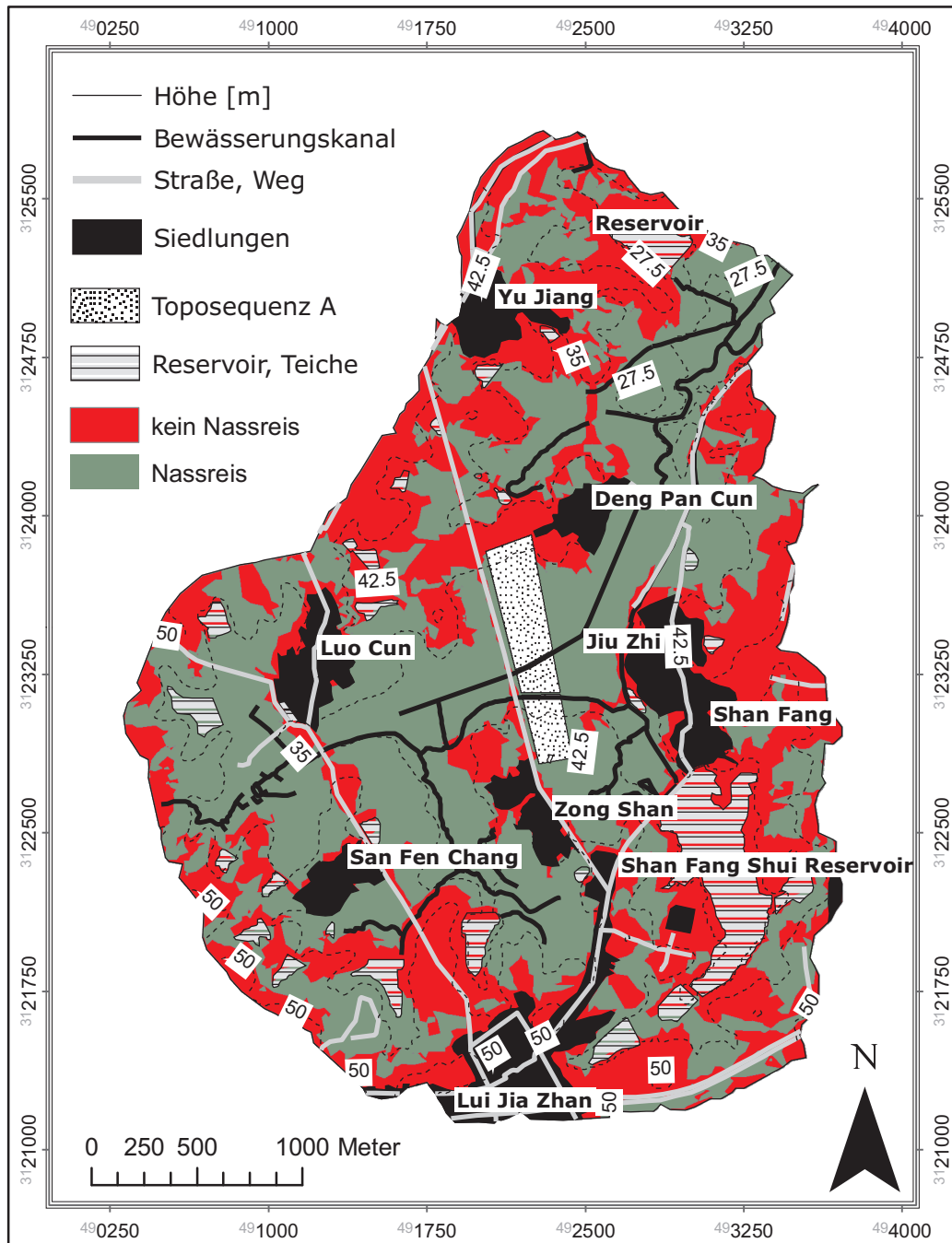


Abbildung 5.5: Multispektrale Landnutzungsklassifizierung auf Grundlage der SPOT5-Szene (10/2005) mit einer Auflösung von 20 m. Dargestellt sind die Flächen, die als Anbaufrucht Nassreis aufweisen

5.3 Verwendete statistische Verfahren

Für die Erfassung der räumlichen Variabilität und der Bodenregionalisierung werden unterschiedliche multivariate und geostatistische Verfahren genutzt. Um die statistische Signifikanz zwischen den Gruppenmittelwerten (Position im Hang) im Rahmen der Varianzanalyse zu testen, wurde der Bonferroni-Test (multipler Vergleichstest oder Post-Hoc-Test) durchgeführt. Dieser Test ist konservativer als der Fisher-LSD-Test. Eine detaillierte Erläuterung verschiedener Post-Hoc-Tests geben SACHS & HEDDERICH (2006). Die Daten wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung getestet. Falls keine Normalverteilung vorlag, wurden die Daten transformiert (Wurzel- bzw. Logarithmustransformation oder Box-Cox-Transformation).

5.3.1 Regressionsmodellierung

Im Rahmen der Regressionsmodellierung sind unterschiedliche Voraussetzungen bzw. sehr umfangreiche Bedingungen zu berücksichtigen, über die an dieser Stelle ein kurzer Überblick gegeben werden soll. Heteroskedastizität (auch Residuen-Varianzheterogenität) bedeutet in der Statistik unterschiedliche Streuung innerhalb einer Datenmessung. Die Varianzheterogenität ist vor allem in der empirischen Forschung bzw. bei der Anwendung von Regressionsmodellen relevant. An dieser Stelle sei betont, dass bei Betrachtung der Residuen auf Normalverteilung die Aussagekraft und damit das Vorhersageergebnis nicht wie erwartet mit Hilfe des RMSE (root mean square error) bewertet werden kann, wenn keine Normalverteilung der Residuen vorliegt. Ein weiterer Aspekt ist die sogenannte Multikollinearität. Sie ist ein Phänomen der Regressionsanalyse und liegt vor, wenn die Annahme über die Unabhängigkeit der Regressoren verletzt wird, was Inkonsistenzen der verwendeten statistischen Methoden nach sich zieht. Der räumliche autokorrelierte Fehler wird gemäß LARK (2000) berücksichtigt. Im Folgenden wird ausgehend von der einfachen linearen Regression die multiple Regression dargestellt. Die abhängige Variable γ hängt linear von mehreren fest vorgegebenen Kovariablen x_1, \dots, x_n ab. Somit erhält man die Formel:

$$\gamma = \alpha + \beta_1 \cdot x_1 \dots + \beta_n \cdot x_n + \varepsilon \quad (5.5)$$

mit:

γ : abhängige Variable

x_n : unabhängige Variable

α : Achsenabschnitt

β : Steigung

x : Parameter

ε : Störgröße

Dabei repräsentiert ε die Störgröße bzw. die Residuen. ε ist eine Zufallsvariable und demzufolge ist γ als lineare Transformation von ε ebenfalls eine Zufallsvariable. n gibt die Anzahl der Kovariablen oder die Dimension des Kovariablenvektors $\underline{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ an. In der einfachen linearen Regression wurde nur der Fall $n = 1$ betrachtet, ausgehend davon wird die multiple Regression als Verallgemeinerung dessen mit $n \geq 2$ angenommen.

5.3.2 Geostatistische Verfahren

Die Theorie der regionalisierten Variablen (realization of random function) basiert auf Arbeiten von MATHERON (1965). Hierzu wird eine Variable $Z(x)$, die die Werte einer Größe in Abhängigkeit vom Ort x angibt, als regionalisierte Variable bezeichnet.

$$Z(x) = m(x) + e'(x) + e'' \quad (5.6)$$

mit:

$m(x)$: strukturelle Komponente (konstanter Mittelwert)

$e'(x)$: zufällige Komponente, räumlich korreliert

e'' : unkorreliertes, zufälliges Rauschen

Falls kein Trend vorhanden ist, ist die Differenz zwischen zwei Beprobungspunkten x und $x+h$ ($h = \text{Distanz}$) gleich 0 bzw. der Erwartungswert gleich dem Mittelwert für die Beprobungspunkte. Dies wird auch als Stationarität 2. Ordnung bezeichnet.

$$E[Z(x) - Z(x+h)] = 0 \quad (5.7)$$

Aus dieser Gleichung resultiert die betrachtete Kovarianzfunktion.

$$\text{cov}(x_i, x_j) = E[(Z(x_i) - \mu)(Z(x_j) - \mu)] = \text{var}[Z(x)] \quad (5.8)$$

mit:

$Z(x_i)$: Realisation der Zufallsvariable Z an Ort (x_i)

μ : Erwartungswert der Zufallsvariable $Z(x)$

Eine Abschwächung der Voraussetzungen wird durch die intrinsische Hypothese gewährleistet. Es wird angenommen, dass die Differenzen der Werte stationär sind, räumlich invariant. Dies entspricht der bekannten Semivarianzfunktion.

$$2\gamma(h) = \text{var}[Z(x_i) - Z(x_i + h)] = E[(Z(x_i) - Z(x_i + h))^2] \quad (5.9)$$

mit:

$\gamma(h)$: Semivarianz

(h) : Abstandsvektor h

$Z(x + h)$: Merkmalsausprägung für Z an Ort $(x + h)$; $Z(x_i + h)$: Merkmalsausprägung für Z an Ort $(x_i + h)$

Falls nun die Voraussetzungen zur intrinsischen Hypothese erfüllt sind, kann entsprechend die Semivarianz (Gleichung 5.10) berechnet werden. Die intrinsische Hypothese verlangt einen konstanten Erwartungswert im Untersuchungsraum. Die Daten der betrachteten Toposequenz weisen Felder nicht stationärer Zufallsvariablen auf. Eine Anwendung instationärer Verfahren, wie beispielsweise die implizite Trendbehandlung, sind hierbei notwendig, Residuen-Kriging, Universal-Kriging und External-Drift-Kriging. In der Geostatistik wird die räumliche Struktur mittels Variogrammen erfasst. Das Variogramm stellt die Semivarianz zwischen zwei Punkten als Funktion ihrer Distanz grafisch dar.

Variogramm-Modellierung

Die Berechnung der Semivariogramme erfolgt auf Grundlage der Beprobungspunkte.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (5.10)$$

mit:

$\gamma(h)$: Semivarianz

(h) : Abstandsvektor h

$2m(h)$: Anzahl der Werte mit Abstand und Richtung h voneinander

$Z(x_i)$: Merkmalsausprägung für Z an Ort (x_i)

$Z(x_i + h)$: Merkmalsausprägung für Z an Ort $(x_i + h)$

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_S \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{für } h \leq a \\ C_0 + C_S & \text{für } h > a \end{cases} \quad (5.11)$$

mit:

(h) : Abstandsvektor

$2m(h)$: Anzahl der Werte mit Abstand und Richtung h voneinander

$Z(x_i)$: Merkmalsausprägung am Ort $Z(x_i)$; $Z(x_i + h)$: Merkmalsausprägung am Ort $Z(x_i + h)$

C_0 : Nuggetvarianz; C_S : Schwellenwert (partial sill)

Ein sogenanntes „Overfitting“, ein zu komplexes Modell sollte in jedem Fall vermieden werden. Ein kompliziertes Modell, welches sehr viele Parameter integriert, liefert nicht zwangsläufig bessere bzw. genauere Ergebnisse (GOOVAERTS, 1999). Für die Darstellung der Semivarianzen wurden unterschiedliche Variogrammmodelle angepasst. Für das Regression Kriging (RK) wurden zur Vergleichbarkeit ausschließlich sphärische Modelle angepasst. Zur Berechnung der

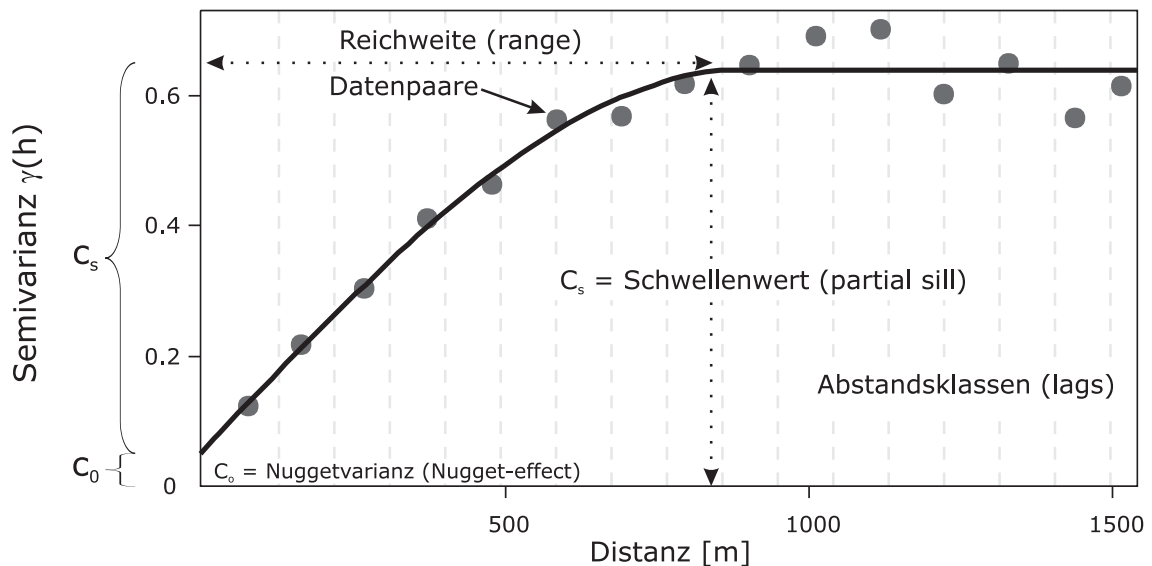


Abbildung 5.6: Beispiel für ein sphärisches Variogramm inklusive der experimentell abgeleiteten Datenpaare. Dargestellt sind der Schwellenwert, die Nuggetvarianz sowie die Reichweite. Darstellung der Einteilung in Abstandsklassen (Lags).

Semivarianz wird je nach Literatur ein Drittel oder die Hälfte der maximalen Gebietsausdehnung zu Grunde gelegt. Variieren die Eigenschaften in einem bestimmten Gebiet nicht zufällig, sondern folgen einem starken Trend (auch Drift genannt), die Erwartungswerte der Eigenschaften hängen von der geographischen Lage ab, so spiegelt sich dies in einem parabolischen Verlauf des Variogramms im Bereich großer Entfernungen wieder (JOURNEL & ROSSI, 1989). In diesem Fall ist die intrinsische Hypothese verletzt und eine Sonderform des Kriging, wie bereits kurz erwähnt, kommt zum Einsatz, das sogenannte Universal-Kriging (GOOVAERTS, 1997). Zur Klassifizierung der räumlichen Autokorrelation wurde der Quotient nach CAMBARDELLA ET AL. (1994) (s. Gleichung 5.12) genutzt.

Die Wertebereiche des klassifizierten Ratios reichen von 0 % bis 25 %, 25 % bis 75 % und >75 %. Der erste Wertebereich zeigt an, dass eine stark strukturierte räumliche Abhängigkeit (S) vorliegt. Räumlich stark strukturierte Abhängigkeiten sind gewöhnlich verursacht durch intrinsische Faktoren, wie beispielsweise Bodenbildungsfaktoren. Der zweite Wertebereich zeigt an, dass eine mittlere strukturierte räumliche Abhängigkeit (M) vorliegt, der Wertebereich >75 % zeigt eine schwach strukturierte räumliche Abhängigkeit (W) und einen hohen Grad an unerklärter Variabilität vorliegt. Räumlich schlecht strukturierte Abhängigkeiten sind normalerweise durch extrinsische Faktoren, wie durch das Bodenmanagement bzw. die Bodenbearbeitung verursacht.

$$NSR = \frac{C_0}{C_0 + C_S} \times 100 \quad (5.12)$$

mit:

NSR : Nugget-Sill-Ratio

C_0 : Nuggetvarianz

C_S : Schwellenwert (partial sill)

Kriging

Für approximativ normalverteilte räumliche Daten ist die klassische Methode der räumlichen Statistik (CHILES & DELFINER, 1999) das Kriging. Die Modellierung und die entsprechende Inferenz (Schlussfolgerung) ist ähnlich der von linearen (gemischten) Regressionsmodellen (GLM), basieren aber auf stationären Gauß-Prozessen (Gauß-Zufallsfelder, Gaussian Random Fields etc.). Der erwartete räumliche Zusammenhang ermöglicht die Ableitung von Vorhersagen an unbeprobten Positionen. Falls räumlich unkorrelierte Werte vorliegen, ist der beste lineare Schätzer von $\hat{Z}_{OK}(x_i)$ das globale Mittel $mean\ m = E[Z]$.

$$\hat{Z}_{OK}(x_i) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (5.13)$$

mit:

$\hat{Z}_{OK}(x_i)$: Zielgröße (Ordinary-Kriging)

λ_i : Kriging-Gewichte

Die Gewichtungen müssen hierbei in der Summe 1 ergeben:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (5.14)$$

und der erwartete Fehler

$$E[\hat{Z}_{x_i} - Z_{x_i}] = 0 \quad (5.15)$$

Die Krigingvarianz ermittelt sich wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{var}[\hat{Z}_{x_i}] &= E[\{\hat{Z}_{x_i} - Z_{x_i}\}] \\ &= 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i, x_j) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (5.16)$$

mit:

$\gamma(x_i, x_j)$: Semivarianz von Z zwischen den Punkten x_i und x_j

$\gamma(x_i, x_o)$: Semivarianz zwischen x_i und der Zielgröße x_o

Die Krigingvarianz kann bei annähernd normalverteilten Werten als Quantifizierung der Unsicherheit genutzt werden (CHILES & DELFINER, 1999). Falls die Krigingvarianz eine Normalverteilung aufweist (die Verteilung wird somit ausschließlich durch den Mittelwert (Null) und deren Varianz bestimmt), kann die Krigingvarianz interpretiert werden. In diesem Zusammenhang ist es dann möglich, eine Aussage zur Eintrittswahrscheinlichkeit mit Hilfe des Mittelwertes $\hat{Z}_{x_i} - Z_{x_i}$ und der Krigingvarianz 2σ zu machen (CHILES & DELFINER, 1999).

$$Pr(|\hat{Z}_{x_i} - Z_{x_i}| > 2\sigma K) \simeq 0.05 \quad (5.17)$$

mit:

Pr : Wahrscheinlichkeit bei entsprechendem Signifikanzniveau von 0.05

$2\sigma K$: Krigingvarianz

Kriging zielt auf die Optimierung der Gewichte $\lambda_\alpha(u)$, die zu einer Minimierung der zuvor genannten Krigingvarianz führen sollen. Die einfache Berechnung führt zum sogenannten Simple Kriging (SK). Bei dem angewandten Regression Kriging (RK) werden die Residuen der Regression zur Berechnung der Semivarianz genutzt. Mittels Ordinary Kriging (OK) werden die Residuen interpoliert und abschließend das Regressionsergebnis und Interpolationsergebnis der Residuen addiert. Die Gleichungen 5.18 und 5.19 zeigen die Regression-Kriging-Varianten Model B (Gleichung 5.18) und Model C (Gleichung 5.19). Weitere Ausführungen geben HENGL ET AL. (2007a); GOOVAERTS (1997) und ODEH ET AL. (1995).

$$Z_{RKB}^* = Z^* + Z_\epsilon^* \quad (5.18)$$

mit:

Z_{RKB}^* : geschätzte Zielvariable Z_{RKB}^* mittels Regression Kriging Modell B

Z^* : mittels Ordinary Kriging geschätzte Originalvariable Z^* (aus der Regression)

Z_ϵ^* : mittels Ordinary Kriging geschätzte Residuen Z_ϵ^*

$$Z_{RKC}^* = Z_{pr}^* + Z_\varepsilon \quad (5.19)$$

mit:

Z_{RKC}^* : geschätzte Zielvariable Z_{RKC}^* mittels Regression Kriging Modell C

Z_{pr}^* : mittels Regression geschätzte Originalvariable Z_{pr}^*

Z_ε : mittels ordinary Kriging geschätzte Residuen Z_ε

Die methodischen Schwierigkeiten des Regression Krigings liegen darin, dass die zu integrierenden Residuen normalverteilt sein bzw. transformiert werden müssen. Die Transformation und entsprechende Rücktransformation bzw. die extreme Sensitivität hinsichtlich der Fehlerfortpflanzung sind zu beachten (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Ein allgemeines Ziel ist die Durchführung der Reduktion der Multikolarität der Zielgrößen. Bei einer zuvor durchgeführten Redundanzanalyse sind alle Variablen in die Analyse zu integrieren. Dies ist jedoch nicht unbedingt sinnvoll, weil dadurch der Ordinationsraum zu groß werden und ein sogenannter Bogeneffekt auftreten kann. Als Lösung gibt es mehrere Möglichkeiten: Eine Auswahl der Variablen erfolgt anhand bestimmter Hypothesen bzw. zuvor erworbenen Wissens. Zusätzlich kann auch eine Dimensionsreduktion mit Hilfe einer Hauptkomponentenanalyse durchgeführt werden. In dem System werden jeweils nur die wichtigsten Variablen bzw. die ersten Hauptkomponenten mit den höchsten Zusammenhängen zu den Originalvariablen integriert (vgl. Kapitel 5.3.3). Anschließend sind die höchsten Korrelationskoeffizienten herauszuarbeiten und der Modellentwurf kann überprüft werden (BOURENNANE & KING, 2003).

Validierung

Die Bewertung der Vorhersagegüte des angewandten Modells wurde mit Hilfe einer Kreuzvalidierung *LOOCV* (*Leave one out cross validation*) (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989) durchgeführt. Dieses Verfahren ist in *R/GSTAT* (PEBESMA, 2004) implementiert. Bei der LOO-Kreuzvalidierung wird sukzessive ein Beprobungspunkt aus dem Modell entfernt, um für den gesamten Datensatz iterativ die Residuen zu berechnen. Schließlich kann für alle Punkte ein *RMSE* (s. Gleichung 5.20) berechnet werden, mit Hilfe dessen man ausschließlich eine Aussage über die Güte des angewendeten Regionalisierungsmodells treffen kann. Arbeiten zur Regionalisierung von Bodeneigenschaften verwenden diese Art der Validierung (HERBST ET AL., 2006). Um jedoch über den Modellvergleich hinaus Aussagen zur Güte durchführen zu können, ist die Verwendung eines unabhängigen Datensatzes etwa in Relation 70 (*prediction set*) zu 30 (*validation set*) notwendig (GOOVAERTS, 1997). Es zeigt sich jedoch, dass sich der Fehler der Methode LOOCV, je nach Datenumfang nur gering auf die Modellgüte auswirkt (PEBESMA, 2004). Es sei darauf hingewiesen, dass die Kreuzvalidierung weder eine Methode zur Überprüfung von Hypothesen ist noch nützliche Informationen über das Ausmaß der Unsicherheiten in dem gewählten Modell zur Verfügung stellt. Informationen zu einer vorhandenen Varianzhetero-

genität werden nicht betrachtet. Die Kreuzvalidierung liefert ausschließlich einen sogenannten Performancevergleich der entwickelten Regionalisierungsmodelle. Zusätzlich zum Performancevergleich wurden Muster der ermittelten *NDVI*-Klassen genutzt, um mittels kumulierter Häufigkeiten einen Vergleich zwischen den geschätzten bodenhydrologischen Parametern und der spektralen Reflexion aus Fernerkundungsdaten abzuleiten (WEGEHENKEL ET AL., 2005). WEGEHENKEL ET AL. (2005) geht allerdings ausschließlich auf die Zusammenhänge zwischen *NDVI* und Evapotranspiration ein. Zusätzlich zum *RMSE* wurde der *RI* (Gleichung 5.21) als Maß für die prozentuale Verbesserung der Modelle herangezogen.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (5.20)$$

$$RI(\%) = \frac{(RMSE_{SIM} - RMSE_{RK})}{RMSE_{SIM}} \times 100 \quad (5.21)$$

Um die Unsicherheit der Vorhersagemethode zu quantifizieren, wurde der *NMSE* (*normalized root mean square error*, s. Gleichung 5.22) verwendet. Dieser Quotient liefert bei vorhandener Normalverteilung in Zusammenhang mit der Krigingvarianz verlässliche Informationen über die Unsicherheit bzw. auch die Eintrittswahrscheinlichkeit der Zielgröße. Unter Verwendung der Krigingvarianz wird er wie folgt ermittelt:

$$NMSE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{x_i} - \hat{Z}_{x_i})^2}{s^2} \quad (5.22)$$

mit:

Z_{x_i} : gemessener Wert Z an der Position x_i

\hat{Z}_{x_i} : vorhergesagter Wert Z an Position x_i

s^2 : Varianz der Messwerte

5.3.3 Hauptkomponententransformation

Die Hauptkomponentenanalyse (*PCA, Principal Components Analysis*) versucht Einflussfaktoren zu ermitteln, die zur Ausprägung des Merkmals beitragen (WACKERNAGEL, 2003).

Die Korrelationsmatrix geht der Hauptkomponententransformation, in der die Unterschiede der Merkmalsausprägungen bzw. die Distanzen der Relief- und Bodenparameter eines Datensatzes in Bezug auf ihre Ausprägung untereinander dargestellt sind, voraus. Stellt man diese Korrelationsmatrix räumlich dar, so enthält diese gerade so viele Dimensionen, wie verschiedene Parameter vorhanden sind. Somit wird ein n -dimensionaler Raum mit entsprechender Anzahl der Parameter als Dimension gebildet. Ähnliche Werte bilden Cluster. Das Ziel der Hauptkom-

ponententransformation besteht nun darin, Achsen der größten Varianz zu identifizieren, mit denen diese Cluster entsprechend eng korrelieren. Die neu berechneten Achsen, auch Faktoren genannt, weisen in Richtung der höchsten Varianz. Sie ersetzen die ursprünglichen Achsen des Koordinatensystems und stellen linear transformierte Werte der ursprünglichen Parameter dar. Die Faktoren werden nach ihrem Erklärungsgehalt an der Gesamtvarianz des Datensatzes geordnet, die primäre Hauptkomponente (PC 1) enthält den relativ höchsten Anteil der erklärten Varianz; sie enthält den höchsten Eigenwert. Die zweite Hauptkomponente (PC 2) steht im Hauptkomponentendiagramm rechtwinklig auf der ersten Achse, so dass die ersten beiden Hauptkomponenten oder Achsen die Ausprägungen maximal repräsentieren.

Mit anderen Worten ausgedrückt werden die Ausprägungen der n-Merkmale eines Relief- und Bodenparameters durch Drehung des Koordinatensystems des Merkmalsraumes in Richtung der stärksten Streuung in neue Werte, den Eigenwerten, transformiert. Meist entspricht die erste Hauptkomponente den wichtigsten Strukturen der großräumigen Varianz und in weiterer Folge jeweils den kleinräumigeren Varianzen. Dies hat zur Folge, dass der Informationsgehalt der letzten Hauptkomponente sehr gering ist und vernachlässigt werden kann (WACKERNAGEL, 2003).

Die Relief- und Bodenparameter werden mit Hilfe von Vektoren, ausgehend vom Koordinatenursprung dargestellt. Die Vektoren weisen in Richtung der höchsten Varianz des Parameters, ihre Länge entspricht der Größe der Varianz. So weist ein langer Parametervektor, der in die Richtung eines Clusters zeigt, darauf hin, dass dieser Parameter für die betreffende Ausprägung maßgeblich bzw. mit einem quantifizierbaren Grad verantwortlich ist. Idealerweise erfolgt die Auswahl von Regressionsparametern durch Dimensionsreduktion mit Hilfe einer Hauptkomponentenanalyse, um auch eine mögliche Kolinearität im Datenbestand aufzudecken. Es werden jeweils nur die Parameter (mit der höchsten Ladung) der wichtigsten Hauptkomponenten bei der Regressionsmodellierung berücksichtigt.

Die hier verwendeten Korrelationskreise zeigen die Ähnlichkeit der verwendeten Parameter innerhalb eines einheitlichen Kreises (der Skalen) und sind nützlich für die skalenübergreifende Bewertung der Korrelationsstrukturen zwischen den Parametern und den ersten beiden Hauptkomponenten.

5.3.4 Multivariate Geostatistik

Nachfolgend wird in Auszügen ausschließlich auf die Berechnung von Kreuz-Kovarianzen und auf das Model der Koregionalisierung eingegangen, um anschließend für die Ertragsleistung der Toposequenz mit Hilfe einer sequenziellen stochastischen Kosimulation Aussagen über die Unsicherheiten der beprobten Vegetationseigenschaften durchführen zu können. Im Krigingsystem mit variierendem Mittelwert wird die räumliche Variabilität der Eingangsparameter oft vernachlässigt. Sekundärvariablen haben ebenfalls oft eine ausgeprägte räumliche Variation

bzw. zeigen deutliche Muster von Korrelation zur Zielvariablen. In diesen Fällen ist es sinnvoll, ebenfalls die räumliche Autokorrelation für die Sekundärvariablen zu berechnen und die räumliche Korrelation zwischen der Zielvariable und den Sekundärvariablen mit Hilfe der Kreuz-Kovarianz abzuleiten. DEUTSCH & JOURNAL (1992) betonen jedoch, dass die Verwendung der Kreuz-Kovarianz nur bei engen Zusammenhängen zwischen Primärvariable und Kovariable einzusetzen ist. Die Kreuz-Kovarianz berechnet sich wie folgt:

$$\rho_{Z_1 Z_2}(h) = \frac{\text{Cov}(Z_1(u), Z_2(u+h))}{\sqrt{\text{Var}(Z_1)\text{Var}(Z_2)}} \quad (5.23)$$

Die Berechnung der Zielgröße $z_{coK}^*(u)$ von $Z_1(u)$ erfolgt durch Integration der Gewichte $\lambda_\alpha(u)$ und $\lambda_\beta(u)$ mit Hilfe der folgenden Gleichung:

$$z_{coK}^*(u) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha(u) z_1(u_\alpha) + \sum_{\beta=1}^n \lambda_\beta(u) z_2(u_\beta) \quad (5.24)$$

Die sequenzielle gaußsche Simulation basiert auf der Annahme, dass eine multivariate Normalverteilung vorliegt. In abgeschwächter Form wird eine bivariate Normalverteilung vorausgesetzt. Die Verteilung kann mit Hilfe der zwei Parameter Mittelwert und Varianz beschrieben werden. Dies schließt ein, dass alle weiteren konditionalen Verteilungen ebenfalls einer gaußschen Verteilung folgen. Mehr noch: es hebt hervor, dass der Mittelwert jeder anderen Verteilung einer Linearkombination der zuvor simulierten Datenpunkte entspricht.

$$E[Z(u_i)|Z(u_{i-1})] = z_{i-1}, \dots, Z(u_1) = z_1 = \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_j(u_i) z(u_j) = z_{SK}^*(u_i) \quad (5.25)$$

Mit den Gewichten $\lambda_j(u_i)$ aus dem SK und mit dem Ergebnis, dass die Varianz der Krigingvarianz entspricht.

$$\text{Var}[Z(u_i)|Z(u_{i-1}) = z_{i-1}, \dots, Z(u_1) = z_1] = \sigma_{SK}^2(u_i) \quad (5.26)$$

Für alle Datenpunkte der Grundgesamtheit werden konditionierte gaußsche Verteilungen berechnet.

$$G(u_i, z|(n+i-1)) = G\left(\frac{z - z_{SK}^*(u_i)}{\sigma_{SK}(u_i)}\right) \quad (5.27)$$

5.4 Abschätzung bodenhydrologischer Parameter in Reisanbausystemen

Die Abschätzung des Gehalts an Bodenwasser erfolgte durch die Parametrisierung nach VAN GENUCHTEN (1980) mit der Verwendung von Parametern aus den Pedotransferfunktionen nach WÖSTEN ET AL. (2001). Die Abschätzung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit erfolgte ebenfalls mit Hilfe der Pedotransferfunktion nach WÖSTEN ET AL. (2001).

5.4.1 Bodenwasserhaushalt

Wasser fließt in porösen Medien in Richtung abnehmender Energiehöhe H , welche mit Hilfe folgender Gleichung beschrieben werden kann:

$$H = h + z \quad (5.28)$$

Dabei steht h für die Druckhöhe und z für den vertikalen Gradienten (inklusive der aufwärts gerichteten Strömung). In ungesättigten Böden ist der Wasserfluss in der Regel abwärts gerichtet. Mit Hilfe des Darcy-Gesetzes wird der Wasserfluss $q \text{ cm d}^{-1}$ unter stationären laminaren Bedingungen mit folgender Gleichung 5.29 beschrieben:

$$q = -K(h) \left[\frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad (5.29)$$

$K \text{ cm d}^{-1}$ entspricht der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit als Funktion des Wasserdrucks h . Zusätzlich ist die Kontinuitätsgleichung des Bodens unter Betrachtung einer Störgröße $S_a(z)$ gegeben mit:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} - S_a(z) \quad (5.30)$$

Dabei steht θ für den volumetrischen Bodenwassergehalt und t für die Zeit. Die Kombination der Gleichungen 5.29 und 5.30 ergibt die generelle Gleichung zur Berechnung des Bodenwasserflusses, auch bekannt als Richards-Gleichung:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S_a(z) \quad (5.31)$$

Für die Ableitung bzw. für die Berechnung der Richards-Gleichung muss die Kurve der Wasserretention und die Ableitung der hydraulischen Leitfähigkeit bekannt sein. Der Zusammenhang zwischen θ und h (Retentionsfunktion) wird beschrieben anhand der analytischen Gleichung

nach VAN GENUCHTEN (1980):

$$\theta(h) = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{[1 + |\alpha h|^n]^{\frac{n-1}{n}}} \quad (5.32)$$

mit θ_{res} dem residualen Wassergehalt und θ_{sat} dem gesättigten Wassergehalt sowie m und n als empirische Formfaktoren. Diese Parameter sind mit Hilfe der Pedotransferfunktionen nach WÖSTEN ET AL. (2001) (Gleichungen 5.34, 5.35 sowie 5.36) abgeschätzt worden. Gleichung 5.32 in Kombination mit der Theorie von MUALEM (1976) liefert diese vielseitig einsetzbare Beziehung zwischen θ und K :

$$K(\theta) = K_{sat} S_e \left[1 - \left(1 - S_e^{n/n-1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]^2 \quad (5.33)$$

mit:

K_{sat} : gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [$cm\ d^{-1}$]

m : empirischer Faktor [-]

S_e : relative Sättigung $(\theta - \theta_{res})/(\theta_{sat} - \theta_{res})$

Die Untersuchung der Wasserretention in strukturierten Böden hat gezeigt, dass sich unimodale Modelle der Porengrößenverteilung nicht immer befriedigend an die empirischen Daten anpassen lassen. Bei Anwesenheit von Makroporen, die für den Transport von Wasser und darin gelösten Stoffen bedeutungsvoll sein können, treten Abweichungen zwischen gemessenen Wassergehalten und den angepassten Funktionswerten auf. Diese Unsicherheiten haben Veranlassung gegeben, mehrmodale Modelle der Porengrößenverteilung bzw. der Wasserretention in Böden zu entwickeln. Diese gehen von der Vorstellung aus, dass die repräsentative Grundgesamtheit aus n -Regionen besteht, die bezüglich ihrer Porengrößenverteilung unterschiedlich sind (VOGEL ET AL., 2000). Effekte der Porosität im Hinblick auf die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit speziell für Reisböden sind veröffentlicht in AIMRUN ET AL. (2004) und WOPEREIS ET AL. (1994b).

5.4.2 Pedotransferfunktionen

Nachfolgende Ausführungen beschreiben die verwendeten Pedotransferfunktionen (s. Gleichung 5.38), hier die *PTF* nach WÖSTEN ET AL. (2001) sowie die Ableitung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und der Wasserretentionskurve. Die Regionalisierung von Bodeneigenschaften erfordert eine hohe Stichprobenzahl im jeweiligen Untersuchungsraum. Für viele Bodeneigenschaften ist der damit einhergehende Analyseaufwand zu groß. Die Übertragung in den Raum erfolgt daher über Pedotransferfunktionen (ZHU & MOHANTY, 2002). Die Berechnung von verlässlichen bodenphysikalischen Parametern für tropische Böden ist mit Pedotransferfunktionen für temperierte Böden nicht durchzuführen (HODNETT & TOMASELLA, 2002). Aufgrund von Restriktionen hinsichtlich der Datenspannweite bzw. Extrapolation sind

der Anwendung hier Grenzen gesetzt. Beispielsweise gilt die *PTF* von RAWLS & BRAKENSIEK (1985) nur für Böden, die einen Tongehalt zwischen 5-60 % und einen Sandgehalt zwischen 5-70 % aufweisen. Kaolinitreiche tropische Böden, wie Ferralsole oder Acrisole, können jedoch Tongehalte von bis zu 70-90 % aufweisen. Darüber hinaus sind beispielsweise die hohen Lagerungsdichten der Pflugsohle von bis zu 1.75 g cm^{-3} kaum über sogenannte look up tables erfasst.

Die hier verwendete Pedotransferfunktion nach WÖSTEN ET AL. (1999) ist streng genommen nur für Böden Mitteleuropas entwickelt worden und basiert auf der HYPRES-Datenbank. Vergleichende Untersuchungen von WANG & CAI (2007) berechneten für sandige Substrate beispielsweise Eingangsgrößen für Bewässerungspläne unter Verwendung der *PTF* nach WÖSTEN ET AL. (1999). Untersuchungen von BELDER ET AL. (2007) verwendeten für Reisfelder in China und in Philippinen diese *PTF* zur Ableitung von hydraulischen Leitfähigkeiten. Ein Vergleich verschiedener *PTF* zur Ableitung von bodenphysikalischen Parametern ist in WAGNER ET AL. (2001) zu finden. Für diese Untersuchungen werden die bodenphysikalischen Parameter aus dem Tongehalt, dem Schluffgehalt und dem Humusgehalt ermittelt. Der Humusgehalt ist anhand des Gesamtkohlenstoffgehalts und einer Multiplikation mit dem Faktor 1.721 abgeleitet worden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002).

$$\begin{aligned} \theta_s = & 0.7919 + 0.001691 * Ton - 0.29619 * \rho_t - 0.000001491 * Schluff^2 \\ & + 0.0000821 * OM^2 + 0.02427 * Ton^{-1} + 0.01113 * Schluff^{-1} \\ & + 0.01472 * \log(Schluff) - 0.0000733 * OM * Ton - 0.000619 * \rho_t \\ & * Ton - 0.001183 * \rho_t * OM - 0.0001664 * Topsoil * Schluff \end{aligned} \quad (5.34)$$

$$\begin{aligned} \alpha * = & 14.96 + 0.03135 * Ton + 0.0351 * Schluff + 0.646 * OM + 15.29 \\ & * \rho_t - 0.192 * Topsoil - 4.671 * \rho_t^2 - 0.000781 * Ton^2 - 0.00687 \\ & * OM^2 + 0.0449 * OM^{-1} + 0.0663 * \log(Schluff) + 0.1482 * \log(OM) \\ & - 0.04546 * \rho_t * Schluff - 0.4852 * \rho_t * OM + 0.00673 * Topsoil * Ton \end{aligned} \quad (5.35)$$

$$\begin{aligned} n * = & -25.23 - 0.02195 * Ton + 0.0074 * Schluff - 0.194 * OM + 45.5 \\ & * \rho_t - 7.24 * \rho_t^2 + 0.0003658 * Ton^2 + 0.002885 * OM^2 - 12.81 \\ & * \rho_t^{-1} - 0.1524 * Schluff^{-1} - 0.01958 * OM^{-1} - 0.2876 * \log(Schluff) \\ & - 0.0709 * \log(OM) - 44.6 * \log(\rho_t) - 0.02264 * \rho_t * Ton \\ & + 0.0896 \rho_t * OM + 0.00718 * Topsoil * Ton \end{aligned} \quad (5.36)$$

$$\begin{aligned} \lambda * = & 0.0202 + 0.0006193 * Ton^2 - 0.001136 * OM^2 - 0.2316 * \log(OM) \\ & - 0.03544 * \rho_t * Ton + 0.00283 * \rho_t * Schluff \\ & + 0.0488 * \rho_t * OM \end{aligned} \quad (5.37)$$

$$\begin{aligned} K_S * = & 7.755 + 0.0352 * Schluff + 0.93 * Topsoil - 0.967 * \rho_t^2 - 0.000484 \\ & * Ton^2 - 0.000322 * Schluff^2 + 0.001 * Schluff^{-1} - 0.0748 * OM^{-1} \\ & - 0.643 * \log(Schluff) - 0.01398 * \rho_t * Ton - 0.1673 * \rho_t * OM \\ & - 0.02986 * Topsoil * Ton - 0.03305 * Topsoil * Schluff \end{aligned} \quad (5.38)$$

mit :

$Ton = Tongehalt < 2\mu m$ [Gew. - %], $Sand = Sandgehalt (50 - 2000\mu m)$ [Gew. - %]

$\rho_t = Rohdichte trocken$ [$g\ cm^3$], $OM = Gehalt an organischer Substanz$ [Gew. - %]

$\theta_s = gesättigter Wassergehalt$ [$cm^3\ cm^{-3}$]

$\theta_r = residualer Wassergehalt = 0.01$ [$cm^3\ cm^{-3}$]

$\alpha = exp(\alpha *)$ [$1/cm$], $n = exp(n *) + 1$ [-]

$\lambda = 10(exp(\lambda *) - 1)/(exp(\lambda *) + 1)$ [-]

$K_S [cm\ d^{-1}] = exp(K_S *)$

$Topsoil = 1$; $Subsoil = 0$

Vergleichende bodenphysikalische Parameter bzw. gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten für die Pflugsohle sind in folgenden Untersuchungen gegeben: BELDER ET AL. (2007) mit K_S -Werten zwischen 0.4 bis 50 $mm\ d^{-1}$ für lehmige bis tonige Böden, XIE ET AL. (2004) mit

K_s -Werten von 0.53 mm d^{-1} , AIMRUN ET AL. (2004) mit K_s -Werten von 0.000535 bis 0.0877 cm d^{-1} , sowie CHEN ET AL. (2002) mit K_s -Werten von 0.034 bis 0.083 cm d^{-1} . Messungen von JANSSEN & LENNARTZ (2007) ergaben für lehmig-tonige Böden gesättigte Leitfähigkeiten von 28 cm d^{-1} bis zu 0.16 cm d^{-1} . Die für das sandige Gebiet ermittelten Leitfähigkeiten variieren zwischen 0.1 cm d^{-1} und 46 cm d^{-1} . Obwohl die berechneten Leitfähigkeiten der angewandten Pedotransferfunktionen recht hohe Werte aufweisen, korrespondieren diese mit den durchgeführten Messungen. Die Abbildung 5.7 zeigt die für die Punktdatensätze der Toposequenz A berechneten pedohydrologischen Parameter. Die Korngrößen und der

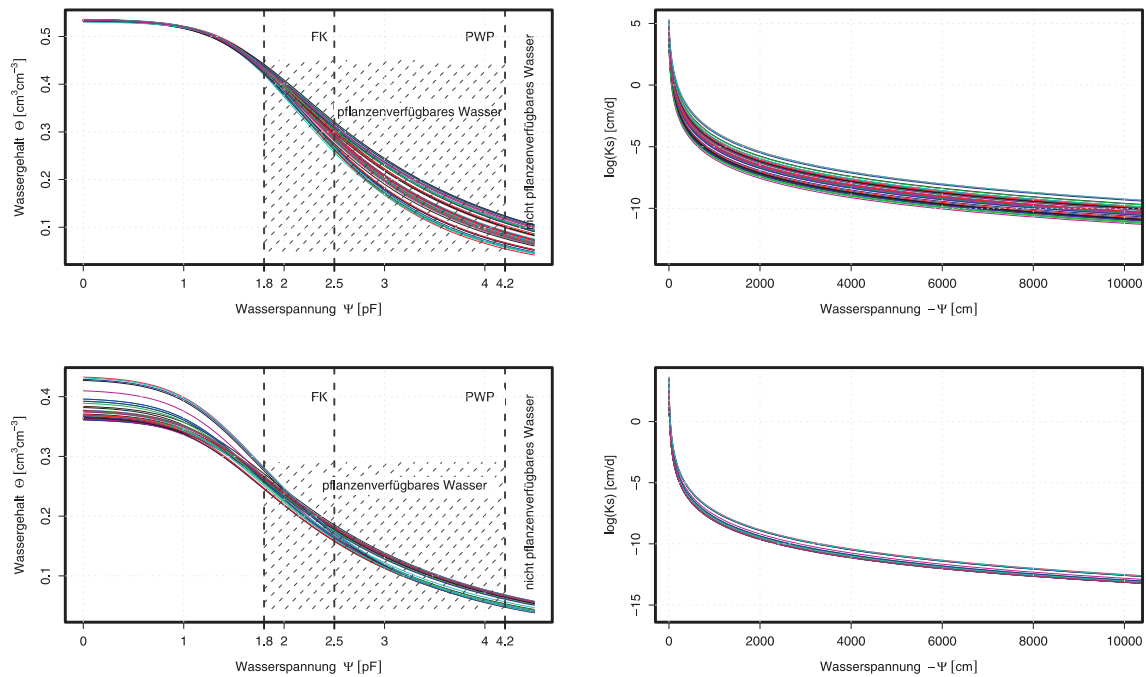


Abbildung 5.7: Retentionsfunktionen und Leitfähigkeitsfunktionen des Oberbodens und der Pflugsohle für die betrachtete Toposequenz. Pedotransferfunktionen nach WÖSTEN ET AL. (2001); VAN GENUCHTEN (1980)

Gesamtkohlenstoffgehalt der Pflugsohle für die catenare Skala sind aus den regionalisierten Ergebnissen der Landschaftsskala übernommen, die Trockenrohdichte aus den Ergebnissen der Kartierung von 2006. Der Berechnung liegen folgende mittlere Trockenrohdichten zugrunde. Für Bereiche des unteren Hangabschnittes sind Trockenrohdichten für den gepuddelten Horizont von 0.95 g cm^{-3} ermittelt worden. Für mittlere Hangbereiche sind Trockenrohdichten von 1.20 g cm^{-3} erfasst, der gepuddelte Horizont der oberen Felder weist Trockenrohdichten von 1.25 g cm^{-3} auf. Die Pflugsohle der unteren Hangbereiche weist Trockenrohdichten von 1.75 g cm^{-3} und in oberen Hangpositionen von 1.60 g cm^{-3} auf.

Im folgenden Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Bodenregionalisierung vorgestellt. Dies beinhaltet zunächst eine Analyse der räumlichen Autokorrelation bodenphysikalischer und pedohydrologischer Eigenschaften auf unterschiedlichen Skalen. Darüber hinaus erfolgt eine Überprüfung der bodenphysikalischen und pedohydrologischen Eigenschaften auf Übereinstimmung mit den aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten Mustern der Wuchs- und Ertragsleistung.

6 Ergebnisse der Bodenregionalisierung

Dieses Kapitel liefert die grundlegenden Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt für die Landschaftsskala, die catenare Skala und die Feldskala unter Berücksichtigung der räumlichen Variabilität der bodenphysikalischen und pedohydrologischen Eigenschaften. Es zeigt sich, dass eine eindeutige Skalenabhängigkeit der Korrelationsstrukturen und vor allem der räumlichen Autokorrelation vorherrscht. Abschließend werden die Zusammenhänge zwischen den räumlichen Verteilungsmustern pedohydrologischer Eigenschaften und der spektralen Reflexion aus Fernerkundungsdaten dargestellt. Die Ergebnisse sind bereits in Auszügen von SUMFLETH & DUTTMANN (2008b,a); DUTTMANN & SUMFLETH (2007) beschrieben.

6.1 Ergebnisse der Regionalisierung von Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala, der catenaren Skala sowie der Feldskala

Die bodenphysikalischen Eigenschaften der Landschaftsskala sind anhand ausgewählter statistischer Parameter dargestellt (s. Tabelle 6.1). Es folgen für jede betrachtete Skala die Darstellungen der Zusammenhänge zwischen ausgewählten Reliefparametern und multispektralen Informationen sowie den untersuchten Bodeneigenschaften. Darüber hinaus wurde mittels einer Hauptkomponententransformation die Korrelationsstruktur auf den betrachteten Skalen ermittelt.

6.1.1 Landschaftsskala

Der Unterschied zwischen der ersten und zweiten Tiefenstufe bzw. dem gepuddelten Horizont und der Pflugsohle zeigt erwartungsgemäß deutliche Unterschiede hinsichtlich der minimalen und maximalen Ausprägung des Gesamtkohlenstoffgehaltes bei einer geringeren Standardabweichung von 0.29 Gew.-% der Pflugsohle zu 0.48 Gew.-% des gepuddelten Horizontes (s. Tabelle 6.1). Der Median der Horizonttiefe des gepuddelten Horizontes beträgt 13.35 cm und ist vergleichbar mit Angaben aus DEDATTA (1981). Der Medianwert der Pflugsohlen-Mächtigkeit von 8.0 cm bei einer Standardabweichung von 5.09 cm ist als repräsentativ für das Untersu-

chungsgebiet anzusehen. Nassreisböden benötigen für eine charakteristische Entwicklung ca. 50 bis 100 Jahre (DE DATTA, 1981), somit ist die Mächtigkeit der Pflugsohle indirekt ein Indiz für die Bewirtschaftungsdauer. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung der bodenphysi-

Tabelle 6.1: Deskriptive Statistiken des Ap-Horizontes (gepuddelter Horizont) und der Pflugsohle (Plough pan) für das Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet

	Ap-Horizont (gepuddelter Horizont)					B-Horizont (Pflugsohle)				
	Tiefe [cm]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	C total [%]	Tiefe [cm]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	C total [%]
MW	14.64	15.39	25.00	59.51	1.03	9.62	15.76	24.57	59.66	0.63
MED	15.00	13.35	26.30	59.85	0.97	8.00	13.67	24.57	60.91	0.60
MIN	5.00	2.50	7.50	24.50	0.22	2.00	3.02	6.19	22.76	0.01
MAX	27.00	45.50	40.40	86.70	2.26	26.00	48.55	47.04	87.06	1.44
SA	3.66	8.11	7.07	13.20	0.48	5.09	8.80	7.12	13.29	0.29
VK (%)	25.00	52.69	28.28	22.18	46.60	52.91	55.84	28.98	22.28	46.03
n	212	212	212	212	212	212	175	175	175	175

MW = Mittelwert; MED = Median; SA = Standardabweichung; VK = Variationskoeffizient

kalischen Eigenschaften nach erfolgter Clusteranalyse (vgl. Abbildung 5.3) sind den folgenden Tabellen zu entnehmen (s. Tabelle 6.2 und 6.3). Der Sandgehalt für das Gebiet mit verwittertem roten Sandstein als Ausgangssubstrat variiert von 44 bis 86 Gew.-%. Der Tongehalt variiert von 2.5 bis 27 Gew.-%. Der Gesamtkohlenstoffgehalt variiert von geringen 0.22 bis zu 2.18 Gew.-%. Grundsätzlich ist der geringere Gesamtkohlenstoffgehalt in der Pflugsohle auffällig, der

Tabelle 6.2: Deskriptive Statistiken des Ap-Horizontes (gepuddelter Horizont) und der Pflugsohle (Plough pan) für das Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet (nur Sandsteinverwitterungsgebiete)

	Ap-Horizont (gepuddelter Horizont)					B-Horizont (Pflugsohle)				
	Tiefe [cm]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	C total [%]	Tiefe [cm]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	C total [%]
MW	14.62	12.59	23.36	63.97	1.01	9.52	13.02	22.98	64.00	0.61
MED	15.00	12.25	23.20	62.80	0.95	8.00	12.22	22.56	63.52	0.58
MIN	5.00	2.50	7.50	44.40	0.22	2.00	3.02	6.19	23.59	0.01
MAX	26.00	27.10	38.00	86.70	2.18	24.00	43.57	47.04	87.06	1.43
SA	3.65	4.75	6.55	9.43	0.49	5.24	5.76	6.74	9.91	0.28
VK [%]	25.00	37.73	28.04	14.74	48.51	55.04	44.24	29.33	15.48	45.90
n	174	174	174	174	174	174	143	143	143	143

MW = Mittelwert; MED = Median; SA = Standardabweichung; VK = Variationskoeffizient;

maximal 1.44 Gew.-% bei einem hohen Variationskoeffizienten von 45.9 % erreicht. Darüber hinaus liegen die Pflugsohlen-Mächtigkeiten um 8 cm im Sandsteingebiet und 10 cm im Gebiet des Quartären Tons bei jeweils einer Standardabweichung von 5 sowie 4.3 cm (vgl. Tabelle 6.3). Die Zusammenhänge zwischen bodenphysikalischen Eigenschaften sowie einfachen und komplexen Reliefparametern ist der Tabelle 6.4 zu entnehmen. Der in der Literatur viel benutzte Reliefparameter Hangneigung (β) weist im Vergleich nur schwache Zusammenhänge zu den Bodeneigenschaften Gesamtkohlenstoffgehalt und Schluffgehalt auf. Zwischen den Reliefparametern relative Höhe (H_r) und Höhe über Tiefenlinie (H_{ch}) sind dagegen negativ signifikante

6.1 Ergebnisse der Regionalisierung von Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala, der catenaren Skala sowie der Feldskala

Tabelle 6.3: Deskriptive Statistiken des Ap-Horizontes (gepuddelter Horizont) und der Pflugsohle (Plough pan) für das Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet (nur Red-Clay-Gebiete)

	Ap-Horizont (gepuddelter Horizont)					B-Horizont (Pflugsohle)				
	Tiefe [cm]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	C total [%]	Tiefe [cm]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	C total [%]
MW	14.73	28.21	32.52	39.08	1.14	10.11	28.01	31.67	40.31	0.76
MED	15.00	27.10	32.10	40.55	1.13	10.00	26.89	30.88	41.48	0.74
MIN	8.00	18.40	26.40	24.50	0.52	4.00	6.95	24.77	22.76	0.16
MAX	27.00	45.50	40.40	49.90	2.26	26.00	48.55	39.91	55.96	1.44
SA	3.70	8.00	3.73	7.43	0.46	4.33	9.62	3.63	8.34	0.29
VK [%]	25.12	28.36	11.47	19.01	40.35	42.83	34.34	11.46	20.69	38.16
n	38	38	38	38	38	38	32	32	32	32

MW = Mittelwert; MED = Median; SA = Standardabweichung; VK = Variationskoeffizient;

Zusammenhänge von bis zu $r = -0.58$ bezüglich des Gesamtkohlenstoffgehaltes zu verzeichnen. Diese deutlichen Zusammenhänge zwischen relativer Höhe und Gesamtkohlenstoffgehalt liegen maßgeblich an der ständigen Vernässung der unteren Felder, die durch die ständige Bewässerung und durch den relativ hohen Grundwasserstand hervorgerufen wird. Zusätzlich ist

Tabelle 6.4: Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet für den Ap-Horizont und die Pflugsohle

Param.	C tot. [%]		Mächtiggk. [cm]		Ton [%]		Schluff [%]		Sand [%]	
	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp
H_r	-0.58**	-0.29**	-0.14	0.24**	0.02	0.14	-0.50**	-0.42**	0.32**	0.19*
H_{ch}	-0.56**	-0.33**	-0.03	0.24**	-0.04	0.11	-0.45**	-0.38**	0.29**	0.16
β	-0.28**	-0.19*	0.11	0.08	0.03	0.11	-0.27**	-0.21*	0.18*	0.05
C_v	-0.26**	-0.16	-0.11	0.17*	0.20**	-0.10	-0.24**	-0.20*	0.22**	0.15
C_h	-0.21**	-0.24**	0.05	0.21**	0.05	0.01	-0.12	-0.11	0,08	0.05
CDI	-0.21**	-0.17*	-0.02	0.14	0.01	0.07	0.12*	-0.09	-0.05	0.01
TWI	0.40**	0.33**	-0.07	-0.18*	0.07	-0.10	0.35**	0.27**	-0.25**	-0.10
Ω	0.20**	0.23**	0.03	-0.08	0,07	0.02	0.19*	0.20*	-0.14	-0.14
LS	-0.08	0.03	0.13	-0.03	0,05	0.15	-0.05	0.01	-0.01	-0.11

Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman; * mindestens auf dem 99 %-Niveau signifikant; ** mindestens auf dem 99,5 %-Niveau signifikant; Ap: gepuddelter Horizont, Pp: Pflugsohle; n = 174 (Ap), n = 143 (Pp)

H_r = relative Höhe; β = Hangneigung; C_v = Vertikalkrümmung; C_h = Horizontalkrümmung;

H_{ch} = Höhe über Tiefenlinie; CDI = Konvergenz/Divergenz Index; TWI = Topographischer Feuchteindex;

Ω = Stream Power Index; LS = LS-Faktor (USLE)

anzunehmen, dass die reduzierte Zersetzung der organischen Substanz durch den häufig nassen anaeroben Boden im Tieflandbereich (alternierenden Feuchtebedingungen) zu den hohen Gehalten an Gesamtkohlenstoff beiträgt. Ähnliche Ergebnisse sind in LIU ET AL. (2004b) veröffentlicht. Für die Verteilung der räumlichen Muster des Gesamtkohlenstoffgehaltes sind eine verringerte hydraulische Leitfähigkeit der Pflugsohle und der laterale Wasserzufluss bzw. der Eintrag aus oberhalb gelegenen Feldern verantwortlich. Wie bereits erwähnt, ist jedoch die Bedeutung der Bodenbewirtschaftung über die Jahre ebenfalls stark für die entwickelten Muster

des Gesamtkohlenstoffgehaltes verantwortlich (OLK ET AL., 1996; DE DATTA, 1981). Weniger deutliche Zusammenhänge sind zwischen der Horizontmächtigkeit und den Reliefparametern relative Höhe und Höhe über Tiefenlinie für die Pflugsohle ermittelt worden (s. Tabelle 6.4). Die Reliefparameter relative Höhe (H_r) und Höhe über Tiefenlinie (H_{ch}) zeigen negativ signifikante Zusammenhänge zu dem ermittelten Schluffgehalt von $r = -0.45$ bis $r = -0.50$. Untersuchungen von IQBAL ET AL. (2005b) geben vergleichbare Ergebnisse für Auenböden

Tabelle 6.5: Regressionsmodelle für einfache bodenphysikalische Parameter und primäre sowie sekundäre Reliefparameter im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet für den Ap-Horizont

Zielvariable	H_r [m]	β [°]	H_{ch} [m]	TWI[-]	LS[-]	Intercept	R^2
C total [%]	-0.026	-	-0.055	-	-	2.12	0.35
N total [%]	-0.003	-	-0.005	-	-	0.22	0.32
Ton [%]	-0.120	0.560	-	-	-	18.16	0.07
Schluff [%]	-0.510	-	-	0.294	-	39.71	0.25
Sand [%]	0.465	-	-	-0.376	-	50.36	0.11
Ap Tiefe [cm]	-0.135	0.540	-	-	-	18.16	0.06
Pp Mächtigkeit [cm]	-	-	0.461	-	-	8.18	0.07

n = 174

an. Als Ursachen ist diesbezüglich die hangabwärtsgerichtete Verlagerung von Partikeln der Schlufffraktion mit dem Bewässerungswasser als Folge erosiver Prozesse zu nennen. Auf der Landschaftsskala wurden für alle weiteren Reliefparameter geringe Zusammenhänge mit den untersuchten Bodeneigenschaften nachgewiesen.

Die Regressionsmodellierung (s. Tabelle 6.5, 6.6 und 9.4) für die Landschaftsskala zeigt erwartungsgemäß die durch die Korrelationsanalyse bestätigten Zusammenhänge. Durch Integration der relativen Höhe (H_r) und der Höhe über Tiefenlinie (H_{ch}) konnten die Gesamtkohlenstoffgehalte im gepuddelten Horizont mit einer Varianz von 35 % erklärt werden. In Arbeiten von LIU ET AL. (2004e) wurden in unteren Hangbereichen einer Toposequenz höhere Gehalte an Gesamtkohlenstoff als in oberen Positionen ermittelt. LIU ET AL. (2004e) führen dieses Ergebnis auf die reduzierte Mineralisationsrate in einem ständig wassergesättigtem anaeroben Milieu zurück. Die Integration von multispektralen Informationen - in diesem Fall des *Normalized Vegetation Index* für die Jahre 2000, 2001 und 2005 - liefert eine relative Verbesserung von 3 bis 17 %. Für den Parameter Gesamtstickstoff ergab sich eine Verbesserung von 3 bis 12 %, für den Schluffgehalt liefert die Integration des *NDVI* eine Verbesserung von bis zu 16 %. Bei den weiteren Bodenparametern sind keine Verbesserungen erzielt worden, so dass sie in der weiteren Untersuchung nicht berücksichtigt worden sind.

Darüber hinaus berichten SAHRAWAT ET AL. (2005), dass der Vergleich von Uplandreisvarietäten oder Reis in Verbindung mit einer anderen Feldfrucht innerhalb eines Fruchtfolgesystems zu einer Anreicherung des Kohlenstoffgehaltes im gepuddelten Horizont führt. Es zeigt sich, dass auch in stark anthropogen überprägten Landschaften reliefabhängige Prozesse bzw. Eigenschaften mittels regressions-statistischen Verfahren teilweise erklärt werden können. Für die hier betrachtete Landschaftsskala sind beispielsweise die Effekte der Terrassierung eindeu-

6.1 Ergebnisse der Regionalisierung von Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala, der catenaren Skala sowie der Feldskala

Tabelle 6.6: Regressionsmodelle für einfache bodenphysikalische Parameter und primäre sowie sekundäre Reliefparameter des Ap-Horizontes und des Pp-Horizontes im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet

Zielvariable	H_r [m]	H_{ch} [m]	β [°]	TWI [-]	C [%]	N [%]	Ton [%]	Schluff [%]	Sand [%]	Intercept	R^2
C total	-0.003	-0.027	-	-	-	-	-	-	-	0.80	0.12
(%)	0.003	-	-	-	0.35	-	-	-	-	0.16	0.35
N total	-0.003	-0.0001	-	-	-	-	-	-	-	0.19	0.05
(%)	-0.002	-	-	-	-	0.29	-	-	-	0.11	0.08
Ton	0.214	-	-	-0.060	-	-	-	-	-	5.55	0.05
(%)	-	0.357	-	-	-	-	0.93	-	-	0.08	0.67
Schluff	-0.407	-	-	0.207	-	-	-	-	-	36.41	0.15
(%)	0.072	-	-	-0.080	-	-	-	0.98	-	-1.90	0.87
Sand	0.194	-	-	-0.150	-	-	-	-	-	58.04	0.02
(%)	-0.187	-	-	0.213	-	-	-	-	0.96	8.15	0.79

n = 143, H_r = relative Höhe; β = Hangneigung; H_{ch} = Höhe über Tiefenlinie;

TWI = Topographischer Feuchteindex; C = Ctotal im Ap, N = Ntotal im Ap;

Ton = Tongehalt im Ap, Schluff = Schluffgehalt im Ap;

Sand = Sandgehalt im Ap

tig zu vernachlässigen. Die Strukturen der Terrassierung werden durch das Reliefmodell nicht wiedergegeben.

Die Erfassung der räumlichen Autokorrelation erfolgt mit Hilfe der Semivarianz. Um der vorhandenen Variabilität zu genügen, wurden unterschiedliche Modelle angepasst. Die Abbildungen 6.1 und 6.2 zeigen omnidirektionale Variogramme und zusätzlich die Parameter zur Beschreibung der räumlichen Autokorrelation. Das variogrammspezifische Bestimmtheitsmaß beschreibt die Güte der Modellanpassung. Es zeigt sich, dass für den Schluffgehalt und für den Gesamtkohlenstoffgehalt in beiden Tiefenstufen ein guter räumlicher Zusammenhang erkennbar ist. Der Gesamtkohlenstoffgehalt wurde mit einem sphärischen Variogrammmodell und den Parametern zur Variabilität $C_o = 0.10$, $C_o + C = 0.26$ und $A_o = 631$ und mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.914$ angepasst. Die räumliche Abhängigkeit des Gesamtkohlenstoffgehaltes in der Pflugsohle ist dagegen gering ausgeprägt, mit einer Anpassung von $C_o = 0.056$, $C_o + C = 0.076$ und $A_o = 356$ sowie einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.67$. Im gepuddelten Horizont ist der Gesamtkohlenstoff in starkem Maße vom Bodenmanagement und indirekt von der Topographie abhängig, wie aus der Regressionsanalyse ersichtlich wird (s. Tabelle 6.5). Der relativ hohe Grad an unerklärter räumlicher Varianz ist direkt auf den Einfluss langandauernder Bodenbewirtschaftung in Kombination mit rezemtem Bodenmanagement, wie der Terrassierung und der Puddlingintensität sowie dem variierenden Strohmanagement zurückzuführen. Das empirische Variogramm wurde mit einem Abstandsintervall von 50 m und entsprechend omnidirektional berechnet. In einem Winkelintervall von 45° ist der Einfluss der Anisotropie visuell erfasst und gegebenenfalls gesondert betrachtet worden. Sphärische Variogrammmodelle mit mit dargestellten Aussageweiten und Schwellenwerten wurden als theoretisches Variogramm gewählt (s. Tabellen 6.7 und 6.8). Höhere räumliche Abhängigkeiten sind auf intrinsische Faktoren der natürlichen bodenbildenden Faktoren, Relief und Ausgangsma-

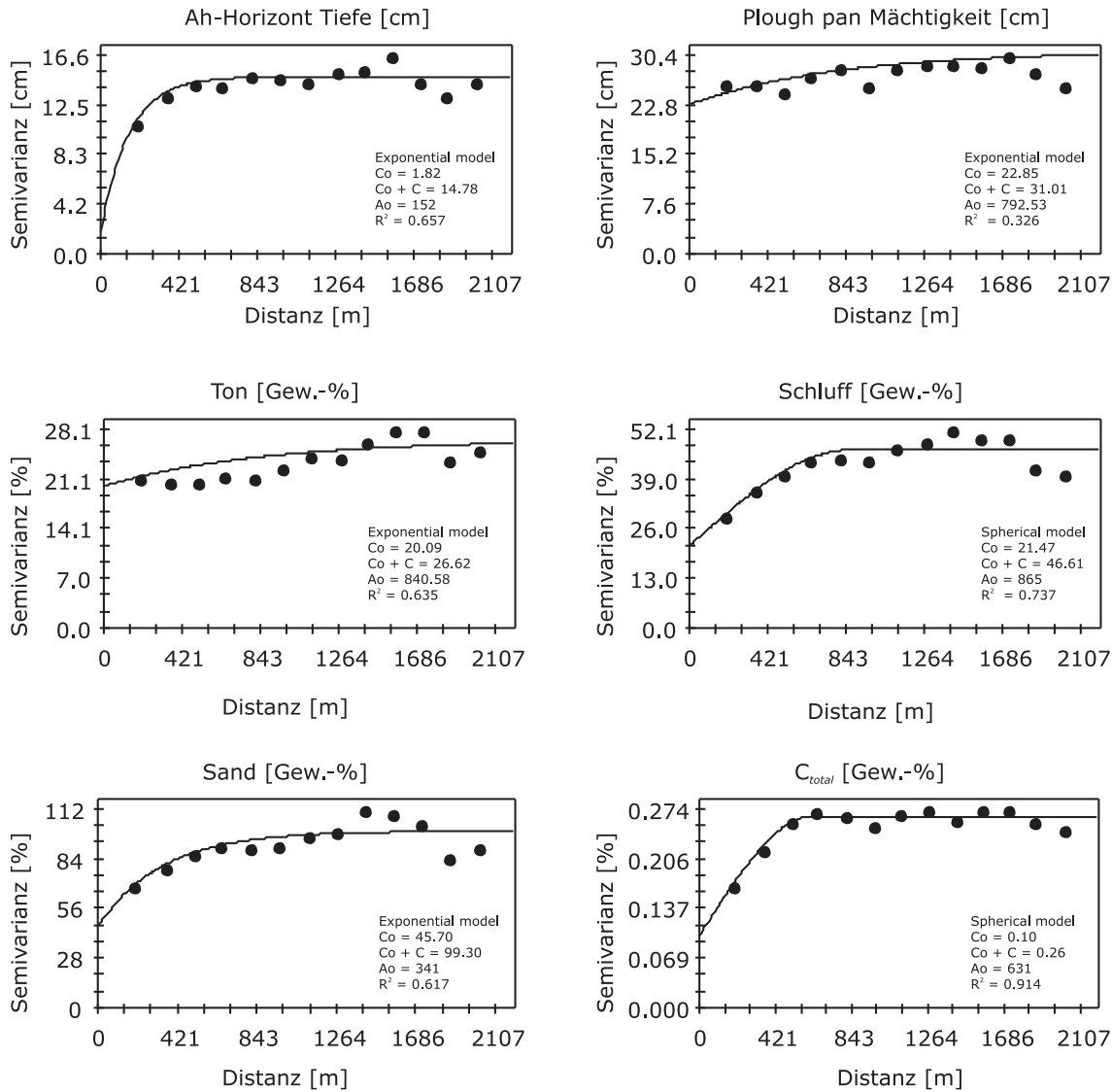


Abbildung 6.1: Darstellung der Variogramme für ausgewählte Bodeneigenschaften des Oberbodens für die Landschaftsskala

terial, zurückzuführen. Für den Schluffgehalt sind in beiden Tiefenstufen ähnliche räumliche Abhängigkeiten erfasst: Im gepuddelten Horizont wurden Variogramme mit $C_o = 21.47$, $C_o + C = 46.61$ und einer Reichweite von $A_o = 865$ m angepasst, in der Pflugsohle sind Variogrammparameter von $C_o = 23$, $C_o + C = 46.01$ und einer Reichweite von $A_o = 1013$ m ermittelt worden. Für beide Variogramme sind sphärische Modelle verwendet worden; die Bestimmtheitsmaße der Anpassung sind $R^2 = 0.737$ für den gepuddelten Horizont und $R^2 = 0.886$ für die Pflugsohle. Für die Parameter Tongehalt und Mächtigkeit des gepuddelten Horizontes sowie Mächtigkeit der Pflugsohle ließen sich keine zufriedenstellenden Variogramme ermitteln. Für den Sandgehalt sind kaum räumliche Abhängigkeiten erkennbar. Die Überprüfung der angewandten Regionalisierungsmethode erfolgte mit Hilfe der Kreuzvalidierung (vgl. Kapitel 5.3.2), die Bewertung der Regionalisierung mit dem Fehlermaß des RMSE (vgl. Gleichung 5.20), das der Wurzel aus den mittleren Abweichungsquadraten entspricht. Bei dem Regressionsverfahren

6.1 Ergebnisse der Regionalisierung von Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala, der catenaren Skala sowie der Feldskala

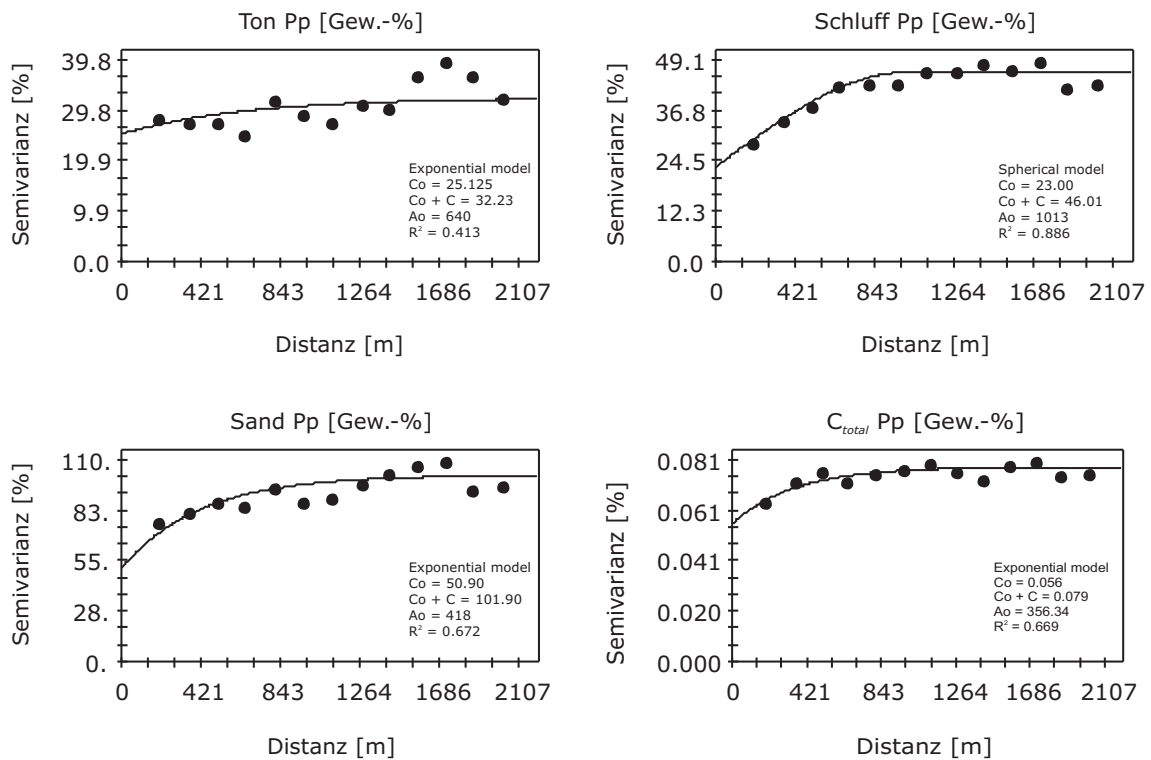


Abbildung 6.2: Darstellung der Variogramme für ausgewählte Bodeneigenschaften der Pflugschale für die Landschaftsskala

Tabelle 6.7: Semivariogrammparameter der aus den Regressionsmodellen hervorgegangenen Residuen für den Bodenparameter des Ap-Horizontes

Zielvariable	Kovariable	R^2	Variogramm Modell	Nugget Varianz c_0	Strukturierte Varianz c_S	Gesamt Sill (c_0+c_S)	Reichweite [m] a
C total [%]	H_r, H_{ch}	0.35	sphärisch	0.11	0.043	0.153	500
N total [%]	H_r, H_{ch}	0.32	sphärisch	0.001	0.001	0.002	474
Ton [%]	H_r, β	0.07	sphärisch	17.53	5.50	23.03	1700
Schluff [%]	H_r, TWI	0.25	sphärisch	20.82	8.87	26.69	466
Sand [%]	H_r, TWI	0.11	sphärisch	61.50	16.03	77.53	1459
Ap Tiefe [cm]	H_r, β	0.06	sphärisch	8.30	3.70	16.00	377

n = 174

ist die Abweichung zwischen gemessenen und geschätzten Werten gleich dem Residuum. Für die weiteren Analysen zeigen die Tabellen 6.9 und 6.10, dass die Vorhersagegenauigkeit durch die Integration von Sekundärinformation verbessert werden kann, auch wenn die Unterschiede zwischen den angewandten Methoden verhältnismäßig klein sind. Aufgrund der räumlichen Verteilung ergab die Anwendung des Kriging Modells C den niedrigsten RMSE im Vergleich zu allen anderen betrachteten Bodenvariablen (s. Tabelle 6.9). Verglichen mit einfachen Interpolationsmethoden wie der Inversen Distanz Gewichtung (IDW) und dem Ordinary Kriging (OK), die nur Primärvariablen verwenden, wird der RMSE verringert, wenn Sekundärvariablen in die Vorhersage miteinbezogen werden. Die größte relative Verbesserung (vgl. Gleichung 5.21)

Tabelle 6.8: Semivariogrammparameter der aus den Regressionsmodellen hervorgegangenen Residuen für den Bodenparameter des Pflugschle

Zielvariable	Kovariable	R^2	Variogramm Modell	Nugget variance $c0$	Strukturierte Varianz cS	Gesamt Sill $(c0+cS)$	Reichweite [m] a
C total [%]	H_r, CAp	0.35	sphärisch	0.01	0.016	0.026	615
N total [%]	H_r, NAp	0.13	sphärisch	0.0002	0.0003	0.0005	643
Ton [%]	H_{ch}, T	0.64	sphärisch	2.40	9.75	12.15	2031
Schluff [%]	H_r, TWI, S	0.85	sphärisch	21.73	17.73	39.46	1005
Sand [%]	H_r, TWI, S	0.77	sphärisch	9.80	2.53	12.33	2332
Pp M. [cm]	H_{ch}	0.07	sphärisch	22.00	6.50	28.50	1600

$n = 143$; T = Tongehalt in Ap; S = Sandgehalt in Ap

Tabelle 6.9: Kreuzvalidierung der regionalisierten Parameter (Ap-Horizont) mittels RMSE für das Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet

Bodenparam.	Methode	Methode					
		Multi lineare Regression	Inverse Distanz Gewichtung *	Simple Kriging	Ordinary Kriging	Regression Kriging Model B	Regression Kriging Model C
		(MLR)	(IDW)	(SK)	(OK)	(RK B)	(RK C)
C total [%]	RMSE	0.39	0.449	0.434	0.436	0.434	0.371
N total [%]	RMSE	0.04	0.047	0.046	0.047	0.045	0.039
Ton [%]	RMSE	4.73	4.760	4.715	4.624	4.714	4.643
Schluff [%]	RSME	5.56	5.628	5.941	5.766	5.921	5.358
Sand [%]	RMSE	8.86	8.967	8.793	8.824	8.672	8.608
Ap Tiefe [cm]	RSME	3.52	3.525	3.513	3.464	3.556	3.473

RMSE: Root mean square error; * Power = 1; n = 174

Tabelle 6.10: Kreuzvalidierung der Regionalisierungsmodelle im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet für die Pflugschle

Bodenparam.	Methode	Methode					
		Multi lineare Regression	Inverse Distanz Gewichtung *	Simple Kriging	Ordinary Kriging	Regression Kriging Model B	Regression Kriging Model C
		(MLR)	(IDW)	(SK)	(OK)	(RK B)	(RK C)
C total [%]	RMSE	0.226	0.286	0.281	0.290	0.295	0.230
N total [%]	RMSE	0.055	0.085	0.083	0.085	0.063	0.061
Ton [%]	RMSE	1.292	5.743	5.678	5.663	5.671	3.446
Schluff [%]	RSME	2.558	6.180	6.010	6.151	6.424	2.549
Sand [%]	RMSE	4.608	9.718	9.324	9.761	5.114	4.900
Pp M. [cm]	RMSE	5.090	5.348	6.199	5.223	5.133	4.941

RMSE: Root mean square error; * Power = 1; n = 143

wurde für den Gesamtkohlenstoffgehalt, Gesamtstickstoffgehalt und Schluffgehalt erzielt. Im Vergleich mit dem Simple Kriging (SK) und dem Ordinary Kriging (OK) ergab die Anwendung von RK-C eine relative Verbesserung von 13.8 % für den Gesamtkohlenstoffgehalt, von 13.2 % für den Gesamtstickstoffgehalt und von 9.8 % für den Schluffgehalt. Die Vorhersage-

6.1 Ergebnisse der Regionalisierung von Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala, der catenaren Skala sowie der Feldskala

leistung von RK-C hängt jedoch vom Verhältnis der (Primär)-Variablen der Zielgröße und den erklärenden Kovariablen ab. Je stärker die räumliche Abhängigkeit und je enger die räumliche Autokorrelation der Primärvariablen, desto höher ist die Performanz des Kriginginterpolators. Obwohl der RMSE für die Pflugsohle berechnet wurde und auf eine beträchtliche Verbesserung in der Vorhersage deutet, ist diese relative Verbesserung von 20.3 % (vgl. Gleichung 5.21) im Vergleich zum Simple Kriging (SK) fraglich, da die Regressionsanalyse und die geostatistische Analyse keine Zusammenhänge für diese Parameterkombination aufzeigen. So bleibt unklar, ob die Integration der Residuen der Regression für die berechnete Verbesserung gegenüber dem einfachen Kriging verantwortlich oder ob die angenommene Verbesserung zufälliger Natur ist (vgl. Kapitel 7.2).

Die Abbildungen 6.3a,b zeigen die räumliche Verteilung des Schluffgehaltes und des Gesamtkohlenstoffgehaltes unter Verwendung des Regression Kriging C Modells. Wie bereits oben beschrieben korrespondieren diese räumlichen Muster mit der Annahme, dass in tiefer gelegenen Bereichen höhere Gesamtkohlenstoffgehalte vorliegen. Die räumliche Verteilung der Schluffgehalte ist entsprechend zu interpretieren (s. oben).

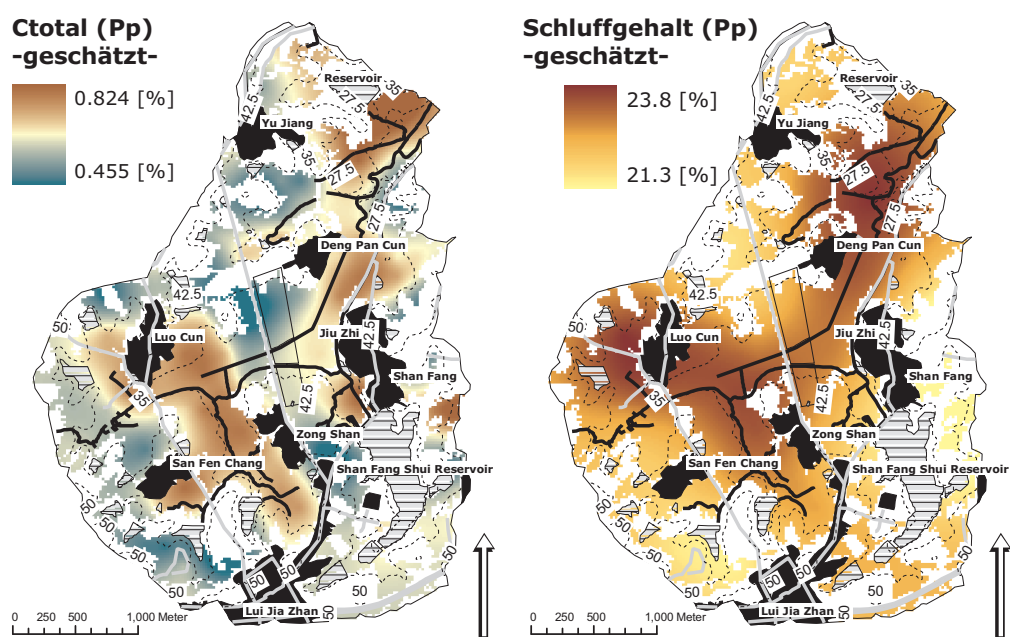


Abbildung 6.3: Räumliche Verteilung des Gesamtkohlenstoffgehalts und des Schluffgehalts für die Pflugsohle im Untersuchungsgebiet Liu Jia Zhan. Dargestellt sind die Ergebnisse des RK C Modells nur für Gebiete mit Reis als Anbaufrucht (vgl. Kapitel 5.2.2.2)

6.1.2 Catenare Skala

Die bodenphysikalischen Eigenschaften der catenaren Skala werden zunächst anhand ausgewählter statistischer Parameter veranschaulicht (s. Tabelle 6.11). Es folgt die Darstellung der linearen Zusammenhänge zwischen ausgewählten Reliefparametern und den untersuchten Bodeneigenschaften. Hervorzuheben ist der Gehalt an Gesamtkohlenstoff von 30.55 Gew.-% im Vergleich zum Sandgehalt von 11.67 Gew.-%. Die Varianz von 51.63 weist ebenfalls auf eine hohe Variabilität hin (im Vergleich hierzu die geringe Varianz von 0.12 des Gesamtkohlenstoffgehaltes). Für eine detaillierte Übersicht wird auf Tabelle 6.11 verwiesen. Die beschreibende

Tabelle 6.11: Deskriptive Statistiken des Oberbodens (*puddled layer*) im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet für die catenare Skala

	n	MW	VAR	SA	VK %	MIN	MED	MAX	W	p
Ah Tiefe [cm]	49	16.12	4.38	2.09	12.99	13.20	15.80	24.00	0.909	0.001
Pp Mächtigkeit [cm]	48	8.41	13.29	3.68	43.35	3.20	8.10	19.40	0.936	0.011
Sand [%]	49	61.56	51.63	7.19	11.67	47.70	62.10	75.70	0.973	0.305
Schluff [%]	49	25.38	28.44	5.33	21.01	14.00	26.00	34.00	0.965	0.150
Ton [%]	49	13.05	8.30	2.88	22.08	7.40	12.80	19.90	0.974	0.353
C total [%]	49	1.12	0.12	0.34	30.55	0.33	1.12	1.82	0.979	0.535

MW = Mittelwert; VAR = Varianz; SA = Standardabweichung; VK = Variationskoeffizient;
MED = Median; W = Shapiro-Wilk; p = Prüfgröße

Statistik der verwendeten morphometrischen Parameter und Reliefindizes ist in Tabelle 6.12 aufgeführt. Allgemein wird für die Bewertung von Regressionsmodellen die Normalverteilung der berechneten Residuen vorausgesetzt bzw. eine Varianzhomogenität erwartet (vgl. Kapitel 7.2). Die Überprüfung der Null-Hypothese wurde mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests durchge-

Tabelle 6.12: Deskriptive Statistik der Reliefparameter im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet der catenaren Skala und Test auf Normalverteilung

	n	MW	VAR	SA	VK %	MIN	MED	MAX	W	p
H_r	48	33.17	11.46	3.39	10.21	29.10	32.04	40.34	0.891	<0.001
H_{ch}	48	0.48	0.56	0.75	157.12	0.00	0.16	3.48	0.657	<0.001
β	48	1.69	2.53	1.59	93.97	0.08	1.21	7.54	0.804	<0.001
C_v	48	-0.0003	4.7E-06	0.002	833.61	-0.01	0.0001	0.002	0.400	<0.001
C_h	48	-2.4E-05	5.2E-07	0.001	3019.99	-0.001	0.0025	0.002	0.827	<0.001
CDI	48	-0.09	221.50	14.90	16325.0	-48.20	-2.13	55.40	0.837	<0.001
TWI	48	8.56	1.25	1.12	13.08	6.05	8.65	11.45	0.987	0.874
Ω	48	8.93	515.40	22.70	254.14	0.02	2.47	152.20	0.3779	<0.001
LS	48	0.86	1.17	1.01	117.00	0.01	0.31	3.86	0.790	<0.001

MW = Mittelwert; VAR = Varianz; SA = Standardabweichung; VK = Variationskoeffizient;
MED = Median; W = Shapiro-Wilk; p = Prüfgröße

führt und ergab, abgesehen vom TWI , nicht normalverteilte Werte. Eine Transformation war an dieser Stelle notwendig und wurde mittels einer Box-Cox-Transformation erreicht. Die korrelativen Zusammenhänge zwischen bodenphysikalischen Eigenschaften und einfachen sowie komplexen Reliefparametern sind der Tabelle 6.13 zu entnehmen. Der in der Literatur vielfach

6.1 Ergebnisse der Regionalisierung von Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala, der catenaren Skala sowie der Feldskala

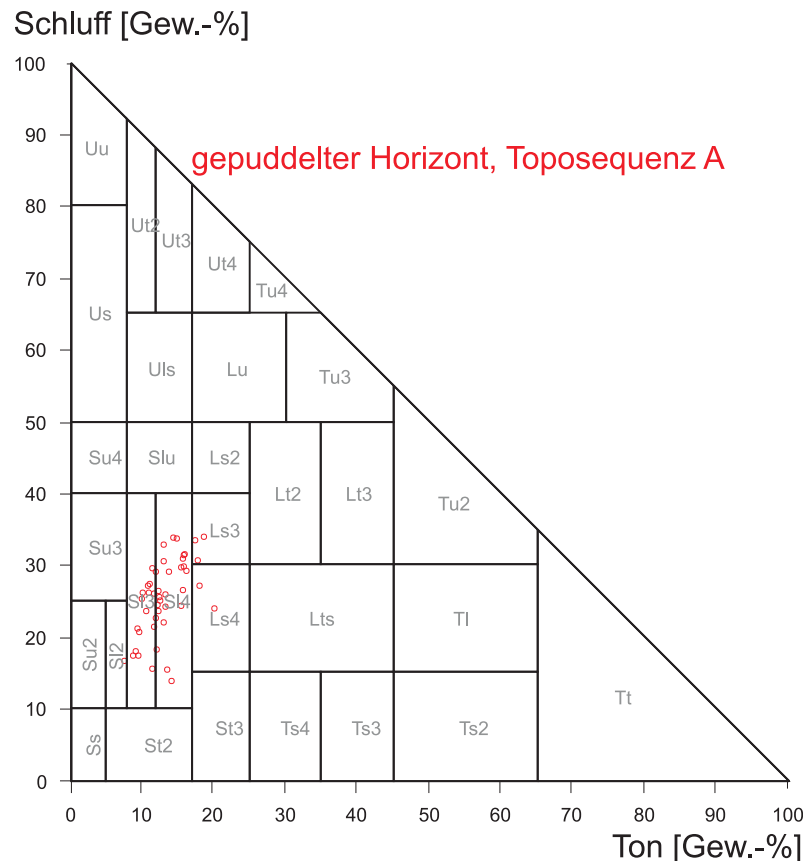


Abbildung 6.4: Bodenarten des gepuddelten Horizontes der Toposequenz A

benutzte Reliefparameter Hangneigung (β) weist im Vergleich zur Landschaftsskala weitaus engere signifikante Zusammenhänge zum Schluffgehalt $r = -0.70$ oder zum Gesamtkohlenstoffgehalt $r = -0.59$ auf. Der Reliefparameter relative Höhe (H_r) lässt ähnlich hohe Zusammenhänge zwischen dem betrachteten Reliefparameter und den Bodeneigenschaften erkennen. Dagegen liefert der Parameter Höhe über Tiefenlinie (H_{ch}) keine Zusammenhänge auf dieser Skala. Die Erklärungsansätze für die Ausprägung des Zusammenhanges zwischen Gesamtkohlenstoffgehalt bzw. Schluffgehalt und relativer Höhe (H_r) sind denen auf der Landschaftsskala bereits dargestellten Erklärungsansätzen gleichzusetzen. Für die Berechnung der linearen Zusammenhänge wurde der robuste Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman gewählt. Der Rangkorrelationskoeffizient liefert negativ signifikante Zusammenhänge zwischen der relativer Höhe (H_r) und den Bodenparametern Gesamtkohlenstoffgehalt von $r = -0.65$. Zwischen relativer Höhe (H_r) und Schluffgehalt wurden negative Korrelationskoeffizienten berechnet ($r = -0.71$), ebenso zwischen relativer Höhe und Tongehalt ($r = -0.38$). Signifikant positive Zusammenhänge ließen sich hingegen zwischen der relativen Höhe (H_r) und dem Sandgehalt von $r = 0.65$ nachweisen. Die detaillierte Aufstellung der Rangkorrelationskoeffizienten ist der Tabelle 6.13 zu entnehmen. Die Regressionsmodellierung für die catenare Skala (s. Tabellen 6.14, 6.15 und 6.16) zeigt einen deutlich negativ signifikanten Zusammenhang zwischen dem Gesamtkohlenstoffgehalt, dem Schluffgehalt und der relativen Höhe (H_r). Für die

Tabelle 6.13: Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern für die betrachtete Toposequenz (Ap-Horizont)

	<i>C total</i> [Gew.-%]	<i>N total</i> [Gew.-%]	<i>Ap-Horizont</i> Mächtigg. [cm]	<i>Plugsohle</i> Mächtigg. [cm]	<i>Ton</i> [Gew.-%]	<i>Schluff</i> [Gew.-%]	<i>Sand</i> [Gew.-%]
H_r	-0.65**	-0.66**	-0.10	-0.51**	-0.38**	-0.71**	0.65**
H_{ch}	0.04	0.04	0.11	0.06	0.15	-0.01	-0.02
β	-0.59**	-0.58**	0.11	-0.30*	-0.35**	-0.70**	0.65**
C_v	-0.08	-0.09	0.26*	0.06	-0.05	-0.12	0.16
C_h	0.24*	0.27*	-0.16	0.07	0.09	0.26*	-0.18
<i>CDI</i>	0.20	0.24*	-0.06	0.11	0.08	0.15	-0.13
<i>TWI</i>	0.24*	0.20	0.06	-0.03	-0.04	0.29*	-0.2
Ω	-0.53**	-0.54**	0.11	-0.26*	-0.40**	-0.60**	0.59**
<i>LS</i>	-0.59**	-0.59**	0.11	-0.29*	-0.39**	-0.68**	0.65**

Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman; * mindestens auf dem 99 %-Niveau signifikant; ** mindestens auf dem 99,5 %-Niveau signifikant; Ap: gepuddelter Horizont, Pp: Pflugsohle; n = 49 (Ap)

H_r = relative Höhe; β = Hangneigung; C_v = Vertikalkrümmung; C_h = Horizontalkrümmung;
 H_{ch} = Höhe über Tiefenlinie; *CDI* = Konvergenz/Divergenz Index; *TWI* = Topographischer Feuchteindex;
 Ω = Stream Power Index; *LS* = LS-Faktor (USLE)

Zielvariable Schluff und Integration der Parameter relative Höhe, Hangneigung und Topographischer Feuchteindex ergab sich ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.71$, für den Tongehalt durch Integration der relativen Höhe und der Hangneigung jedoch nur ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.059$. Die Tabellen 6.14, 6.15 und 6.16 zeigen unterschiedliche Modellkonzepte

Tabelle 6.14: Multiple lineare Regressionsmodelle der erfassten Oberbodeneigenschaften des Ap-Horizontes und ausgewählter Reliefparameter, Integration aller Reliefparameter

Zielgröße	H_r	β	H_{ch}	<i>TWI</i>	<i>LS</i>	Intercept	R^2
C total [%]	-0.040	-0.216	-0.062	-0.106	0.110	3.674	0.690
N total [%]	-0.004	-0.021	-0.008	-0.013	0.011	0.398	0.707
Ton [%]	-0.231	-0.281	-0.244	-0.637	-0.012	26.755	0.092
Schluff [%]	-0.821	-2.38	-0.829	-1.085	0.503	66.025	0.714
Sand [%]	1.052	2.678	1.056	1.728	-0.519	7.112	0.524
Ap Tiefe [cm]	-0.060	-0.035	0.035	0.074	0.527	17.012	0.067
Pp M. [cm]	-0.634	3.545	-0.093	1.198	-4.815	17.377	0.500

n = 48

tionen. In der Tabelle 6.14 sind alle ausgewählten Reliefparameter integriert worden. Es zeigt sich, dass durch die Integration der relativen Höhe (H_r), der Hangneigung (β), der Höhe über Tiefenlinie (H_{ch}), des Topographischen Feuchteindex (*TWI*) sowie des LS-Faktors (*LS*) für die Zielgrößen Gesamtkohlenstoffgehalt und Schluffgehalt maximale Erklärungsgehalte der Gesamtvarianz von 0.69 sowie 0.71 % erzielt werden. Hervorzuheben ist ebenfalls die erklärte Varianz von 70.7 % des Gesamtstickstoffgehaltes, von 52.4 % des Sandgehaltes und 50.6 % der Pflugsohlen-Mächtigkeit. Die Tabelle 6.15 zeigt die erklärten Varianzen in Abhängigkeit der integrierten Reliefparameter. Deutlich wird hier die Faktorverschiebung der erklärenden Reliefparameter. Ausschließlich der Schluffgehalt liefert ähnliche Regressionsstrukturen wie auf

6.1 Ergebnisse der Regionalisierung von Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala, der catenaren Skala sowie der Feldskala

Tabelle 6.15: Multiple lineare Regressionsmodelle der erfassten Eigenschaften des gepuddelten Horizontes und ausgewählter Reliefparameter (die Auswahl der integrierten Reliefparameter entspricht der auf der Landschaftsskala)

Zielgröße	H_r	β	H_{ch}	TWI	LS	Intercept	R^2
C total [%]	-0.045	-	-0.139	-	-	2.699	0.355
N total [%]	-0.005	-	-0.013	-	-	0.275	0.383
Ton [%]	-0.186	-0.136	-	-	-	19.455	0.059
Schluff [%]	-0.815	-2.099	-	-0.539	-	60.721	0.706
Sand [%]	1.094	-	-	-0.562	-	29.936	0.303
Ap Tiefe [cm]	-0.086	0.239	-	-	-	18.519	0.042
Pp M. [cm]	-	0.614	-0.093	-	-	8.116	0.016
*Pp [cm]	-0.486	-	-	-	-	24.526	0.204

n = 48

Tabelle 6.16: Multiple lineare Regressionsmodelle der erfassten Eigenschaften des gepuddelten Horizontes und ausgewählter Reliefparameter, Integration der Reliefparameter mittels „stepwise criteria“ (es werden nur Reliefparameter integriert, die eine signifikante Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes gewährleisten)

Zielgröße	H_r	β	H_{ch}	TWI	LS	Intercept	R^2
C total [%]	-0.036	-0.199	0.090	-	0.113	2.530	0.624
N total [%]	-0.004	-0.018	-0.004	-	0.010	0.261	0.616
Ton (%)	-0.199	-	-	-	-	19.644	0.053
Schluff (%)	-0.774	-1.928	-	-	-	54.460	0.696
Sand (%)	0.961	2.060	-	-	-	26.023	0.496
Ap Tiefe [cm]	-	-	-	-	0.475	15.659	0.053
Pp M. [cm]	-0.633	3.534	-	1.232	-4.810	17.019	0.500

n = 48

der Landschaftsskala mit ca. 70 % erklärter Varianz. Der Reliefparameter Höhe über Tiefenlinie liefert im Gegensatz zur Landschaftsskala keinen erklärenden Anteil an der Vorhersage des Gesamtkohlenstoffgehaltes auf der catenaren Skala. Der Schluffgehalt korreliert mit der relativen Höhe und der Hangneigung auf beiden Skalen (s. Tabelle 6.16). Darüber hinaus zeigt Tabelle 6.16, dass für die Bodeneigenschaften Tongehalt und Tiefe des gepuddelten Horizontes keine verlässlichen Regressionsmodelle ableitbar waren. Demnach sind diese Eigenschaften nicht durch reliefabhängige Prozesse zu erklären; eine mögliche Ursache sind unterschiedliche Bearbeitungsintensitäten.

Die Variogrammanalyse der Bodeneigenschaften auf der catenaren Skala lieferte durchweg plausible Ergebnisse. Abgesehen von der Mächtigkeit des gepuddelten Horizontes lassen sich stark strukturierte räumliche Abhängigkeiten nach CAMBARDELLA ET AL. (1994) beobachten. Die Autokorrelationslängen (Reichweiten) für die einfachen bodenphysikalischen Parameter liegen bei 216 m Länge für den Tongehalt und 131.5 m für den Schluffgehalt. Der Gesamtkohlenstoffgehalt weist eine Reichweite von 124.60 m auf. Eine Übersicht über die berechneten räumlichen Autokorrelationen der betrachteten Bodeneigenschaften gibt die Abbildung 6.5. Zur Anpassung der theoretischen Variogramme wurden neben sphärischen Modellen das gauß-

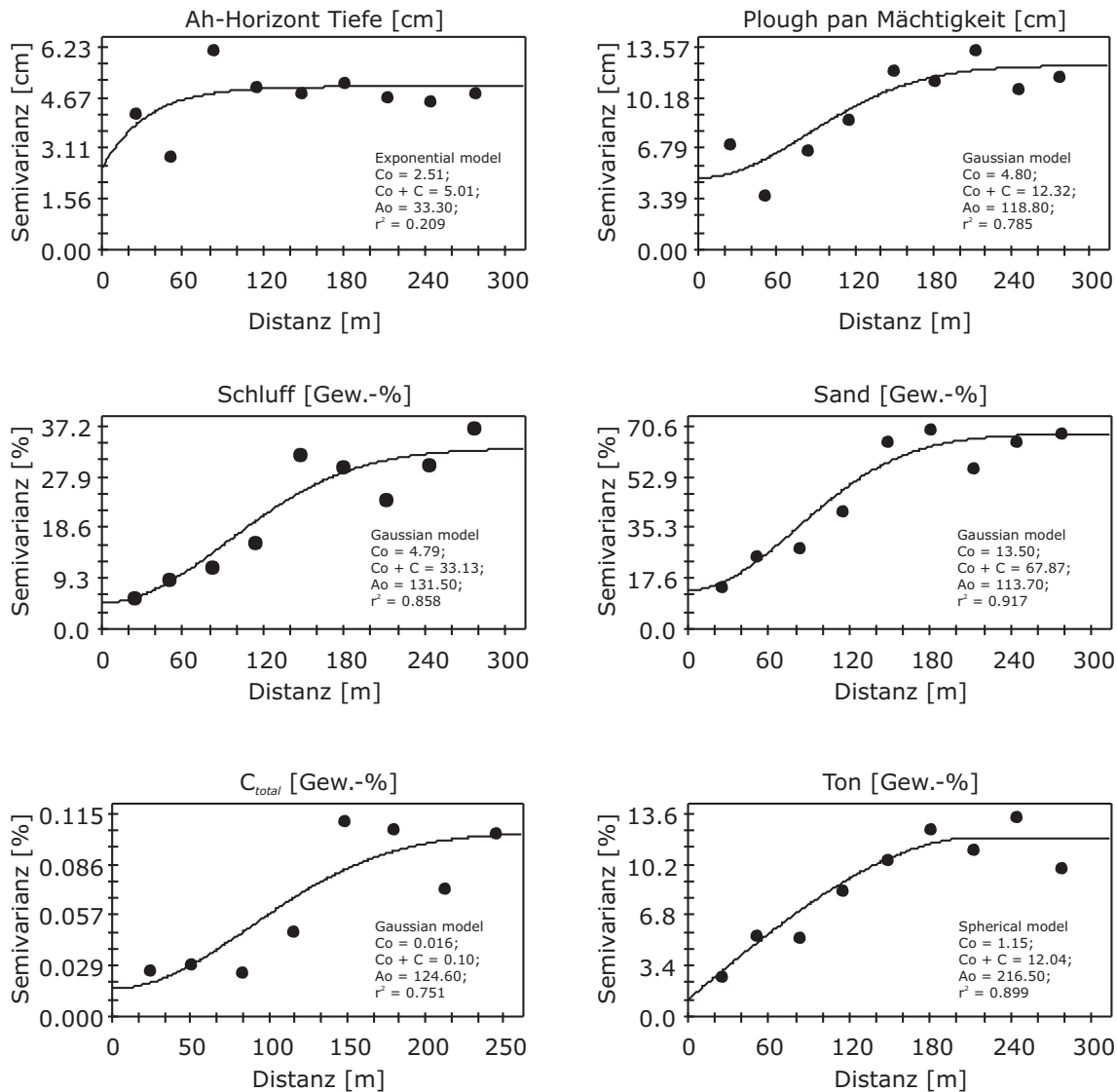


Abbildung 6.5: Darstellung der Variogramme für ausgewählte Bodeneigenschaften des gepuddelten Horizontes für die Toposequenz

sche und das exponentielle Variogramm verwendet. Deutlich wurde dabei, dass das sphärische Modell bei allen betrachteten Bodenvariablen eine insgesamt gute Anpassung an das experimentelle Variogramm ermöglichte. So wurden hier Bestimmtheitsmaße $R^2 = 0.92$ für den Sandgehalt und $R^2 = 0.90$ für den Tongehalt ermittelt. Es hat sich gezeigt, dass für den Tongehalt auch exponentielle und gaußsche Variogramme ähnlich hohe Erklärungsanteile liefern. Das geringste Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.21$ ist für die Horizonttiefe des gepuddelten Horizontes zu verzeichnen (s. Abbildung 6.5). Es bestehen stark strukturierte Abhängigkeiten, abgesehen von der Mächtigkeit des gepuddelten Horizontes mit einem NSR-Ratio (s. Gleichung 5.12) von 42.4 % und der Pflugsohlen-Mächtigkeit mit einem NSR-Ratio von 37.6 %. Die Variogramme der Residuen weisen grundsätzlich geringere Reichweiten auf (s. Tabelle 6.18), deutlich wird dies bei dem nicht vorhandenen Zusammenhang zwischen Tongehalt und relativer Höhe. Die Reichweiten der Residuen waren nur gering verbessert. Hingegen führt der

6.1 Ergebnisse der Regionalisierung von Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala, der catenaren Skala sowie der Feldskala

Tabelle 6.17: Variogrammparameter der catenaren Skala des gepuddelten Horizontes für das Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet

Parameter	Box-Cox trans.		Vari. modell	Nugget	Struktur.	Gesamt sill	Reichw. (m)	NSR (%)	Spatial class
	W	p		Varianz c0	Varianz cS				
Total C [%]	0.984	0.751	sph.	0.01	0.1	0.1	370.7	5.7	S
Total N [%]	0.984	0.729	sph.	0.00001	0.001	0.0	384.9	1.8	S
Ton [%]	0.988	0.908	sph.	0.02	0.1	0.1	210.8	10.7	S
Schluff [%]	0.969	0.225	sph.	623.1	623.1	1246.2	329.7	50.0	S
Sand [%]	0.975	0.367	sph.	0.02	0.2	0.2	227.2	9.8	S
Ap Tiefe [cm]	0.981	0.598	sph.	6.9E-08	9.4E-08	1.6E-07	220.0	42.4	M
Pp M. [cm]	0.971	0.272	sph.	4.0353	6.7	10.7	323.9	37.6	M

n = 48 (Ap) M: moderate strukturierte Abhängigkeit; S: starke strukturierte Abhängigkeit;
W = Shapiro Wilk; p= Prüfgröße

Tabelle 6.18: Variogrammparameter der Residuen der catenaren Skala des gepuddelten Horizontes für das Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet

Zielvariable	Kovariable	R^2	Vari. Mod.	Nugget Varianz c0	Struk. Varianz cS	Gesamt Sill (c0+cS)	Reichw. [m] a	NS Ratio [%]	Kl. rä. Abh.
C total [%]	H_r, β, H_{ch}, LS	0.624	sph.	0.000	0.034	0.03	40.58	0.0	S
N total [%]	H_r, β, H_{ch}, LS	0.616	sph.	0.000	0.0006	0.0006	191.78	13.4	S
Ton [%]	H_r	0.053	sph.	0.413	10.315	10.73	191.30	3.9	S
Schluff [%]	H_r, β	0.696	sph.	0.000	9.783	9.78	47.31	0.0	S
Sand [%]	H_r, β	0.496	sph.	1.810	41.732	43.54	141.47	4.2	S
Ap Tiefe [cm]	LS	0.053	sph.	0.000	4.776	4.78	33.54	0.0	S
Pp M. (cm)	H_r, β, TWI	0.499	sph.	3.481	3.689	7.17	260.38	48.6	M

n = 48 (Ap) M: moderate strukturierte Abhängigkeit; S: starke strukturierte Abhängigkeit;
W = Shapiro Wilk; p= Prüfgröße

enge Zusammenhang zwischen der relativen Höhe, der Hangneigung, der Höhe über Tiefenlinie und dem LS-Faktor von 62.4 % zu einer deutlichen Verbesserung der Reichweite von 40.58 m für die Residuen des Gesamtkohlenstoffgehaltes. Die räumliche Verteilung der ausgewählten Bodeneigenschaften ist der Abbildung 6.6 zu entnehmen. Auffällig sind geringe Tongehalte des gepuddelten Horizontes für den südlichen und relativ hoch gelegenen Abschnitt der Toposequenz, dagegen höhere Tongehalte von bis zu 20 Gew.-% im mittleren Teil der Toposequenz zwischen den Bewässerungskanälen, die auf Akkumulationsprozesse zwischen den Bewässerungskanälen hinweisen. Der Schluffgehalt weist im mittleren Bereich der Toposequenz Werte von bis zu 34 Gew.-% auf, dagegen sind in den höheren Bereichen Schluffgehalte von 14 bis 25 Gew.-% erfasst. Korrespondierend dazu sind geringere Sandgehalte in den am tiefsten gelegenen Positionen und höhere Werte in den relativ hoch gelegenen Bereichen. Das Ausgangssubstrat des roten Sandsteins spiegelt sich hier eindeutig wieder.

Die Mächtigkeit des gepuddelten Horizontes weist keine räumliche Korrelationsstruktur auf. In den oberen Hangbereichen sind Oberbodentiefen von bis zu 24 cm aufgenommen worden.

Als mögliche Ursache hierfür kann der Terrassenbau herangezogen werden, ein eindeutiger Zusammenhang ist jedoch nicht auszumachen. Die Pflugsohlen-Mächtigkeit hingegen lässt einen klaren Schluss zu. Die bereits länger unter Nutzung stehenden Reisfelder (also in den Tieflandbereichen, im mittleren Bereich der Toposequenz) weisen größere Mächtigkeiten auf. Der Gesamtkohlenstoffgehalt ist in den in den niedrigeren Reliefpositionen erwartungsgemäß am höchsten, mit Werte zwischen 1.31 und 1.82 Gew.-%. Die Abbildung 6.7 zeigt den vorhergesagten Schluffgehalt und den Gesamtkohlenstoffgehalt für den gepuddelten Horizont auf der Toposequenz A. Zusätzlich dargestellt sind die nach Gleichung 5.16 und 5.17 berechneten Eintrittswahrscheinlichkeiten der Bodeneigenschaften. Deutlich wird, dass die Eintrittswahrscheinlichkeiten parameterunabhängig sind und nur von dem bekannten Variogramm und der Beprobungsdichte abhängig sind. Die Bereiche, die eine hohe Beprobungsdichte aufweisen, zeigen entsprechend die Bereiche höchster Eintrittswahrscheinlichkeit.

Die Ergebnisse der Kreuzvalidierung sind der Tabelle 6.19 zu entnehmen. Wenngleich die Unterschiede zwischen den angewandten Methoden vergleichsweise gering sind, kann die Vorhersagegenauigkeit durch die Integration von Sekundärinformationen auch auf der catenaren Skala verbessert werden. Das Regression Kriging Model B dabei die beste Performance. Mit Ausnahmen des Gesamtkohlenstoffgehalts liefert das *RKC* höhere *RMSE*-Werte. Insgesamt kann konstatiert werden, dass die auf den unterschiedlichen Skalen angewandten Regionalisierungsmethoden zu unterschiedlichen Performance-Ergebnissen führen.

Tabelle 6.19: Kreuzvalidierung der regionalisierten Parameter (*Ap*-Horizont) mittels *RMSE* für die catenare Skala im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet

Bodenparam.	Methode	Gewichtung *					
		Multi lineare Regression (MLR)	Inverse Distanz (IDW)	Simple Kriging (SK)	Ordinary Kriging (OK)	Regression Kriging Model B (RK B)	Regression Kriging Model C (RK C)
<i>C total</i> [%]	<i>RMSE</i>	0.269	0.240	0.237	0.207	0.240	0.231
<i>N total</i> [%]	<i>RMSE</i>	0.026	0.024	0.032	0.033	0.015	0.023
<i>Ton</i> [%]	<i>RMSE</i>	2.824	2.554	2.877	2.799	1.591	2.936
<i>Schluff</i> [%]	<i>RSME</i>	2.864	3.829	2.662	2.818	2.280	2.902
<i>Sand</i> [%]	<i>RMSE</i>	5.995	5.771	5.519	5.103	3.290	5.542
<i>Ap M.</i> [cm]	<i>RSME</i>	2.044	1.882	2.010	1.859	1.096	1.958
<i>Pp M.</i> [cm]	<i>RSME</i>	3.043	2.953	2.741	2.760	2.247	2.721

RMSE: Root mean square error; * Power = 1; n = 48

6.1 Ergebnisse der Regionalisierung von Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala, der catenaren Skala sowie der Feldskala

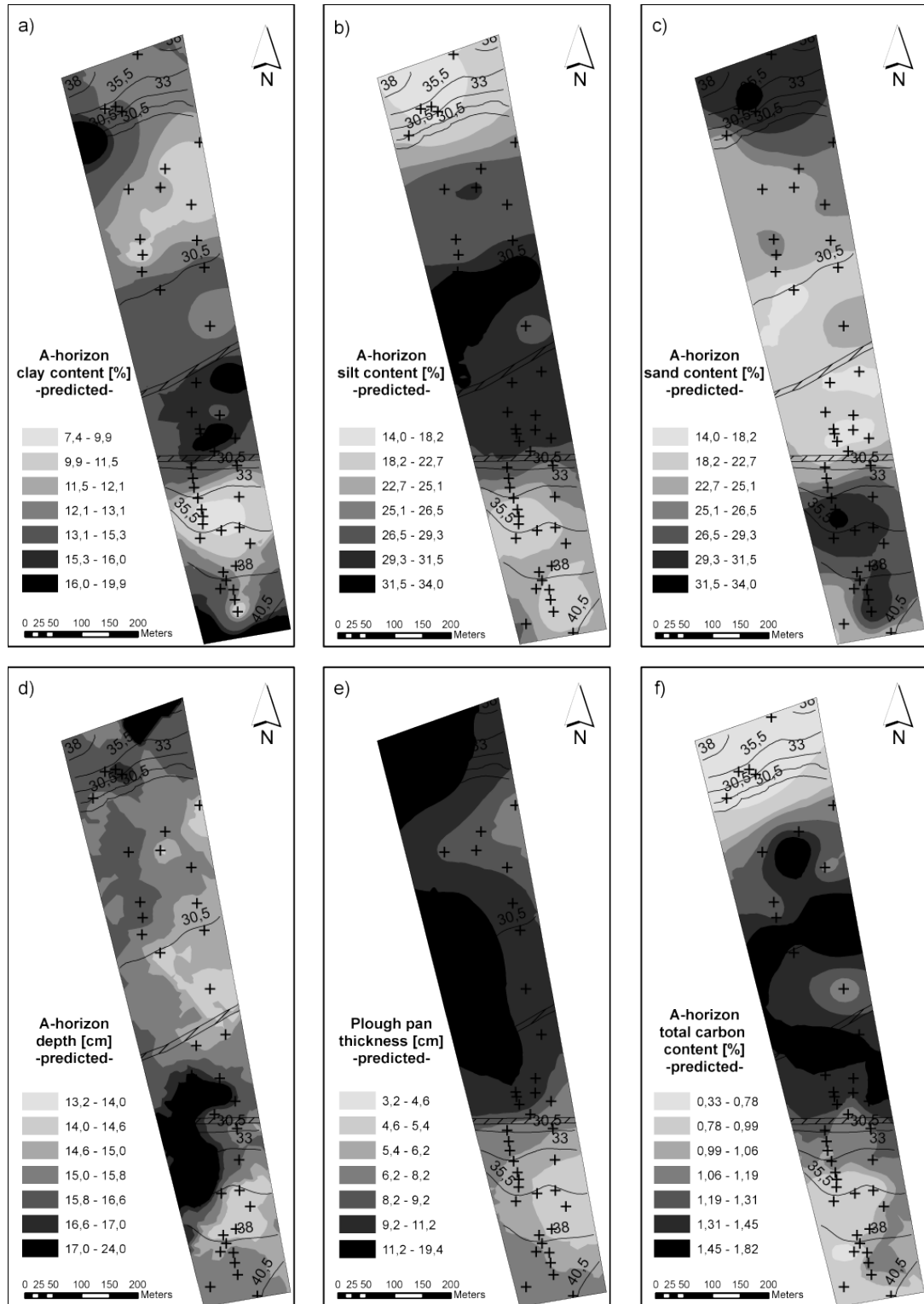


Abbildung 6.6: Mittels Regression Kriging im indirekten Verfahren errechnete bodenphysikalische Parameter: Tongehalt [Gew.-%] (a), Schluffgehalt [Gew.-%] (b) und Sandgehalt [Gew.-%] (c) für den Oberboden. Räumliche Muster der vorhergesagten Oberbodentiefe [cm] (d), die Pflugsohlen-Tiefe [cm] (e) und der Gesamtkohlenstoffgehalt [Gew.-%] (f). Klassifiziert mittels Quantile

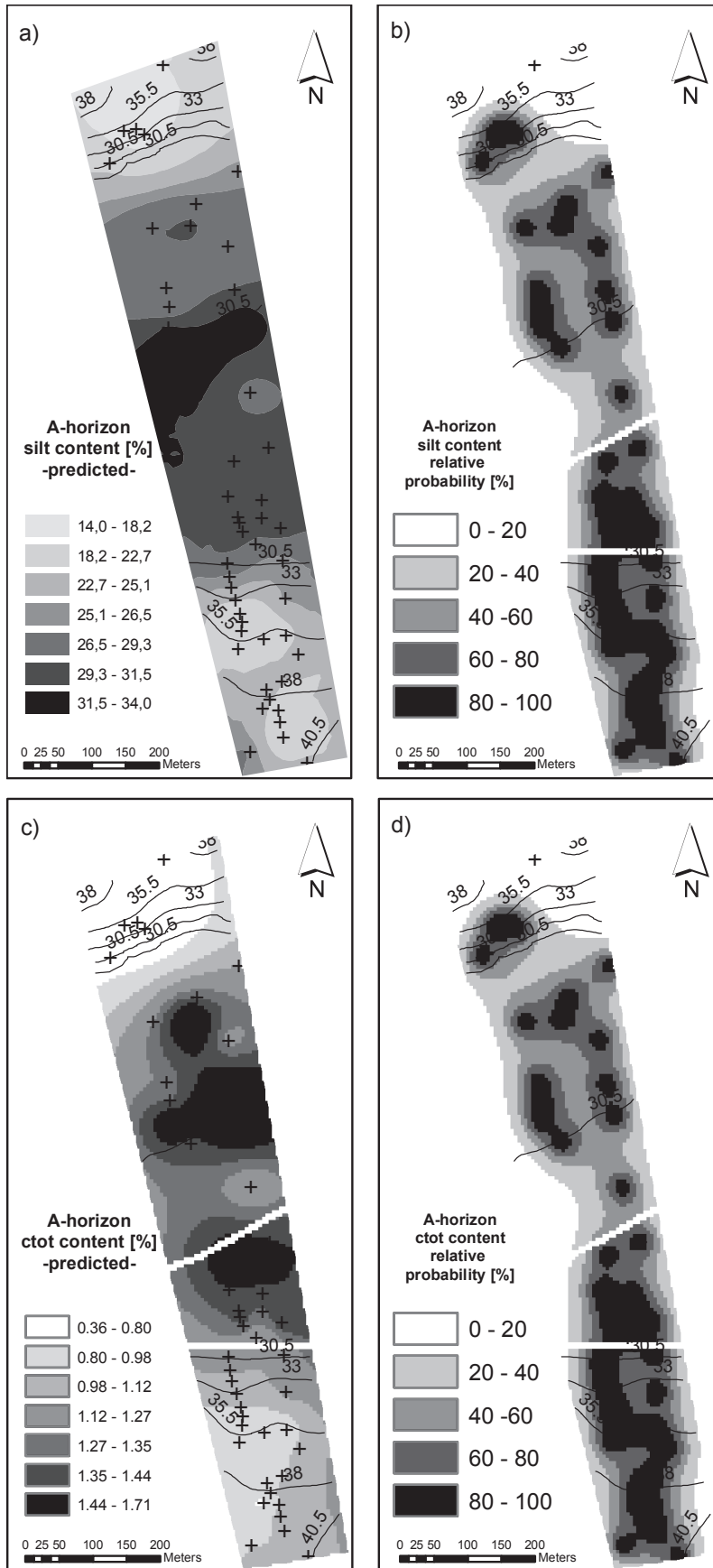


Abbildung 6.7: Regionalisierung des Schluffgehaltes und des Gesamtkohlenstoffgehaltes sowie die Darstellung der Eintrittswahrscheinlichkeit unter Verwendung der Krigingvarianz. Es werden Zonen relativer Unsicherheit abgebildet

6.1.3 Feldskala

Die Variabilität von bodenphysikalischen Eigenschaften auf der Feldskala (s. Abbildung 6.8) ist im Rahmen einer weiteren Messkampagne untersucht worden. Die Auswahl der untersuchten Felder erfolgte nach zuvor durchgeführter Relieffanalyse und Auswertung der vorliegenden Fernerkundungsdaten. Die erfassten Bodenparameter sind Tongehalt, Schluffgehalt und Sandgehalt, Tiefe des gepuddelten Horizontes, Pflugsohlen-Mächtigkeit, Gesamtkohlenstoffgehalt und Gesamtstickstoffgehalt.

Mit Hilfe der Boxplots (s. Abbildung 6.8 und 6.10) und der Textur lässt sich die Variabilität der Bodeneigenschaften beschreiben. Die Verteilungen der Bodeneigenschaften auf der Feldskala wurden jeweils für die drei Tiefenstufen anhand einer ANOVA-Analyse auf signifikante Mittelwertsunterschiede getestet. Unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Box-Plots symbolisieren signifikant unterschiedliche Mittelwerte. Die deskriptive Statistik für den gepuddelten Horizont ist in Tabelle 9.6 und für die Pflugsohle in Tabelle 9.7 (des Anhangs) zu finden. Relativ hohe Sandgehalte sind im unteren und oberen Bereich und relativ geringe Sandgehalte von ca. 50 Gew.-% im mittleren Bereich ermittelt. Für alle drei Tiefenstufen ist die Relation der Schluffgehalte zueinander ebenfalls ähnlich. So wurden Schluffgehalte von über 30 Gew.-% im unteren und mittleren Bereich sowie geringe Schluffgehalte von etwa 25 Gew.-% im oberen Hangbereich, jeweils für die Tiefe des gepuddelten Horizontes und die Pflugsohle ermittelt. Der Gesamtkohlenstoffgehalt der beprobten Felder weist signifikante Unterschiede für den oberen Bereich auf. Die Unterschiede des Mittelwertes variieren um ca. 0.6 Gew.-% im Vergleich zu dem mittleren bzw. dem unteren Feld. Für die Pflugsohle sind gegensätzliche Strukturen zu erkennen, nämlich geringe Gesamtkohlenstoffgehalte von 0.4 zu 0.6 Gew.-% im mittleren wie auch im oberen Bereich. Diese Ausprägung des Kohlenstoffgehaltes lässt auf die längere Bewirtschaftung bzw. auf den längeren Anbau von Nassreis schließen. Die Verteilung der Oberbodentiefe zeigt, im Gegensatz zu den Erkenntnissen aus der catenaren Betrachtung, höhere Oberbodentiefen für die unteren Felder von ca. 16 cm. Ähnliche Verteilungen weisen die Parameter für den mittleren und oberen Bereich auf. Die Pflugsohlen-Mächtigkeit ist erwartungsgemäß in den Tieflandbereichen, im unteren Hangbereich, größer. Geringe Mächtigkeiten von 6 cm sind für die Felder im oberen und mittleren Hangabschnitt aufgenommen worden.

Für alle Felder wurden für die Pflugsohle die Bodenarten mittel lehmiger Sand (SI3) und stark lehmiger Sand (SI4) ermittelt. Die Variabilität des Oberbodens ist etwas ausgeprägter und umfasst daneben die Bodenart mittel sandiger Lehm (LS3), vorrangig in den unteren Hangpositionen. Wie zu erwarten, sind nur geringe räumlich strukturierte Abhängigkeiten innerhalb der Felder zu finden. Unter Berücksichtigung der geringen Anzahl eingehender Beprobungspunkte ist die Berechnung der Semivarianz bzw. die Anpassung der Variogrammodelle problematisch. Die Tabellen 9.8 und 9.9 umfassen die Variogrammparameter und die NSR-Werte für den Tongehalt, Sandgehalt und Schluffgehalt sowie Gesamtkohlenstoffgehalt und Gesamtstickstoffgehalt. Darüber hinaus ist die Oberbodentiefe und die Pflugsohlen-Mächtigkeit Bestandteil

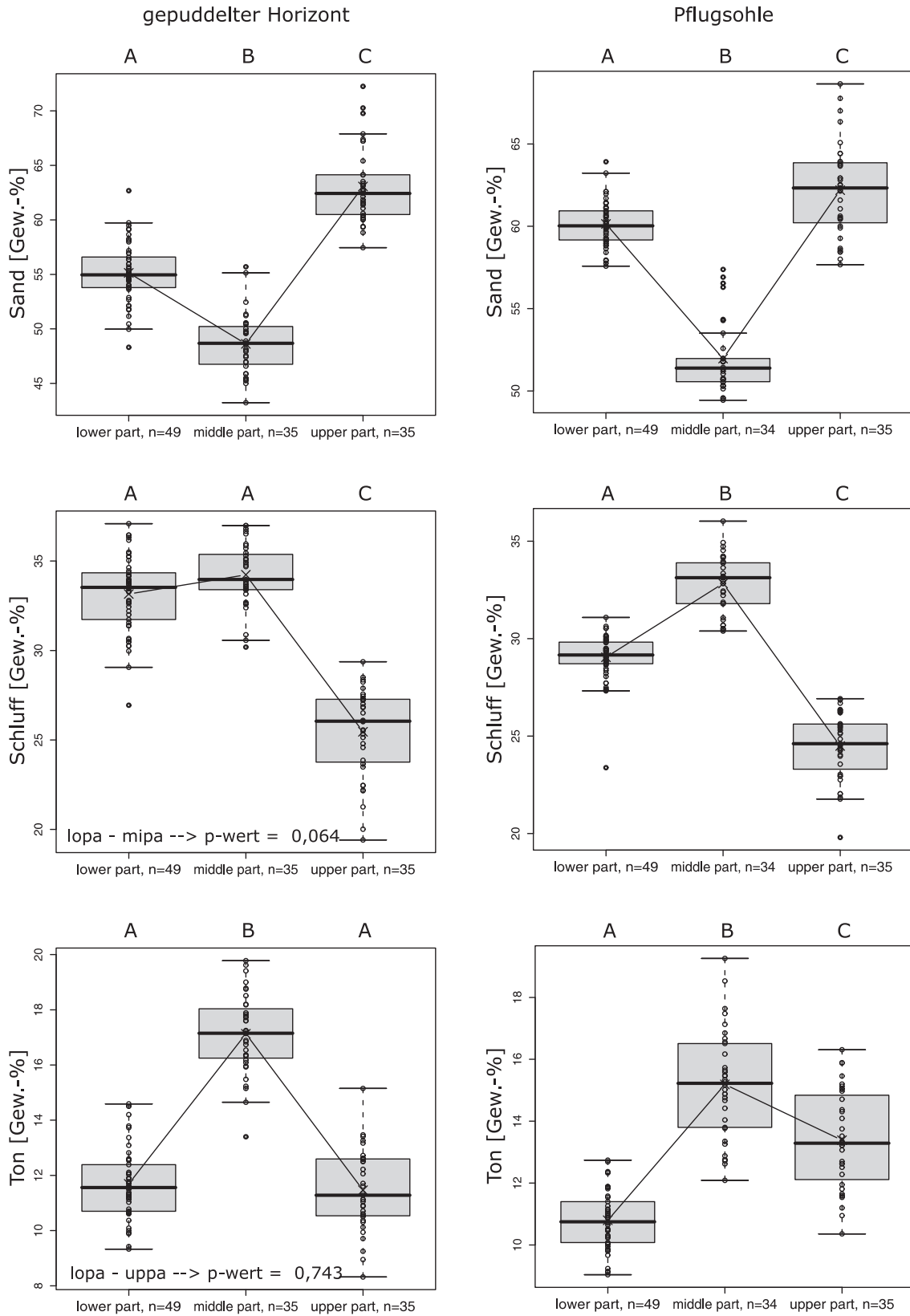


Abbildung 6.8: Boxplot zur Bodentextur in den betrachteten Feldern, Signifikanzen (ANOVA) sind durch entsprechende Buchstaben gekennzeichnet

6.1 Ergebnisse der Regionalisierung von Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala, der catenaren Skala sowie der Feldskala

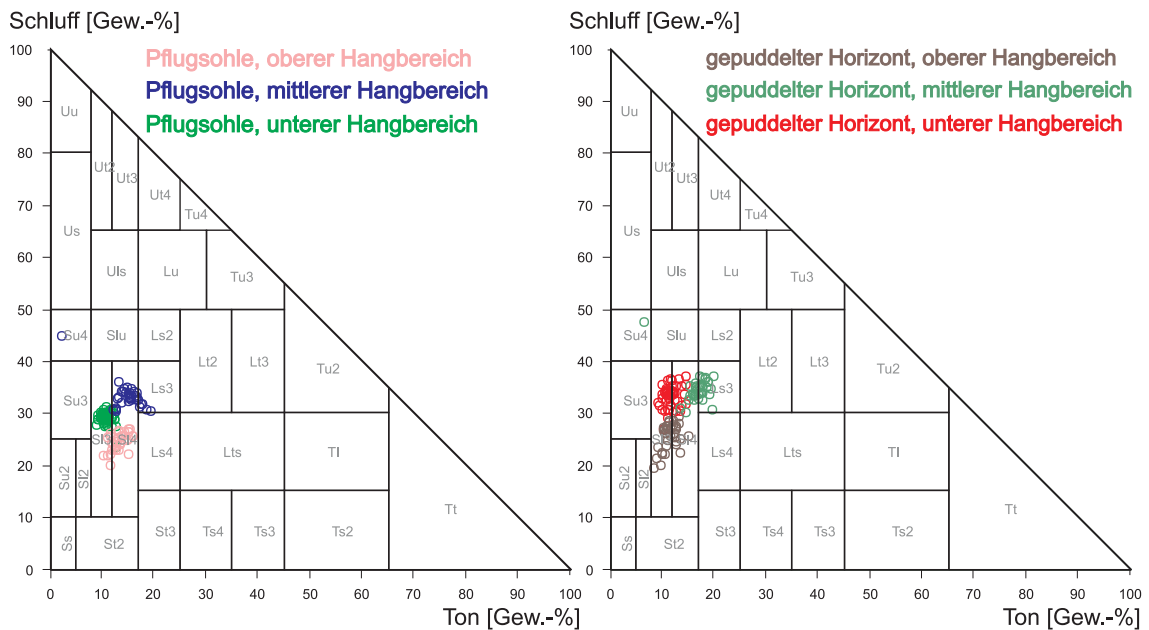


Abbildung 6.9: Die Verteilung der Bodenarten in den betrachteten Hangbereichen

der Auswertung. Die Parameter sind für alle drei aufgenommenen Horizonte auf den drei Feldern der Catena dargestellt. Mit Ausnahme des Gesamtstickstoffgehaltes, der einen NSR von 36 % aufweist, zeichnen sich die Bodenparameter Sandgehalt und Schluffgehalt durch eine geringe strukturierte räumliche Abhängigkeit mit Werten von 64 bis 100 % aus. Die höchste strukturierte räumliche Abhängigkeit wurde für den Schluffgehalt berechnet, der zwischen 22 und 27 % im mittleren Teil der Catena liegt. Ausgehend von den vorgestellten Ergebnissen liegt die Vermutung nahe, dass die räumlich strukturierten Abhängigkeiten auf der Feldskala nur in einem geringen Maße ausgebildet sind. Vorangegangene Studien auf der Feldskala in Reislandschaften haben gezeigt, dass die räumliche Verteilung der Bodeneigenschaften stark von den bodenbearbeitenden Maßnahmen abhängig ist (DOBERMANN ET AL., 1997). Untersuchungen von DOBERMANN (1994) ergaben signifikante Zusammenhänge zwischen den Verfahren der Bodenbearbeitung, wie dem „levelling“, dem Düngemittleinsatz, der Bewässerung und der Ausprägung verschiedener Bodeneigenschaften.

Aufgrund der Tatsache, dass die Position der Felder im Hangverlauf direkt mit dem Alter bzw. der Dauer der Bewirtschaftung in Zusammenhang steht, lassen sich eindeutige Aussagen über die Beziehung zu den Bodeneigenschaften machen. Zur Darstellung der räumlichen Variabilität auf der Feldskala wurde das Ordinary-Kriging-Interpolationsverfahren verwendet (s. Abbildung 9.3).

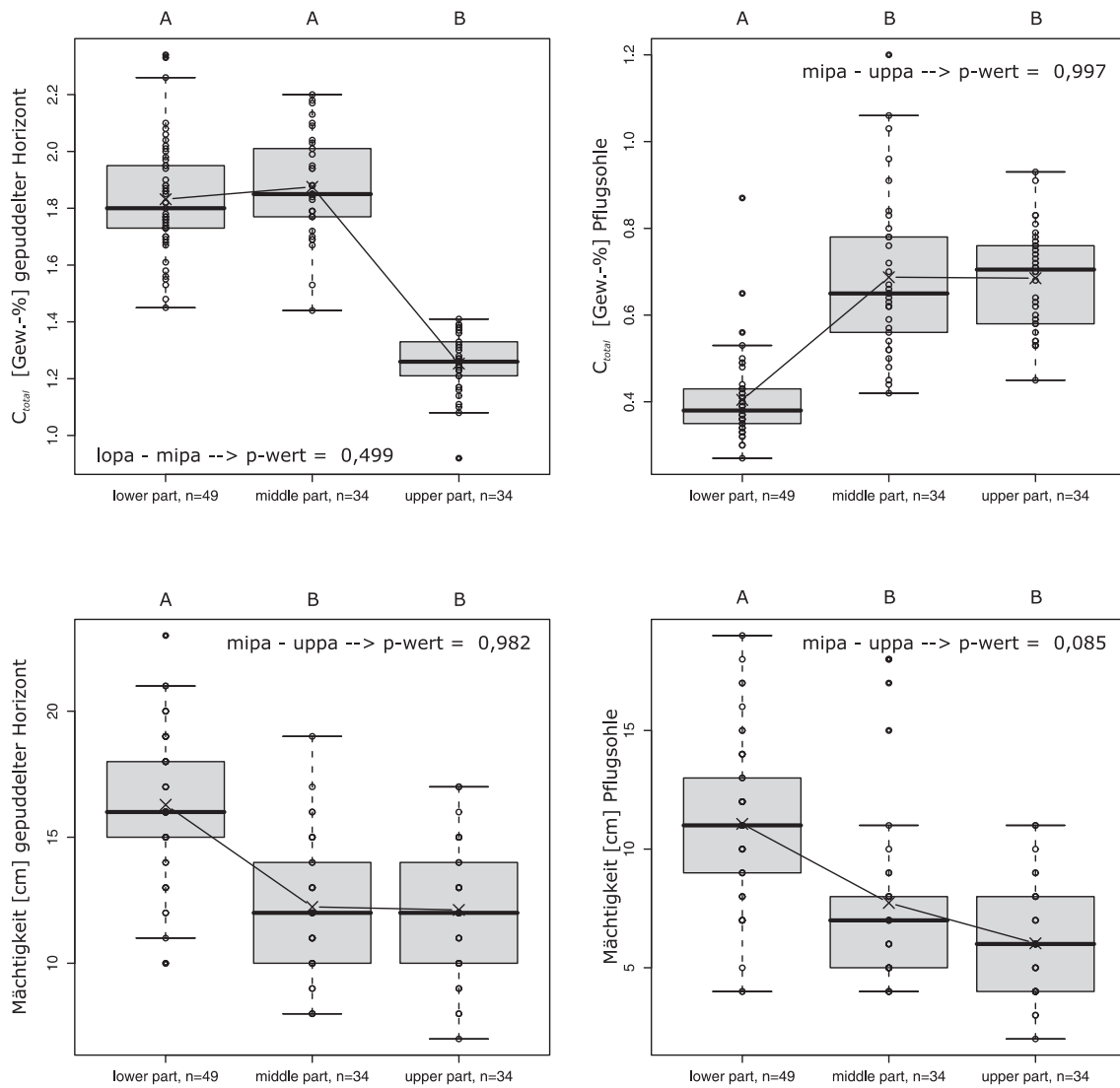


Abbildung 6.10: Boxplot zum Gesamtkohlenstoffgehalt in den betrachteten Feldern, Signifikanzen (ANOVA) sind durch entsprechende Buchstaben gekennzeichnet

6.1 Ergebnisse der Regionalisierung von Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala, der catenaren Skala sowie der Feldskala

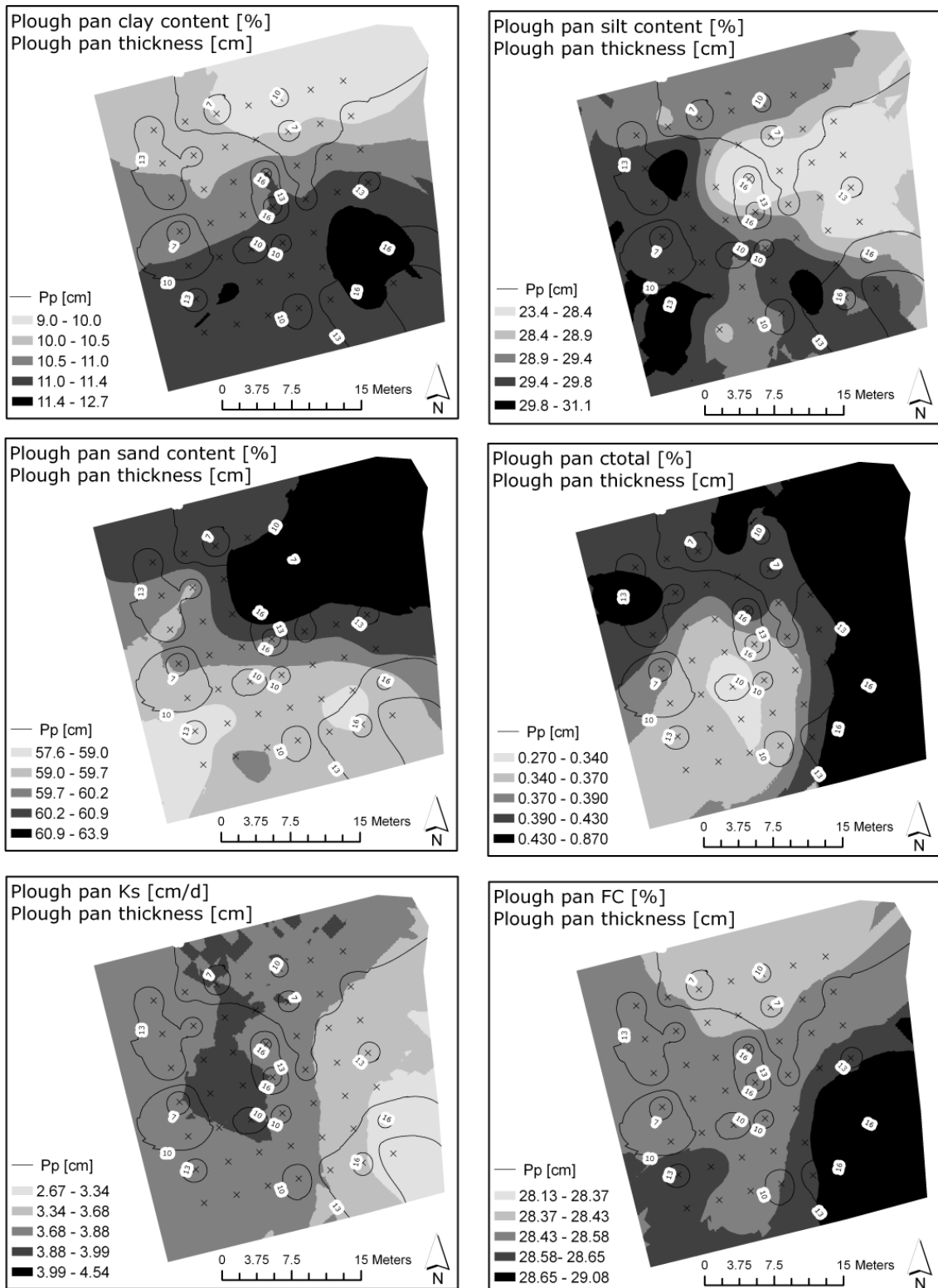


Abbildung 6.11: Flächenhafte Darstellung ausgewählter bodenphysikalischer Eigenschaften und pedohydrologischer Parameter der Pflugschle für das untere Feld der Toposequenz A

6.1.4 Skalenübergreifende Betrachtung der räumlichen Korrelationsstrukturen von ausgewählten Bodenparametern

Nach WESTERN & BLOSCHL (1999) beeinflusst das Skalen-Triplet aus Abstand der Probenahmeplätze, Größe der betrachteten Fläche und das beprobte Volumen die skalenabhängige Semivarianz und vor allem die Autokorrelationslängen jeder Variable. Im Folgenden werden die räumlichen Autokorrelationen mit Hilfe des NSR-Ratios für die drei betrachteten Skalen untersucht. Für die skalenübergreifende Analyse des NSR-Ratios wurde deutlich, dass auf der

Tabelle 6.20: Vergleich des Nugget-Sill-Ratios für die untersuchten Skalen. Zusätzliche Darstellung der für die Variogramm-Modellierung relevanten Parameter der räumlichen Autokorrelation

Parameter	Skala	keine Trans.		Nugget Varianz c_0	Strukt. Varianz c_S	Ges. Sill (c_0+c_S)	Reichw. (m) a	NS- Ratio (%)	Kla. der räuml. Abhängigk.
		W	p						
Ton [%]	FS	0.958	0.079	0.830	0.610	1.440	4	57.6	M
	CS	0.974	0.350	0.800	11.300	12.100	223	6.6	S
	LS	0.99	0.101	16.870	5.750	22.620	1536	74.6	M
Schluff [%]	FS	0.972	0.284	2.420	0.000	2.420	115	100.0	W
	CS	0.965	0.150	3.600	29.700	33.300	341	10.8	S
	LS	0.98	0.007	21.460	22.350	43.810	810	49.0	M
Sand [%]	FS	0.984	0.753	4.460	0.170	4.630	4	96.3	W
	CS	0.973	0.305	6.600	55.100	61.700	224	10.7	S
	LS	0.98	0.007	60.180	32.140	92.320	1190	65.2	M
Tiefe [cm]	FS	0.978	0.492	11.460	0.000	11.460	7	100.0	W
	CS	0.909	0.001	1.220	2.380	3.600	34	33.9	M
	LS	0.99	0.09	6.300	7.130	13.430	442	46.9	M
C total [%]	FS	0.969	0.213	0.030	0.020	0.050	185	60.0	M
	CS	0.979	0.535	0.010	0.100	0.110	370	9.1	S
	LS	0.95	< 0.001	0.106	0.140	0.246	600	43.1	M

n = 49 (Ap. FS); n = 48 (Ap. CS); n = 174 (Ap. LS); W: schlechte räumliche Abhängigkeit;

M: moderate strukturierte räumliche Abhängigkeit; S: starke strukturierte räumliche Abhängigkeit;

CS = catenare Skala; LS = Landschaftsskala; W = Shapiro-Wilk.

FS = Feldskala (lower part). sphärisches Vari.

Feldskala keine räumliche Abhängigkeit vorliegt. Die gesamte Beschreibung der skalenübergreifenden Betrachtung der räumlichen Autokorrelationen ist der Tabelle 6.20 zu entnehmen. Für die Landschaftsskala lassen sich ähnliche Werte wie auf der Feldskala ableiten, wenn auch nicht in gleicher Höhe. Der chaotische Anteil wird aufgrund der vielfach wechselnden Fruchtfolgen größer. Daneben ist der Einfluss des Ausgangssubstrats als Grund für die schlechte räumliche Strukturiertheit zu nennen. Zusätzlich wird der Anteil von älteren Feldern, die eine reine Reis-Reis-Rotation aufweisen, mit dem kleiner werdenden Maßstab geringer. Diesbezüglich ist zu verzeichnen, dass der chaotische Anteil an räumlicher Strukturiertheit auf der Landschaftsskala zunimmt, was insbesondere durch die generell hohen *NSR – Ratios* von über 60 % ersichtlich ist. Einen relativ strukturierten Zusammenhang liefert die Verteilung des Gesamtkohlenstoffgehaltes von 43.1 Gew.-%. Im Vergleich zur Textur liefert der Gesamtkohlenstoffge-

6.1 Ergebnisse der Regionalisierung von Bodeneigenschaften auf der Landschaftsskala, der catenaren Skala sowie der Feldskala

halt einen deutlich geringeren chaotischen Anteil auf der Landschaftsskala. Dies ist vermutlich auf den deutlichen Zusammenhang zwischen langjähriger Landnutzung und dem reduzierten Mineralisierungsvermögen der organischen Substanz in Böden von Nassreisbausystemen zurückzuführen. Hier sind als allgemeine Ursachen die Managementeinflüsse zu nennen. Es ist anzunehmen, dass die Bodenbearbeitung und die Maßnahmen zur Bewässerung Ursachen für die kurzen Reichweiten der räumlichen Verteilung der Bodeneigenschaften sind.

Der sogenannte Biplot weist im Idealfall eine Clusterung der Merkmalsausprägungen auf. Die Vektoren zeigen je nach Länge entsprechend auf die korrespondierenden Zentren der Cluster. Die hier dargestellten Korrelationskreise sind das Ergebnis dieser multivariaten Analyse. Sie stellen die Zusammenhänge zwischen den eingehenden Parametern und den ermittelten Hauptkomponenten dar. Abbildung 6.12 zeigt die Zusammenhänge der Originalvariablen mit den zwei berechneten Komponenten der durchgeführten Hauptkomponentenanalyse. Dabei erklären die Hauptkomponenten 1 und 2 für den Oberboden der Feldskala 50 und 17 % der gesamten Varianz. Die erste Hauptkomponente wird dominiert vom Gesamtkohlenstoffgehalt, dem Schluffgehalt und dem Tongehalt. Für die Landschaftsskala sind ähnliche Werte zu finden. Es werden Gesamtvarianzen für die erste Hauptkomponente von 54 % und für die zweite Hauptkomponente von 17 % berechnet. Für die catenare Skala ergaben sich erklärte Varianzen von 64 % für die erste Hauptkomponente und 19 % für die zweite Hauptkomponente. Für diesen Unterschied können skalenabhängige Faktorkombinationen bzw. skalenspezifische Charakteristika verantwortlich gemacht werden, deren Identifizierung bzw. Deutung sich jedoch als problematisch erweist. Die Korrelationskreise der Abbildungen 6.12 und 6.13 zeigen deutliche skalenabhängige Muster, allerdings wird aufgrund der relativ geringen erklärten Varianz der zwei ersten Hauptkomponenten von 50 - 64 % nur ein Teil der Gesamtvarianz skalenspezifisch betrachtet. Auf allen drei Skalen korreliert der Sandgehalt nur gering mit den Bodenparametern Schluffgehalt, Tongehalt sowie dem Gesamtkohlenstoffgehalt und dem Gesamtstickstoffgehalt. Nach wie vor zeigt sich, dass die Bodeneigenschaften Gesamtkohlenstoffgehalt und Gesamtstickstoffgehalt mit dem Schluffgehalt sehr gut über die ersten Hauptkomponenten erklärt werden können. Mit Hilfe dieser Strukturen lassen sich Aussagen über mögliche Kolinearitäten im Datenbestand treffen. So sind beispielsweise auf der Landschaftsskala die Zusammenhänge zwischen der relativen Höhe und der Höhe über Tiefenlinie, wie bereits in der Korrelationsanalyse aufgezeigt, ausgesprochen eng. Auf der catenaren Skala sind dagegen keine Effekte der Kolinearität zwischen diesen Parametern zu erkennen. Wenn es für die durchgeführte Hauptkomponententransformation eindeutige Punktwolken bzw. skalenunabhängige Korrelationsstrukturen gegeben hätte, wäre mit diesen Komplexen, bei entsprechend hoher erklärter Varianz und Integration weiterer Variablen, eine Identifikation der bodenbildenden Faktoren möglich gewesen. Aufgrund der nicht eindeutigen Korrelationsstruktur ist die Interpretationsfähigkeit jedoch fragwürdig.

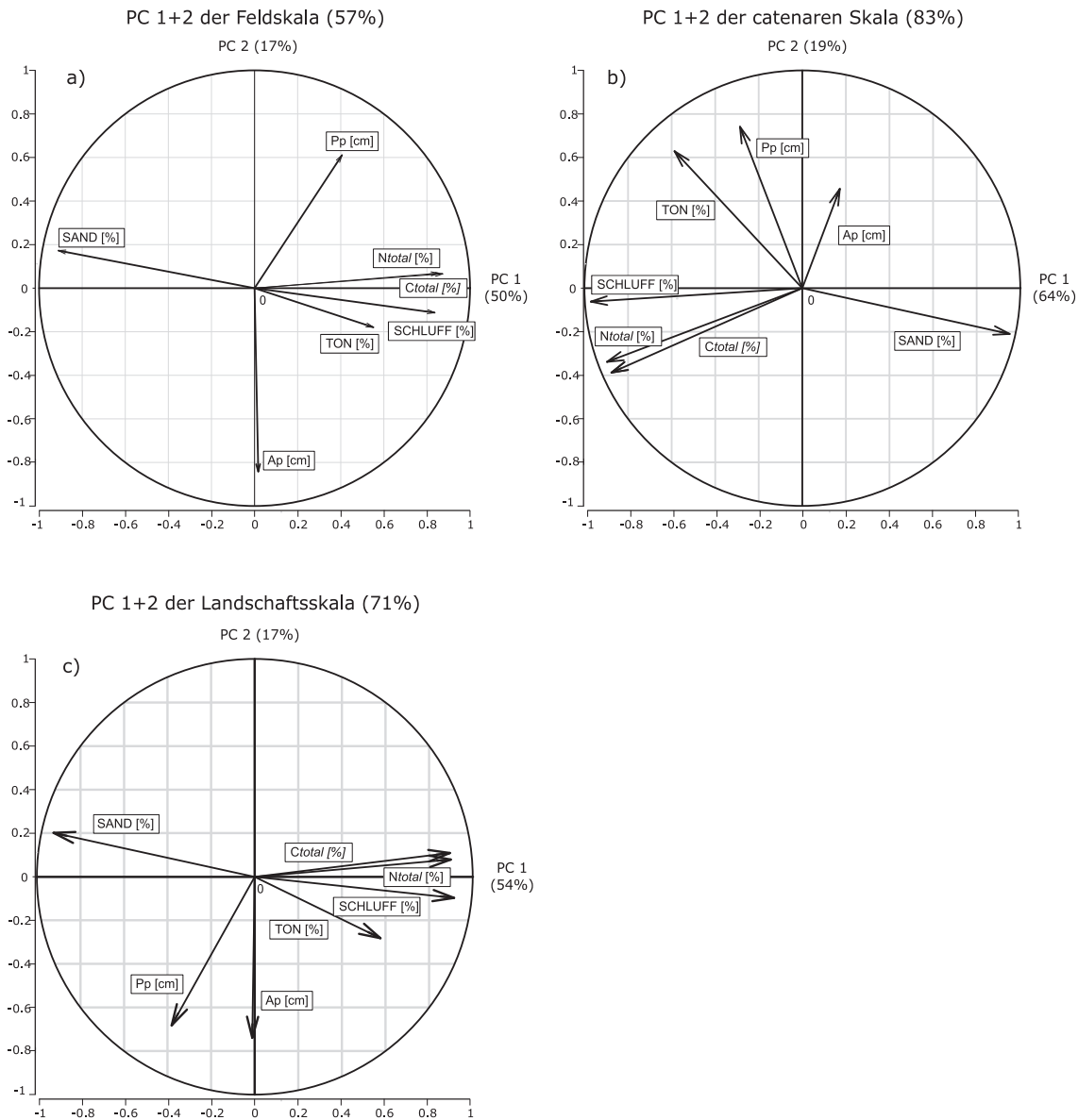


Abbildung 6.12: Korrelationskreise für die Zusammenhänge zwischen Bodenparametern und den ersten zwei Hauptkomponenten für die Feldskala, die catenare Skala und die Landschaftsskala

6.2 Räumliche Variabilität und Korrelationsstrukturen pedohydrologischer Parameter auf unterschiedlichen Skalen

Ausgehend von den vorhergesagten Verteilungen der betrachteten Bodenparameter werden in diesem Kapitel die für den Reisertrag wesentlichen hydrologischen Bodeneigenschaften (nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Pflugsohle) auf Grundlage von Pedotransferfunktionen nach WÖSTEN ET AL. (2001) berechnet. Nach Anwendung der Pedotransferfunktionen auf die Punktdatensätze der Landschaftsskala und der catenaren Skala werden die Zusammenhänge zwischen ausgewählten Reliefparametern, multispektralen Informationen sowie den untersuchten pedohydrologischen Eigenschaften mit Hilfe

6.2 Räumliche Variabilität und Korrelationsstrukturen pedohydrologischer Parameter auf unterschiedlichen Skalen

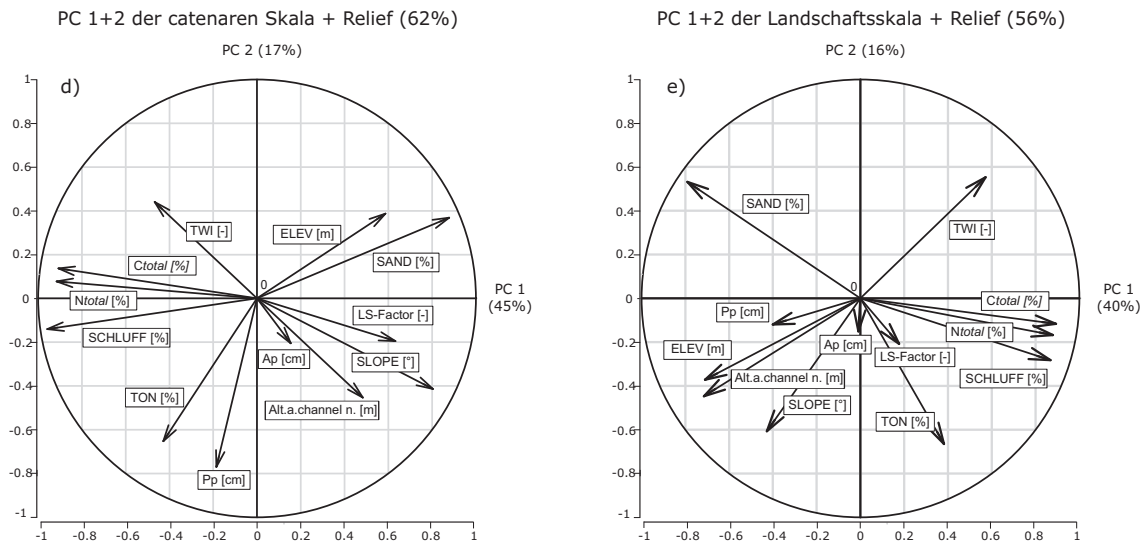


Abbildung 6.13: Zusammenhänge zwischen Bodenparametern, Reliefparametern und den ersten zwei Hauptkomponenten für die catenare Skala und die Landschaftsskala, dargestellt anhand von Korrelationskreisen

statistischer Kennwerte dargestellt. Die geschätzten räumlichen Verteilungen der pedohydrologischen Eigenschaften des gepuddelten Horizontes und der Pflugsohle im Untersuchungsgebiet werden gekennzeichnet, um anschließend mit Hilfe von Vegetationsindizes aus Fernerkundungsdaten übereinstimmende räumliche Muster herauszuarbeiten zu können. Darüber hinaus werden flächenhaft verfügbare Bodeninformation für Modellanwendungen bereitgestellt.

6.2.1 Landschaftsskala

Der Unterschied zwischen der ersten und zweiten Tiefenstufe bzw. des gepuddelten Horizontes und der Pflugsohle zeigt erwartungsgemäß deutliche Unterschiede hinsichtlich der minimalen und maximalen Ausprägung der pedohydrologischen Parameter. Die deskriptive Statistik der geschätzten van Genuchten-Parameter und der Parameter FK , PWP , nFK und Ks sind den Tabellen 6.21 und 6.22 zu entnehmen. Der residuale Wassergehalt wird von der PTF nach WÖSTEN ET AL. (2001) nicht berücksichtigt und wird standardmäßig mit $0.01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ definiert, vgl. BELDER ET AL. (2007). Der wichtige Parameter θ_s (Sättigungswassergehalt) weist ähnliche Variationskoeffizienten für die Pflugsohle und den gepuddelten Horizont auf. Der Medianwert des Oberbodens beträgt $0.489 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, der der Pflugsohle $0.349 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Dies ist auf die niedrigere Lagerungsdichte im gepuddelten Horizont zurückzuführen. Gleiche Relationen sind für den Ks -Wert ermittelt worden. Der residuale Wassergehalt ist nicht berechnet worden, es ist jedoch zu erwarten, dass aufgrund des geringfügig höheren Tongehaltes ein höherer residueller Wassergehalt vorliegt. Der Parameter α ist der Kehrwert des Luftentrittspunktes und ist mit einem Mittelwert von 0.037 geringer als der Mittelwert der Pflugsohle. Der Parameter n ist im Mittel von 1.348 höher als der Mittelwert der Pflugsohle von 1.232 bei einem Variationskoeffizienten von 5.9%. Die geschätzte hydraulische Leitfähigkeit des Oberbodens

Tabelle 6.21: Deskriptive Statistiken bodenphysikalischer Parameter des Oberbodens (puddled layer) auf der Landschaftsskala des Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebietes

Ah-Horizont	Bodenphysikalische Parameter							
	Θ_s [$cm^3 cm^{-3}$]	α [cm^{-3}]	λ [–]	n [–]	FK [$cm^3 cm^{-3}$]	PWP [$cm^3 cm^{-3}$]	nFK^* [$cm^3 cm^{-3}$]	K_s [$cm d^{-1}$]
MW	0.508	0.012	-1.506	1.348	0.230	0.069	16.06	161.80
MED	0.489	0.037	-1.544	1.305	0.216	0.072	15.83	164.17
MIN	0.470	0.120	-2.961	1.196	0.186	0.019	11.40	51.57
MAX	0.576	0.049	0.732	1.510	0.296	0.109	25.59	373.64
SA	0.035	0.001	0.730	0.071	0.030	0.023	2.77	58.614
VK [%]	6.98	29.88	48.46	5.40	13.31	33.52	17.23	36.22
n	174	174	174	174	174	174	174	174

* multipliziert mit 100, nFK bei pF 1.8 und pF 4.2

liegt für den Medianwert bei $164.17 cm d^{-1}$ und ist aufgrund der geringen Lagerungsdichte (vgl. Abbildung 6.17) in Kombination mit dem lehmig-sandigen Substrat als sehr hoch einzustufen. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit $cm d^{-1}$ der Pflugsohle entspricht nach KA5 einer mittleren gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. Die Feldkapazität $cm^3 cm^{-3}$ ist generell im gepuddelten Horizont höher als in der Pflugsohle. Die mittlere Feldkapazität $cm^3 cm^{-3}$ ist als gering einzustufen und entspricht Untersuchungen von SAMSON ET AL. (2004). Ein Ver-

Tabelle 6.22: Deskriptive Statistiken bodenphysikalischer Parameter der Pflugsohle (Plough pan) auf der Landschaftsskala des Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebietes

Pp-Horizont	Bodenphysikalische Parameter							
	Θ_s [$cm^3 cm^{-3}$]	α [cm^{-3}]	λ [–]	n [–]	FK [$cm^3 cm^{-3}$]	PWP [$cm^3 cm^{-3}$]	nFK^* [$cm^3 cm^{-3}$]	K_s [$cm d^{-1}$]
MW	0.340	0.051	0.693	1.248	0.145	0.057	8.772	43.382
MED	0.349	0.052	0.665	1.232	0.145	0.060	8.696	41.609
MIN	0.279	0.021	0.376	1.079	0.114	0.020	3.553	13.421
MAX	0.379	0.084	1.227	1.483	0.180	0.126	12.986	138.36
SA	0.024	0.014	0.160	0.073	0.010	0.020	1.591	20.926
VK [%]	7.173	28.757	23.138	5.898	7.216	35.859	18.142	48.237
n	155	155	155	155	155	155	155	155

* multipliziert mit 100, nFK bei pF 1.8 und pF 4.2

gleich der Variationskoeffizienten zwischen Pflugsohle und gepuddeltem Horizont zeigt für die Landschaftsskala keine deutlichen Unterschiede, abgesehen von λ : 48.46 für den gepuddelten Horizont und 23.138 für die Pflugsohle. Zusätzlich sind Unterschiede des Variationskoeffizienten für den K_s -Wert zu erkennen, was aufgrund der höheren Trocken-Rohdichte auch zu erwarten war. Im Gegensatz zu den Ergebnissen auf der catenaren Skala zeigt die Variabilität des K_s -Wertes für die Pflugsohle höhere Werte als für den Oberboden (vgl. Kapitel 6.2.2).

Die Zusammenhänge zwischen den pedohydrologischen und Relief-Parametern sind in der Tabelle 6.23 dargestellt. Hervorzuheben sind die signifikanten Zusammenhänge zwischen der relativen Höhe H_r und Θ_s für die Pflugsohle von $r = 0.75$. Darüber hinaus existiert ebenfalls

6.2 Räumliche Variabilität und Korrelationsstrukturen pedohydrologischer Parameter auf unterschiedlichen Skalen

ein positiver Zusammenhang zwischen der geschätzten hydraulischen Leitfähigkeit K_s und der relativen Höhe H_r von $r = 0.72$. Die gemessenen hydraulischen Leitfähigkeiten und vor allem die ermittelten Lagerungsdichten wurden ausschließlich für die Toposequenz erhoben. Aus diesem Grund sind weitere Regionalisierungsansätze ausschließlich für die catenare Skala durchgeführt worden. Hier muss erwähnt werden, dass die Trocken-Rohdichte auf der Toposequenz ermittelt worden ist, und eine Approximation mit Hilfe der Landnutzungsklassifizierung und der Position im Gelände durchgeführt worden ist. Die ermittelten Trocken-Rohdichten erscheinen plausibel und sind mit den Untersuchungen von JANSSEN (2008); JANSSEN & LENNARTZ (2007); SANDER & GERKE (2007) vergleichbar. Die räumlichen Verteilungen der gesättigten

Tabelle 6.23: Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern für die betrachtete Landschaftsskala (Ap- und Pp-Horizont)

P.	Θ_s		FK		PWP		nFK		K_s	
	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp
H_r	-0.62***	0.75***	-0.68***	0.31***	-0.42***	-0.13	-0.48***	0.35***	-0.06	0.72***
H_{ch}	-0.40***	0.49***	-0.45***	0.14	-0.35***	-0.09	-0.23**	0.20	0.13	0.52***
β	-0.22*	0.24**	-0.19	0.07	-0.18*	-0.01	-0.14	0.08	0.07	0.26
C_h	-0.06	0.05	-0.05	-0.07	-0.10*	-0.03	0.04	0.01	0.12	0.11
C_v	-0.20	0.16	-0.19	-0.15	-0.24**	-0.18	0.09	0.16	0.23**	0.22
CDI	-0.10	0.12	-0.13**	0.01	-0.08	0.02	-0.05	0.01	0.06	0.13
TWI	0.26***	-0.28***	0.24***	-0.03	0.26**	0.05	0.09	-0.09	-0.17	-0.33***
Ω	0.10	-0.15	0.15	0.07	0.14	0.10	-0.05	-0.07	-0.17	-0.20
LS	-0.08	0.05	-0.03	0.10	-0.02	0.11	-0.14	-0.05	-0.08	0.04

Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman; * mindestens auf dem 99 %-Niveau signifikant;

** mindestens auf dem 99,5 %-Niveau signifikant; Ap: Oberboden, Pp: Pflugsohle;

H_r = relative Höhe; β = Hangneigung; C_v = Vertikalkrümmung; C_h = Horizontalkrümmung;

H_{ch} = Höhe über Tiefenlinie; CDI = Konvergenz/Divergenz Index; TWI = Topographischer Feuchteindex;

Ω = Stream Power Index; LS = LS-Faktor (USLE); n = 174 (Ap), n = 155 (Pp)

hydraulischen Leitfähigkeit, der nutzbaren Feldkapazität, der Lagerungsdichte sowie der Horizontmächtigkeit sind der Abbildung 6.14 zu entnehmen. Obgleich die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, für die Pflugsohle recht hoch erscheint, steht diese in Korrespondenz mit den K_s -Messungen aus dem Jahr 2006 (vgl. Abbildung 6.16). Im Vergleich zu Untersuchungen bzw. Ergebnissen von BELDER ET AL. (2007), die K_s -Werte von 0.4 bis 50 $mm d^{-1}$ in schluffig tonigem Lehm und von 7 bis 20 $cm d^{-1}$ in einem tonigen Boden ermittelten, korrespondieren die durchgeführten Messungen für die Substrate lehmiger Sand und sandiger Lehm im Untersuchungsgebiet. Die Darstellung der nutzbaren Feldkapazität des Oberbodens liefert für das Liu-Jia-Zhan-Untersuchungsgebiet klare räumliche Muster. In den Tieflandbereichen sind Werte von bis zu 21.2 $cm^3 cm^{-3}$ zu erkennen, in den höher gelegenen Bereichen dagegen geringere Werte zwischen 15.5 und 18.8 $cm^3 cm^{-3}$. Die Lagerungsdichten wurden anhand ermittelter Werte und der klassifizierten relativen Höhe für die Reisfelder abgeleitet. Die Horizontmächtigkeit der Pflugsohle weist für den zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes deutlich höhere Werte auf als in den Rand- bzw. den höheren Bereichen des Untersuchungsgebietes. Nicht zu erklären sind die geringen Mächtigkeiten in den nord-westlich gelegenen

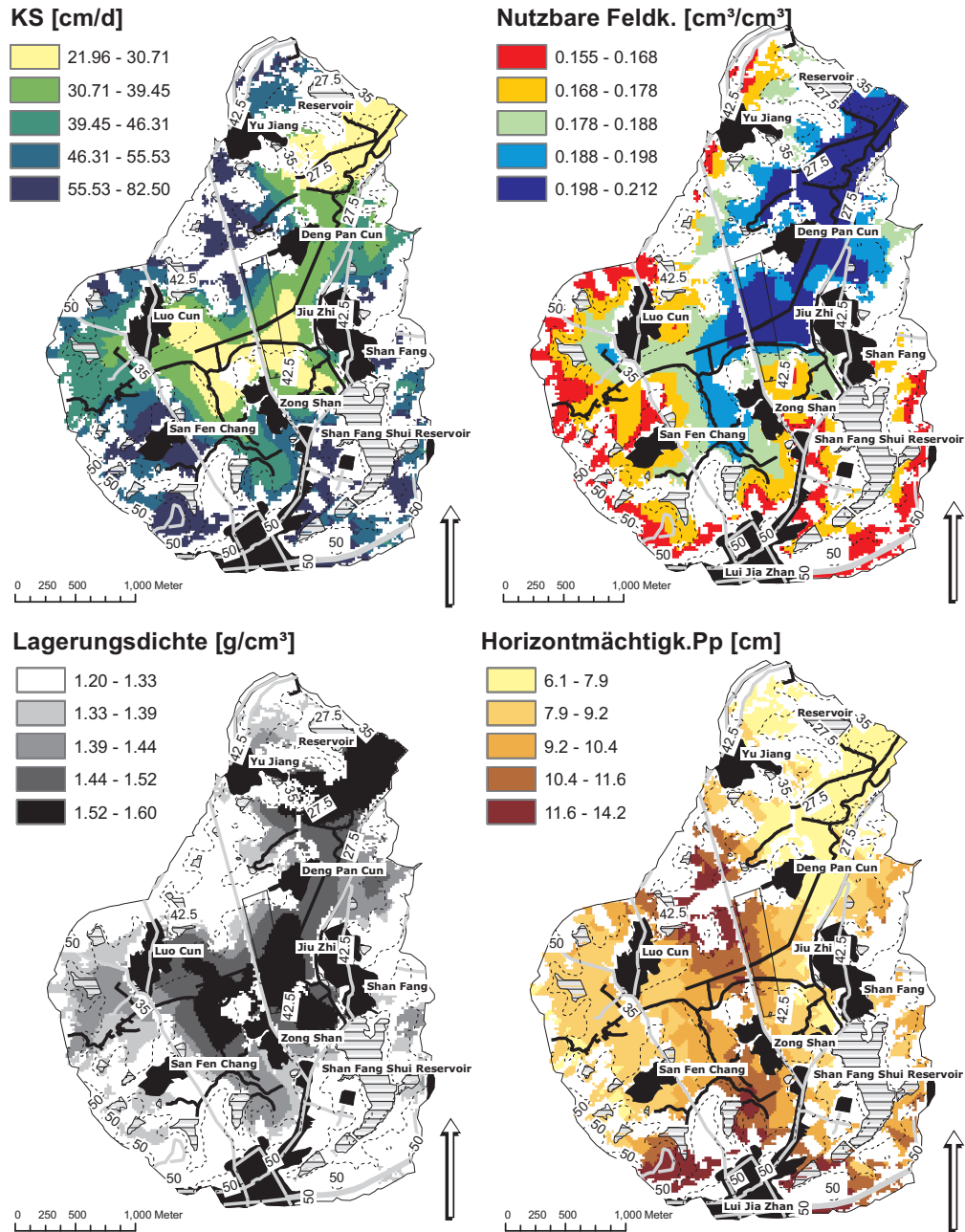


Abbildung 6.14: Räumliche Verteilung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (K_s) für die Pflugsohle und der nutzbaren Feldkapazität für den Oberboden im Untersuchungsgebiet Liu Jia Zhan. Dargestellt sind die Ergebnisse des RK C Modells nur für Gebiete mit Reis als Anbaufrucht (vgl. Kapitel 5.2.2.2)

Tieflandsbereichen des Untersuchungsgebietes. Die räumliche Verteilung variiert zwischen 6.1 cm im südlichen Bereich und 14.2 cm im zentralen Teil des Untersuchungsgebietes.

6.2.2 Catenare Skala

Die pedohydrologischen Parameter auf der catenaren Skala sind sowohl auf Basis von Regressionen als auch hinsichtlich ihrer räumlichen Autokorrelation untersucht worden. Für eine detaillierte Betrachtung der Pflugsohle standen hierfür keine Werte zur Verfügung. Deshalb wurden die regionalisierten bzw. approximierten Werte aus der Landschaftsskala verwendet. Speziell für die Berechnung hydraulischer Eigenschaften im Untersuchungsgebiet (vgl. Kapitel 6.2.2) sind die pedohydrologischen Eigenschaften der Pflugsohle von entscheidender bzw. zentraler Bedeutung. Bei einer Grundgesamtheit von $n = 48$ zeigen sich deutliche Unterschiede hinsichtlich der Variationskoeffizienten (VK) für den gepuddelten Horizont und die Pflugsohle. Hervorzuheben ist der *PWP* mit einem Variationskoeffizienten von 28.3 % für den gepuddelten Horizont und einem Variationskoeffizienten von 5.4 % für die Pflugsohle. Generell weisen die pedohydrologischen Parameter der Pflugsohle geringere Variabilitäten als die des gepuddelten Horizontes auf. Dies ist auf bodenbearbeitende Faktoren, wie beispielsweise das Puddling oder der Einfluss des flächenspezifischen Strawmanagements zurückzuführen. Die Annahme, dass das Bodenmanagement die Variabilität des gepuddelten Horizontes stärker beeinflusst als die der Pflugsohle, kann hiermit bestätigt werden. Korrespondierende Ergebnisse sind von CABANGON & TUONG (2000) veröffentlicht. Eine detaillierte Übersicht der Variabilitätsmaße pedohydrologischer Parameter, differenziert nach Oberboden und Pflugsohle, ist den Tabellen 6.24 und 6.25 zu entnehmen. Die Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zeigen für

Tabelle 6.24: Deskriptive Statistiken bodenphysikalischer Parameter des Oberbodens (puddled layer) für die catenare Skala im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet

Ah-Horizont	Bodenphysikalische Parameter							
	Θ_s [cm ³ cm ⁻³]	α [cm ⁻³]	λ [-]	n [-]	FK [cm ³ cm ⁻³]	PWP [cm ³ cm ⁻³]	nFK^* [cm ³ cm ⁻³]	K_s [cm d ⁻¹]
MW	0.505	0.034	-1.739	1.307	0.228	0.068	16.01	196.0
MED	0.489	0.040	-1.756	1.306	0.214	0.070	14.76	184.2
MIN	0.464	0.013	-2.674	1.246	0.037	0.034	13.37	114.5
MAX	0.571	0.047	-0.470	1.407	0.292	0.106	23.43	361.0
SA	0.042	0.012	0.479	0.044	0.037	0.019	2.65	57.8
VK [%]	8.240	34.645	27.556	3.336	16.046	28.332	16.56	29.5
n	48	48	48	48	48	48	48	48

* multipliziert mit 100, nFK bei pF 1.8 und pF 4.2

den gepuddelten Horizont deutlich engere Zusammenhänge als für die Pflugsohle. Die relative Höhe weist auch bei Betrachtung pedohydrologischer Parameter signifikant positive wie negative Zusammenhänge auf. Hervorzuheben sind die Zusammenhänge zwischen der relativen Höhe und der hydraulischen Leitfähigkeit von $r = 0.70$ des Oberbodens und $r = 0.39$ für die Pflugsohle. Alle weiteren berechneten Reliefparameter liefern keine Zusammenhänge zur hydraulischen Leitfähigkeit der Pflugsohle. Zusätzlich ist der positive lineare Zusammenhang zwischen dem Topographischen Feuchteindex und Θ_s von $r = 0.42$ sowie der Feldkapazität von $r = 0.41$ von zentraler Bedeutung und lässt auf eine mögliche Reliefabhängigkeit schlie-

Tabelle 6.25: Deskriptive Statistiken bodenphysikalischer Parameter der Pflugsohle für die catenare Skala im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet

Pp**	Bodenphysikalische Parameter							
	Θ_s [cm ³ cm ⁻³]	α [cm ⁻³]	λ [-]	n [-]	FK [cm ³ cm ⁻³]	PWP [cm ³ cm ⁻³]	nFK^* [cm ³ cm ⁻³]	K_s [cm d ⁻¹]
MW	0.335	0.045	0.708	1.250	0.146	0.054	9.14	33.9
MED	0.350	0.046	0.706	1.250	0.151	0.055	9.37	36.5
MIN	0.303	0.036	0.661	1.234	0.131	0.048	8.14	23.7
MAX	0.351	0.051	0.751	1.261	0.152	0.058	9.76	40.3
SA	0.022	0.004	0.027	0.006	0.008	0.003	0.59	5.1
VK [%]	6.554	8.007	3.827	0.471	5.602	5.411	6.42	14.9
n	48	48	48	48	48	48	48	48

** aus interpolierten Werten der catenaren Skala; * multipliziert mit 100, nFK bei pF 1.8 und pF 4.2

Ben. Ebenfalls hervorzuheben ist die Hangneigung als mögliche Kovariable zur Vorhersage des K_s -Wertes des gepuddelten Horizontes. Eine Berücksichtigung der Terrassenstruktur erfolgte durch das Höhenmodell jedoch nicht. Die entwickelten Regressionsmodelle wurden mit Hilfe

Tabelle 6.26: Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern für die betrachtete Toposequenz (Ap- und Pp Horizont)

P.	Θ_s		FK		PWP		nFK		K_s	
	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp
H_r	-0.52**	-0.17	-0.46**	-0.08	-0.63**	0.56**	0.13	-0.28	0.70**	0.39**
H_{ch}	0.27	-0.36*	0.37**	-0.39**	0.24	-0.32*	0.10	-0.22	-0.01	-0.05
β	-0.34*	-0.12	-0.22	0.04	-0.51**	0.08	0.32*	-0.11	0.67**	-0.07
C_v	-0.12	0.18	0.01	0.18	-0.18	0.01	0.03	-0.15	0.12	-0.07
C_h	0.29*	-0.27	0.32*	-0.29*	0.25	-0.19	0.11	-0.17	-0.28	-0.08
CDI	0.14	-0.24	0.18	-0.27	0.14	-0.27	-0.02	-0.15	-0.19	0.12
TWI	-0.13	0.42**	-0.18	0.41**	0.01	0.13	-0.22	0.27*	-0.28	-0.08
Ω	-0.38**	0.15	-0.29*	0.19	-0.52**	0.14	0.26	0.01	0.59**	-0.07
LS	-0.34*	0.03	-0.22	0.08	-0.51**	0.08	0.34*	-0.09	0.66**	-0.13

Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman; * mindestens auf dem 99 %-Niveau signifikant;

** mindestens auf dem 99,5 %-Niveau signifikant; Ap: Oberboden, Pp:Pflugsohle;

H_r = relative Höhe; β = Hangneigung; C_v = Vertikalkrümmung; C_h = Horizontalkrümmung;

H_{ch} = Höhe über Tiefenlinie; CDI = Konvergenz/Divergenz Index; TWI = Topographischer Feuchteindex;

Ω = Stream Power Index; LS = LS-Faktor (USLE); $n = 49$ (Ap), $n = 49$ (Pp)

einer ANOVA auf Signifikanz überprüft. Zentrale Bedeutung hat das entwickelte Regressionsmodell zur Vorhersage der Feldkapazität des gepuddelten Horizontes. Mit einer erklärten Varianz von 61 % liefert das Modell in Relation zu anderen Untersuchungen (RYAN ET AL., 2000) ein hohes Bestimmtheitsmaß (vgl. Tabelle 2.1). Die relative Höhe und die Höhe über Tiefenlinie eignen sich für eine verlässliche Modellbildung zur Vorhersage der Feldkapazität bei pF 1.8 des gepuddelten Horizontes. Die Reliefparameter, die signifikanten (ANOVA) Einfluss auf das Modell haben, sind bereits durch die Korrelationsanalyse identifiziert. Das Regressionsmodell zur Vorhersage der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Pflugsohle hat im

6.2 Räumliche Variabilität und Korrelationsstrukturen pedohydrologischer Parameter auf unterschiedlichen Skalen

Tabelle 6.27: Regressionen zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern für die betrachtete Toposequenz (Ap- Horizont)

Parameter	H_r	H_{ch}	β	TWI	Ω	LS	Intercept	R^2
Θ_s	***	***	ns	ns	*	**	(t)***	-
	-0.0071	0.0220	0.0406	0.0137	0.0007	-0.0691	0.5969	0.5225
a	***	***	ns	ns	ns	*	ns	-
	0.0020	-0.0069	-0.0128	-0.0047	-0.0002	0.0201	0.0183	0.5816
λ	***	**	ns	ns	ns	*	(t)***	-
	-0.0001	0.1969	0.5261	0.2275	0.0069	-0.6355	-4.1810	0.3975
n	***	*	***	ns	ns	ns	(t)***	-
	0.0053	0.0108	0.0283	0.0163	0.0002	-0.0219	0.9545	0.4737
$FK, pF1, 8,$	***	***	ns	ns	*	**	(t)***	-
	-0.0063	0.0223	0.0373	0.0134	0.0006	-0.0610	0.2975	0.6059
$PWP, pF4, 2$	***	ns	**	ns	ns	ns	(t)***	-
	-0.0039	0.0040	0.0042	-0.0004	0.0001	-0.0146	0.2034	0.5327
nFK^*	ns	***	**	ns	*	**	ns	-
	-0.2430	1.8373	3.3109	1.3754	0.0459	-4.6329	9.4089	0.6222
K_s	***	ns	**	ns	ns	ns	(t)*	-
	7.3788	13.3530	41.3851	16.2768	0.3104	-29.1185	-242.1809	0.7274

ANOVA Signif. Codes: *** 0.001; ** 0.01; * 0.05; ns nicht signifikant; nFK zwischen pF 1.8 und pF 4.2

H_r = relative Höhe; β = Hangneigung; C_v = Vertikalkrümmung; C_h = Horizontalkrümmung;

H_{ch} = Höhe über Tiefenlinie; TWI = Topographischer Feuchteindex;

Ω = Stream Power Index; LS = LS-Faktor (USLE); n = 49 (Ap); t=T-Test

Vergleich mit den untersuchten bodenhydrologischen Parametern ein geringes Bestimmtheitsmaß von 33 %. Die Reliefparameter relative Höhe und Höhe über Tiefenlinie tragen signifikant zur Modellverbesserung bei. Alle weiteren pedohydrologischen Parameter lassen sich mit Hilfe der Regressionsgleichungen mit moderaten Bestimmtheitsmaßen vorhersagen. Hervorzuheben ist die hohe erklärte Varianz von 72.5 % für die Vorhersage des permanenten Welkepunktes bei Integration der Reliefparameter relative Höhe, Höhe über Tiefenlinie sowie der Hangneigung. Die Bestimmtheitsmaße sind insgesamt relativ gut und liegen in einer für Regressionen mit Bodeneigenschaften typischen Größenordnung RYAN ET AL. (2000). Die Variogrammanalyse der pedohydrologischen Eigenschaften auf der catenaren Skala liefert wenig plausible Ergebnisse hinsichtlich einer Trendbereinigung der Daten. Auch nach durchgeführter linearer Trendbereinigung weisen die Variogramme parabolische Strukturen auf, die auf einen Trend in den Daten hinweisen. Die Ermittlung der Lagerungsdichte und Integration in die PTF zur Ableitung der Bodenparameter führt in diesem Zusammenhang zur starken Trendausprägung.

Für die Toposequenz ist die Ausprägung weitaus gravierender als für die Landschaftsskala, da die Struktur der Lagerungsdichte entsprechend der Toposequenz vorgegeben ist. In diesem Fall müssen, wie bereits erwähnt, Verfahren angewandt werden, die diesen Effekt eliminieren. Dies ist beispielsweise durch das Universal Kriging möglich. Dennoch ergeben sich mit Ausnahme der hydraulischen Leitfähigkeit stark parabolische Variogramme. Das Variogramm der hydraulischen Leitfähigkeit der Pflugsohle ist jedoch auf Grundlage der bereits regionalisierten Werte berechnet worden und bildet den räumlichen Zusammenhang der Landschaftsskala

Tabelle 6.28: Regressionen zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern für die betrachtete Toposequenz (Pp-Horizont)

Parameter	H_r	H_{ch}	β	TWI	Ω	LS	Intercept	R^2
Θ_s	*	***	ns	ns	ns	*	(t)***	-
	0.0028	-0.0117	-0.0225	-0.0082	-0.0004	0.0368	0.3289	0.3932
α	***	*	ns	ns	ns	ns	ns	-
	0.0007	-0.0013	-0.0017	-0.0010	-1.8E-05	0.0029	0.0324	0.3566
λ	***	***	*	ns	ns	ns	(t)***	-
	-0.0064	0.0148	0.0124	0.0044	3.7E-06	-0.0136	0.8662	0.7377
n	***	ns	**	ns	ns	ns	(t)***	-
	-0.0009	0.0007	-0.0030	-0.0016	-0.0001	0.0076	1.2940	0.3461
FK	*	***	ns	ns	ns	**	(t)***	-
	0.0010	-0.0046	-0.0088	-0.0030	-0.0001	0.0142	0.1450	0.4450
PWP	***	***	**	ns	ns	*	(t)***	-
	0.0006	-0.0018	-0.0023	-0.0006	-0.00003	0.0030	0.0430	0.7254
nFK	ns	***	ns	ns	ns	*	(t)***	-
	0.0420	-0.2802	-0.6519	-0.2419	-0.0125	1.1197	10.2014	0.2823
K_S	***	**	ns	ns	ns	ns	ns	-
	0.7949	-2.2535	-3.9662	-1.7195	-0.0597	6.4953	24.9683	0.3320

ANOVA Signif. Codes: *** 0.001; ** 0.01; * 0.05; ns nicht signifikant; nFK zwischen pF 1.8 und pF 4.2

 H_r = relative Höhe; β = Hangneigung; C_v = Vertikalkrümmung; C_h = Horizontalkrümmung; H_{ch} = Höhe über Tiefenlinie; TWI = Topographischer Feuchteindex; Ω = Stream Power Index; LS = LS-Faktor (USLE); $n = 49$ (Ap); t=T-Test**Tabelle 6.29:** Variogrammparameter der Residuen der Bodeneigenschaften des gepudelten Horizontes (trendbereinigt) für die catenare Skala

Bodenpara.	Vari. modell	Nugget Varianz c_0	Structural Varianz c_S	Gesamt sill (c_0+c_S)	Reichweite (m) a	Nugget-sill ratio (%)	Class of spatial dependence
Θ_s	Exp.	0.00003	0.001	0.001	504.0	0.9	S
α	Sph.	0.00000	0.00004	0.00004	605.0	0.0	S
λ	Sph.	0.00687	0.210	0.217	203.0	3.2	S
n	Sph.	0.00020	0.002	0.002	206.0	9.7	S
FK	Exp.	0.00001	0.001	0.001	350.0	2.0	S
PWP	Sph.	0.00002	0.0002	0.0002	220.0	8.6	S
nFK^*	Sph.	0.00000	3.600	3.600	420.0	0.0	S
K_s	Sph.	0.01000	15.000	15.010	350.0	0.1	S

 $n = 48$ (Ap) M: moderately structured spatial dependence; Variogramme der Residuen; Trendbereinigt

S: strongly structured spatial dependence; W = Shapiro Wilk

bei engerer Beprobungsdichte ab. Die Autokorrelationslängen (Reichweiten) für die Parameter liegen bei 374 m Länge für den K_s -Wert der Pflugsohle und 337 m für die nutzbare Feldkapazität. Die räumliche Autokorrelation des permanenten Welkepunktes weist eine Reichweite von 880 m auf, die der Feldkapazität eine Reichweite von 592 m. Für die Beschreibung der räumlichen Autokorrelation ist die Abbildung 6.29 der berechneten Semivarianzen maßgeblich. Für die Darstellung der Variogramme sind unterschiedliche Variogramm-Modelle angepasst.

6.2 Räumliche Variabilität und Korrelationsstrukturen pedohydrologischer Parameter auf unterschiedlichen Skalen

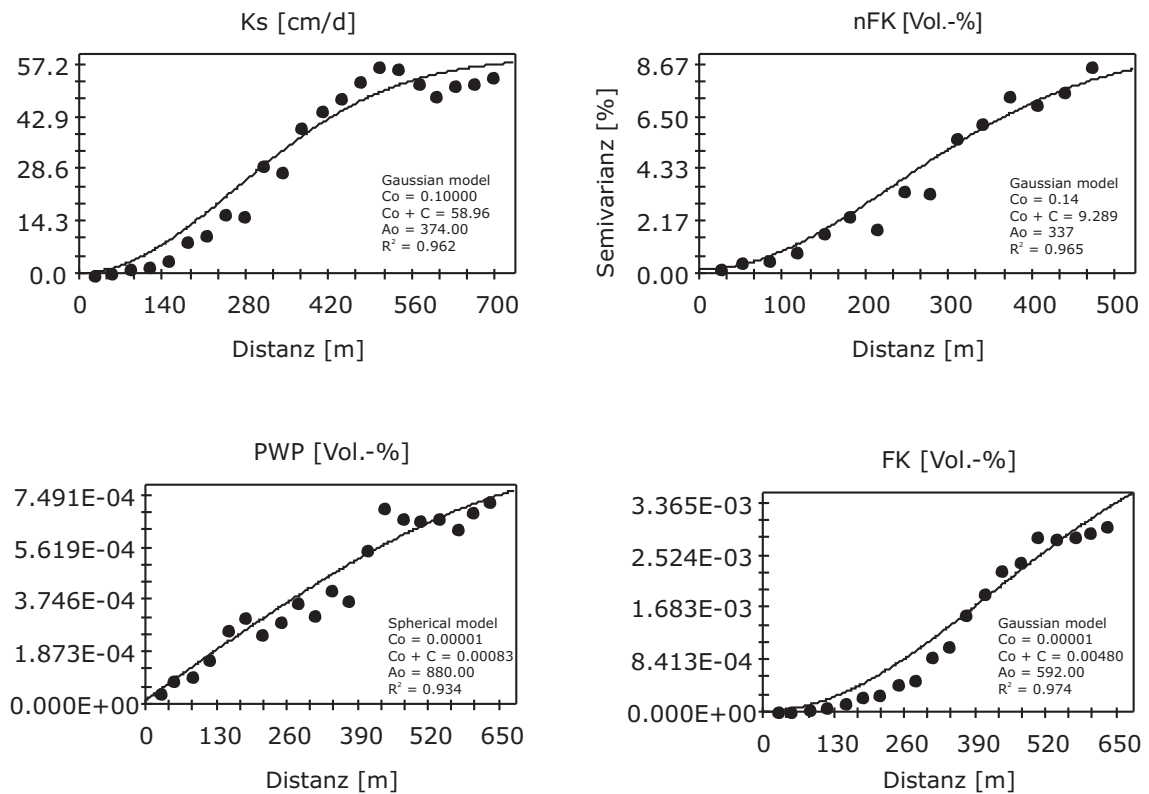


Abbildung 6.15: Trendbereinigte Variogramme ausgewählter bodenphysikalischer Parameter der Toposequenz für den gepuddelten Horizont

Tabelle 6.30: Variogrammparameter der Residuen der Bodeneigenschaften des gepuddelten Horizontes (trendbereinigt) für die catenare Skala

Bodenpara.	Vari. modell	Nugget Varianz c_0	Structural Varianz c_S	Gesamt sill (c_0+c_S)	Reichweite (m) a	Nugget-sill ratio (%)	Class of spatial dependence
Θ_s	sph.	0.00003	0.00094	0.0010	484.0	3.1	S
α	sph.	0.00001	0.00005	0.0001	350.0	16.7	S
λ	sph.	0.03060	0.12600	0.1566	226.0	19.5	S
n	sph.	0.00016	0.00070	0.0009	52.4	18.4	S
FK	sph.	0.00004	0.00055	0.0006	493.0	6.6	S
PWP	sph.	0.00007	0.00007	0.0001	349.0	48.2	M
nFK	sph.	0.16300	3.07500	3.2380	390.0	5.0	S
K_s	sph.	0.00000	25.10000	25.1000	502.0	0.0	S

$n = 48$ (Ap) M: moderately structured spatial dependence; variogramme der Residuen aus der Regression

S: strongly structured spatial dependence; W = Shapiro Wilk

Verwendet wurden die Residuen der Regressionsmodelle mit den höchsten Erklärungsanteilen. Für die pedohydrologischen Parameter wurden hohe räumliche Autokorrelationen berechnet. Dieses Ergebnis ist unter Betrachtung der integrierten höhenabhängigen Lagerungsdichte auch zu erwarten. Die räumlichen Verteilungen der pedohydrologischen Parameter auf Basis des direkten Verfahrens befinden sich im Anhang.

6.2.3 Feldskala

Im Rahmen der dritten Messkampagne ist für die Hangbereiche die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit gemessen worden. Die Boxplots der aus der verwendeten Pedotransferfunktion abgeleiteten gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten (vgl. Gleichung 5.38) zeigen deutlich catenare Abhängigkeiten. Geringe K_s -Werte wurden im unteren Hangbereich ermittelt, höhere K_s -Werte in den oberen Hangbereichen der Toposequenz A. Diese Reliefabhängigkeit ist vermeintlich auf die höheren Trocken-Rohdichten im unteren Bereich der Catena zurückzuführen. Diesbezüglich ist zu betonen, dass die Entwicklung eigener, lokal adaptierter *PTF* der Verwendung vorhandener vorzuziehen ist (LI ET AL., 2007). Die gemessenen gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten haben erwartungsgemäß eine hohe Variabilität (vgl. Abbildung 6.16) und korrespondieren nur für den unteren Hangbereich mit den aus der Pedotransferfunktion nach WÖSTEN ET AL. (2001) abgeleiteten Leitfähigkeiten. Die durch den Boxplot reprä-

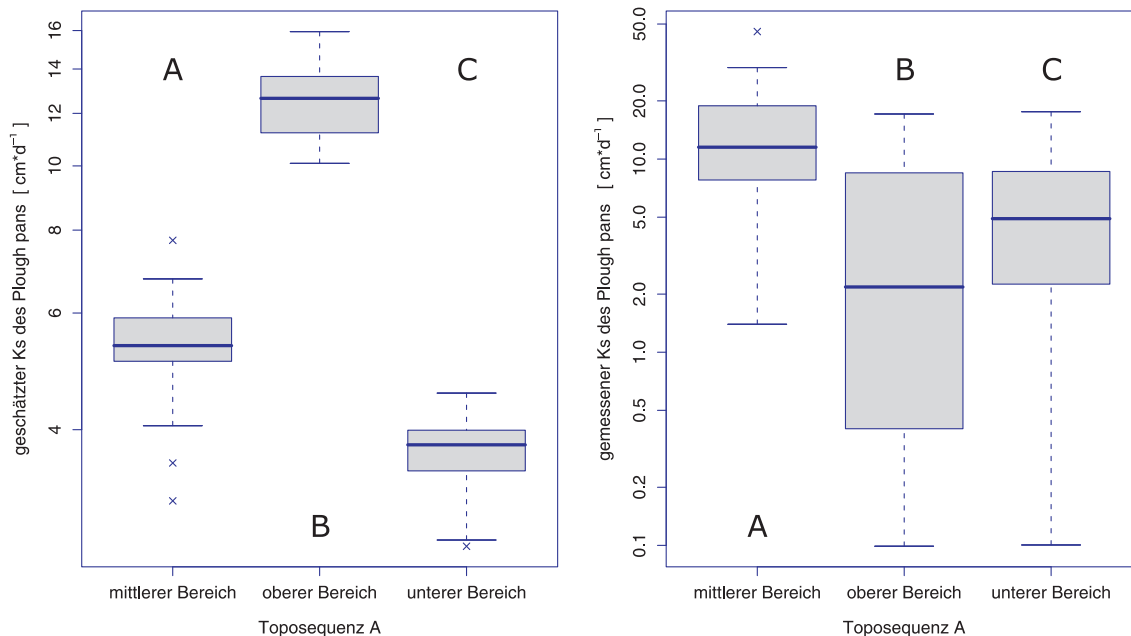


Abbildung 6.16: Boxplots der geschätzten und gemessenen hydraulischen Leitfähigkeit (K_s) für die betrachteten Felder der Toposequenz A, signifikante Mittelwertunterschiede (ANOVA) sind durch Buchstaben gekennzeichnet

sentierte Variabilität ist für den oberen und unteren Bereich ähnlich. Als Vergleichsgrundlage müsste hier eher das geometrische Mittel genutzt werden. Für die spezifische logarithmische Verteilung der K_s -Werte ist jedoch der Medianwert ausreichend. Die ermittelten Trocken-Rohdichten (ρ_t) der Pflugsohle liegen bei 1.75 g cm^{-3} für die unteren Hangbereiche, die der oberen Hangbereiche bei etwa $1.55 - 1.60 \text{ g cm}^{-3}$ (s. Abbildung 6.17). Für die gepuddelten Horizont sind Rohdichten im unteren Hangbereich von unter 1.00 g cm^{-3} ermittelt worden, dagegen im mittleren und oberen Hangbereich Trocken-Rohdichten von 1.20 g cm^{-3} . Die Unterschiede der Mittelwerte erweisen sich im Test als signifikant. Die deskriptive Statistik der erhobenen pedohydrologischen Parameter befindet sich im Anhang.

6.2 Räumliche Variabilität und Korrelationsstrukturen pedohydrologischer Parameter auf unterschiedlichen Skalen

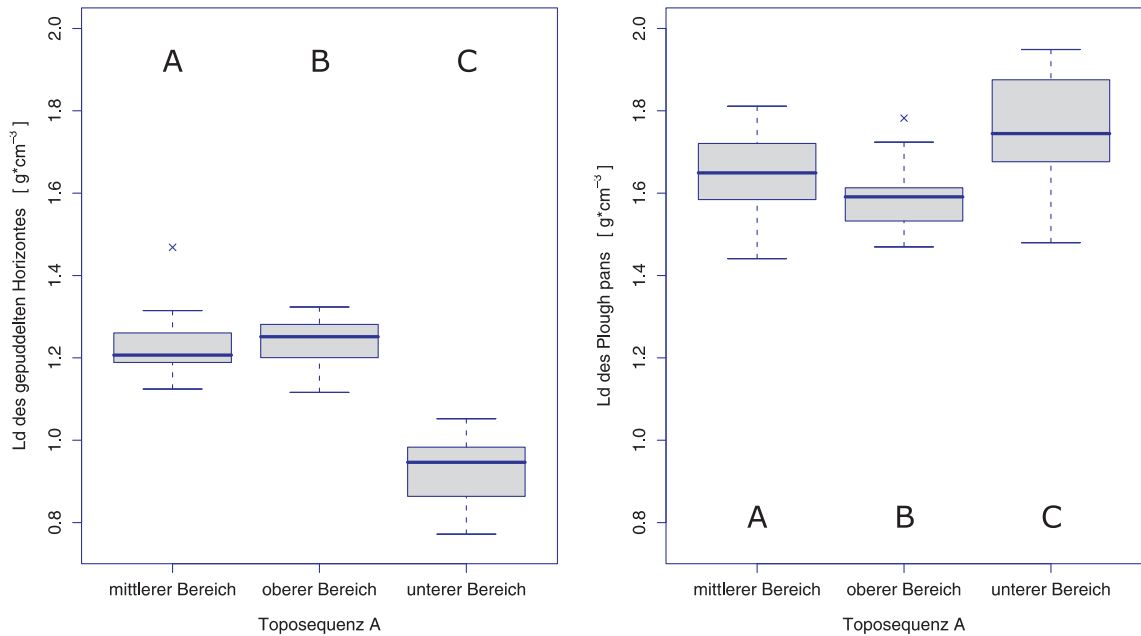


Abbildung 6.17: Boxplots zur ermittelten Trocken-Rohdichte des Oberboden und der Pflugsohle für die betrachteten Felder der Toposequenz A, signifikante Mittelwertsunterschiede (ANOVA) sind durch Buchstaben gekennzeichnet

6.2.4 Skalenübergreifende Betrachtung der räumlichen Korrelationsstrukturen von ausgewählten bodenhydraulischen Parametern

Analog zu den einfachen bodenphysikalischen Eigenschaften wurde auch für die skalenübergreifende Betrachtung der Korrelationsstrukturen eine Hauptkomponententransformation angewandt. Die pedohydrologischen Parameter der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und der nutzbaren Feldkapazität und die berechneten Reliefparameter wurden linear transformiert. Für die Hauptkomponenten der catenaren Skala errechnet sich eine erklärte Varianz von 62 %, im Vergleich zu 56 % für die Landschaftsskala. Die PC 1 und die PC 2 der catenaren Skala weisen jeweils einen Erklärungsgehalt von 33 % bzw. 27 % der Gesamtvarianz auf. Für die PC 1 der Landschaftsskala ergeben sich 34 % und für die PC 2 der Landschaftsskala 18 % erklärte Varianz. Um eindeutige Aussagen zu prozesserklärenden Faktorkomplexen machen zu können, sind die hier dargestellten Varianzen zu gering. Dennoch lassen sich für die catenare Skala Aussagen über die vorhandene Kolinearität der Parameter relative Höhe und Höhe über Tiefenlinie sowie der Hangneigung und dem LS-Faktor machen. Die Hauptkomponente 1 wird dominiert von den Faktoren K_s , Höhe über Tiefenlinie und relativer Höhe sowie in negativer Art mit der Pflugsohlen-Mächtigkeit. In der Hauptkomponente 2 dominieren eher die Parameter Hangneigung und LS-Faktor sowie der Topographische Feuchteindex TWI . Auf der Landschaftsskala stehen ebenfalls die Reliefparameter Höhe über Tiefenlinie, relative Höhe und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in engem Zusammenhang mit der Hauptkomponente 1. Der topographische Feuchteindex TWI weist jedoch, anders als auf der catenaren Skala, einen engeren Zusammenhang zur PC 1 auf. Demnach existieren hier keine deutlichen

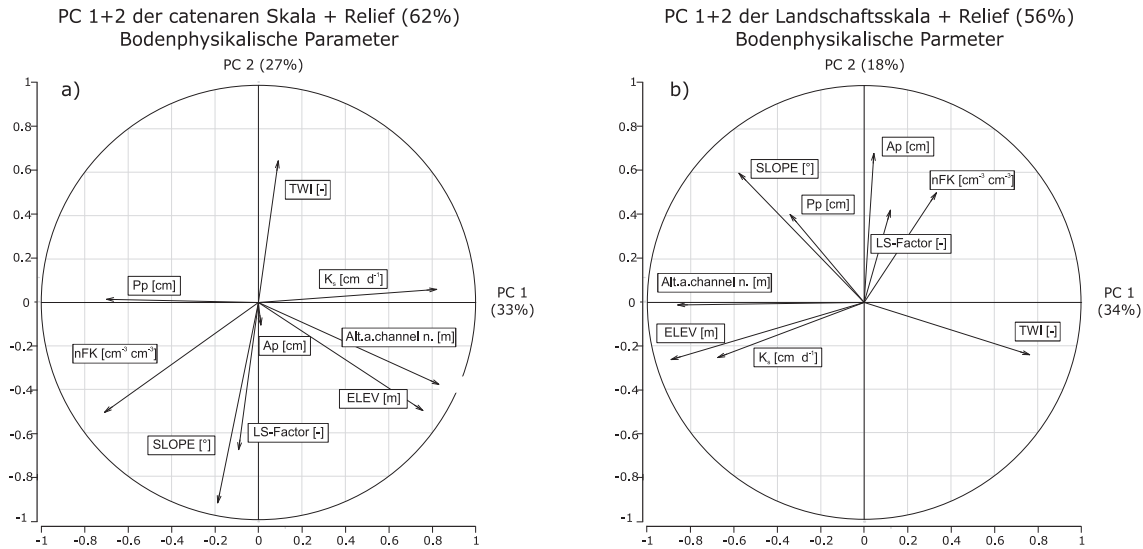


Abbildung 6.18: Hauptkomponententransformation pedohydrologischer Parameter und des Reliefs

Skalenübergänge, wie dies bei den Korrelationsstrukturen der einfachen bodenphysikalischen Eigenschaften der Fall ist (vgl. Kapitel 6.1.4).

6.3 Zusammenhänge zwischen der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Pflugsohle, der nutzbaren Feldkapazität des Oberbodens und Fernerkundungsdaten

Nachfolgend werden die vorhandenen räumlichen Korrelationsstrukturen zwischen den pedohydrologischen Eigenschaften des gepuddelten Horizontes und der Pflugsohle sowie der spektralen Reflexion aus Fernerkundungsdaten herausgearbeitet. Zwischen den aus LANDSAT ETM+, SPOT und ASTER-Szenen abgeleiteten *NDVI*-Werten und den berechneten pedohydrologischen Eigenschaften bzw. deren räumlichen Verteilungsmustern sind signifikante Zusammenhänge ermittelt worden. Die Tabelle 6.31 zeigt eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Korrelationsstrukturen auf der Landschaftsskala und der catenaren Skala für die bodenphysikalischen Parameter. Signifikante Zusammenhänge von $r = 0.42$ zwischen dem *NDVI* der Spot5-Szene und dem Schluffgehalt und von $r = 0.54$ zwischen dem *NDVI* und dem Gesamtkohlenstoffgehalt wurden ermittelt. Die Korrelation auf der catenaren Skala läßt keine Zusammenhänge zwischen multispektraler Information und bodenphysikalischen Eigenschaften erkennen. Die spektralen Informationen der ETM+-Szene weist die geringste Korrelationen zu den betrachteten Bodeneigenschaften auf. Dagegen wurden für die Szenen aus den Oktobermonaten 2001 und 2005 jeweils höhere Zusammenhänge zwischen dem *NDVI* und den bodenphysikalischen Eigenschaften ermittelt. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die räumliche Verteilung des Gesamtkohlenstoffgehaltes, des Gesamtstickstoffgehaltes und des Schluffgehaltes mit Mustern des *NDVI* korrespondieren (vgl. SAHRAWAT ET AL. 2005; SAHRAWAT 2004).

6.3 Zusammenhänge zwischen der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Pflugsohle, der nutzbaren Feldkapazität des Oberbodens und Fernerkundungsdaten

Tabelle 6.31: Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern sowie Fernerkundungsdaten im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet für den Ap-Horizont

Reliefparameter / <i>NDVI</i>	Ah-Horizont (gepuddelter Horizont)							
	Ton [%]		Schluff [%]		Sand [%]		C total [%]	
	LS	CS	LS	CS	LS	CS	LS	CS
H_r	0.02	-0.38**	-0.50**	-0.71**	0.32**	0.65**	-0.58**	-0.65**
H_{ch}	-0.04	0.15	-0.45**	-0.01	0.29**	-0.02	-0.56**	-0.04
<i>TWI</i>	0.07	0.04	0.35**	0.29*	-0.25**	-0.20*	0.40**	0.24
ETM+ (9/2000)	0.09	-0.03	0.28**	0.14	-0.02	-0.11	0.46**	0.19
ASTER (10/2001)	0.07	-0.30	0.40**	0.21	-0.27**	-0.13	0.50**	0.23
SPOT5 (10/2005)	0.01	-0.01	0.42**	0.22	-0.24**	-0.17	0.54**	0.22

Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman; * mindestens auf dem 99 %-Niveau signifikant; ** mindestens auf dem 99,5 %-Niveau signifikant; LS = Landschaftsskala; n = 174 (Ap), CS = catenare Skala; n = 49 (Ap)
 H_r = relative Höhe; H_{ch} = Höhe über Tiefenlinie; *TWI* = Topographischer Feuchteindex

Mit Hilfe einer Mittelwertbildung des *NDVI* können für die Jahre 2000, 2001 und 2005 si-

Tabelle 6.32: Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und Fernerkundungsdaten für die Landschaftsskala (Ap- und Pp-Horizont)

	Θ_s		<i>FK</i>		<i>PWP</i>		<i>nFK</i> *		K_s	
	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp
ETM+	0.26**	-0.31**	0.28**	-0.02	0.30**	0.11	0.07	-0.15	-0.15	-0.34**
SPOT5	0.31**	-0.30**	0.35**	-0.04	0.33**	0.07	0.16	-0.10	-0.18*	-0.41***
ASTER	0.34**	-0.31**	0.36**	0.01	0.36**	0.12	0.11	-0.14	-0.20**	-0.43***
MW <i>NDVI</i>	0.36**	-0.37***	0.39***	-0.03	0.38***	0.12	0.12	-0.16	-0.18*	-0.44***

Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman; * mindestens auf dem 99 %-Niveau signifikant;
 ** mindestens auf dem 99,5 %-Niveau signifikant; Ap: Oberboden, Pp: Pflugsohle; n = 174 (Ap), n = 155 (Pp)
 Landsat ETM+ (9/2000); SPOT5 (10/2005); ASTER/Terra (10/2001)

gnifikante Verbesserungen der Modelle erzielt werden (vgl. Tabelle 6.33). Die Verbesserung sollte jedoch nicht überbewertet werden, weil der Einfluss von Störfaktoren (z. B. atmosphärische Einflüsse) bei Aggregation von multispektraler/multitemporaler Information zunimmt. Für die aggregierten *NDVI*-Werte sind Zusammenhänge von $r = 0.39$ für die Feldkapazität, von $r = 0.38$ für den permanenten Welkepunkt und von $r = -0.44$ für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ermittelt worden. Deutlich wird, dass pedohydrologische Parameter einen engeren Zusammenhang zu den multispektralen Informationen aufweisen als einfache Bodeneigenschaften der catenaren Skala (vgl. Tabellen 6.33 und 6.32). Die Untersuchung der Korrelationsstruktur zwischen den Parametern θ_s , *FK*, *PWP*, *nFK* und K_s ergab, dass die Kanäle *NIR*, *Rot* und *Grün* teilweise höhere Zusammenhänge aufweisen. Der rote Kanal des ETM+ -Sensors liefert beispielsweise für alle Parameter die höchsten Korrelationen zwischen $r = -0.67$ und $r = 0.62$. Dagegen weist der Vegetationsindex *NDVI* geringere Korrelationen zu den Parametern θ_s , *FK*, *PWP*, *nFK* und K_s auf. Ähnlich geringe Zusammenhänge sind zwischen dem *NDVI_{green}*, nach GITELSON ET AL. (1996) eine Alternative zum *NDVI*, und den pedohydrologischen Eigenschaften festgestellt worden. Tabelle 6.34 stellt sowohl die be-

Tabelle 6.33: Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und Fernerkundungsdaten für die betrachtete Toposequenz (Ap- und Pp-Horizont)

	Θ_s		FK		PWP		nFK*		K_s	
	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp	Ap	Pp
Landsat ETM+ (9/2000)										
<i>Grün</i>	0.39**	-0.61**	0.47**	-0.59**	0.20	-0.28	0.44*	-0.54**	0.11	-0.25
<i>Rot</i>	0.55**	-0.65**	0.62**	-0.67**	0.44*	-0.50**	0.42*	-0.53**	-0.03	-0.34*
<i>NIR</i>	-0.08	0.40**	-0.19	0.34*	0.03	0.04	-0.17	0.37*	-0.30*	-0.03
<i>NDVI_{green}</i>	-0.20	0.51**	-0.31*	-0.58*	-0.05	0.13	-0.29*	0.47**	-0.27	0.07
<i>NDVI</i>	-0.37*	0.60**	-0.46*	0.57*	-0.25	0.31*	-0.35*	0.52**	-0.11	0.21
ASTER/Terra (10/2001)										
<i>Grün</i>	0.42**	0.01	0.55**	-0.08	0.39**	-0.66**	0.10	0.13	-0.20	-0.35*
<i>Rot</i>	0.44**	-0.18	0.54**	-0.22	0.34*	-0.52**	0.18	-0.06	-0.07	-0.29
<i>NIR</i>	-0.02	0.39**	-0.07	0.35*	0.10	-0.06	-0.11	0.26	-0.32*	-0.24
<i>NDVI_{green}</i>	-0.15	0.01	-0.23	-0.08	0.39**	0.17	-0.22	0.21	-0.20	-0.03
<i>NDVI</i>	-0.15	0.23	-0.24	0.25	-0.07	0.23	-0.10	0.07	-0.13	-0.07
SPOT 5 (10/2005)										
<i>Grün</i>	0.20	-0.24	0.26	-0.23	0.17	-0.32*	0.22	-0.21	0.08	-0.26
<i>Rot</i>	-0.14	-0.08	-0.02	-0.08	-0.21	0.03	0.05	-0.06	0.40**	0.08
<i>NIR</i>	0.13	0.11	0.13	0.05	0.10	-0.29*	0.11	0.12	-0.05	-0.20
<i>NDVI_{green}</i>	0.06	0.20	0.03	0.13	0.17	-0.17	0.00	0.20	-0.09	-0.09
<i>NDVI</i>	0.13	0.14	0.05	0.10	0.16	-0.02	0.02	0.12	-0.21	-0.16

Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman; * mindestens auf dem 99 %-Niveau signifikant;
** mindestens auf dem 99.5 %-Niveau signifikant; Ap: Oberboden, Pp: Pflugschle; n = 49 (Ap), n = 49 (Pp)

reits dargestellten Regressionsmodelle als auch die Integration der Vegetationsindizes *NDVI* und *NDVI_{green}* für die einzelnen Szenen dar. Die Regressionsmodelle sind in Tabelle 6.34 dargestellt. Für die im Rahmen der Regressionsmodellierung durchgeführten Untersuchungen sind keine bzw. nur sehr geringe Verbesserungen der Bestimmtheitsmaße festzustellen. Die Tabelle 6.34 zeigt die durch Integration verschiedener Kanäle, aber auch durch die Vegetationsindizes verbesserten Bestimmtheitsmaße. Insgesamt kann konstatiert werden, dass pedohydrologischen Eigenschaften durch Muster der spektralen Reflexion aus Fernerkundungsdaten teilweise erklärt werden können.

6.3 Zusammenhänge zwischen der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Pflugsohle, der nutzbaren Feldkapazität des Oberbodens und Fernerkundungsdaten

Tabelle 6.34: Regressionen zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern sowie primären und sekundären Reliefparametern und spektraler Information aus Fernerkundungsdaten für die Toposequenz A

Parameter	Landsat ETM+ (9/2000)	ASTER/Terra (10/2001)	SPOT 5 (10/2005)	H_r	H_{ch}	β	TWI	Ω	LS	Intercept	R^2
Θ_S	² 0.0040***	-	-	-0.0060***	0.0080	0.0248	0.0081	0.0004	-0.0492*	0.4216	0.594
	-	¹ -0.0003***	-	-0.0072**	0.0227***	0.0406	0.0136	0.0007*	-0.0688**	0.6159***	0.511
	-	-	¹ 0.0058**	-0.0067***	0.0125***	0.0418	0.0154	0.0004*	-0.0719**	-0.1463	0.547
FK	² 0.0035***	-	-	-0.005***	0.0100*	0.0235	0.0084	0.0003*	-0.0435*	0.1430	0.680
	-	¹ 0.0002	-	-0.0063***	0.0226***	0.0375	0.0131	0.0006*	-0.0615**	0.2831**	0.597
	-	-	¹ 0.0047***	-0.006***	0.0146***	0.0384	0.0148	0.0004**	-0.0632**	-0.3082	0.628
PWP	² 0.0018*	-	-	-0.0034***	-0.0025	-0.0031***	-0.0030*	-0.00002	-0.0054	0.1223*	0.605
	-	⁴ 0.0078	-	-0.0039***	0.0042	0.0042**	-0.0005	0.0001	-0.0147	0.2018	0.521
	-	-	¹ 0.0008*	-0.0041***	0.0021	0.0053*	0.00006*	8.49E-05	-0.0171	0.1260	0.532
mFK^*	² 0.1673***	-	-	-0.1991	1.2518*	2.6523	1.1421	0.0338*	-3.8032**	2.0738	0.649
	-	⁴ 0.6156***	-	-0.2431	1.8549***	3.3122**	1.367	0.0464*	-4.6383**	9.2882	0.613
	-	-	¹ 0.2027***	-0.2286	1.507***	3.3550**	1.4353	0.0379*	-4.7306**	-16.5332	0.624
K_S^{Pp}	² -0.3129***	-	-	0.7128***	-1.158	-2.7345	-1.2833	-0.0370	4.9435	38.686	0.350
	-	¹ 0.6571*	-	1.0634*	-3.159**	-3.8477	-1.8222	-0.0350	5.5837	-35.3801	0.350
	-	-	¹ -0.6539*	0.7484***	-1.188*	-4.1086	-1.9129	-0.0337	6.8104	108.6517	0.347

ANOVA Signif. Codes: *** 0.001, ** 0.01, * 0.05; ns nicht signifikant; nFK zwischen pF 1.8 und pF 4.2

H_r = relative Höhe; H_{ch} = Höhe über Tiefenlinie; β = Hangneigung; TWI = Topographischer Feuchteindex

Ω = Stream Power Index; LS = LS-Faktor (USLE); n = 49; * multipliziert mit 100, nFK bei pF 1.8 und pF 4.2

¹ = grüner Kanal; ² = roter Kanal; ³ = NIR; ⁴ = $NDVI_{green}$; K_S^{Pp} gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Pflugsohle

Die folgende Abbildung 5.4 zeigt für die verschiedenen $NDVI$ ($NDVI_{low}$, $NDVI_{medium}$ und $NDVI_{high}$) die regionalisierten pedohydrologischen Muster der nutzbaren Feldkapazität des Oberbodens und der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Pflugsohle. Die Klasse

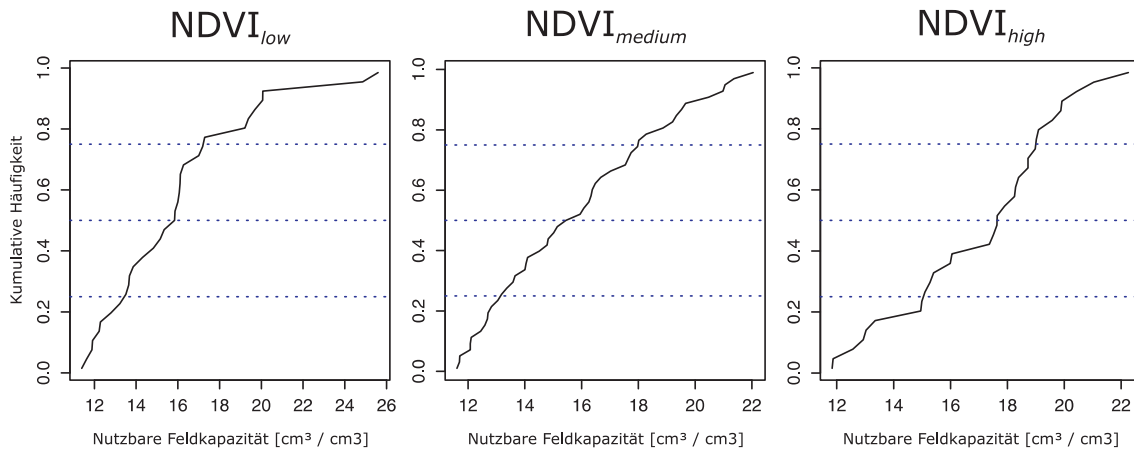


Abbildung 6.19: Kumulierte Häufigkeiten der nutzbaren Feldkapazität in den aus multispektralen Fernerkundungsdaten erfassten $NDVI$ -Klassen

$NDVI_{low}$ erfasst Bereiche relativ geringer nutzbarer Feldkapazitäten, hauptsächlich in oberen Hangbereichen. Die dargestellten Quartile liegen zwischen 13 und 17 cm^3/cm^3 . Die Klasse der hohen $NDVI_{high}$ über die Jahre erfasst die Muster der nutzbarer Feldkapazität vorrangig im 3. Quartil zwischen 18 und 19.5 cm^3/cm^3 . Diese relativ hohen nutzbarer Feldkapazitäten des gepuddelten Horizonts sind vorwiegend in den Tieflandbereichen, im zentralen Teil des Untersuchungsgebietes zu finden. Abgesehen von dem Cluster $NDVI_{low}$ sind keine Ausreißer aus der kumulierten Häufigkeit zu erkennen. Die Abbildung 6.20 liefert für die $NDVI$ -Klassen hinsichtlich der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ein ähnliches Ergebnis. Die über die Jahre als hoch klassifizierten $NDVI$ entsprechen geringen K_s -Werten der Pflugsohle. Somit liefern

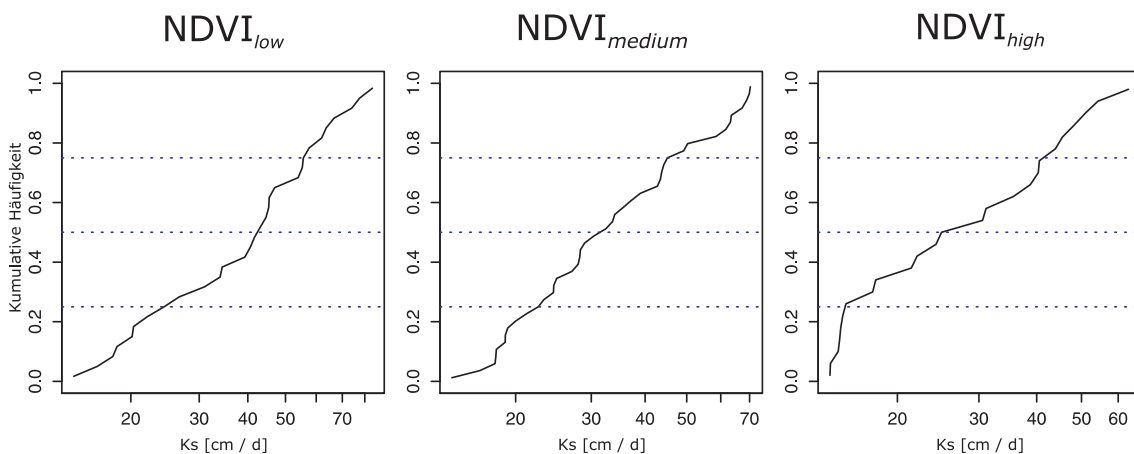


Abbildung 6.20: Kumulierte Häufigkeiten der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit in den aus multispektralen Fernerkundungsdaten erfassten $NDVI$ -Klassen

die aus LANDSAT ETM+, SPOT und ASTER-Szenen abgeleiteten $NDVI$ -Werte signifikante Zusammenhänge zwischen den Vegetationsindizes und den abgeleiteten pedohydrologischen

Eigenschaften bzw. deren räumlichen Verteilungsmuster.

6.4 Räumliche Variabilität der Wuchs- und Ertragsleistungen für das Untersuchungsgebiet Liu Jia Zhan

Die deskriptiven Kennwerte der Wuchs- und Ertragsleistungen zeigen für die Monitorpedozellen im Mittel einen Ertrag von 4 Tonnen pro Hektar bei einer relativ hohen Standardabweichung von ca. 20 % (vgl. Tabelle 6.35). Messungen des spektralen Reflexionsgrades und des Leaf Area

Tabelle 6.35: Deskriptive Statistik der Wuchs- und Ertragsleistungen für die Toposequenz A auf der catenaren Skala

	n	MW	SA	VK %	MIN	MED	MAX	W	p
Wuchshöhe [m]	49	0.9	0.1	12.8	0.6	0.9	1.5	0.768	<0.001
Biomasse [kg/ha]	47	7971.9	1318.2	16.5	5774.9	7888.4	13243.7	0.918	0.003
Biomasse* [g]	47	637.8	105.5	16.5	462.0	631.1	1059.5	0.918	0.003
Kornertrag [kg/ha]	49	4010.6	812.6	20.3	1897.9	4235.9	5393.62	0.935	0.009
Kornertrag* [g]	49	501.3	101.6	20.3	237.2	501.3	674.2	0.935	0.009

(*20 Reispflanzen, MW = Mittelwert; SA = Standardabweichung; VK = Variationskoeffizient; MED = Median; W=Shapiro-Wilk; p = Prüfgröße

Index *LAI* lagen nicht vor. Außerdem war keine Satellitenszene zum korrespondierenden Zeitpunkt von 2004 verfügbar, so dass die Ertragsabschätzung unter Abhängigkeit des Gesamtkohlenstoffgehalts sowie des Schluffgehalts erfolgte. Zur Erweiterung der Ertragsabschätzung wurden ebenfalls komplexe Parameter wie die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Pflugsohle und nutzbare Feldkapazität des gepuddelten Horizontes in die Ertragsabschätzung integriert (vgl. KRAVCHENKO & ROBERTSON 2007; BOUMAN 1994). Die Betrachtung der räumlichen

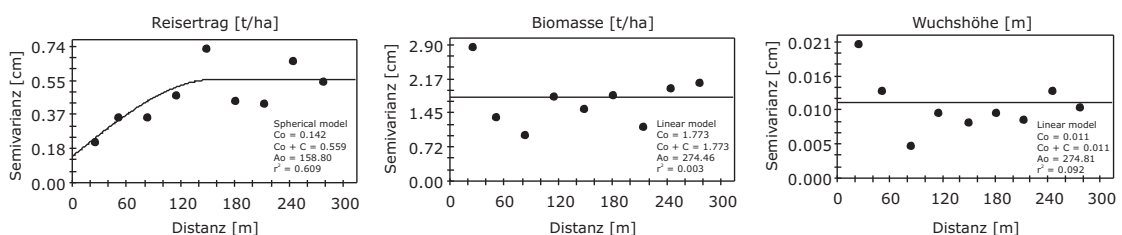


Abbildung 6.21: Darstellung der räumlichen Autokorrelation für die Wuchs- und Ertragsleistungen auf der Toposequenz A

Autokorrelation ergab für den Ertrag $t\ ha^{-1}$ enge strukturierte Abhängigkeiten mit Semivariogrammparametern von $C_o = 0.142$, $C_o + C = 0.559$ und einer Reichweite von $A_o = 159$ m. Die Anpassung der sphärischen Variogrammmodelle erfolgte mit einem Bestimmtheitsmaß von ($R^2 = 0.61$). Dagegen weisen die Variogramme der Parameter Biomasse und Wuchshöhe keine räumlichen Abhängigkeiten auf. Die Abschätzung des Ertrages für die Toposequenz A unter Verwendung des Gesamtkohlenstoffgehaltes und des Schluffgehaltes führte zu unbefriedigenden Ergebnissen. Die Bestimmtheitsmaße der Regression liegen sowohl für das Modell Kornertrag

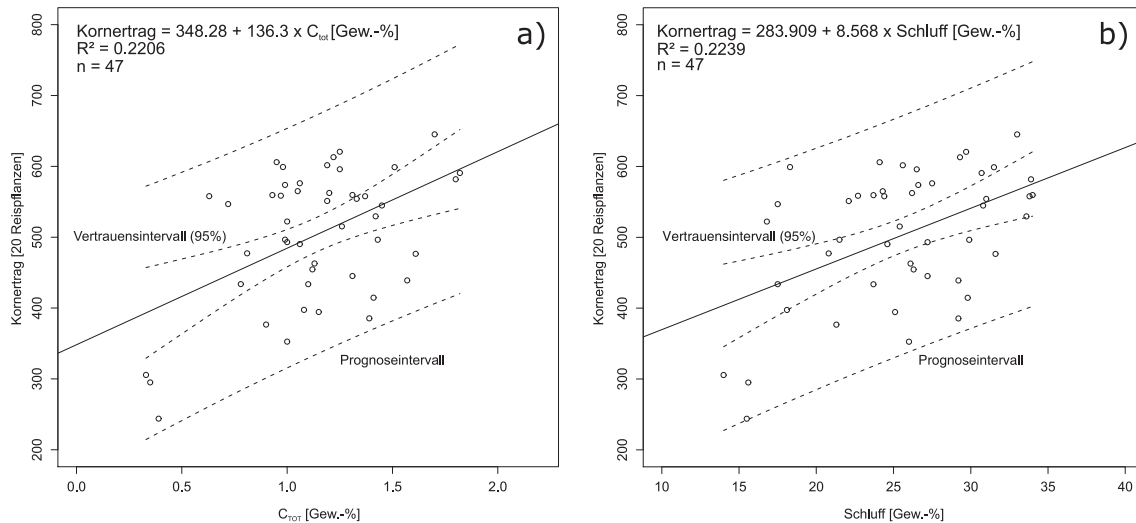


Abbildung 6.22: Ertragsabschätzung unter Verwendung der einfachen bodenphysikalischen Parameter a) Gesamtkohlenstoffgehalt; b) Schluffgehalt

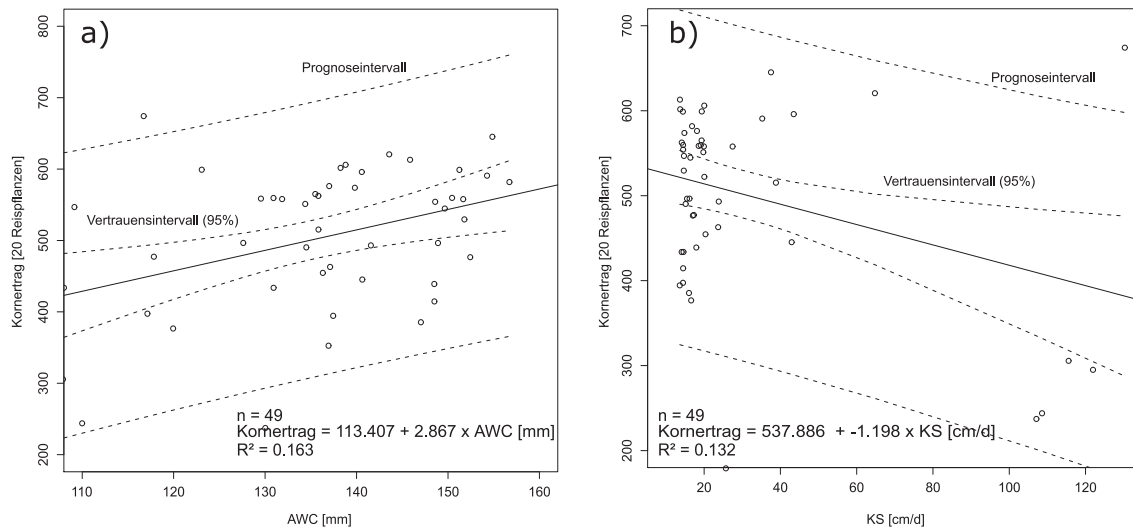


Abbildung 6.23: Ertragsabschätzung unter Verwendung pedohydrologischer Parameter a) Nutzbare Feldkapazität (für den Oberboden); b) gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (Pflugschle)

und Gesamtkohlenstoffgehalt als auch für das Regressionsmodell Schluffgehalt und Korntrag im Bereich von $R^2 = 0.22$ (vgl. Abbildung 6.22). Die Ertragsabschätzung unter Verwendung der pedohydrologischen Parameter nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum (Oberboden) und der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ergab derweil eine geringere erklärte Varianz für den Korntrag. Schließlich wurden unter Betrachtung der ausgeprägten räumlichen Abhängigkeit des Korntrages die signifikanten Zusammenhänge zwischen den Parametern relative Höhe und Korntrag mit Hilfe einer konditionierten gaußschen Ko-Simulation für den Parameter Ertrag $t\ ha^{-1}$ simuliert. Die in Abbildung 6.24 dargestellten Kreuz-Kovariogramme zeigen für den ermittelten Ertrag $t\ ha^{-1}$, die relative Höhe m und die Bodeneigenschaften Schluff- und Gesamtkohlenstoffgehalt die Ko-Varianz als Funktion zur Beprobungsdistanz (vgl. Gleichung 5.23). Die berechneten Semivarianzen für die Originalparameter sind jeweils in den

obersten „Blöcken“ dargestellt. Die Kreuzvariogramme sind in Form einer Matrix zu lesen. Der

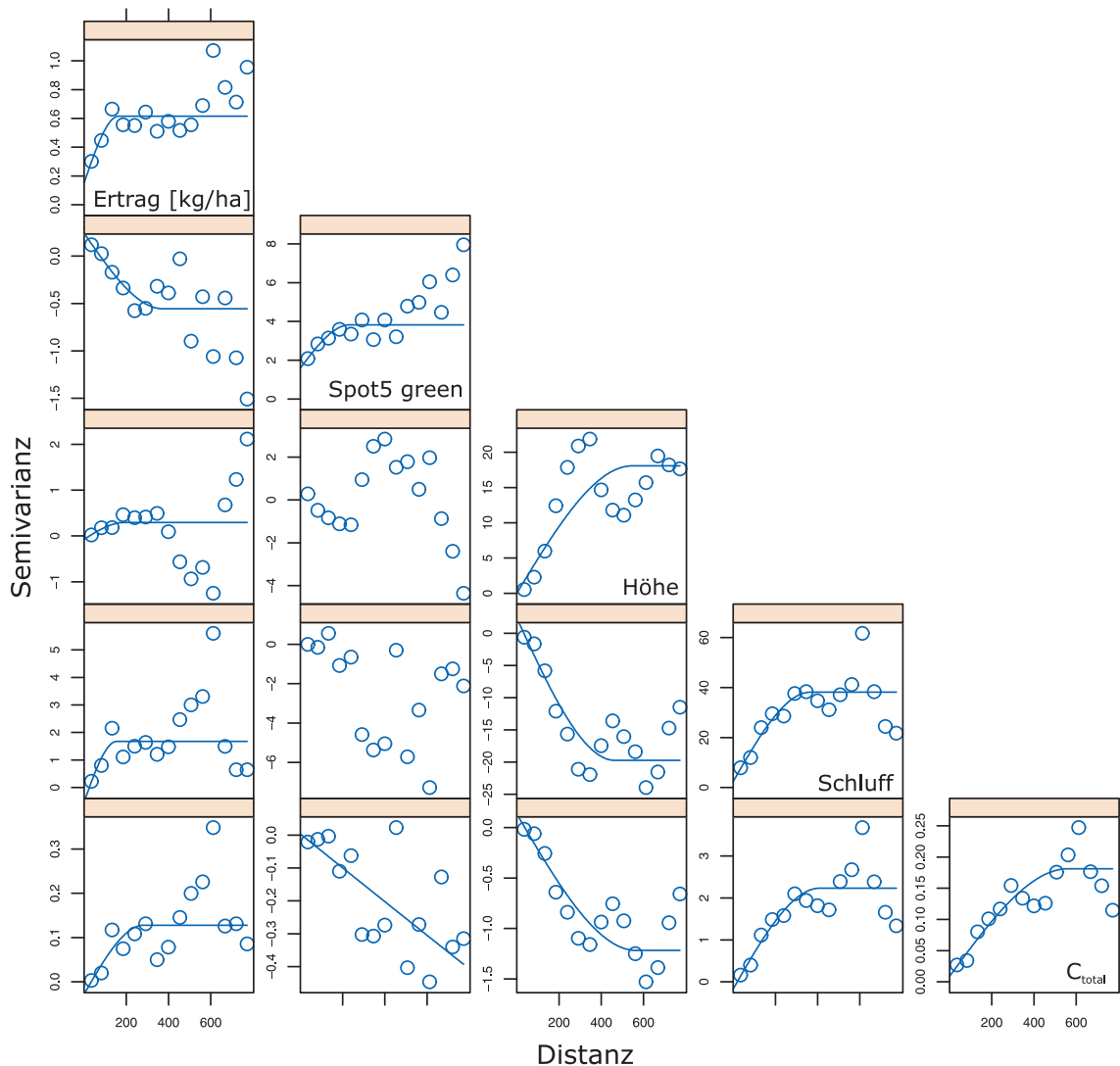


Abbildung 6.24: Modelle der Koregionalisierung, Darstellung der berechneten Kreuzvariogramme

Parameter $NDVI_{green}$ des SPOT5-Sensors ist aufgrund des schlechten Zusammenhanges in der weiteren Untersuchung nicht berücksichtigt worden. Die Parameter relative Höhe, Schluffgehalt sowie der Gesamtkohlenstoffgehalt sind in die Ko-Regionalisierung integriert worden. Die Restriktionen des Ko-Krigings basieren auf einem engen Zusammenhang der Eingangsvariablen; bei schwach ausgeprägten Zusammenhängen wird eine Anwendung nicht empfohlen (DEUTSCH & JOURNAL, 1992). Zur Ableitung der räumlichen Variabilität unter Verwendung der Kreuzsemivarianz ist die Verwendung dieser Methode jedoch auch bei weniger guten Zusammenhängen möglich (CURRAN & ATKINSON, 1998). Hier wird jedoch darauf verwiesen, dass die Bestandesentwicklung sehr stark von der jeweils vorherrschenden Witterung (YOSHIDA, 1981) beeinflusst wird. Dabei wird ein räumliches Verhalten hervorgerufen, für dessen Bedeutung die eher statischen Bodenkenngößen (Textur, Kohlenstoffgehalt) sich nicht für eine Ertragsabschätzung eignen (WENDROTH ET AL., 2003). Die räumlichen Muster, die durch die

Simulation der Wuchs- und Ertragseigenschaften deutlich wurden, sind visuell recht gut durch die Position innerhalb der Toposequenz zu erklären. Die Grafik 6.25 zeigt im oberen Bereich deutliche Ertragsdefizite im Vergleich zum mittleren Bereich der Toposequenz. Die simulierten

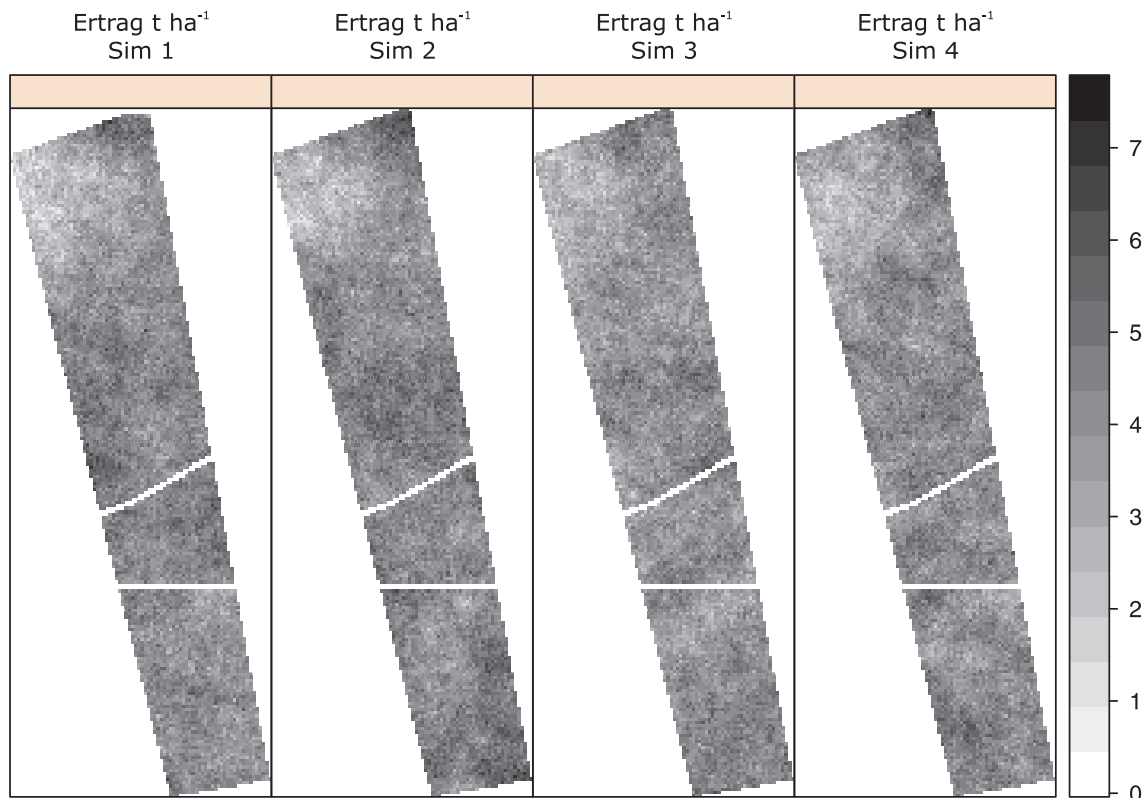


Abbildung 6.25: Vier Realisationen der sequenziellen gaußschen Ko-Simulation, basierend auf den Modellen der Koregionalisierung für die Toposequenz A

Erträge (150 Simulationen) geben erwartungsgemäß bei einem Mittelwert von ca. $4\ t\ ha^{-1}$ und einer Standardabweichung von ca. $1\ t\ ha^{-1}$ die kumulierte Häufigkeit wieder. Die simulierten räumlichen Autokorrelationen zeigen ausschließlich die zunehmende Unsicherheit der Semivarianz als Funktion zur Distanz (vgl. Abbildung 6.26).

6.5 Vergleich der verwendeten Regionalisierungsstrategien

IFCL und *CFIL*

Ähnliche methodische Ansätze zur Bewertung von Regionalisierungsverfahren enthalten Arbeiten von HERBST ET AL. (2006); SINOWSKI (1995) und STEIN ET AL. (1991). Der methodische Ansatz der Regionalisierungsverfahren **Interpolate First Calculate Later** (*IFCL*) und **Calculate First Interpolate Later** (*CFIL*) wird im Folgenden kurz dargestellt.

- Regionalisierungsmethode 1 (indirekt) \Leftrightarrow *IFCL*

Im ersten Schritt werden die Eingangsgrößen der *PTF* interpoliert, um anschließend die

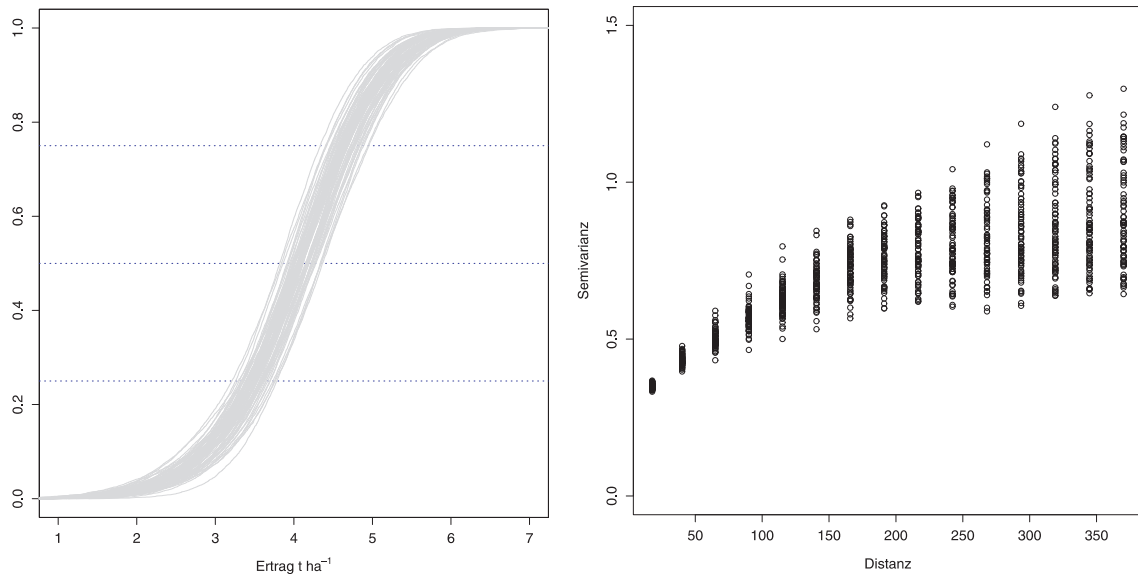


Abbildung 6.26: Kumulierte Häufigkeiten des simulierten Ertrages und Unsicherheiten der Semivarianz

flächenhaft verfügbaren Parameter pixelweise in die Pedotransferfunktion zu integrieren.

- Regionalisierungsmethode 2 (direkt) \Leftrightarrow *CFIL*

Für den Umkehrschluss sind erst die komplexen Parameter mit Hilfe der Pedotransferfunktionen für die Punktdatensätze geschätzt worden, um anschließend interpoliert zu werden.

Die Simulation der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit wurde mit dem Programmpaket GSTAT (PEBESMA, 2004) durchgeführt. Sie beruht auf normalverteilten Werten. Nicht-normalverteilte Werte müssen in eine multivariat-normalverteilte Form transformiert werden (SAITO & GOOVAERTS, 2000). Für jedes Pixel mit einer Auflösung von 10 m wurden unter Verwendung des Mittelwertes und der Standardabweichung 150 Simulationsdurchläufe gerechnet. Der Vergleich der Simulationsergebnisse und die damit verbundene Abschätzung der Unsicherheit erfolgt zum einen über die ermittelten Standardabweichungen, zum anderen aber auch visuell mit Hilfe der kumulierten Häufigkeit. Der Vergleich der Simulationen zeigt ausschließlich die Unterschiede der Regionalisierungsverfahren hinsichtlich ihres Mittelwertes und der Standardabweichung. Zu berücksichtigen ist, dass der Mittelwert und die Varianz des simulierten K_s -Wertes den Erwartungswert und die Krigingvarianz der gaußschen Simulation widerspiegeln. Die Regionalisierungsmethode 2 weist einen geringeren Medianwert von 38 cm d^{-1} , jedoch eine höhere Varianz auf. Die Regionalisierungsmethode 1 liefert einen simulierten Medianwert von 42 cm d^{-1} und eine geringere Standardabweichung für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Pflugsohle. Allgemein scheinen die Werte recht hoch, stehen jedoch im Zusammenhang mit den lehmig sandigen Substraten des Untersuchungsgebietes. Für die weitere Nutzung der Variante *CFIL* müssen fundamentale Einschränkungen, zitiert in BURROUGH (1993), berücksichtigt werden. Für die Verwendung von Bodenwasserhaushaltsmodellen im

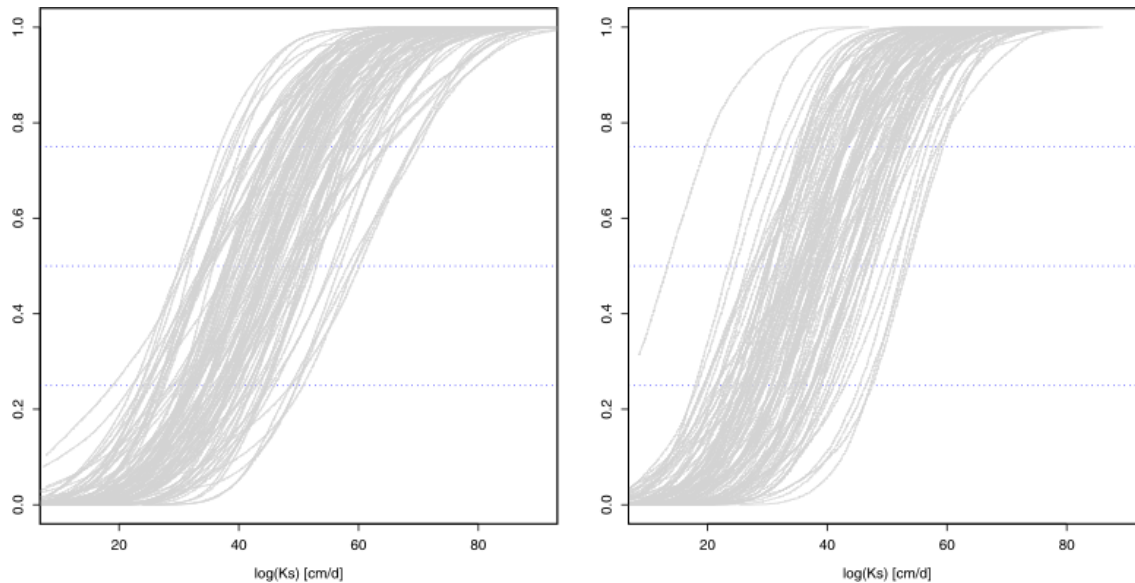


Abbildung 6.27: Kumulierte Häufigkeiten der simulierten gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten für die Regionalisierungsmethode 1 (a) und die Regionalisierungsmethode 2 (b)

zwei- oder dreidimensionalen Raum, wie beispielsweise *FEMWATER* (LIU ET AL., 2004a) ist die Regionalisierung über die Methode *IFCL* unumgänglich. Modelle benötigen bodenphysikalische Eingangsparameter wie Textur, Lagerungsdichte oder Porengrößenverteilung als Inputgröße. Diese Bodendaten müssen diskret, besser kontinuierlich für das gesamte Einzugsgebiet in angemessener Auflösung vorliegen. Vorteile der Regionalisierungsmethode *IFCL* sind im Einzelnen:

- Durch die Ergebnisse der Bodenregionalisierung lassen sich mit einer quantifizierbaren Unsicherheit Flächen ausgrenzen, die die Gültigkeitsbereiche der angewendeten *PTF* überschreiten (beispielsweise extrem hohe Trocken-Rohdichten, extrem hohe Sand- und Tongehalte).
- Die Quantifizierung der Unsicherheit (Kriging-Varianz) lässt sich mit den erwähnten Limitierungen für die interpolierten Bodeneigenschaften abschätzen und es lassen sich somit für die geschätzten Bodeneigenschaften Eintrittswahrscheinlichkeiten ableiten.
- Das Beprobungsmessnetz lässt sich individuell an die räumliche Variabilität anpassen. Somit lassen sich die strukturierten räumlichen Abhängigkeiten über die Messdichte erfassen.

Ein Nachteil des Verfahrens ist die Inkonsistenz der Summen aus den interpolierten Korngrößenfraktionen (HERBST, 2001). Die folgende Abbildung 6.28 zeigt die räumliche Ausprägung der absoluten und relativen Abweichungen der verwendeten Regionalisierungsverfahren. Die Spannweite der absoluten Werte liegt zwischen -15 cm d^{-1} und $+15 \text{ cm d}^{-1}$. Die höchsten relativen Abweichungen der Regionalisierungsmethoden sind für die Bereiche identifiziert, die sehr geringe *Ks*-Werte im indirekten *IFCL*-Verfahren aufweisen. Das sind Bereiche mit relativ

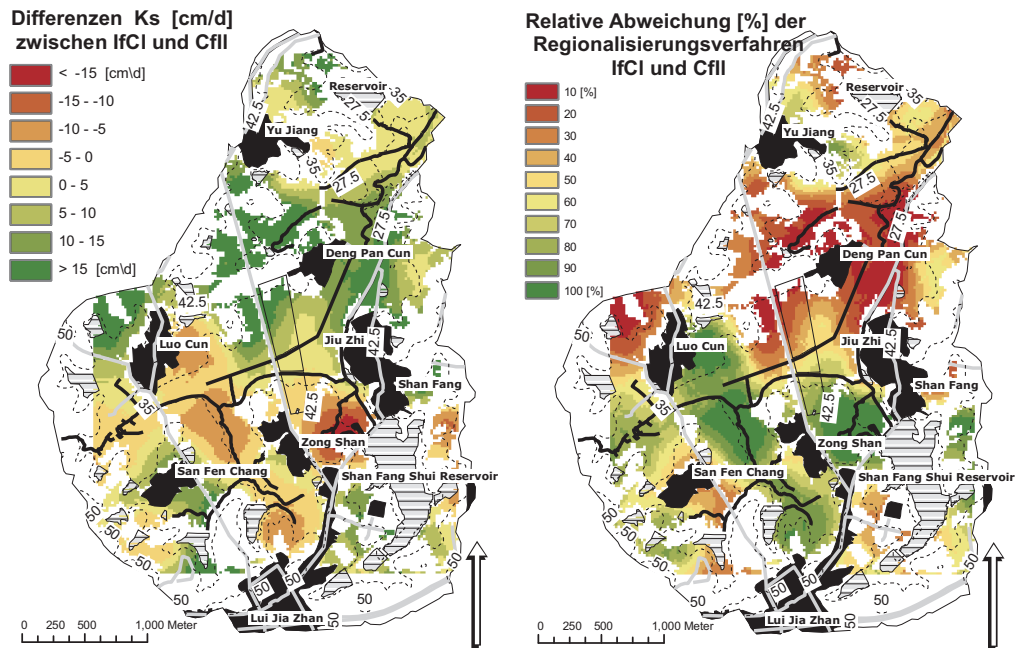


Abbildung 6.28: Prozentuale Unterschiede zwischen der Regionalisierungsmethode 1 *IFCL* und der Regionalisierungsmethode 2 *CFIL* für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit

hohen Schluffgehalten und vor allem relativ hohen Tongehalten, vor allem westlich der Toposequenz A und im Bereich des Shan Fang Shui Reservoirs. Die Abbildung 6.28 zeigt darüber hinaus, dass für die Bereiche mit eher hohem Sandgehalt und sandig-lehmigem Substrat im Nordosten des Untersuchungsgebietes eine geringe relative Abweichung vorliegt. Das bedeutet: für relativ sandige Bereiche liegt eine gute Übereinstimmung der Regionalisierungsmethoden vor, für relativ hohe Tongehalte dagegen nehmen die Unterschiede zu.

Bereiche, die eine geringe Punktdichte aufweisen verfügen über, eine hohe prozentuale Abweichung gegenüber dem Referenzgrid *IFCL* der hydraulischen Leitfähigkeiten. Als Gründe hierfür werden angesehen: zum einen die für das Gebiet ermittelte hohe Kriging-Varianz, zum anderen die Sensitivität der Eingangsgröße für die *PTF*, wofür auch der bereits dargestellte Unterscheid der Regionalisierungsmethoden hindeutet. Zu vergleichbaren Ergebnissen kommen HERBST (2001) und SINOWSKI (1995).

7 Diskussion der Ergebnisse

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit können folgende Aussagen abgeleitet und im Rahmen ausgewählter Literatur diskutiert werden:

Die Variabilität (Variationskoeffizienten) der untersuchten Bodeneigenschaften des gepuddelten Horizontes und der Pflugsohle ist auf der Landschaftsskala nahezu gleich. Der Gesamtkohlenstoffgehalt des gepuddelten Horizontes weist erwartungsgemäß einen höheren Medianwert bei höherer Standardabweichung als in der Pflugsohle auf. Dies stimmt mit den Arbeiten von SAHRAWAT (2004) u. a. überein. Ebenso ergaben Untersuchungen von SINOWSKI (1995) in klein strukturierten Agrarlandschaften Süddeutschlands höhere Variabilitäten im Oberboden als im Unterboden.

Der Gesamtkohlenstoffgehalt weist im gepuddelten Horizont eine mittlere strukturierte Abhängigkeit von 43 %, auf. In der Pflugsohle von 72 %. Gleiche Relationen sind für die Parameter Schluff- und Sandgehalt sowie die Horizonttiefe festzustellen. Die strukturierte räumliche Abhängigkeit des Tongehaltes hingegen ist in der Pflugsohle ausgeprägter als im gepuddelten Horizont. Der Gesamtstickstoffgehalt weist nahezu identische NSR-Werte für den gepuddelten Horizont (46 %) und der Pflugsohle (45 %) auf. Aus der Betrachtung der skalenübergreifenden räumlichen Autokorrelation ist ersichtlich, dass der zufällige Fehler bzw. der chaotische Anteil der Parameterverteilung auf der Landschaftsskala sowie auf der Feldskala ausgeprägter ist als auf der catenaren Skala. Für die Landschaftsskala sind die Faktoren des wechselnden Bodenmanagements und die relativen Dorflagen Ursachen für den höheren chaotischen Anteil der räumlichen Autokorrelation. Die Untersuchung von BOLING ET AL. (2008) stellt heraus, dass die Variabilität von Bodeneigenschaften zwischen Dorflagen größer ist als die Variabilität innerhalb einer Toposequenz. Dem kann für das Untersuchungsgebiet aufgrund des wechselnden Bodenmanagements ebenfalls zugestimmt werden. Auf der Feldskala nimmt hingegen der chaotische Anteil wieder zu. Die klassifizierten räumlichen Autokorrelationen zeigen eine deutliche Abnahme der strukturierten Abhängigkeit auf der Feldskala bei gleichzeitiger Zunahme der aus der individuellen Bodenbearbeitung resultierenden zufälligen Variation der Bodeneigenschaften.

7.1 Unsicherheiten in der Regionalisierungsgrundlage

Will man die Unsicherheiten in den Grundlagen der Regionalisierung bewerten, stellt sich die Frage, ob Reliefparameter, die für natürliche Systeme entwickelt wurden, wie der Topographische Feuchteindex *TWI* (MOORE ET AL., 1993; BEVEN & KIRKBY, 1979) oder der *LS*-Faktor (USLE) (DESMET & GOVERS, 1995) angesichts der stark anthropogen veränderten „Reliefsituationen“ (bzgl. zeitlicher und struktureller Dynamik) angewendet werden können. Eine Limitierung der Anwendbarkeit und vor allem hinsichtlich der Interpretation ist zu vermuten. An dieser Stelle lässt sich aufgrund der nicht vorhandenen Vergleichsgrundlage keine Aussage zur Anwendbarkeit machen. Es ist weiterhin festzustellen, dass in anthropogen stark geprägten Landschaften wie dem Liu Jia Zhan-Einzugsgebiet reliefabhängige Prozesse kaum identifizierbar sind. Die geringeren Zusammenhänge zwischen den Reliefparametern *TWI*, Ω sowie dem *LS*-Faktor und den Bodeneigenschaften Schluff und Gesamtkohlenstoffgehalt weisen, im Vergleich zum engen Zusammenhang des einfachen Reliefparameters Relative Höhe zu den genannten Bodeneigenschaften darauf hin, dass eher die Art und Dauer der Landwirtschaft differenziert durch die Reliefposition entscheidend ist, als der prozessuale Hintergrund des bodenbildenden Faktors Relief. Darauf weist auch die Beobachtung hin, dass jüngere Reisfelder in den oberen Hanglagen und ältere auf den unteren alluvialen Gunststandorten zu finden sind. Als weitere Unsicherheitsfaktor kann das Reliefmodell angesehen werden, das aus einer Topographischen Karte (Maßstab 1:15000) von 1979 abgeleitet wurde. Eine Übersicht zu möglichen Unsicherheiten bzgl. vertikaler und horizontaler Auflösungen geben beispielsweise FLORINSKY ET AL. (2002); THOMPSON ET AL. (2001).

Mit einer großen Unsicherheit sind weiterhin die aus Fernerkundungsdaten (Momentaufnahmen) abgeleiteten Vegetationsindizes (z. B. *NDVI*) verbunden. Verwendung fanden hierbei drei Satellitenszenen aus den Jahren 2000, 2001 und 2005, deren Aufnahmezeitpunkte im Jahresverlauf in etwa vergleichbar waren. Zur sicheren Ableitung abiotischer und biotischer Störgrößen der Wuchs- und Ertrageigenschaften unter Berücksichtigung eventueller Witterungseinflussere reicht die zeitliche Auflösung der verwendeten Fernerkundungsdaten jedoch bei weitem nicht aus. Durch eine Aggregation konnte zwar ein mittlerer *NDVI* für die Jahre berechnet und eine geringe Verbesserung der Korrelationsstrukturen erreicht werden, dennoch konnte nicht aufgelöst werden, welche Faktoren für die Ausprägung des spektralen Reflexionsgrades verantwortlich sind. Um Aussagen über den jeweiligen abiotischen bzw. biotischen Stress zu spezifizieren, ist die Kalibrierung durch Kenntnis des phänologischen Verlaufs zwingend erforderlich. Messungen von spektralen Reflexionsgraden als Referenz waren nicht vorhanden, so dass keine detaillierten Aussagen zur spektralen Reflexion der Bestände gemacht werden konnten. Eine sichere Erfassung von Bewirtschaftungszyklen erfordert eine deutlich höhere zeitliche Auflösung.

Um die geometrische Unsicherheit auf der Landschaftskala zu minimieren, wurden sogenannte Pufferbereiche um die mittels GPS erfassten Monitorpedozellen angelegt, deren Radien 15,

20 und 50 m betragen. Innerhalb dieser Pufferbereiche wurden die Werte aggregiert, was zu geringfügig höheren korrelativen Zusammenhängen auf der Landschaftsskala führte.

Zusätzlich ist der Aussagegehalt abgeschätzter Bodeneigenschaften unter Berücksichtigung der zeitlichen Variabilität pedohydrologischer Eigenschaften speziell im Hinblick auf die Managementfaktoren limitiert. Die zeitliche Variabilität pedohydrologischer Eigenschaften in kleinstrukturierten Reisanbausystemen ist extrem hoch. Die alternierenden Feuchtebedingungen in Folge der künstlichen Bewässerung und der damit in Verbindung stehenden Schrumpfung und Quellung tonreicher Böden lassen keine Aussage zur Größe der hydraulischen Leitfähigkeit im Untersuchungsgebiet zu. Wie Untersuchungen von SANDER & GERKE (2007) zeigen, gehen Schrumpfungsrisse oft bis über die Pflugsohle hinaus. Demnach müssen für wasserhaushaltliche Betrachtungen das Schrumpfungsvermögen, das Bodenmanagement sowie Witterungseinflüsse berücksichtigt werden. Trotz allem lassen sich für die Landschaftsskala mit Hilfe klassifizierter Vegetationsindizes Zonen charakteristischer pedohydrologischer Eigenschaften erfassen.

Regressionsmodellierung

Die Nutzung des RMSE als Gütemaß setzt in jedem Fall eine Varianzhomogenität voraus. Der *RMSE* liefert nur den mittleren Fehler des Modells, liefert jedoch keine Aussage, ob das Modell über- oder unterschätzt. Die Abweichungen bei hohen und niedrigen Werten werden nicht berücksichtigt. Darüber hinaus bleiben die gemessenen Werte bei einer Regression nicht erhalten.

Geostatistik

Geostatistische Verfahren sind parametrische Verfahren und setzen grundsätzlich eine Normalverteilung voraus. Multivariate Verfahren wie das Ko-Kriging setzen multivariat normalverteilte Verteilungen voraus. Die Unsicherheiten in der Regionalisierungsmethodik liegen daher vor allem in der nicht vorhandenen Normalverteilungen der zu integrierenden Primär- und Kovariablen begründet. In vielen Untersuchungen werden diese elementaren Voraussetzungen nur in einem gewissen Grad eingehalten (GOOVAERTS, 1997).

Eine grundsätzliche Fehlerquelle der Kriging-Interpolation bzw. der Interpolation nach der Methode der kleinsten quadratischen Abweichung ist, dass die lokale Veränderung des Erwartungswertes, in Abhängigkeit der Nuggetvarianz, geglättet wird. Vorhergesagte Werte sind in der Regel weitaus weniger variabel als die originale Verteilung. Kleine Werte werden überschätzt, hohe Werte unterschätzt. Darüber hinaus ist der sogenannte „support“ (vgl. Kapitel 6.1.4) also die Datenkonfiguration von entscheidender Bedeutung (WESTERN & BLOSCHL, 1999). Nah gelegene Werte werden für die Interpolation höher gewichtet als weiter entfernte Punkte. Für Parameter, die extrem hohe oder extrem niedrige Werte aufweisen wie z. B. die hydraulische Leitfähigkeit, ist die Anwendung der Interpolationsverfahren kritisch zu hinterfragen, weil hierbei die ursprünglich hohe Variabilität reduziert wird. Ein alternatives Verfahren ist die Simulation der Parameterverteilungen. Hierbei wird unter Beibehaltung

der ursprünglichen Varianz und des Mittelwertes flächenhaft der Parameter in simulierter Form bereitgestellt (GOOVAERTS, 1999). Die Arbeiten von HEUVELINK & WEBSTER (2001), GOULARD & VOLTZ (1992) und STEIN ET AL. (1991) sind für die Betrachtung von Unsicherheiten in der Umweltmodellierung von Relevanz.

Die Krigingvarianz ist ein von der tatsächlichen Größe der Messung Daten unabhängiges Maß zur Beschreibung der räumlichen Variabilität. Das Variogrammmodell und die zugrunde gelegte Beprobungsstrategie fließen in die Berechnung der Krigingvarianz ein. Somit repräsentiert die Krigingvarianz ausschließlich die modellierte räumliche Abhängigkeit und den Effekt der gewählten Anordnung der Beprobung. Man erkennt für das entwickelte Modell die Unsicherheiten resultierend aus den Beprobungsdistanzen. Auf diese Weise lassen sich Bereiche lokalisieren, die durch das gewählte Beprobungsmuster unterrepräsentiert sind. Die Krigingvarianz ist demnach kein Maß zur Beurteilung der lokalen Genauigkeit (JOURNEL & ROSSI, 1989). Basierend auf der Modellannahme der Stationarität 2. Ordnung liefert die Krigingvarianz jedoch ein Maß für die Unsicherheit der entsprechenden Interpolation. Wie bereits in Gleichung 5.17 erwähnt, kann die spezifische Eintrittswahrscheinlichkeit aus der Krigingvarianz abgeleitet werden, was jedoch nur bei gegebener der Normalverteilung möglich ist. Ebenfalls lassen sich Konfidenzintervalle ableiten. Die Aggregierung der Eingangsdaten oder das Verwenden des Block-Krigings führt meist zu stärker normal verteilten Werten. Hierbei führt der zentrale Grenzwertsatz zu einer verlässlichen Anwendung der Krigingvarianz.

Pedotransferfunktionen

Die Entwicklung dynamischer PTF, die beispielsweise die alternierenden Feuchtebedingungen der Bewässerung berücksichtigen können, ist in Reisanbausystemen von großer Bedeutung. Die zeitliche Dynamik der Parameterverteilung wird von den angewandten Pedotransferfunktionen nicht berücksichtigt. Darüber hinaus existieren bekannte Einschränkungen hinsichtlich des Gültigkeitsbereiches von Pedotransferfunktionen, die häufig räumlich nicht eindeutig abgrenzbar sind. Eine Aussage über die Sensitivität der einzelnen Eingangsgrößen der *PTF* ist über eine Simulation zu quantifizieren. Es kann somit geprüft werden, welchen Einfluss die Eingangsparameter zur Schätzung der Zielgröße aufweisen. Die verwendete Pedotransferfunktion nach WÖSTEN ET AL. (2001) zur Ableitung beispielsweise des K_s -Wertes liefert eine erklärte Varianz von 19 %. Hieraus resultiert eine hohe Unsicherheit in der Verwendung. Die Verwendung lokal adaptierter *PTF* ist hier sicherlich zu bevorzugen. Die Ableitung solcher Funktionen erfordert jedoch eine umfangreiche Datengrundlage, die in den seltensten Fällen vorhanden ist.

7.2 Die Regionalisierung von Bodeneigenschaften unter Verwendung von Sekundärinformationen auf unterschiedlichen Skalen

Es ist unter Betrachtung der räumlichen Korrelationsstrukturen hervorzuheben, dass die abgeleiteten Reliefparameter wie relative Höhe und Höhe über Tiefenlinie die höchsten Erklärungsanteile der entwickelten Regressionsmodelle (von bis zu 71.4 % erklärter Varianz) aufweisen. Je nach betrachteter Skala sind diese Korrelationsstrukturen jedoch unterschiedlich. Festzuhalten ist, dass der Reliefparameter relative Höhe für die Landschaftsskala den höchsten Erklärungsanteil aufweist und grundsätzlich in die Vorhersage zu integrieren ist. Es ist zu beachten, dass in stark anthropogen überprägten Landschaften, wie in Reisanbausystemen, ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Landnutzung und der Ausprägung der Bodeneigenschaften besteht. Darüber hinaus ist für das Untersuchungsgebiet die Dauer der Bewirtschaftung indirekt in Abhängigkeit zum Relief zu sehen. Die Reisfelder in höher gelegenen Bereichen wurden aufgrund der erschwerten Wasserversorgung (durch die Art der Bewässerung und des tiefliegenden Grundwasserstandes) erst später in die intensive Nutzung integriert. In höher gelegenen Reisfeldern dominieren die Fruchtfolgesysteme Reis-Erdnuss (vgl. Abbildung 4.8). Ohne eindeutige Altersdatierungen ist jedoch die Interpretation des vermeintlich reliefabhängigen Alters kaum durchführbar. Dennoch, die räumliche Variabilität der Bodeneigenschaften innerhalb der Toposequenz, (repräsentiert zum einen durch die catenare Skala wie auch durch die feldübergreifende Betrachtung der Toposequenz), korrespondiert mit den Ergebnissen aus Arbeiten zur räumlichen Variabilität pedohydrologischer Eigenschaften innerhalb einer Toposequenz (HSEU & CHEN, 2001). Die Ergebnisse zeigen, dass in oberen Hangbereichen höhere gesättigte Leitfähigkeiten und geringere Trocken-Rohdichten der Pflugsohle vorliegen. Durch Arbeiten von Tsubo et al. (2005) ist bekannt, dass: je höher die Position innerhalb der Toposequenz, desto größer das Potenzial an Wasserverlust aufgrund höherer Perkolation und lateralem Wasserabfluss. Diese Beobachtung konnte bestätigt werden. Die geschätzten gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten der feldübergreifenden Betrachtung stimmen mit den genannten Ergebnissen überein. Im Gegensatz zu den Schätzungen zeigen die Messungen der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten ein widersprüchliches Bild. Die ermittelte Trockenrohddichte ist für die Bewertung der Perkolation respektive des Wasserverlustes an Positionen innerhalb der Catena entscheidend. Darüber hinaus stellen Arbeiten von Tsubo et al. (2007b) fest, dass Wasserflüsse im oberen Bereich der Toposequenz hangabwärts gerichtet sind, dagegen im unteren Hangbereich der Bodenwasserhaushalt maßgeblich durch den lateralen Wasserfluss geprägt ist. Für das Untersuchungsgebiet konnte festgestellt werden, dass der Grundwasserstand in den Tieflandbereichen, für den Wasserfluss maßgeblich entscheidend ist.

Die Verwendung von Sekundärinformation zur Integration in die Vorhersage von Bodeneigenschaften ist bei räumlich abhängigen Korrelationsstrukturen einfachen Interpolationsverfahren vorzuziehen. Der Modellvergleich für die Bodeneigenschaften der Pflugsohle auf der

Landschaftsskala zeigt grundsätzlich einen geringen Unterschied. Für den Parameter Gesamtkohlenstoffgehalt liefert die Kreuzvalidierung der multiplen linearen Regression einen RMSE von 0.226, für das RKC-Verfahren einen RMSE von 0.236. Dennoch beträgt die relative Verbesserung (RI, vgl. Gleichung 5.21) 13.2 % für die Vorhersage von Gesamtkohlenstoffgehalt mittels RK-C gegenüber dem Simple Kriging (SK) oder dem Ordinary Kriging (OK). Diese Ergebnisse korrespondieren mit aktuellen Untersuchungen von RIVERO ET AL. (2007) sowie KRAVCHENKO & ROBERTSON (2007). Es ist zu beachten, dass dieser geringfügige Vorteil in der Vorhersagequalität der multiplen linearen Regression bei Betrachtung der absoluten Werte des Gesamtkohlenstoffgehaltes für die originären Werte keine Verbesserung erkennen lässt. Der Variationskoeffizient von 46.03 % deutet auf eine hohe Variabilität der Werte hin, die in gleichem Ausmaß auch im residualen Fehler des Vorhersagemodells zu erkennen ist (vgl. Tabelle 6.10). Aus der Kreuzvalidierung für den gepuddelten Horizont der Landschaftsskala ist ebenfalls ersichtlich, dass eine strukturierte räumliche Abhängigkeit gegeben sein muss, um valide Aussagen mit Hilfe hybrider geostatistischer Verfahren durchführen zu können. Speziell im Vergleich der Verfahren RKC und RKB wird dies sehr deutlich. Das Verfahren, das die Residuen aus dem deterministischen Verfahren der Regression integriert, weist einen geringeren RMSE auf als die geostatistische Variante. Es ist festzuhalten, dass nach Prüfung der räumlich strukturierten Abhängigkeit eine Auswahl des geeigneten Verfahrens erfolgen kann. Darüber hinaus betonen ODEH ET AL. (1995), dass bei einer ausgeprägten räumlich strukturierten Abhängigkeit der Primärvariablen die Leistungsfähigkeit des Hybriden-Verfahrens steigt. Es ist ebenfalls zu beachten, dass bei einem *pure – nugget* die Anwendung von Krigingverfahren keine Vorteile gegenüber nicht-geostatistischen Verfahren liefert. Die Kreuzvalidierung der Vorhersagemodelle für den Oberboden der Landschaftsskala zeigt, dass mittels Regression der geschätzten Originalvariable und den mittels Ordinary Kriging geschätzten Residuen eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit zu erzielen ist. Die engeren Zusammenhänge zwischen den Bodeneigenschaften des gepuddelten Horizontes und Reliefparametern wie der relativen Höhe sowie der Höhe über Tiefenlinie lassen das RKC als valides Verfahren zu. Die Differenzen sind jedoch auch hier sehr gering.

Die Kreuzvalidierung der regionalisierten Parameter für die catenare Skala ergibt, abgesehen vom Gesamtkohlenstoffgehalt, die geringsten *RMSE*-Werte für das Regression Kriging Model B. Das steht jedoch im Widerspruch mit den Ergebnissen auf der Landschaftsskala, weil für die catenare Skala die engsten Zusammenhänge zwischen Reliefparameter und Bodeneigenschaften ermittelt worden sind. Das abweichende Ergebnis des Vorhersagemodells im Vergleich zur Landschaftsskala ist wahrscheinlich durch die geringe Anzahl ($n = 48$) der Prädiktoren (HENGL ET AL., 2007b) und die große Abweichung von der Normalverteilung der Kovariablen bzw. der Primärvariablen (SAITO & GOOVAERTS, 2000) erklärbar.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Bodenregionalisierung unter Verwendung von Sekundärinformation verlässliche bodenphysikalische wie auch pedohydrologische Eigenschaften in Reisanbausystemen bereitstellen kann. Die Erfassung von Ertragsvariabilitäten durch

multispektrale Fernerkundungsdaten zur Bodenregionalisierung beinhaltet hohes Entwicklungspotenzial.

8 Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Vorhersage räumlicher Verteilungen pedohydrologischer Eigenschaften in einem ca. 13 km² großen Reisanbaugebiet im Südosten Chinas. Im Mittelpunkt steht dabei die regionalisierte Abbildung der für die Modellierung des Pflanzenertrags sowie des Landschaftswasser- und -stoffhaushaltes elementaren bodenkundlichen Modelleingangsgroßen. Im Einzelnen sind dies die Sand-, Schluff- und Tongehalte, der Gehalt an Gesamtkohlenstoff und Stickstoff sowie die Mächtigkeiten des gepuddelten Horizontes und der darunter folgenden Pflugsohle („Plough pan“). Angesichts des Mangels an flächenhaft verfügbaren Bodeninformationen im groß- und mittelmaßstäbigen Bereich und angesichts des hohen Kostenaufwandes, der mit der Bereitstellung zuverlässiger Bodeninformation verbunden ist, untersucht diese Dissertation, in welchem Maße die Anwendung von Sekundärinformationen aus digitalen Geländemodellen und multispektralen Fernerkundungsdaten die Bodenkartierung in einem schwach reliefierten Reisanbausystem unterstützen kann.

Mit dem Ziel, diese Sekundärdaten als Kovariablen in die Vorhersage von Bodeneigenschaften zu integrieren, werden hier das Regression Kriging (RK Modelle B und C) und die multi-lineare Regression als Regionalisierungsansätze angewendet. Die vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass der Gesamtkohlenstoffgehalt und Gesamtstickstoffgehalt sowie der Sand- und Schluffgehalt des Oberbodens signifikant mit der relativen Geländehöhe, der Höhe über Tiefenlinie und in geringerem Maße mit dem Topographischen Feuchteindex korrelieren. So lassen sich mit diesen Reliefvariablen ca. 25 % der Varianz der Schluffgehalte und 35 % der Varianz der Gesamtkohlenstoffgehalte und Gesamtstickstoffgehalte erklären. Gleichzeitig deuten die geostatistischen Analysen für diese Bodeneigenschaften auf eine erkennbar entwickelte räumliche Korrelationsstruktur auf der Landschaftsskala sowie der Feldskala hin. Im Unterschied dazu variiert die Verteilung der in starkem Maße von der Bewirtschaftung und Bewirtschaftungsdauer abhängigen Mächtigkeiten des gepuddelten Horizontes und der Pflugsohle eher zufällig. Für diese Eigenschaften sowie für die Verteilung des Tongehaltes im gepuddelten Horizont konnten weder Zusammenhänge mit dem Relief noch räumliche Korrelationsstrukturen nachgewiesen werden.

Ein Vergleich zwischen den hier eingesetzten Regionalisierungsverfahren zeigt, dass die Anwendung des Regression Kriging (RKC) gegenüber dem Simple und Ordinary Kriging auch dann zu einer verbesserten Schätzung einer Bodenvariablen führt, wenn der korrelative Zusammenhang zwischen der Zielvariablen und den erklärenden Kovariablen nur vergleichsweise schwach

ausgebildet ist. Ausgehend von den vorhergesagten Verteilungen der o. g. Bodenparametern werden abschließend wesentliche hydrologischen Bodeneigenschaften (nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Pflugsohle) auf Grundlage von Pedotransferfunktionen nach WÖSTEN ET AL. (2001) berechnet. Vergleiche mit den aus LANDSAT ETM+, SPOT und ASTER-Szenen abgeleiteten *NDVI*-Werten ergaben signifikante Zusammenhänge zwischen den Vegetationsindizes und den abgeleiteten pedohydrologischen Eigenschaften bzw. deren räumlichen Verteilungsmustern.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Bodenregionalisierung unter Verwendung von Sekundärinformation verlässliche bodenphysikalische wie auch pedohydrologische Eigenschaften in Reisanbaussystemen bereitstellen kann.

9 Summary

Sustainable land management practices require reliable information about spatial distributions of physical and chemical soil properties affecting landscape processes. Although many studies have been conducted to identify spatial patterns of soil property distribution on various scales and in various landscapes, only little is known about relationships underlying the spatial distribution of soil properties in intensively used, finely structured paddy soil landscapes in the southeastern part of China. In order to provide adequate soil information for modelling of landscape processes, such as soil water movement, nutrient leaching, soil erosion and plant growth, this study investigates to what extent readily available ancillary information derived from digital elevation models and remote sensing data can be used to support soil mapping and to indicate soil characteristics on the field and landscape scale. This dissertation focuses on the spatial prediction of total carbon content and of soil physical properties such as topsoil's and plough pan's silt, sand and clay content and horizon depth. Correlation analyses indicate that the distribution of C, N and silt contents corresponds significantly with terrain attributes such as relative elevation, elevation above nearest drainage channel and topographical wetness index. Geostatistical analyses furthermore reflect a moderately structured spatial correlation of these soil variables on the landscape scale as well as on the fieldscale. The use of above mentioned terrain variables in a multiple linear regression accounted for 25 % (silt) to 35 % (total C) of the variance of these soil properties. Less narrow relationships were achieved for other soil variables under the given study. Topsoil clay content, top soil depth and plough pan thickness did not correspond to any terrain variable and seemed to vary rather randomly in distribution. Similar results were obtained for the textural characteristics of the plough pan when using terrain attributes as explanatory variables only. Since plough pan texture is tightly correlated to that of the A-horizon the combined use of the corresponding A-horizon properties and terrain variables in a regression model resulted in higher degrees of determination. In order to select the best prediction method for accurately mapping soil property distribution a comparison of performance of various regionalization techniques, such as multi-linear regression, simple kriging, inverse distance to a power, ordinary kriging and regression kriging has been conducted. Except for prediction of topsoil clay content, in all cases regression kriging model „C“ and multi-linear regression performed best. Compared to simple kriging, the spatial prediction was relatively improved by 14 % (total C), 13 % (total N) and 10 % (silt) for A-horizon soil properties and by 77 % (clay) for plough pan characteristics. On the basis of predicted distributions above mentioned soil parameters the hydrologic soil characteristics usable field capacity and saturated hydraulic conductivity in the Plough pan on basis of *PTF* are finally

calculated after WÖSTEN ET AL. (2001). In comparison with the *NDVI* values derived from LANDSAT ETM+, SPOTS and Aster scenes resulted in significant connections between the vegetation indices and the derived pedohydrological characteristics and their spatial patterns.

Finally it is determined that the regionalization of soil properties under consideration of secondary information could provide reliable soil physical and pedohydrological properties even in paddy soil landscapes.

Literaturverzeichnis

- AIMRUN, W., AMIN, M. S. M., ELTAIB, S. M. (2004): Effective porosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity. In: *GEODERMA*, 121(3-4):197–203.
- ALDAKHEEL, Y. Y., DANSON, F. M. (1997): Spectral reflectance of dehydrating leaves: measurements and modelling. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING*, 18(17):3683–3690.
- AMBAST, S. K., KESHARI, A. K., GOSAIN, A. K. (2002): Satellite remote sensing to support management of irrigation systems: Concepts and approaches. In: *IRRIGATION AND DRAINAGE*, 51(1):25–39.
- APARICIO, N., VILLEGAS, D., CASADESUS, J., ARAUS, J. L., ROYO, C. (2000): Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. In: *AGRONOMY JOURNAL*, 92(1):83–91.
- ARORA, V. (2006): Application of a rice growth and water balance model in an irrigated semi-arid subtropical environment. In: *AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT*, 83(1-2):51–57.
- ARORA, V. K., GAJRI, P. R., UPPAL, H. S. (2006): Puddling, irrigation, and transplanting-time effects on productivity of rice-wheat system on a sandy loam soil of Punjab, India. In: *SOIL & TILLAGE RESEARCH*, 85(1-2):212–220.
- ARYA, L., PARIS, J. (1981): A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. In: *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL*, 45:1023–1030.
- ASRAR, G., MYNENI, R. B., CHOUDHURY, B. J. (1992): Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote-sensing of absorbed photosynthetically active radiation - a modeling study. In: *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 41(2-3):85–103.
- ATKINSON, P. M., WEBSTER, R., CURRAN, P. J. (1994): Cokriging with airborne mss imagery. In: *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 50(3):335–345.
- BACHELET, D., GAY, C. A. (1993): The impacts of climate change on rice yields a comparison of 4 model performances. In: *ECOLOGICAL MODELLING*, 65(1-2):71–93.

- BARKER, R., LOEVE, R., LI, Y. H., TUONG, T. P. (Hrsg.) (2001): Water-saving irrigation for rice: Proceedings of an International Workshop held in Wuhan, China. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka:.
- BARRS, H. D., PRATHAPAR, S. A. (1996): Use of satellite remote sensing to estimate summer crop areas in the Coleambally Irrigation Area, NSW. Techn. Ber., Division of Water Resources Consultancy.
- BASTIAANSEN, W., BOS, M. (1999): Irrigation Performance Indicators Based on Remotely Sensed Data: a Review of Literature. In: IRRIGATION AND DRAINAGE SYSTEMS, 13(4):291–311.
- BASTIAANSEN, W. G. M. (2000): SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. In: JOURNAL OF HYDROLOGY, 229(1-2):87–100.
- BASTIAANSEN, W. G. M., ALI, S. (2003): A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. In: AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT, 94(3):321–340.
- BASTIAANSEN, W. G. M., MOLDEN, D. J., MAKIN, I. W. (2000): Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. In: AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT, 46(2):137–155.
- BEGET, M. E., DI BELLA, C. M. (2007): Flooding: The effect of water depth on the spectral response of grass canopies. In: JOURNAL OF HYDROLOGY, 335(3-4):285–294.
- BEHRENS, T., SCHOLTEN, T. (2006): Digital soil mapping in Germany - a review. In: JOURNAL OF PLANT NUTRITION AND SOIL SCIENCE, 169(3):434–443.
- BELDER, P., BOUMAN, B. A. M., SPIERTZ, J. H. J. (2007): Exploring options for water savings in lowland rice using a modelling approach. In: AGRICULTURAL SYSTEMS, 92(1-3):91–114.
- BELWARD, A. S. (1991): Spectral characteristics of vegetation, soil and water in the visible, near-infrared and middle-infrared wavelengths. In: BELWARD, A. S., VALENZUELA, C. R. (Hrsg.), Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries, Kluwer Academic Publishers, Kap. Spectral characteristics of vegetation, soil and water in the visible, near-infrared and middle-infrared wavelengths, 31–53.
- BERNHARDT, C. (2003): Granulometrie: Klassier- und Sedimentationsmethoden. Wiley, Freising.
- BEVEN, K., KIRKBY, M. (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. In: Hydrol.Sci. Bull., 24:43–69.

- BEVEN, K. J. (2003): Rainfall Runoff Modelling: The Primer. John Wiley and Sons Ltd, Chichester.
- BÖHNER, J., KÖTHE, R. (2003): Bodenregionalisierung und Prozeßmodellierung: Instrumente für den Bodenschutz. In: PETERMANN'S GEOGRAPHISCHE MITTEILUNGEN, 147:72–82.
- BIAN, L., WALSH, S. (1993): Scale dependencies of vegetation and topography in a mountainous environment of Montana. In: THE PROFESSIONAL GEOGRAPHER, 45:1–11.
- BISHOP, T. F. A., MCBRATNEY, A. B. (2001): A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. In: GEODERMA, 103(1-2):149–160.
- BOLING, A. A., TUONG, T. P., SUGANDA, H., KONBOON, Y., HARNPICHITVITAYA, D., BOURNAN, B. A. M., FRANCO, D. T. (2008): The effect of toposequence position on soil properties, hydrology, and yield of rainfed lowland rice in Southeast Asia. In: FIELD CROPS RESEARCH, 106(1):22–33.
- BOLTON, F., ZANDSTRA, H. (1981): A soil moisture-based yield model of wetland rainfed rice. Techn. Ber. IRPS NO. 62, International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines.
- BOLUDA, R., ANDREU, V., GILABERT, M. A., SOBRINO, P. (1993): Relation between reflectance of rice crop and indexes of pollution by heavy-metals in soils of Albufera-natural-park (Valencia, Spain). In: SOIL TECHNOLOGY, 6(4):351–363.
- BORRELL, A., GARSIDE, A., FUKAI, S. (1997): Improving efficiency of water use for irrigated rice in a semi-arid tropical environment. In: FIELD CROPS RESEARCH, 52(3):231–248.
- BOS, M. G., BURTON, M. A., MOLDEN, D. J. (2005): Irrigation and Drainage Performance Assessment: Practical Guidelines. CABI.
- BOUMA, J. (1989): Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: STEWART, B. (Hrsg.), Advances in Soil Science, Springer, New York, Bd. 9, 177–213.
- BOUMA, J., VAN LANEN, H. A. J. (1986): Transfer functions and threshold values: From soil characteristics to land qualities. In: BEEK, K. J., BURROUGH, P. A., MCCORMACK, D. (Hrsg.), Quantified land evaluation procedures: Proceedings of the international workshop on quantified land evaluation procedures held in Washington, DC 27 April - 2 May 1986. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, ITC, Washington, DC, Nr. 6 in International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC) Publication No. 6, 106–110.
- BOUMAN, B. A. M. (1992): Linking physical remote-sensing models with crop growth simulation-models, applied for sugar-beet. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 13(14):2565–2581.
- BOUMAN, B. A. M. (1994): A framework to deal with uncertainty in soil and management parameters in crop yield simulation: a case-study for rice. In: AGRICULTURAL SYSTEMS, 46(1):1–17.

- BOUMAN, B. A. M., HUMPHREYS, E., TUONG, T. P., BARKER, R. (2007): Rice and water. In: *ADVANCES IN AGRONOMY*, 92:187–237.
- BOUMAN, B. A. M., KROPFF, M. J., TUONG, T. P., WOPEREIS, M. C. S., TEN BERGE, H. F. M., VAN LAAR, H. H. (2001): *ORYZA2000: modeling lowland rice*. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute, and Wageningen: Wageningen University and Research Centre.
- BOUMAN, B. A. M., PENG, S., CASTANEDA, A. R., VISPERAS, R. M. (2005): Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice, systems. In: *AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT*, 74(2):87–105.
- BOUMAN, B. A. M., TUONG, T. P. (2001): Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. In: *AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT*, 49(1):11–30.
- BOUMAN, B. A. M., VAN LAAR, H. H. (2006): Description and evaluation of the rice growth model *ORYZA2000* under nitrogen-limited conditions. In: *AGRICULTURAL SYSTEMS*, 87(3):249–273.
- BOUMAN, B. A. M., WOPEREIS, M. C. S., KROPFF, M. J., TEN BERGE, H. F. M., TUONG, T. P. (1994): Water use efficiency of flooded rice fields II. Percolation and seepage losses. In: *AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT*, 26(4):291–304.
- BOURENNANE, H., KING, D. (2003): Using multiple external drifts to estimate a soil variable. In: *GEODERMA*, 114(1-2):1–18.
- BRAKENSIEK, D. L., RAWLS, W., STEPHANSON, G. (1984): Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. In: *ASEA PAPER*, 84-203; St. Joseph/Michigan.
- BRUTSAERT, W. (1967): Some methods of calculating unsaturated permeability. In: *TRANSACTION ASAE*, 10:400–404.
- BURROUGH, P. (1993): Soil variability: A late 20th century view. In: *SOILS AND FERTILIZERS*, 56:529–562.
- BURROUGH, P. A. (1991): Soil information systems. In: MAGUIRE, D., GOODCHILD, M., RHIND, D. (Hrsg.), *Geographical information systems*, Longmans, Harlow, England, Bd. 2, 153–169.
- BUSCHMANN, C., NAGEL, E. (1993): *In vivo Spectroscopy And Internal Optics Of Leaves As Basis For Remote-Sensing Of Vegetation*. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING*, 14(4):711–722.
- CABANGON, R., TUONG, T. (2000): Management of cracked soils for water saving during land preparation for rice cultivation. In: *SOIL & TILLAGE RESEARCH*, 56:105–116.

- CAMBARDELLA, C. A., MOORMAN, T. B., NOVAK, J. M., PARKIN, T. B., KARLEN, D. L., TURCO, R. F., KONOPKA, A. E. (1994): Field-scale variability of soil properties in central iowa soils. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, 58(5):1501–1511.
- CAMPBELL, G. (1985): Soil Physics with BASIC: Transport Models for Soil Plant System, Bd. 6. Elsevier, Amsterdam.
- CANTY, M. J., NIELSEN, A. A., SCHMIDT, M. (2004): Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery. In: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 91(3-4):441–451.
- CARRÉ, F., MCBRATNEY, A. B., MAYR, T., MONTANARELLA, L. (2007): Digital soil assessments: Beyond DSM. In: GEODERMA, 142(1-2):69–79.
- CASANOVA, D., EPEMA, G. F., GOUDRIAAN, J. (1998): Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. In: FIELD CROPS RESEARCH, 55(1-2):83–92.
- CASSMAN, K., PINGALI, P. L. (1995): Extrapolating Trends from Long-term Experiments to Farmers' Fields: The case of irrigated Rice Systems in Asia. In: BARNETT, V., STEINER, R., PAYNE, R. (Hrsg.), Agricultural Sustainability: Economic, Environmental and Statistical Considerations, John Wiley & Sons, Chichester.
- CHANG, K. W., SHEN, Y., LO, J. C. (2005): Predicting rice yield using canopy reflectance measured at booting stage. In: AGRONOMY JOURNAL, 97(3):872–878.
- CHEMIN, Y., PLATONOV, A., UL-HASSAN, M., ABDULLAEV, I. (2004): Using remote sensing data for water depletion assessment at administrative and irrigation-system levels: case study of the Ferghana Province of Uzbekistan. In: AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT, 64(3):183–196.
- CHEN, S. K., LIU, C. W., HUANG, H. C. (2002): Analysis of water movement in paddy rice fields (II) simulation studies. In: JOURNAL OF HYDROLOGY, 268(1-4):259–271.
- CHEN, S. K., LIU, C. W. I. (2002): Analysis of water movement in paddy rice fields (I) experimental studies. In: JOURNAL OF HYDROLOGY, 260(1-4):206–215.
- CHILES, J., DELFINER, P. (1999): Geostatistics & Modeling Spatial Uncertainty. John Wiley & Sons, Ney York.
- CHOWDARY, V. M., RAO, N. H., SARMA, P. B. S. (2004): A coupled soil water and nitrogen balance model for flooded rice fields in India. In: AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT, 103(3):425–441.
- CHUNG, S. O., KIM, H. S., KIM, J. S. (2003): Model development for nutrient loading from paddy rice fields. In: AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT, 62(1):1–17.

- CNRRI (2004): China National Rice Research Institute. Rice Economy Database.
- CONGALTON, R. G. (1991): A Review Of Assessing The Accuracy Of Classifications Of Remotely Sensed Data. In: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 37(1):35–46.
- CONRAD, O. (2001): DIGEM: A Program for Digital Terrain Analysis. <http://www.geogr.uni-goettingen.de>.
- COSBY, B. J., HORNBERGER, G. M., CLAPP, R. B., GINN, T. R. (1984): A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. In: WATER RESOURCES RESEARCH, 20(9):682–690.
- CSBC (various issues): China Statistical Bureau. China Agricultural Yearbook.
- CURRAN, P. J. (1980): Multispectral remote sensing of vegetation amount. In: Progress in Physical Geography, 4:315–341.
- CURRAN, P. J., ATKINSON, P. M. (1998): Geostatistics and remote sensing. In: PROGRESS IN PHYSICAL GEOGRAPHY, 22(1):61–78.
- DAUGHTRY, C. S. T., GALLO, K. P., GOWARD, S. N., PRINCE, S. D., KUSTAS, W. P. (1992): Spectral Estimates Of Absorbed Radiation And Phytomass Production In Corn And Soybean Canopies. In: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 39(2):141–152.
- DAWE, D. (2005): Increasing water productivity in rice-based systems in Asia - Past trends, current problems, and future prospects. In: PLANT PRODUCTION SCIENCE, 8(3):221–230.
- DECKERS, J., NACHTERGAELE, F., SPAARGAREN, O. (Hrsg.) (1998): World Reference Base for soil resources : introduction. ACCO, Leuven.
- DEDATTA, S. K. (1981): Principles and practices of rice production. John Wiley & Sons, New York.
- DESMET, P. J. J., GOVERS, G. (1995): Gis-Based Simulation Of Erosion And Deposition Patterns In An Agricultural Landscape - A Comparison Of Model Results With Soil Map Information. In: CATENA, 25(1-4):389–401.
- DEUTSCH, C., JOURNEL, A. (1992): GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. Oxford University Press, New York.
- DIEKKRÜGER, B., RICHTER, O., BORMANN, H., RENSCHLER, C. (1999): Heraufskalieren von landwirtschaftlich genutzten Ökotypen. In: KLEEBOG, H., MAUSER, W., PESCHKE, G., STREIT, U. (Hrsg.), Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 bis 1998), WILEY, Weinheim, 477.

- DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2007): Prüfung fester Brennstoffe. Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff. Instrumentelle Methoden. DIN-Norm 51732. Berlin.
- DOBERMANN, A. (1994): Factors causing field variation of direct-seeded flooded rice. In: *GEODERMA*, 62(1-3):125–150.
- DOBERMANN, A., GAUNT, J. L., NEUE, H. U., GRANT, I. F., ADVIENTO, M. A., PAMPOLINO, M. F. (1994): Spatial and temporal variability of ammonium in flooded rice fields. In: *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL*, 58(6):1708–1717.
- DOBERMANN, A., GOOVAERTS, P., NEUE, H. U. (1997): Scale-dependent correlations among soil properties in two tropical lowland rice fields. In: *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL*, 61(5):1483–1496.
- DOBERMANN, A., PAMPOLINO, M. F., NEUE, H. U. (1995): Spatial and temporal variability of transplanted rice at the field-scale. In: *AGRONOMY JOURNAL*, 87(4):712–720.
- DOBERMANN, A., WITT, C., DAWE, D., ABDULRACHMAN, S., GINES, H. C., NAGARAJAN, R., SATAWATHANANONT, S., SON, T. T., TAN, P. S., WANG, G. H., CHIEN, N. V., THOA, V. T. K., PHUNG, C. V., STALIN, P., MUTHUKRISHNAN, P., RAVI, V., BABU, M., CHATUPORN, S., SOOKTHONGSA, J., SUN, Q., FU, R., SIMBAHAN, G. C., ADVIENTO, M. A. A. (2002): Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia. In: *FIELD CROPS RESEARCH*, 74(1):37–66.
- DOBOS, E., CARRÉ, F., HENGL, T., REUTER, H., TÓTH, G. (2006): Digital Soil Mapping as a support to production of functional maps. Techn. Ber., EUR 22123 EN, 68 pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg.
- DU, Y., TEILLET, P. M., CIHLAR, J. (2002): Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection. In: *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 82(1):123–134.
- DUTTMANN, R., SUMFLETH, K. (2007): Predictive mapping of soil characteristics in paddy rice landscapes of the central eastern Jiangxi Province, China. In: *GEOÖKO*, 1-2(28):72–103.
- FAO (1998): World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report 84. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO (2004): FAOSTAT Database. <http://apps.fao.org>.
- FEDDES, R. A., MENENTI, M., KABAT, P., BASTIAANSEN, W. G. M. (1993): Is large-scale inverse modeling of unsaturated flow with areal average evaporation and surface soil-moisture as estimated from remote-sensing feasible. In: *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 143(1-2):125–152.

- FENG, L. P., BOUMAN, B. A. M., TUONG, T. P., CABANGON, R. J., LI, Y. L., LU, G. A., FENG, Y. H. (2007): Exploring options to grow rice using less water in northern China using a modelling approach - I. Field experiments and model evaluation. In: *Agricultural Water Management*, 88(1-3):1–13.
- FLINN, J., DE DATTA, S., LABADAN, E. (1982): An analysis of long-term rice yields in a wetland soil. In: *FIELD CROPS RESEARCH*, 5:201–216.
- FLORINSKY, I. V., EILERS, R. G., MANNING, G. R., FULLER, L. G. (2002): Prediction of soil properties by digital terrain modelling. In: *ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE*, 17(3):295–311.
- FRENZEL, P., ROTHFUSS, F., CONRAD, R. (1992): Oxygen Profiles And Methane Turnover In A Flooded Rice Microcosm. In: *BIOLOGY AND FERTILITY OF SOILS*, 14(2):84–89.
- GEROLD, G., CYFFKA, B., SUTMÖLLER, J., KRÜGER, J.-P., BUSCH, G. (1999): Regionalisierung der Abflußbildung über die Aggregation homogener Flächen unter Verwendung des Geographischen Informationssystems ARC/INFO und der Digitalen Reliefanalyse (Programm SARA). In: KLEEGER, H., MAUSER, W., PESCHKE, G., STREIT, U. (Hrsg.), *Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 bis 1998)*, WILEY, Weinheim, 477.
- GESSLER, P. E., MOORE, I. D., MCKENZIE, N. J., RYAN, P. J. (1995): Soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS*, 9(4):421–432.
- GILABERT, M., MELIÁ, J. (1990a): Usefulness of the temporal analysis and the normalized difference in the study of rice by means of Landsat-5 TM images: establishment of relationships for yield prediction purpose. In: *GEOCARTO INT.*, 5:27–32.
- GILABERT, M., MELIÁ, J. (1990b): Usefulness of the temporal analysis and the normalized difference in the study of rice by means of Landsat-5 TM images: identification and inventory of rice fields. In: *GEOCARTO INT.*, 5:17–26.
- GITELSON, A., MERZLYAK, M. N. (1994): Spectral Reflectance Changes Associated With Autumn Senescence Of *Aesculus-Hippocastanum* L And *Acer-Platanoides* L Leaves - Spectral Features And Relation To Chlorophyll Estimation. In: *JOURNAL OF PLANT PHYSIOLOGY*, 143(3):286–292.
- GITELSON, A. A., KAUFMAN, Y. J., MERZLYAK, M. N. (1996): Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. In: *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 58(3):289–298.
- GOOVAERTS, P. (1997): *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, New York.

- GOOVAERTS, P. (1999): Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. In: GEODERMA, 89(1-2):1–45.
- GOOVAERTS, P. (2000): Estimation or simulation of soil properties? An optimization problem with conflicting criteria. In: GEODERMA, 97(3-4):165–186.
- GOULARD, M., VOLTZ, M. (1992): Linear Coregionalization Model - Tools For Estimation And Choice Of Cross-Variogram Matrix. In: MATHEMATICAL GEOLOGY, 24(3):269–286.
- GRUNWALD, S., E, C. M., GRUNWALD, G. (2005): Environmental Soil-Landscape Modeling: Geographic Information Technologies and Pedometrics. Taylor & Francis, Boca Raton.
- GUYOT, G. (1990): Optical properties of vegetative canopies. Applications of remote sensing in agriculture. Butterworths Publ, London.
- HAEFELE, S. M., WOPEREIS, M. C. S. (2005): Spatial variability of indigenous supplies for N, P and K and its impact on fertilizer strategies for irrigated rice in West Africa. In: PLANT AND SOIL, 270(1-2):57–72.
- HAFEEZ, M. M., BOUMAN, B. A. M., VAN DE GIESEN, N., VLEK, P. (2007): Scale effects on water use and water productivity in a rice-based irrigation system (UPRIIS) in the Philippines. In: AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT, 92(1-2):81–89.
- HAVERKAMP, R., PARLANGE, J.-Y. (1986): Predicting the water retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. In: SOIL SCIENCE, 142:325–339.
- HENGL, T., HEUVELINK, G. B. M., ROSSITER, D. G. (2007a): About regression-kriging: From equations to case studies. In: COMPUTERS & GEOSCIENCES, 33(10):1301–1315.
- HENGL, T., HEUVELINK, G. B. M., STEIN, A. (2004): A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. In: GEODERMA, 120(1-2):75–93.
- HENGL, T., TOOMANIAN, N., REUTER, H. I., MALAKOUTI, M. J. (2007b): Methods to interpolate soil categorical variables from profile observations: Lessons from Iran. In: GEODERMA, 140(4):417–427.
- HERBST, M. (2001): Regionalisierung von Bodeneigenschaften unter Berücksichtigung geomorphometrischer Strukturen für die Modellierung der Wasserflüsse eines mikroskaligen Einzugsgebiets. Dissertation, Universität Bonn.
- HERBST, M., DIEKKRUGER, B., VEREECKEN, H. (2006): Geostatistical co-regionalization of soil hydraulic properties in a micro-scale catchment using terrain attributes. In: GEODERMA, 132(1-2):206–221.
- HEUVELINK, G. B. M., WEBSTER, R. (2001): Modelling soil variation: past, present, and future. In: GEODERMA, 100(3-4):269–301.

- HODNETT, M. G., TOMASELLA, J. (2002): Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. In: GEODERMA, 108(3-4):155–180.
- HOQUE, E., HUTZLER, P. J. S., SEIDLITZ, H. K. (1988): Relationship Between Discoloration And Histological-Changes In Leaves Of Trees Affected By Forest Decline. In: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 26(2):171–184.
- HSEU, Z. Y., CHEN, Z. S. (2001): Quantifying soil hydromorphology of a rice-growing Ultisol toposequence in Taiwan. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, 65(1):270–278.
- INAMURA, T., GOTO, K., IIDA, M., NONAMI, K., INOUE, H., UMEDA, M. (2004): Geostatistical analysis of yield, soil properties and crop management practices in paddy rice fields. In: PLANT PRODUCTION SCIENCE, 7(2):230–239.
- INES, A. V. M., HONDA, K. (2005): On quantifying agricultural and water management practices from low spatial resolution RS data using genetic algorithms: A numerical study for mixed-pixel environment. In: ADVANCES IN WATER RESOURCES, 28(8):856–870.
- INES, A. V. M., HONDA, K., DAS GUPTA, A., DROOGERS, P., CLEMENTE, R. S. (2006): Combining remote sensing-simulation modeling and genetic algorithm optimization to explore water management options in irrigated agriculture. In: AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT, 83(3):221–232.
- INOUE, Y., KUROSU, T., MAENO, H., URATSUKA, S., KOZU, T., DABROWSKA-ZIELINSKA, K., QI, J. (2002): Season-long daily measurements of multifrequency (Ka, Ku, X, C, and L) and full-polarization backscatter signatures over paddy rice field and their relationship with biological variables. In: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 81(2-3):194–204.
- INOUE, Y., M.SUSAN, M., HORIE, T. (1998): Analysis of Spectral Measurements in Paddy Field for Predicting Rice Growth and Yield Based on a Simple Crop Simulation Model. In: PLANT PRODUCTION SCIENCE, 1(4):269–279.
- INOUE, Y., PENUELAS, J., MIYATA, A., MANO, M. (2008): Normalized difference spectral indices for estimating photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and CO₂ flux measurements in rice. In: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 112(1):156–172.
- IQBAL, J., READ, J. J., THOMASSON, A. J., JENKINS, J. N. (2005a): Relationships between soil-landscape and dryland cotton lint yield. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, 69(3):872–882.
- IQBAL, J., THOMASSON, J. A., JENKINS, J. N., OWENS, P. R., WHISLER, F. D. (2005b): Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, 69(4):1338–1350.

- IRRI (2004): International Rice Research Institute (IRRI).
- ISAAKS, E., SRIVASTAVA, R. (1989): Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, NY.
- ISHIDA, T., ANDO, H. (1994a): Computer-assisted mapping of paddy-field soils .1. production of closely spaced data from sparse data relating to soil chemical-properties. In: SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION, 40(3):391–402.
- ISHIDA, T., ANDO, H. (1994b): Computer-assisted mapping of paddy-field soils .2. classification, mapping, and significance. In: SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION, 40(3):403–414.
- ISHIDA, T., ITAGAKI, S., SASAKI, Y., ANDO, H. (2003): Drainage network analysis for regional partitions of alluvial paddy-field soils. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, 67(1):190–197.
- ISHIDA, T., ITAGAKI, S., SASAKI, Y., ANDO, H. (2004): Application of wavelet transform for extracting edges of paddy fields from remotely sensed images. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 25(2):347–357.
- ISHIGURO, E., KUMAR, M. K., HIDAKA, Y., YOSHIDA, S., SATO, M., MIYAZATO, M., CHEN, J. Y. (1993): Use Of Rice Response Characteristics In Area Estimation By Landsat Tm And Mos-1 Satellites Data. In: ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 48(1):26–32.
- JANSSEN, I. (2008): Landnutzungsabhängige Dynamik hydraulischer und mechanischer Bodenstrukturfunktionen in Nassreisböden. Dissertation, Universität zu Kiel.
- JANSSEN, M., LENNARTZ, B. (2007): Horizontal and vertical water and solute fluxes in paddy rice fields. In: SOIL & TILLAGE RESEARCH, 94(1):133–141.
- JENNY, H. (1941): Factors of soil formation. McGraw-Hill, New York.
- JENSEN, J. R. (2006): Remote Sensing of the Environment. An Earth Resource Perspective. Prentice Hall Series in Geographic Information Science. Prentice Hall.
- JOEL, G., GAMON, J. A., FIELD, C. B. (1997): Production efficiency in sunflower: The role of water and nitrogen stress. In: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 62(2):176–188.
- JOURNAL, A., HUIJBREGTS, C. (1978): Mining Geostatistics. Academic Press, New York.
- JOURNAL, A. G., ROSSI, M. E. (1989): When do we need a trend model in kriging? In: MATHEMATICAL GEOLOGY, 21(7):715–739.
- KAR, G., SINGH, R., VERMA, H. N. (2004): Spatial variability studies of soil hydro-physical properties using GIS for sustainable crop planning of a watershed of eastern India and its testing in a rainfed rice area. In: AUSTRALIAN JOURNAL OF SOIL RESEARCH, 42(4):369–379.

- KHEPAR, S. D., YADAV, A. K., SONDHI, S. K., SIAG, M. (2000): Water balance model for paddy fields under intermittent irrigation practices. In: *IRRIGATION SCIENCE*, 19(4):199–208.
- KLEEBOURG, H. (2000): Hydrologie und Regionalisierung. Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998). Wiley-VCH.
- KOBATA, T., UEMUKI, N. (2004): High temperatures during the grain-filling period do not reduce the potential grain dry matter increase of rice. In: *AGRONOMY JOURNAL*, 96(2):406–414.
- KOCH, B., AMMER, U., SCHNEIDER, T., WITTMER, H. (1990): Spectroradiometer Measurements In The Laboratory And In The Field To Analyze The Influence Of Different Damage Symptoms On The Reflection Spectra Of Forest Trees. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING*, 11(7):1145–1163.
- KRAVCHENKO, A. N., ROBERTSON, G. P. (2007): Can topographical and yield data substantially improve total soil carbon mapping by regression kriging? In: *AGRONOMY JOURNAL*, 99(1):12–17.
- KRÜGER, K. (2008): Regionalisierung von Bodeneigenschaften unter Verwendung digitaler Geländemodelle sowie multispektraler Fernerkundungsdaten am Beispiel einer Agrarlandschaft im Jungmoränengebiet Schleswig-Holsteins. Dissertation, Universität zu Kiel.
- KUKAL, S. S., AGGARWAL, G. C. (2002): Percolation losses of water in relation to puddling intensity and depth in a sandy loam rice (*Oryza sativa*) field. In: *AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT*, 57(1):49–59.
- KYUMA, K. (2004): Paddy Soil Science. Kyoto University Press und Trans Pacific Press, Melbourne.
- LAFFAN, S. W., LEES, B. G. (2004): Predicting regolith properties using environmental correlation: a comparison of spatially global and spatially local approaches. In: *GEODERMA*, 120(3-4):241–258.
- LAGACHERIE, P., MCBRATNEY, A. B., VOLTZ, M. (2007): Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective (Developments in Soil Science): An Introductory Perspective (Developments in Soil Science). Elsevier.
- LAMP, J., JAKOB, SCHRÖDER, D. (1981): Möglichkeiten und Grenzen der Bodenfernerkundung in Norddeutschen Kulturlandschaften. In: *MITTEILGN. DTSCH. BODENKUNDL. GESELLSCH.*, 32:731–744.
- LANCASHIRE, P. D., BLEIHOLDER, H., LANGELÜDDECKE, P., STAUSS, R., BOOM, T. V. D., WEBER, E., WITZEN-BERGER, A. (1991): An uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. In: *ANN. APPL. BIOL.*, 119:561–601.

- LARK, M. R. (2006): Analysis of complex soil variation using wavelets. In: GRUNWALD, S. (Hrsg.), *Environmental Soil-Landscape Modeling - Geographic Information Technologies and Pedometrics*, Taylor & Francis, Kap. 3, 61–104.
- LARK, R. (2000): Regression analysis with spatially autocorrelated error: simulation studies and application to mapping of soil organic matter. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOGRAPHICAL INFORMATION SCIENCE*, 14(3):247–264.
- LARK, R. M. (1999): Soil-landform relationships at within-field scales: an investigation using continuous classification. In: *GEODERMA*, 92(3-4):141–165.
- LEBLON, B., GUERIF, M., BARET, F. (1991): The use of remotely sensed data in estimation of par use efficiency and biomass production of flooded rice. In: *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 38(2):147–158.
- LEBLON, B., GUERIF, M., LA ROCQUE, A. (2001): Wind and cloud cover effects on spectral measurements of flooded rice crops in red and near-infrared SPOT-HRV bands. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING*, 22(7):1391–1397.
- LETOAN, T., RIBBES, F., WANG, L. F., FLOURY, N., DING, K. H., KONG, J. A., FUJITA, M., KUROSU, T. (1997): Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and modeling results. In: *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 35(1):41–56.
- LI, Y., BARKER, R. (2004): Increasing water productivity for paddy irrigation in China. In: *PADDY AND WATER ENVIRONMENT*, 2(4):187–193.
- LI, Y., CHEN, D., WHITE, R. E., ZHU, A., ZHANG, J. (2007): Estimating soil hydraulic properties of Fengqiu County soils in the North China Plain using pedo-transfer functions. In: *GEODERMA*, 138(3-4):261–271.
- LI, Y., LIAO, Q. F., LI, X., LIAO, S. D., CHI, G. B., PENG, S. L. (2003): Towards an operational system for regional-scale rice yield estimation using a time-series of Radarsat ScanSAR images. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING*, 24(21):4207–4220.
- LIN, D., H.C.AND RICHARDS, YEH, G., CHENG, J., CHENG, H., JONES, N. (1997): *FEMWATER: A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media*. Technical Report CHL-97-12, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg.
- LIN, H., BOUMA, J., PACHEPSKY, Y., WESTERN, A., THOMPSON, J., VAN GENUCHTEN, R., VOGEL, H. J., LILLY, A. (2006): *Hydropedology: Synergistic integration of pedology and hydrology*. In: *WATER RESOURCES RESEARCH*, 42(5):W05301.

- LINDAU, C. W., DELAUNE, R. D., PATRICK, W. H., BOLLIICH, P. K. (1990): Fertilizer Effects On Dinitrogen, Nitrous-Oxide, And Methane Emissions From Lowland Rice. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, 54(6):1789–1794.
- LIU, C. W., CHEN, S. K., JANG, C. S. (2004a): Modelling water infiltration in cracked paddy field soil. In: HYDROLOGICAL PROCESSES, 18(13):2503–2513.
- LIU, C. W., CHENG, S. W., YU, W. S., CHEN, S. K. (2003): Water infiltration rate in cracked paddy soil. In: GEODERMA, 117(1-2):169–181.
- LIU, C. W., HUANG, H. C., CHEN, S. K., KUO, Y. M. (2004b): Subsurface return flow and ground water recharge of terrace fields in northern Taiwan. In: JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION, 40(3):603–614.
- LIU, C. W., TAN, C. H., HUANG, C. C. (2005a): Determination of the Magnitudes and Values for Groundwater Recharge from Taiwanese Paddy Field. In: JOURNAL OF PADDY AND WATER ENVIRONMENT, 3:121–126.
- LIU, C. W., YU, W. S., CHEN, W. T., CHEN, S. K. (2005b): Laboratory investigation of plough sole reformation in a simulated paddy field. In: JOURNAL OF IRRIGATION AND DRAINAGE ENGINEERING-ASCE, 131(5):466–473.
- LIU, H., LI, X. B., FISCHER, G., SUN, L. X. (2004c): Study on the impacts of climate change on China's agriculture. In: CLIMATIC CHANGE, 65(1-2):125–148.
- LIU, X. M., XU, J. M., ZHANG, M. K., HUANG, J. H., SHI, J. C., YU, X. F. (2004d): Application of geostatistics and GIS technique to characterize spatial variabilities of bio-available micronutrients in paddy soils. In: ENVIRONMENTAL GEOLOGY, 46(2):189–194.
- LIU, X. M., XU, J. M., ZHANG, M. K., ZHOU, B. (2004e): Effects of land management change on spatial variability of organic matter and nutrients in paddy field: A case study of Pinghu, China. In: ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, 34(5):691–700.
- LIU, X. M., ZHAO, K. L., XU, J. M., ZHANG, M. H., SI, B., WANG, F. (2008): Spatial variability of soil organic matter and nutrients in paddy fields at various scales in southeast China. In: ENVIRONMENTAL GEOLOGY, 53(5):1139–1147.
- MACLEAN, J. L., DAWE, D. C., HARDY, B., HETTEL, G. P. (2002): Rice Almanac: Source Book for the Most Important Economic Activity on Earth. CABI Publishing.
- MARTIN, R. D. J., HEILMAN, J. L. (1986): Spectral reflectance patterns of flooded rice. In: PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING AND REMOTE SENSING, 52:1885–1890.
- MARX, D. B., GILMOUR, J. T., SCOTT, H. D., FERGUSON, J. A. (1988): Effects of long-term water management in a humid region on spatial variability of soil chemical status. In: SOIL SCIENCE, 145(3):188–193.

- MATHERON, G. (1965): Les Variables Regionalises et leur Estimation. Dissertation, Masson, Paris.
- MATSUI, T., NAMUCO, O. S., ZISKA, L. H., HORIE, T. (1997): Effects of high temperature and CO₂ concentration on spikelet sterility in indica rice. In: FIELD CROPS RESEARCH, 51(3):213–219.
- MATTHEWS, R. (2002a): Crop management. In: MATTHEWS, R. B., STEPHENS, W. (Hrsg.), Crop-Soil Simulation Models: Applications in Developing Countries, CABI Publ, Wallingford, 277.
- MATTHEWS, R. (2002b): Regional and national planning. In: MATTHEWS, R. B., STEPHENS, W. (Hrsg.), Crop-Soil Simulation Models: Applications in Developing Countries, CABI Publ, Wallingford, 277.
- MCBRATNEY, A. B., ODEH, I. O. A., BISHOP, T. F. A., DUNBAR, M. S., SHATAR, T. M. (2000): An overview of pedometric techniques for use in soil survey. In: GEODERMA, 97(3-4):293–327.
- MCBRATNEY, A. B., SANTOS, M. L. M., MINASNY, B. (2003): On digital soil mapping. In: GEODERMA, 117(1-2):3–52.
- MCCLOY, K. R., SMITH, F. R., ROBINSON, M. R. (1987): Monitoring rice areas using Landsat MSS data. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 8:741–749.
- MCKENZIE, N. J., RYAN, P. J. (1999): Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. In: GEODERMA, 89(1-2):67–94.
- MERTENS, M., NESTLER, I., HUWE, B. (2002): GIS-based regionalization of soil profiles with Classification and Regression Trees (CART). In: JOURNAL OF PLANT NUTRITION AND SOIL SCIENCE, 165(1):39–43.
- MIAO, Z. W., CHEPLICK, M. J., WILLIAMS, M. W., TREVISAN, M., PADOVANI, L., GENNARI, M., FERRERO, A., VIDOTTO, F., CAPRI, E. (2003): Simulating pesticide leaching and runoff in rice paddies with the RICEWQ-VADOFT model. In: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL QUALITY, 32(6):2189–2199.
- MINASNY, B., MCBRATNEY, A. B., BRISTOW, K. L. (1999): Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. In: GEODERMA, 93(3-4):225–253.
- MITASOVA, H., HOFIERKA, J., ZLOCHA, M., IVERSON, L. R. (1996): Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS, 10(5):629–641.
- MONTEITH, J. (1972): Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. In: Journal of Applied Ecology, 9:747–766.

- MOORE, I., GRAYSON, R., LADSON, A. (1992): Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications. In: *Hydrological Processes*, Bd.5:7–35.
- MOORE, I. D., GESSLER, P. E., NIELSEN, G. A., PETERSON, G. A. (1993): Soil Attribute Prediction Using Terrain Analysis. In: *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL*, 57(2):443–452.
- MORITSUKA, N., YANAI, J., UMEDA, M., KOSAKI, T. (2004): Spatial relationships among different forms of soil nutrients in a paddy field. In: *SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION*, 50(4):565–573.
- MUALEM, Y. (1976): A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. In: *WATER RESOURCES RESEARCH*, 12(3):513–522.
- MUELLER, T., PIERCE, F. (2003): Soil carbon maps: Enhancing spatial estimates with simple terrain attributes at multiple scales. In: *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL*, 67(1):258–267.
- MYERS, E., D. (1982): Matrix formulation of cokriging. In: *MATHEMATICAL GEOLOGY*, 14:249–250.
- MYNENI, R. B., NEMANI, R. R., RUNNING, S. W. (1997): Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. In: *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 35(6):1380–1393.
- NEMES, A., RAWLS, W. J., PACHEPSKY, Y. A. (2005): Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity. In: *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL*, 69(4):1330–1337.
- NEMES, A., SCHAAP, M. G., LEIJ, F. J., WOSTEN, J. H. M. (2001): Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0. In: *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 251(3-4):151–162.
- NEMES, A., WOSTEN, J. H. M., BOUMA, J., VARALLYAY, G. (2006): Soil water balance scenario studies using predicted soil hydraulic parameters. In: *HYDROLOGICAL PROCESSES*, 20(5):1075–1094.
- OBERTHUR, T., GOOVAERTS, P., DOBERMANN, A. (1999): Mapping soil texture classes using field texturing, particle size distribution and local knowledge by both conventional and geostatistical methods. In: *EUROPEAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE*, 50(3):457–479.
- ODEH, I. O. A., MCBRATNEY, A. B. (2000): Using AVHRR images for spatial prediction of clay content in the lower Namoi Valley of eastern Australia. In: *GEODERMA*, 97(3-4):237–254.
- ODEH, I. O. A., MCBRATNEY, A. B., CHITTLEBOROUGH, D. J. (1994): Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. In: *GEODERMA*, 63(3-4):197–214.

- ODEH, I. O. A., MCBRATNEY, A. B., CHITTLEBOROUGH, D. J. (1995): Further results on prediction of soil properties from terrain attributes heterotopic cokriging and regression-kriging. In: *GEODERMA*, 67(3-4):215–226.
- ODHIAMBO, L. O., MURTY, V. V. N. (1996): Modeling water balance components in relation to field layout in lowland paddy fields .1. Model development. In: *AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT*, 30(2):185–199.
- OLEJNIK, J., EULENSTEIN, F., KEDZIORA, A., WERNER, A. (2001): Evaluation of a water balance model using data for bare soil and crop surfaces in Middle Europe. In: *AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY*, 106(2):105–116.
- OLK, D. C., CASSMAN, K. G., RANDALL, E. W., KINCESH, P., SANGER, L. J., ANDERSON, J. M. (1996): Changes in chemical properties of organic matter with intensified rice cropping in tropical lowland soil. In: *EUROPEAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE*, 47(3):293–303.
- PACHEPSKY, Y. A., TIMLIN, D., VARALLYAY, G. (1996): Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. In: *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL*, 60(3):727–733.
- PARK, S., VLEK, P. (2002): Environmental correlation of three-dimensional soil spatial variability: a comparison of three adaptive techniques. In: *GEODERMA*, 109(1-2):117–140.
- PATEL, N. K., SINGH, T. P., SAHAI, B., PATEL, M. S. (1985): Spectral response of rice crop and its relation to yield and yield attributes. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING*, 6(5):657–664.
- PEBESMA, E. J. (2004): Multivariable geostatistics in S: the gstat package. In: *COMPUTERS & GEOSCIENCES*, 30(7):683–691.
- PETTORELLI, N., VIK, J. O., MYSTERUD, A., GAILLARD, J. M., TUCKER, C. J., STENSETH, N. C. (2005): Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. In: *TRENDS IN ECOLOGY & EVOLUTION*, 20(9):503–510.
- PHILLIPS, J. D. (2001): The relative importance of intrinsic and extrinsic factors in pedodiversity. In: *ANNALS OF THE ASSOCIATION OF AMERICAN GEOGRAPHERS*, 91(4):609–621.
- RAWLS, W., BRAKENSIEK, D. (1985): Prediction of soil water properties for hydrologic modelling. In: JONES, E., WARD, T. (Hrsg.), *Watershed Management in the Eighties*. Irrig. Drain. Div., ASCE, New York, *Watershed Management in the Eighties*, 293–299.
- RAWLS, W. J., BRAKENSIEK, D. L., LOGSDON, S. D. (1993): Predicting saturated hydraulic conductivity utilizing fractal principles. In: *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL*, 57(5):1193–1197.

- RIBBES, F., LE TOAN, T. (1999): Rice field mapping and monitoring with RADARSAT data. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 20(4):745–765.
- RIEU, M., SPOSITO, G. (1991): Fractal Fragmentation, Soil Porosity, And Soil-Water Properties .2. Applications. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, 55(5):1239–1244.
- RIVERO, R. G., GRUNWALD, S., BRULAND, G. L. (2007): Incorporation of spectral data into multivariate geostatistical models to map soil phosphorus variability in a Florida wetland. In: GEODERMA, 140(4):428–443.
- RYAN, P. J., MCKENZIE, N. J., O'CONNELL, D., LOUGHHEAD, A. N., LEPPERT, P. M., JACQUIER, D., ASHTON, L. (2000): Integrating forest soils information across scales: spatial prediction of soil properties under Australian forests. In: FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT, 138(1-3):139–157.
- SACHS, L., HEDDERICH, J. (2006): Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R. Springer, Berlin.
- SAHRAWAT, K. L. (2004): Organic matter accumulation in submerged soils. In: ADVANCES IN AGRONOMY, 81:169–201.
- SAHRAWAT, K. L., BHATTACHARYYA, T., WANI, S. P., CHANDRAN, P., RAY, S. K., PA, D. K., PADMAJA, K. V. (2005): Long-term lowland rice and arable cropping effects on carbon and nitrogen status of some semi-arid tropical soils. In: CURRENT SCIENCE, 89(12):2159–2163.
- SAITO, H., GOOVAERTS, P. (2000): Geostatistical interpolation of positively skewed and censored data in a dioxin-contaminated site. In: ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, 34(19):4228–4235.
- SAMEL, A. N., WANG, S. W., WANG, W. C. (1995): A Comparison Between Observed And Gcm-Simulated Summer Monsoon Characteristics Over China. In: JOURNAL OF CLIMATE, 8(6):1690–1696.
- SAMSON, B. K., HASAN, M., WADE, L. J. (2002): Penetration of hardpans by rice lines in the rainfed lowlands. In: FIELD CROPS RESEARCH, 76(2-3):175–188.
- SAMSON, B. L., ALI, A., RASHID, M. A., MAZID, M. A., WADE, L. J. (2004): Topographic position influences water availability in rainfed lowland rice at Rajshahi, northwest Bangladesh. In: PLANT PRODUCTION SCIENCE, 7(1):101–103.
- SANDER, T., GERKE, H. H. (2007): Preferential Flow Patterns in Paddy Fields Using a Dye Tracer. In: VADOSE ZONE JOURNAL, 6(1):105–115.
- SCHAAP, M. G., LEIJ, F. J. (1998): Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. In: SOIL SCIENCE, 163(10):765–779.

- SCHAAP, M. G., LEIJ, F. J., VAN GENUCHTEN, M. T. (2001): ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. In: JOURNAL OF HYDROLOGY, 251(3-4):163–176.
- SCHAAP, M. G., NEMES, A., VAN GENUCHTEN, M. T. (2004): Comparison of models for indirect estimation of water retention and available water in surface soils. In: VADOSE ZONE JOURNAL, 3(4):1455–1463.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag.
- SCULL, P., FRANKLIN, J., CHADWICK, O. A., MCARTHUR, D. (2003): Predictive soil mapping: a review. In: PROGRESS IN PHYSICAL GEOGRAPHY, 27(2):171–197.
- SELLE, B., MORGEN, R., HUWE, B. (2006): Regionalising the available water capacity from readily available data. In: GEODERMA, 132(3-4):391–405.
- SENANAYAKE, N., NAYLOR, R. E. L., DEDATTA, S. K., THOMSON, W. J. (1994): Variation In Development Of Contrasting Rice Cultivars. In: JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCE, 123:35–39.
- SHAO, Y., FAN, X. T., LIU, H., XIAO, J. H., ROSS, S., BRISCO, B., BROWN, R., STAPLES, G. (2001): Rice monitoring and production estimation using multitemporal RADARSAT. In: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 76(3):310–325.
- SHARMA, P. K., DEDATTA, S. K., REDULLA, C. A. (1988): Tillage Effects On Soil Physical-Properties And Wetland Rice Yield. In: AGRONOMY JOURNAL, 80(1):34–39.
- SHOJI, K., KAWAMURA, T., HORIO, H., NAKAYAMA, K., KOBAYASHI, N. (2005): Variability of micro-elevation, yield, and protein content within a transplanted paddy field. In: PRECISION AGRICULTURE, 6(1):73–86.
- SINGH, K. B., GAJRI, P. R., ARORA, V. K. (2001): Modelling the effects of soil and water management practices on the water balance and performance of rice. In: AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT, 49(2):77–95.
- SINGH, R., KROES, J. G., VAN DAM, J. C., FEDDES, R. A. (2006): Distributed eco-hydrological modelling to evaluate the performance of irrigation system in Sirsa district, India: I. Current water management and its productivity. In: JOURNAL OF HYDROLOGY, 329(3-4):692–713.
- SINGH, U., RITCHIE, J. T. (1993): Simulating the Impact of Climate Change on Crop Growth and Nutrient Dynamics Using the CERES-Rice Model. In: Journal of Agricultural Meteorology, 48:819–822.
- SINOWSKI, W. (1995): Die dreidimensionale Variabilität von Bodeneigenschaften - Ausmaß, Ursachen und Interpolation. Dissertation, Technische Universität München.

- SKIDMORE, A. K., VAREKAMP, C., WILSON, L., KNOWLES, E., DELANEY, J. (1997): Remote sensing of soils in a eucalypt forest environment. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 18(1):39–56.
- SOMMER, M., WEHRHAN, M., ZIPPRICH, M., WELLER, U., CASTELL, W. Z., EHRICH, S., TANDLER, B., SELIGE, T. (2003): Hierarchical data fusion for mapping soil units at field scale. In: GEODERMA, 112(3-4):179–196.
- SPOHRER, K., HERRMANN, L., INGWERSEN, J., STAHR, K. (2006): Applicability of uni- and bimodal retention functions for water flow modeling in a tropical acrisol. In: VADOSE ZONE JOURNAL, 5(1):48–58.
- STEIN, A., STARITSKY, I. G., BOUMA, J., VANEIJNSBERGEN, A. C., BREGT, A. K. (1991): Simulation of moisture deficits and areal interpolation by universal cokriging. In: WATER RESOURCES RESEARCH, 27(8):1963–1973.
- SUMFLETH, K., DUTTMANN, R. (2008a): Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators. In: ECOLOGICAL INDICATORS, 8(5):485–501.
- SUMFLETH, K., DUTTMANN, R. (2008b): The spatial variability of scale-dependent correlations between soil properties and relief information in a typical paddy soil landscape of south-east China. In: Geophysical Research Abstracts, 10:EGU2008–A–10988, 2008.
- TABBAL, D. F., BOUMAN, B. A. M., BHUIYAN, S. I., SIBAYAN, E. B., SATTAR, M. A. (2002): On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case studies in the Philippines. In: AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT, 56(2):93–112.
- TAO, H. B., BRUECK, H., DITTERT, K., KREYE, C., LIN, S., SATTELMACHER, B. (2006): Growth and yield formation of rice (*Oryza sativa* L.) in the water-saving ground cover rice production system (GCRPS). In: FIELD CROPS RESEARCH, 95(1):1–12.
- TENNAKON, S. B., MURTY, V. V. N., EIUMNOH, A. (1992): Estimation of cropped area and grain-yield of rice using remote-sensing data. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 13(3):427–439.
- THENKABAIL, P. S., SMITH, R. B., DE PAUW, E. (2000): Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. In: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 71(2):158–182.
- THENKABAIL, P. S., WARD, A. D., LYON, J. G., MERRY, C. J. (1994): Thematic mapper vegetation indices for determining soybean and corn growth parameters. In: PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING AND REMOTE SENSING, 60:437–442.
- THOMPSON, J. A., BELL, J. C., BUTLER, C. A. (2001): Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. In: GEODERMA, 100:67–89.

- TIETJE, O., HENNINGS, V. (1993): Bewertung von Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Wasserspannungskurve. In: ZEITSCHRIFT FÜR PFLANZENERNÄHRUNG UND BODENKUNDE, 156(5):447–455.
- TIETJE, O., HENNINGS, V. (1996): Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. In: GEODERMA, 69(1-2):71–84.
- TIETJE, O., TAPKENHINRICHS, M. (1993): Evaluation of Pedo-Transfer Functions. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, 57(4):1088–1095.
- TOMASELLA, J., HODNETT, M. G., ROSSATO, L. (2000): Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, 64(1):327–338.
- TORIYAMA, K., SASAKI, R., SHIBATA, Y., SUGIMOTO, M., CHOSA, T., OMINE, M., SAITO, J. (2003): Development of a site-specific nitrogen management system for paddy rice. In: JAPAN AGRICULTURAL RESEARCH QUARTERLY, 37(4):213–218.
- TOU, J. T., GONZALEZ, R. C. (1974): Pattern recognition principles. Addison- Wesley Publishing Company, Reading, Mass.
- TOURNEBIZE, J., WATANABE, H., TAKAGI, K., NISHIMURA, T. (2006): The development of a coupled model (PCPF-SWMS) to simulate water flow and pollutant transport in Japanese paddy fields. In: PADDY AND WATER ENVIRONMENT, 4(1):39–51.
- TRANGMAR, B. B., YOST, R., UEHARA, G. (1985): Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. In: ADVANCES IN AGRONOMY, 38:45–94.
- TRANGMAR, B. B., YOST, R., UEHARA, G. (1986a): Spatial dependence and interpolation of soil properties in West Sumatra, Indonesia: I. Anisotropic variation. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, 50:1391–1395.
- TRANGMAR, B. B., YOST, R., UEHARA, G. (1986b): Spatial dependence and interpolation of soil properties in West Sumatra, Indonesia: II. Co-regionalization and co-kriging. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, 50:1396–1400.
- TRANGMAR, B. B., YOST, R., WADE, M., UEHARA, G., SUDJADI, M. (1987): Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, 51:668–674.
- TSUBO, M., BASNAYAKE, J., FUKAI, S., SIHATHEP, V., SIYAVONG, P., SIPASEUTH, CHANPHENGSAI, M. (2006): Toposequential effects on water balance and productivity in rainfed lowland rice ecosystem in Southern Laos. In: FIELD CROPS RESEARCH, 97(2-3):209–220.

- TSUBO, M., FUKAI, S., BASNAYAKE, J., TUONG, T. P., BOUMAN, B., HARNPICHITVITAYA, D. (2005): Estimating percolation and lateral water flow on sloping land in rainfed lowland rice ecosystem. In: PLANT PRODUCTION SCIENCE, 8(3):354–357.
- TSUBO, M., FUKAI, S., BASNAYAKE, J., TUONG, T. P., BOUMAN, B., HARNPICHITVITAYA, D. (2007a): Effects of soil clay content on water balance and productivity in rainfed lowland rice ecosystem in northeast Thailand. In: PLANT PRODUCTION SCIENCE, 10(2):232–241.
- TSUBO, M., FUKAI, S., TUONG, T., OUK, M. (2007b): A water balance model for rainfed lowland rice fields emphasising lateral water movement within a toposequence. In: ECOLOGICAL MODELLING, 204(3-4):503–515.
- TUONG TP, B. B. (2003): Rice production in water-scarce environments. In: KIJNE, J. W., BARKER, R., MOLDEN, D. (Hrsg.), Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement, CABI Publishing, 13–42.
- VAESEN, K., GILLIAMS, S., NACKAERTS, K., COPPIN, P. (2001): Ground-measured spectral signatures as indicators of ground cover and leaf area index: the case of paddy rice. In: FIELD CROPS RESEARCH, 69(1):13–25.
- VAN GENUCHTEN, M. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, 44:892–898.
- VAN NIEL, T. G., McVICAR, T. R. (2004): Current and potential uses of optical remote sensing in rice-based irrigation systems: a review. In: AUSTRALIAN JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH, 55(2):155–185.
- VERECKEN, H., MAES, J., FEYEN, J. (1990): Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. In: SOIL SCIENCE, 149(1):1–12.
- VOGEL, H. J., ROTH, K. (2003): Moving through scales of flow and transport in soil. In: JOURNAL OF HYDROLOGY, 272(1-4):95–106.
- VOGEL, T., GERKE, H. H., ZHANG, R., VAN GENUCHTEN, M. T. (2000): Modeling flow and transport in a two-dimensional dual-permeability system with spatially variable hydraulic properties. In: JOURNAL OF HYDROLOGY, 238(1-2):78–89.
- WACKERNAGEL, H. (2003): Multivariate Geostatistics. Springer-Verlag, Berlin.
- WADE, L. J., FUKAI, S., SAMSON, B. K., ALI, A., MAZID, M. A. (1999): Rainfed lowland rice: physical environment and cultivar requirements. In: FIELD CROPS RESEARCH, 64(1-2):3–12.
- WAGNER, B., TARNAWSKI, V. R., HENNINGS, V., MULLER, U., WESSOLEK, G., PLAGGE, R. (2001): Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. In: GEODERMA, 102(3-4):275–297.

- WAHID, D. A., ISHIGURO, E., SHIMOTASHIRO, T., HIRAYAMA, S., UEDA, K. (2003): Study on Relationships among LAI, DW, fPAR and spectral reflectance in paddy rice. In: JOURNAL OF AGRICULTURAL METEOROLOGY, 59(1):13–21.
- WALKER, T. W., KINGERY, W. L., STREET, J. E., COX, M. S., OLDHAM, J. L., GERARD, P. D., HAN, F. X. (2003): Rice yield and soil chemical properties as affected by precision land leveling in alluvial soils. In: AGRONOMY JOURNAL, 95(6):1483–1488.
- WANG, D. B., CAI, X. M. (2007): Optimal estimation of irrigation schedule - An example of quantifying human interferences to hydrologic processes. In: ADVANCES IN WATER RESOURCES, 30(8):1844–1857.
- WASSMANN, R., BUTTERBACH-BAHL, K., A.DOBERMANN (2007): Irrigated rice production systems and greenhouse gas emissions: crop and residue management trends, climate change impacts and mitigation strategies. In: CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources, 2:1–14.
- WEBSTER, R., OLIVER, M. A. (2000): Geostatistics for Environmental Scientists. Wiley & Sons.
- WEGEHENKEL, M., JOCHHEIM, H., KERSEBAUM, K. C. (2005): The application of simple methods using remote sensing data for the regional validation of a semidistributed hydrological catchment model. In: PHYSICS AND CHEMISTRY OF THE EARTH, 30(8-10):575–587.
- WENDROTH, O., REUTER, H. I., KERSEBAUM, K. C. (2003): Predicting yield of barley across a landscape: a state-space modeling approach. In: JOURNAL OF HYDROLOGY, 272(1-4):250–263.
- WESTERN, A. W., BLOSCHL, G. (1999): On the spatial scaling of soil moisture. In: JOURNAL OF HYDROLOGY, 217(3-4):203–224.
- WIEGAND, C., SHIBAYAMA, M., YAMAGATA, Y., AKIYAMA, T. (1989): Spectral Observations For Estimating The Growth And Yield Of Rice. In: JAPANESE JOURNAL OF CROP SCIENCE, 58(4):673–683.
- WIEGAND, C. L., RICHARDSON, A. J., ESCOBAR, D. E., GERBERMANN, A. H. (1991): Vegetation Indexes In Crop Assessments. In: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 35(2-3):105–119.
- WILLIAMS, M., RITTER, A., CHEPLICK, M., ZDINAK, C. (1999): RICEWQ: Pesticide runoff model for rice crops, version 1.6.1 Aufl.
- WOPEREIS, M. C. S., BOUMA, J., KROPFF, M. J., SANIDAD, W. (1994a): Reducing Bypass Flow-Through A Dry, Cracked And Previously Puddled Rice Soil. In: SOIL & TILLAGE RESEARCH, 29(1):1–11.

- WOPEREIS, M. C. S., BOUMAN, B. A. M., KROPFF, M. J., TENBERGE, H. F. M., MALIGAYA, A. R. (1994b): Water-use efficiency of flooded rice fields. 1. validation of the soil-water balance model SAWAH. In: AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT, 26(4):277–289.
- WOPEREIS, M. C. S., KROPFF, M. J., MALIGAYA, A. R., TUONG, T. P. (1996): Drought-stress responses of two lowland rice cultivars to soil water status. In: FIELD CROPS RESEARCH, 46(1-3):21–39.
- WÖSTEN, J. H. M., LILLY, A., NEMES, A., LE BAS, C. (1999): Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. In: GEODERMA, 90(3-4):169–185.
- WÖSTEN, J. H. M., PACHEPSKY, Y. A., RAWLS, W. J. (2001): Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. In: JOURNAL OF HYDROLOGY, 251(3-4):123–150.
- XIAO, X., BOLES, S., LIU, J., ZHUANG, D., FROLKING, S., LI, C., SALAS, W., MOORE III, B. (2005): Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. In: REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 95(4):480–492.
- XIE, X. J., RAN, W., SHEN, Q. R., YANG, C. Y., YANG, J. J., CAO, Z. H. (2004): Field studies on P-32 movement and P leaching from flooded paddy soils in the region of Taihu Lake, China. In: ENVIRONMENTAL GEOCHEMISTRY AND HEALTH, 26(2-3):237–243.
- XIN, J. F., TIAN, G. L., LIU, Q. H., CHEN, L. F. (2006): Combining vegetation index and remotely sensed temperature for estimation of soil moisture in China. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 27(9-10):2071–2075.
- YANAI, J., LEE, C., KAHO, T., IIDA, M., MATSUI, T., UMEDA, M., KOSAKI, T. (2001): Geostatistical analysis of soil chemical properties and rice yield in a paddy field and application to the analysis of yield-determining factors. In: SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION, 47(2):291–301.
- YANAI, J., LEE, C. K., UMEDA, M., KOSAKI, T. (2000): Spatial variability of soil chemical properties in a paddy field. In: SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION, 46(2):473–482.
- YANAI, J., SAWAMOTO, T., OE, T., KUSA, K., YAMAKAWA, K., SAKAMOTO, K., NAGANAWA, T., INUBUSHI, K., HATANO, R., KOSAKI, T. (2003): Spatial variability of nitrous oxide emissions and their soil-related determining factors in an agricultural field. In: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL QUALITY, 32(6):1965–1977.
- YANG, C. M., CHEN, R. K. (2004): Modeling rice growth with hyperspectral reflectance data. In: CROP SCIENCE, 44(4):1283–1290.
- YANG, C. M., CHENG, C. H., CHEN, R. K. (2007): Changes in spectral characteristics of rice canopy infested with brown planthopper and leafhopper. In: CROP SCIENCE, 47(1):329–335.

- YANG, C.-M., SU, M.-R. (1998): Correlation of spectral reflectance to growth in rice vegetation. In: Proc. ACRS 1998 - 19nd Asian Conference on Remote Sensing.
- YANG, C.-M., SU, M.-R. (1999): Modeling rice growth from characteristics of reflectance spectra. In: Proc. ACRS 1999 - 20nd Asian Conference on Remote Sensing.
- YANG, C.-M., SU, M.-R. (2000): Analysis of spectral characteristics of rice canopy under water deficiency. In: Proc. ACRS 2000 - 21nd Asian Conference on Remote Sensing.
- YEMEFACK, M., ROSSITER, D. G., NJOMGANG, R. (2005): Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. In: GEODERMA, 125(1-2):117–143.
- YING, J. F., PENG, S. B., HE, Q. R., YANG, H., YANG, C. D., VISPERAS, R. M., CASSMAN, K. G. (1998): Comparison of high-yield rice in tropical and subtropical environments I. Determinants of grain and dry matter yields. In: FIELD CROPS RESEARCH, 57(1):71–84.
- YOSHIDA, S. (1981): Fundamentals of Rice Crop Science. International Rice Research Institute, Los Banos, Laguna, Philippines.
- YOSHIKAWA, N., SHIOZAWA, S. (2006): Estimating variable acreage of cultivated paddy fields from preceding precipitation in a tropical watershed utilizing Landsat TM/ETM. In: AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT, 85(3):296–304.
- YU, T.-R. (1985): Physical Chemistry of Paddy Soils. Springer.
- ZECH, W., HINTERMAIER-ERHARD, G. (2002): Böden der Welt.
- ZEVENBERGEN, L. W., THORNE, C. R. (1987): Quantitative Analysis Of Land Surface-Topography. In: EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS, 12(1):47–56.
- ZHANG, S. P., JIANG, S. C. (2001): Possible influences of ITCZ in Asian monsoon regions on rainy season anomaly of North China. In: ADVANCES IN ATMOSPHERIC SCIENCES, 18(5):1018–1028.
- ZHONG, W. H., CAI, Z. C. (2007): Long-term effects of inorganic fertilizers on microbial biomass and community functional diversity in a paddy soil derived from quaternary red clay. In: Applied Soil Ecology, 36(2-3):84–91.
- ZHU, A. X., HUDSON, B., BURT, J., LUBICH, K., SIMONSON, D. (2001): Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL, 65(5):1463–1472.
- ZHU, J., MOHANTY, B. P. (2002): Spatial Averaging of van Genuchten Hydraulic Parameters for Steady-State Flow in Heterogeneous Soils: A Numerical Study. In: VADOSE ZONE JOURNAL, 1(2):261–272.

- ZHU, Y., ZHOU, D., YAO, X., TIAN, Y., CAO, W. (2007): Quantitative relationships of leaf nitrogen status to canopy spectral reflectance in rice. In: AUSTRALIAN JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH, 58(11):1077–1085.
- ZISKA, L. H., NAMUCO, O., MOYA, T., QUILANG, J. (1997): Growth and yield response of field-grown tropical rice to increasing carbon dioxide and air temperature. In: AGRONOMY JOURNAL, 89(1):45–53.
- ZONG, Y., CHEN, Z., INNES, J. B., CHEN, C., WANG, Z., WANG, H. (2007): Fire and flood management of coastal swamp enabled first rice paddy cultivation in east China. In: NATURE, 449(7161):459–463.

Verzeichnis der wichtigsten Symbole

An dieser Stelle sind die wichtigsten Symbole, ihre Einheit und ihre Bedeutung zusammengefasst. Symbole, die nur einmal benutzt werden, sind direkt beim Auftreten erläutert.

Symbol	Bedeutung	Einheit
Θ	Wassergehalt	$cm^3 cm^{-3}$
Ψ	Matrixpotenzial	cm
Θ_r	Sättigungswassergehalt	$cm^3 cm^{-3}$
Θ_s	Residualer Wassergehalt	$cm^3 cm^{-3}$
α	Kehrwert des Lufteintrittspunktes	cm^{-1}
n	Formparameter	-
m	Formparameter	-
ρ_{tr}	Rohdichte trocken	$g cm^3$
β	Hangneigung	$^\circ$
Ω	Abflussintensitäts-Index	—

Verzeichnis der Akronyme

Acronym	Bedeutung
CTI	Compound Topographic Index
CV	Coefficient of Variation
DGM	Digitales Geländemodell
DKI	Divergenz/Konvergenz-Index
EDK	External Drift Kriging
FK	Feldkapazität
GSLIB	Geostatistical Software Library
LAI	Leaf Area Index
LS	Length-slope Faktor
MAE	Mean Absolute Error
NDVI	Normalized difference Vegetation Index
NDVIgreen	Normalized difference Vegetation Index
nFK	nutzbare Feldkapazität
OK	Ordinary Kriging
PTF	Pedotransferfunktion
PWP	Permanenter Welkepunkt
REG	Regression
RKA	Regression Kriging Model A
RKB	Regression Kriging Model B
RKC	Regression Kriging Model C
RMSE	Root Mean Square Error
SARA	System zur Automatischen Reliefanalyse
TWI	Topographischer Feuchteindex
VK	Variationskoeffizient

Anhang

Tabelle 9.3: Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen einfachen bodenphysikalischen Parametern und primären sowie sekundären Reliefparametern und NDVI im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet für den Ap-Horizont

Reliefparameter / Bodenparameter	NDVI			
	Landsat ETM+ 23.09.2000	ASTER 01.10.2001	SPOT 5 29.09.2005	Mean NDVI 2000-2005
Relative Höhe H_r [m]	-0.51**	-0.56**	-0.61**	-0.64**
Höhe ü. Tiefenlinie H_{ch} [m]	-0.47**	-0.50**	-0.56**	-0.59**
Hangneigung β	-0.25**	-0.32**	-0.36**	-0.39**
Vertikalkrümmung C_v	-0.22**	-0.15*	-0.24**	-0.21**
Horizontalkrümmung C_h	-0.18**	-0.16*	-0.18**	-0.17*
Konvergenz/Divergenz Index CDI	-0.21**	-0.18*	-0.23**	-0.21**
Topographischer Feuchteindex TWI [-]	0.37**	0.39**	0.44**	0.46**
Stream Power Index Ω	0.20**	0.12	0.17*	0.17*
LS Faktor LS	-0.05	-0.15*	-0.15*	-0.14*
C total [%] Ap	0.46**	0.50**	0.54**	0.55**
N total [%] Ap	0.44**	0.46**	0.51**	0.52**
Sand (%) Ap	-0.20*	-0.27**	-0.24**	-0.26**
Schluff [%] Ap	0.28**	0.40**	0.42**	0.38**
Ton [%] Ap	0.09	0.07	0.01	0.07
Ap Tiefe [cm]	0.15*	0.05	0.14*	0.12
Pp M. [cm]	-0.25**	-0.25**	-0.25**	-0.25**

Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman; * mindestens auf dem 99 %-Niveau signifikant; ** mindestens auf dem 99,5 %-Niveau signifikant; Ap: gepuddelter Horizont, Pp: Pflugsohle; n = 174 (Ap), n = 143 (Pp)

H_r = relative Höhe; β = Hangneigung; C_v = Vertikalkrümmung; C_h = Horizontalkrümmung;

H_{ch} = Höhe über Tiefenlinie; CDI = Konvergenz/Divergenz Index; TWI = Topographischer Feuchteindex;

Ω = Stream Power Index; LS = LS-Faktor (USLE)

Tabelle 9.4: Regressionsmodelle für bodenphysikalische Parameter, Reliefparameter sowie NDVI für den Ap-Horizont im Liu-Jia-Zhan-Einzugsgebiet

Zielvariable	ASTER NDVI 1. October 2001	SPOT5 NDVI 29. September 2005	ETM+ NDVI 23. September 2000	H_r [m]	β [°]	H_{ch} [m]	TWI [-]	LS Faktor [-]	Intercept	R^2
C total [%]	1.32	-	-	-0.020	-	-0.030	-	-	1.63	0.41
	-	1.00	-	-0.020	-	-0.030	-	-	1.81	0.40
Sand [%]	-16.18	-	0.70	-0.020	-	-0.050	-	-	0.39	0.38
	-	-10.33	-	0.264	-	-	-0.419	-	61.51	0.12
	-	-	-	0.276	-	-	-0.428	-	58.22	0.10
	-	-	-10.49	0.308	-	-	-0.486	-	58.72	0.10
Schluff [%]	13.12	-	-	-0.392	-	-	0.271	-	32.58	0.29
	-	10.60	-	-0.375	-	-	0.266	-	34.26	0.29
	-	-	6.26	-0.449	-	-	0.296	-	36.32	0.27
Ton [%]	3.18	-	-	0.087	-	-	0.126	-	3.18	0.01
	-	0.16	-	0.053	-	-	0.133	-	9.46	0.01
	-	-	4.79	0.099	-	-	0.148	-	6.83	0.02
Tiefe Oberboden [cm]	-0.35	-	-	-0.130	0.591	-	-	-	18.36	0.06
	-	0.27	-	-0.124	0.597	-	-	-	18.01	0.06
	-	-	1.13	-0.117	0.60	-	-	-	20.90	0.07
Pp-Mächtiggk. [cm]	-6.78	-	-	-	-	0.258	-	-	10.13	0.09
	-	-5.83	-	-	-	0.304	-	-	8.95	0.09
	-	-	-7.24	-	-	0.336	-	-	9.74	0.10

$n = 174$; H_r = relative Höhe; β = Hangneigung; H_{ch} = Höhe über Tiefenlinie; TWI = Topographischer Feuchteindex; LS = LS-Faktor (USLE)

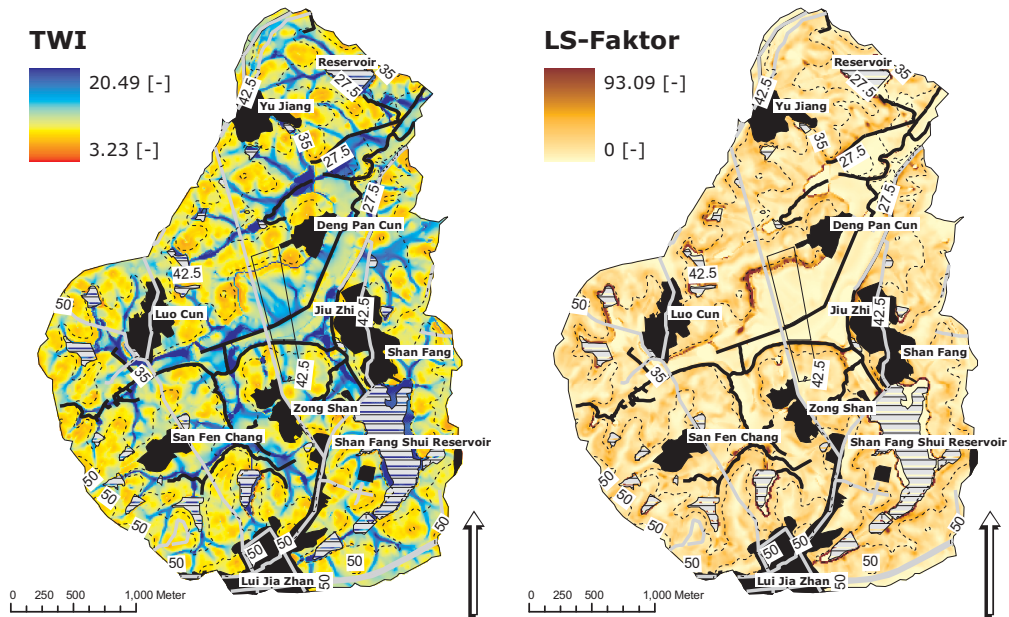


Abbildung 9.1: Darstellung der Reliefparameter Topographischer Feuchteindex und des LS-Faktors (USLE) für das Untersuchungsgebiet Liu Jia Zhan

Tabelle 9.5: Semivariogrammparameter zur Beschreibung der räumlichen Autokorrelation auf der Landschaftsskala für den Ap-Horizont und den Plough pan

Ho.	Parameter	Variogramm model	Nugget Varianz $c0$	Strukturelle Varianz cS	Gesamt Sill $(c0+cS)$	Reichw. (m) a	N-S Ratio (%)	Klasse der räumlichen Abhängigk.
Ap	C total (%)	sphärisch	0.106	0.14	0.246	600	43	M
PP			0.056	0.022	0.078	530	72	W
Ap	N total (%)	sphärisch	0.0011	0.0013	0.0024	534	46	M
PP			0.0023	0.0028	0.0051	750	45	M
Ap	Ton (%)	sphärisch	16.87	5.75	22.62	1536	75	W
PP			19.94	12.55	32.49	815	61	M
Ap	Silt (%)	sphärisch	21.46	22.35	43.81	810	49	M
PP			24.84	22.54	47.38	960	52	M
Ap	Sand (%)	sphärisch	60.18	32.14	92.32	1190	65	M
PP			76.44	29.39	105.85	1600	72	W
Ap	Depth (cm)	sphärisch	6.3	7.13	13.43	442	47	M
PP			23.69	4.85	28.54	1559	83	W

$n = 174$ (Ap), $n = 143$ (PP); S: starke strukturelle Abhängigkeit; M: moderate strukturelle Abhängigkeit
W: schlechte strukturelle Abhängigkeit

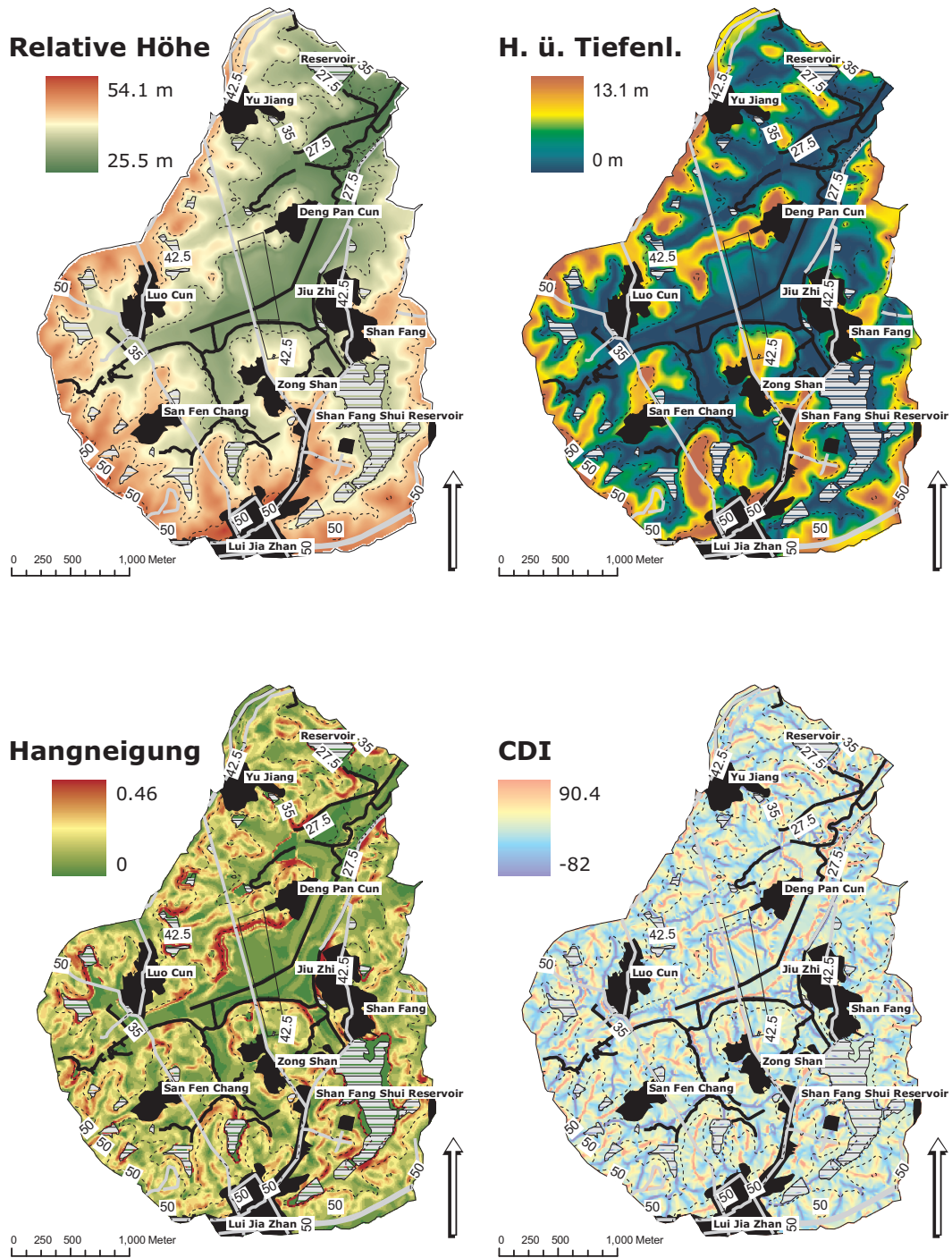


Abbildung 9.2: Darstellung der Reliefparameter relative Höhe, Höhe über Tiefenlinie, Hangneigung und CDI für das Untersuchungsgebiet Liu Jia Zhan

Tabelle 9.6: Deskriptive Statistiken des Oberbodens Feldskala

Bodenpar.	n	MW	VAR	SA	VK %	MIN	MED	MAX.	k. trans.		Boxcox		
									W	P	W	P	
Mächtigkeit Ah [cm]	Upper	35	12.46	10.02	3.17	25.41	7.00	12.00	24.00	0.92	0.01	0.98	0.66
	Middle	36	12.14	6.95	2.64	21.72	8.00	12.00	19.00	0.96	0.22	0.97	0.50
	Lower	49	16.29	8.12	2.85	17.50	10.00	16.00	23.00	0.98	0.49	0.98	0.56
Sand [%]	Upper	35	63.07	11.63	3.41	5.41	57.45	62.44	72.26	0.92	0.02	0.96	0.19
	Middle	36	48.56	7.29	2.70	5.56	43.23	48.63	55.71	0.96	0.26	0.98	0.76
Lower		49	55.14	7.34	2.71	4.91	48.32	54.97	62.68	0.98	0.75	0.98	0.77
	Upper	35	25.46	6.12	2.47	9.71	19.42	26.06	29.38	0.93	0.04	0.95	0.11
Silt [%]	Middle	36	34.60	7.57	2.75	7.95	30.19	34.34	47.40	0.76	3.0E-06	0.91	0.01
	Lower	49	33.16	4.39	2.10	6.32	26.94	33.53	37.09	0.97	0.28	0.98	0.56
Ton[%]	Upper	35	11.47	2.07	1.44	12.54	8.33	11.28	15.15	0.98	0.89	0.99	0.92
	Middle	36	16.84	5.05	2.25	13.35	6.47	17.15	19.78	0.77	4.0E-06	0.90	0.003
Lower		49	11.70	1.68	1.30	11.07	9.34	11.56	14.59	0.96	0.08	0.98	0.59
	Upper	35	1.26	0.01	0.10	8.25	0.93	1.27	1.41	0.94	0.05	0.96	0.21
Ctot [%]	Middle	36	1.87	0.03	0.18	9.73	1.44	1.86	2.21	0.98	0.73	0.90	0.003
	Lower	49	1.84	0.04	0.20	10.80	1.45	1.80	2.35	0.97	0.22	0.99	0.80

Var.=Varianz; S.D.=Standardabweichung; W=Shapiro-Wilk

Tabelle 9.7: Deskriptive Statistiken der Pflugsohle (Plough pan) Feldskala

Bodenpar.	n	MW	VAR	SA	VK %	MIN	MED	MAX.	k. trans.		Boxcox		
									W	P	W	P	
Ap M.[cm]	Upper	35	6.00	4.97	2.23	37.16	2.00	6.00	11.00	0.94	0.08	0.97	0.40
	Middle	36	7.75	14.35	3.79	48.89	4.00	7.00	18.00	0.80	1.4E-05	0.95	0.08
	Lower	49	11.06	11.24	3.35	30.31	4.00	11.00	19.00	0.98	0.42	0.98	0.44
Sand [%]	Upper	33	62.18	8.16	2.86	4.59	57.68	62.34	68.65	0.96	0.34	0.97	0.50
	Middle	36	51.96	4.23	2.06	3.96	49.44	51.39	57.39	0.84	1.1E-04	0.88	0.001
	Lower	49	60.15	1.81	1.35	2.24	57.58	60.03	63.93	0.98	0.68	0.99	0.91
Silt [%]	Upper	33	24.57	2.82	1.68	6.84	19.81	24.86	26.93	0.94	0.08	0.96	0.19
	Middle	36	33.16	5.76	2.40	7.24	30.40	33.13	44.78	0.71	4.1E-07	0.87	0.001
	Lower	49	29.05	1.46	1.21	4.16	23.38	29.17	31.09	0.84	1.3E-05	0.88	0.0001
Ton[%]	Upper	33	13.25	2.20	1.48	11.20	10.37	13.23	15.89	0.97	0.45	0.97	0.50
	Middle	36	14.88	7.36	2.71	18.23	2.32	15.23	19.26	0.77	5.1E-06	0.94	0.07
	Lower	49	10.81	0.86	0.93	8.60	9.04	10.75	12.75	0.98	0.51	0.98	0.61
C total [%]	Upper	33	0.70	0.01	0.12	16.40	0.53	0.72	0.93	0.95	0.12	0.95	0.11
	Middle	36	0.69	0.03	0.18	25.80	0.43	0.65	1.21	0.94	0.04	0.99	0.92
	Lower	49	0.41	0.01	0.10	23.57	0.28	0.39	0.88	0.76	1.7E-07	0.99	0.90

Var.=Varianz; S.D.=Standardabweichung; W=Shapiro-Wilk

Tabelle 9.8: Variogrammparameter Feldskala ohne Transformation

Horizont	Parameter	W	p	Variogram model	Nugget variance $c0$	Structural variance cS	Total sill $(c0+cS)$	Range (m) a	Nugget-sill ratio (%)	Class of spatial dependence
Ap	Ton [%]	0.9580	0.0787	sphärisch	0.83	0.61	1.44	4	57.8	W
Pp	Ton [%]	0.9784	0.4988	sphärisch	0.58	0.00	0.58	223	100.0	W
C	Ton [%]	0.9408	0.0159	sphärisch	1.67	0.28	1.95	4	85.5	W
Ap	Schluff [%]	0.9718	0.2842	sphärisch	2.42	0.00	2.42	115	100.0	W
Pp	Schluff [%]	0.8447	1.32E-05	sphärisch	1.22	0.04	1.26	4	96.8	W
C	Schluff [%]	0.9843	0.7511	sphärisch	0.89	0.00	0.89	4	100.0	W
Ap	Sand [%]	0.9843	0.7527	sphärisch	4.46	0.17	4.63	4	96.3	W
Pp	Sand [%]	0.9826	0.6793	sphärisch	1.06	0.00	1.06	4	99.9	W
C	Sand [%]	0.9542	0.0548	sphärisch	1.81	0.26	2.07	4	87.5	W
Ap	Tiefe [cm]	0.9782	0.4920	sphärisch	11.46	0.00	11.46	7	100.0	W
Pp	Tiefe [cm]	0.9762	0.4196	sphärisch	11.17	0.82	11.99	4	93.2	W
C	Tiefe [cm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ap	Ctotal [%]	0.9686	0.2130	sphärisch	0.03	0.02	0.04	185	64.3	W
Pp	Ctotal [%]	0.7643	1.79E-07	sphärisch	0.005	0.03	0.03	222	14.5	-
C	Ctotal [%]	0.9764	0.4262	sphärisch	0.001	0.001	0.00	93	47.4	-
Ap	Ntotal [%]	0.9530	0.0530	sphärisch	0.0003	0.0001	0.00	51	72.2	W
Pp	Ntotal [%]	0.8938	0.0003	sphärisch	0.0001	0.0002	0.00	11	36.4	M
C	Ntotal [%]	0.8101	1.82E-06	sphärisch	0.0002	2.55E-05	0.00	43	89.2	W
Ap	$q(fc)$ [$cm^3 cm^{-3}$] pF 1.8	0.9770	0.4478	sphärisch	0.79	0.15	0.94	5	84.1	W
Pp	$q(fc)$ [$cm^3 cm^{-3}$] pF 1.8	0.9733	0.3245	sphärisch	0.03	0.00	0.03	25	100.0	W
C	$q(fc)$ [$cm^3 cm^{-3}$] pF 1.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ap	$q(pwp)$ [$cm^3 cm^{-3}$] pF 4.2	0.9732	0.3220	sphärisch	0.71	0.00	0.71	42	100.0	W

Pp	q(pwp) [$cm^3 cm^{-3}$] pF 1.8	0.9832	0.7039	sphärisch	0.16	0.00	0.16	44	100.0	W
C	q(pwp) [$cm^3 cm^{-3}$] pF 1.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ap	q(awc) [mm] (root zone)	0.9917	0.9786	sphärisch	3.14	1.74	4.88	4	64.4	W
Pp	q(awc) [mm] (root zone)	0.9775	0.4666	sphärisch	2.06	0.61	2.67	5	77.1	W
C	q(awc) [mm] (root zone)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pp	KS [cm/d]	0.9633	0.1290	sphärisch	0.14	0.00	0.14	44	100.0	W

n = 48 (Ap) M: moderately structured spatial dependence; S: strongly structured spatial dependence

Tabelle 9.9: Variogrammparameter Feldskala BoxCox

Horizon	Soil parameter	W	p	Variogram model	Nugget variance	Structural variance	Total sill (c0+cS)	Range (m)	Nugget-sill ratio (%)	Class of spatial dependence
					c0	cS		a		
Ap	Ton [%]	0.9805	0.5861	sphärisch	3.1E-05	0.0	0.0	4.2	44.5	M
Pp	Ton [%]	0.9807	0.5943	sphärisch	0.00	0.00	0.01	4	99.7	W
C	Ton [%]	0.9399	0.0147	sphärisch	47.37	16.26	63.63	4	74.4	W
Ap	Schluff [%]	0.9800	0.5633	sphärisch	2386.57	560.03	2946.60	1	81.0	W
Pp	Schluff [%]	0.8783	0.0001	sphärisch	668.98	216.46	885.44	4	75.6	W
C	Schluff [%]	0.9918	0.9810	sphärisch	-	-	-	-	-	-
Ap	Sand [%]	0.9848	0.7744	sphärisch	0.07	0.00	0.07	42	100.0	W
Pp	Sand [%]	0.9883	0.9036	sphärisch	-	-	-	-	-	-
C	Sand [%]	0.9549	0.0583	sphärisch	-	-	-	-	-	-
Ap	Tiefe [cm]	0.9800	0.5647	sphärisch	40.99	0.00	40.99	4	100.0	W
Pp	Tiefe [cm]	0.9768	0.4398	sphärisch	0.98	5.13	6.10	7	16.0	S
C	Tiefe [cm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ap	Ctotal [%]	0.9848	0.7730	sphärisch	0.004	0.001	0.01	107	72.9	W
Pp	Ctotal [%]	0.9851	0.7846	sphärisch	0.000	0.62	0.62	6	0.0	-
C	Ctotal [%]	0.9826	0.6773	sphärisch	0.01	0.01	0.02	10	66.1	W
Ap	Ntotal [%]	0.9663	0.1715	sphärisch	0.05	0.01	0.07	23	79.6	W
Pp	Ntotal [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	Ntotal [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ap	q(fc) [cm ³ cm ⁻³] pF 1.8	0.9779	0.4813	sphärisch	873.71	376.75	1250.46	4	69.9	W
Pp	q(fc) [cm ³ cm ⁻³] pF 1.8	0.9763	0.4220	sphärisch	-	-	-	-	-	-
C	q(fc) [cm ³ cm ⁻³] pF 1.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Ap	q(pwp) [$cm^3 cm^{-3}$] pF 4.2	0.9827	0.6829	sphärisch	0.0002	3.6E-06	0.00	5	98.2	W
Pp	q(pwp) [$cm^3 cm^{-3}$] pF 1.8	0.9877	0.8850	sphärisch	8.13	4.35	12.48	4	65.2	W
C	q(pwp) [$cm^3 cm^{-3}$] pF 1.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ap	q(awc) [mm] (root zone)	0.9927	0.9897	sphärisch	-	-	-	-	-	-
Pp	q(awc) [mm] (root zone)	0.9783	0.4955	sphärisch	-	-	-	-	-	-
C	q(awc) [mm] (root zone)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pp	KS [cm/d]	0.9847	0.7687	sphärisch	0.00	0.00	0.00	5	99.7	W

n = 48 (Ap) M: moderately structured spatial dependence; S: strongly structured spatial dependence

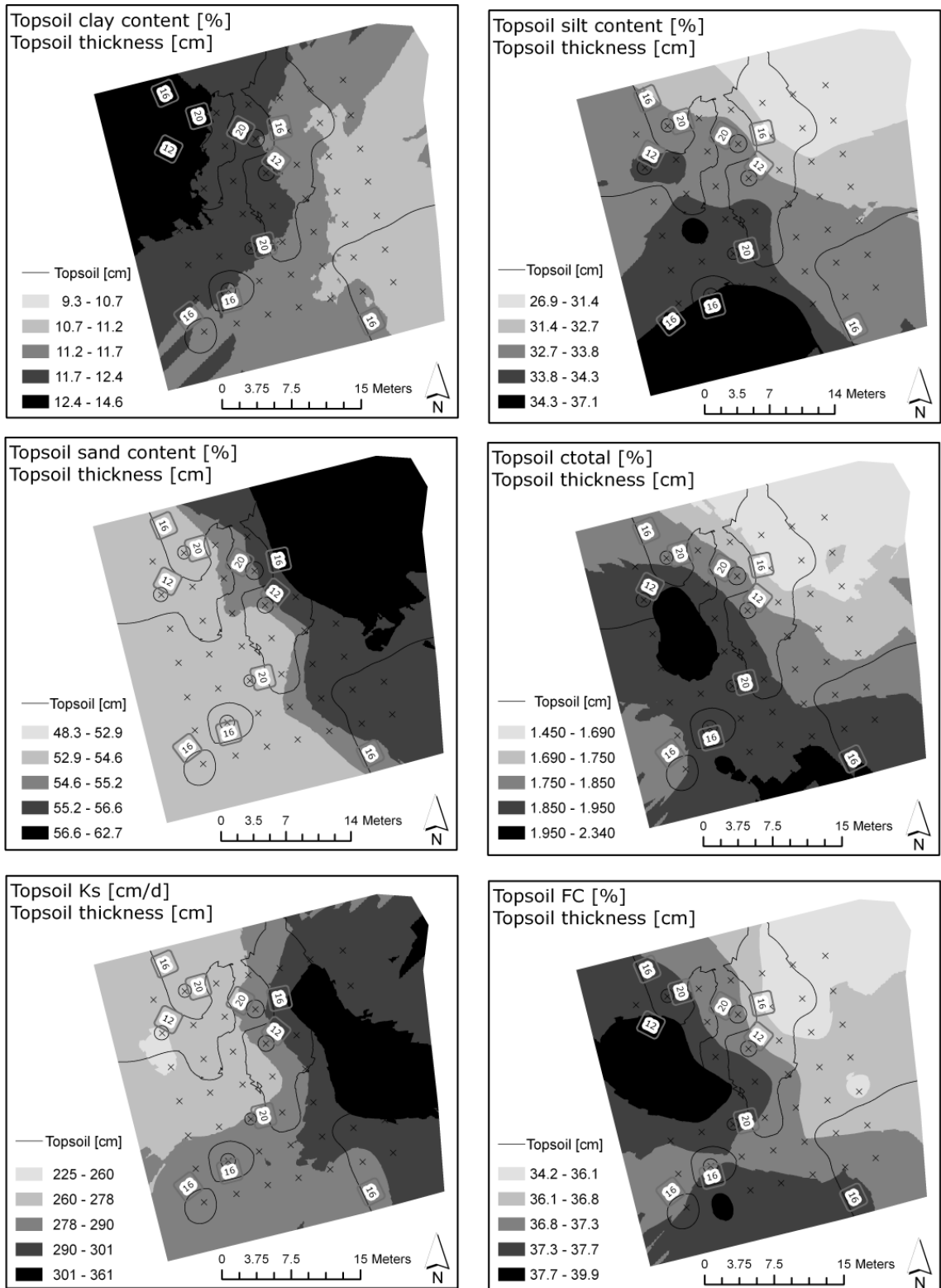


Abbildung 9.3: Flächenhafte Darstellung ausgewählter Bodenkennwerte des Oberbodens für das untere Feld der Toposequenz

Kay Sumfleth

Crop and Environmental Science Division
International Rice Research Institute
DAPO Box 7777
Metro Manila
Philippines

k.sumfleth@cgiar.org, k.sumfleth@gmail.com
http://www.sumfleth.de
Date of birth: 14.09.1977
married, two kids

EDUCATION

PhD-studies Physical Geography Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, (Defense 06/2008)

Thesis: Regionalization of soil properties in paddy soil landscapes for spatial distributed modeling of water budget and rice yield (in german)

Advisor: Prof. Dr. Rainer Duttmann

Diploma Geography Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2004

Diploma thesis: Mesoscale estimation of soil erosion risks in agricultural landscapes of Schleswig-Holstein with means of remote sensing data - The application of ASTER and ETM data for soil conservation (in german)

Minor subject: Hydrogeology/Geology and water management

Studies abroad Undergraduate Studies at the Université de Bretagne Occidentale Brest, France

02/2001 - 07/2001 (Erasmus Grant)

PUBLICATIONS

- Lennartz B., Horn R., Duttmann R., Gerke H.H., Tippkotter R., Eickhorst T., Janssen I., Janssen M., Ruth B., Sander T., Shi X., Sumfleth K., Taubner H., and Zhang B., 2009. Ecological safe management of terraced rice paddy landscapes. *Soil & Tillage Research*, 102(2):179–192.
- Wassmann R., Jagadish S.V.K., Heuer S., Ismail A., Redona E., Serraj R., Singh R., Howell G., Pathak H., and Sumfleth K., 2009a. Chapter 2 Climate Change Affecting Rice Production: The Physiological and Agronomic Basis for Possible Adaptation Strategies. *Advances in Agronomy*, Volume 101:59–122.
- Wassmann R., Jagadish S.V.K., Sumfleth K., Pathak H., Howell G., Ismail A., Serraj R., Redona E., Singh R., and Heuer S., 2009b. Chapter 3 Regional Vulnerability of Climate Change Impacts on Asian Rice Production and Scope for Adaptation. *Advances in Agronomy*, Volume 102:91–133.
- Sumfleth K. and Duttmann R., 2008a. The spatial variability of scale-dependent correlations between soil properties and relief information in a typical paddy soil landscape of south-east China. *Geophysical Research Abstracts*, 10:EGU2008–A–10988, 2008.
- Sumfleth K. and Duttmann R., 2008b. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators. *Ecological Indicators*, 8(5):485–501.
- Duttmann R. and Sumfleth K., 2007a. Predictive mapping of physical soil characteristics in paddy rice landscapes of the central eastern Jiangxi Province/ China. *GEOÖKO*, 28:72–103.
- Duttmann R. and Sumfleth K., 2007b. Regionalisierung von bodenphysikalischen Eigenschaften in paddy rice Landschaften SO-Chinas auf unterschiedlichen Skalen. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 110:445–446.
- Sumfleth K. and Duttmann R., 2007. Prediction of soil properties in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators. In: R. Bunce, R. Jongman, L. Hojas, and S. Weel, editors, *25 years landscape ecology: Scientific Principles in Practice. Proceedings of the 7th IALE World Congress 8-12 July Wageningen*, IALE Publications series 4. The Netherlands.
- Duttmann R., Krüger K., and Sumfleth K., 2005. "No data als Problem"- Wo die Landschaftsmodellierung an ihre Grenzen stößt. In: *Grenzwerte (55. Dt. Geographentag Trier 2.10.-08.10.2005)*.

Duttmann R. and Sumfleth K., 2005. Räumliche Variabilität ausgewählter Bodeneigenschaften von Reiskulturlandschaften in SE-China unter Anwendung von morphometrischen und radiometrischen Analysetechniken. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 107:33–34.

Sumfleth K., Duttmann R., Koop B., Lennartz B., and Zhao Y., 2005. Räumliche Variabilität ausgewählter Bodeneigenschaften und Standortpotenziale von Reiskulturlandschaften in SE-China. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 106:99–100.

GEOGRAPHIC INFORMATION SCIENCE/COMPUTER SKILLS

- ◇ **Geographic Information Systems:** Experiences with ArcGIS and open source GIS. Experiences with geostatistics and terrain modelling.
- ◇ **Remote Sensing Systems:** ENVI/IDL (CREASO certificate), Erdas Imagine and open source software.
- ◇ **Scripting/Programming knowledge:** HTML, PHP, Visual Basic, Java, Python, IDL.
- ◇ **Data Analysis:** R, Geostatistical Software, Surfer, SPSS, Minitab.
- ◇ **Computer Administration:** MySQL, Postgres, Linux, Windows.
- ◇ **Productivity Software:** L^AT_EX, Word, Excel, Access, Powerpoint, Adobe products etc.

RESEARCH EXPERIENCE

Doctoral Research. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2004 – present

My doctoral research investigates to what extent readily available ancillary information derived from digital elevation models and remote sensing data can be used to support soil mapping and to indicate soil characteristics on the field and the landscape scale.

Research Assistant. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2004 – 2007

Main objective of the project is the development of cross-scale transfer functions enabling the extrapolation of soil and crop yield data from a limited number of sample sites to the field and landscape scales. An essential improvement of recently applied regionalization and prediction models will be achieved by integrating high-resolution terrain models and remote sensing information respectively the crop growth and yield information derived from satellite data. Dr. Rainer Duttmann, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Research trips. Jiangxi Province / China

10/2006 - 11/2006

10/2005 - 11/2005

09/2004 - 12/2004

Undergraduate Thesis. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Mesoscale estimation of soil erosion risks in agricultural landscapes of Schleswig- Holstein with means of remote sensing data - The application of ASTER and ETM data for soil conservation.
06/2004

OTHER WORK EXPERIENCE

Integrated Expert, 05/2008 - present

CIM Integrated Expert GIS/RS at International Rice Research Institute. CIM (Centre for international migration and development)

Scientific Associate, 08/2007 - 05/2008

Chair of Physical Geography Landscape ecology & Geoinformation, lectures in remote sensing and GIS, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

WebGIS Applications, 08/2004 - 03/2005

Development and installation of a Web-GIS project (Campus Map CAU Kiel), <http://www.uni-kiel.de/uniplan/>, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Tutor/GIS-Laboratory Assistant, 06/2003 - 06/2004

Student assistant within the project "Education and training of geo-information systems and communication technics" (LearnGIS), Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

GIS support, 08/2003 - 09/2003

Internship at Ochmann + Partner Geotechnics GmbH, environmental geology and soil conservation.

Database development, 07/2001 - 10/2001

Internship at the environmental agency of Hamburg, urban environmental protection and implementing the European Water Framework Directive.

Multimedia productions, 08/1997 - 05/1998

Bundeswehr Command and Staff College, Institute of audio-visual media.

PRESENTATIONS

International Rice Research Institute, 7.11.2008, Los Banos. Contributed talk, "The spatial variability of scale-dependent correlations between soil properties and relief information in a typical paddy soil landscape of south-east China."

European Geosciences Union General Assembly 2008, 13.-18.4.2008, Vienna. Contributed poster, "The spatial variability of scale-dependent correlations between soil properties and relief information in a typical paddy soil landscape of south-east China."

German Soil Science Society annual conference, 2.-9.9.2007, Dresden. Contributed talk, "Räumliche Variabilität ausgewählter Bodeneigenschaften von Reiskulturlandschaften in SE-China unter Anwendung von morphometrischen und radiometrischen Analysetechniken."

International Association for Landscape Ecology, World Congress IALE, 8.-12.7.2007, Wageningen. Contributed poster, "Prediction of soil properties in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators."

International Association for Landscape Ecology, IALE-D, 27.-30.9.2006, Kiel. Contributed talk, "Regionalisierung von Bodeneigenschaften und Standortpotenzialen in SE-China unter Einsatz von Fernerkundungsdaten."

German Soil Science Society annual conference, 3.-11.9.2005, Marburg. Contributed poster, "Räumliche Variabilität ausgewählter Bodeneigenschaften von Reiskulturlandschaften in SE-China unter Anwendung von morphometrischen und radiometrischen Analysetechniken."

German Soil Science Society, Workshop der AG Informationssysteme in der Bodenkunde, 15.-16.10.2005, Jena. Contributed poster, "Räumliche Variabilität ausgewählter Bodeneigenschaften und Standortpotenziale von Reiskulturlandschaften in SE-China."

Sino-German Cooperation Group of Soil and Environment, Kick-Off Meeting and Workshop, Sino-German Centre for Science Promotion (DFG and NSFC). 29.09.-04.10.2005, Garmisch-Partenkirchen, Germany. Contributed talk, "Regionalization of distinct soil properties with the means of high resolved remote sensing data and topographic information - first results."

TEACHING

Teaching Assistant. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2008

Selective methods of remote sensing and statistical analysis with R/CRAN, SS 2008.

Teaching Assistant. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2007-2008

Introduction in GIS (ESRI/ArcGIS), WS 2007/2008.

Teaching Assistant. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2007-2008
Introduction in Remote Sensing (ENVI/IDL), WS 2007/2008.

Teaching Assistant. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2006-2007
Selective methods of remote sensing and statistical analysis with R/CRAN, WS 2006/2007.

Teaching Assistant. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2005
Web-Mapping and Web-GIS - Introduction to the UMN MapServer, SS 2005.

Tutor/GIS-Laboratory Assistant. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2000-2004
Worked as a tutor and laboratory assistant for various introductory and advanced level GIS and web-mapping courses.

LANGUAGES

German: Native speaker.

English: Good knowledge written and spoken.

French: Knowledge written and spoken.

REFERENCES

References are available upon request.