

**Methoden zur Beurteilung der Heterogenität und
Disaggregierungsverfahren zur Verbesserung
des Aussagegehaltes von Bodenbasisdaten.**

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
genehmigte Dissertation von

Diplom- Geograph Uwe Meer
geboren am 24.10.1967 in Meppen

2005

Referent: Prof. Dr. Th. Mosimann
Korreferent: Prof. Dr. G. Kuhnt
Tag der Promotion: 08.02.2006

Vorwort

Die Arbeit entstand im Rahmen des DFG-Forschungsprojektes „Maßstabsübergreifende Optimierung pedoökologischer Grundlagenkarten für die Modellierung von Boden- und Landschaftshaushaltsfunktionen“ in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. Thomas Mosimann bedanken, der mir in all der Zeit große Freiräume zur Umsetzung meiner Ideen gewährte und mir erlaubte, unsere Forschungsergebnisse auf nationalen und internationalen Tagungen vorzustellen. Ein ganz besonderer Dank gilt außerdem Prof. Dr. Rainer Duttmann. Er war primär an der Beantragung des Forschungsvorhabens bei der DFG beteiligt und unterstützte und half mir zu seiner Zeit in Hannover sehr. Herrn Prof. Dr. G. Kuhnt danke ich für die Übernahme des Korreferats. Auch den Projektpartnern aus der BGR Dr. Volker Hennings, und meinem Freund und Projektpartner Dr. Georg Lösel, danke ich für die vielen Fachgespräche und die schöne Zeit auf gemeinsamen Tagungen. Einen Dank gebührt auch Rüdiger Köthe von der Firma Scilands, der mir erlaubte, sein Programm SARA zu nutzen sowie Olaf Conrad aus der Physischen Geographie der Georg-August-Universität Göttingen, der mir freundlicherweise sein Reliefanalyseprogramm DIGEM zur Verfügung stellte.

Für Ihren unermüdlichen Einsatz bei Ihren Diplomarbeiten danke ich Stephan Marahrens, Thorsten Anger, Ingo Wendt, Dirk Hermann, Claus Rösemann, Jörn Thorsten Wandelt, Stephan Holl und Otto Dassau. Vor allem meinem Freund Stephan Marahrens danke ich für die vielen Stunden, die er nach seiner Diplomarbeit als Projektmitarbeiter in die Access-Datenbanken investiert hat. Zudem waren die Fachgespräche mit ihm interessant, motivierend und anregend.

In meinem privaten Umfeld gilt mein Dank und meine Liebe meiner Freundin Martina Laske, die während dieser Zeit auf viele Dinge verzichten musste, da Zeit immer ein limitierender Faktor war. Trotz der stressreichen Zeit, in der viele Dinge zurückstehen mussten, hat sie nie die Geduld mit mir verloren und mich in Motivationstälern immer wieder aufs Neue motiviert.

Auch meinen Eltern möchte ich danken, da sie immer bereit waren, mich in jeder Form zu unterstützen. Auch unseren Freunden Ilka und Peter, Daniel und Sonja, Ute und Birk und allen anderen nicht explizit genannten Personen gilt mein Dank.

Rückblickend auf die Zeit, in der diese Arbeit entstanden ist, gab es nicht nur stressige Zeiten, sondern auch ganz wunderschöne Momente, die ich nicht missen möchte. Neben der Dissertation hat mir vor allem die Lehre am Institut viel Freude bereitet. Kurzum: Ich würde es immer wieder machen.

Uwe Meer

Hannover, im November 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	3
2	Methodische Vorgehensweise	5
2.1	Methodischer Ablauf.....	5
2.2	Datengrundlagen, untersuchte Bodeneigenschaften und technische Vorarbeiten	5
2.2.1	Datengrundlagen	5
2.2.2	Untersuchte Bodeneigenschaften (Bodenbasisdaten).....	6
2.2.3	Technische Vorarbeiten	7
2.3	Statistische Methoden	7
3	Das Anwendungsgebiet Ebergötzen als Beispiel für den Landschaftstyp Niedersächsisches Berg- und Hügelland	9
3.1	Gestein und Relief	9
3.2	Böden	11
3.3	Klima.....	12
4	Theoretische Vorüberlegungen und Stand der Forschung: Heterogenität und Disaggregation	16
4.1	Aspekte zur Heterogenität von Bodenmerkmalen	16
4.2	Was ist Disaggregation?.....	20
4.2.1	Skalenhierarchien	20
4.2.2	Klassifizierung von Disaggregationsmethoden.....	24
5	Heterogenitätsmaße	27
5.1	Einleitung	27
5.2	Verwendete Kontrastmaße	27
5.3	Neu Entwickelte Heterogenitätsmaße	30
6	Konzept und Aufbau eines Disaggregierungsmodells für reliefierte Gebiete	38
6.1	Downscaling – Varianten für Bodenkarten der mittleren Maßstabsebene auf Grundlage von Gesteinsuntergrund und Reliefsituation.	38
6.1.1	Gesteinsuntergrund	38
6.1.2	Relief	38
6.2	Inhaltlicher Aufbau und GIS-technische Umsetzung des gewählten Disaggregierungsmodells	43
7	Heterogenität bodenkundlicher Basisdaten in bestehenden mittelmaßstäbigen Bodenkarten	48
7.1	Einführung	48
7.2	Die Heterogenität hinsichtlich der Grenzlinienziehung der Bodenübersichtskarte 1:50.000.....	48

7.2.1	Die Heterogenität der Kornfraktionen	48
7.2.1.1	Lössdominierte Kartiereinheiten	
7.2.1.2	Lössfreie Kartiereinheiten	
7.2.2	Die Heterogenität der Kalkgehalte	61
7.3	Die Heterogenität der Merkmalsausprägung der Bodenübersichtskarte 1:50.000	64
7.3.1	Unterschiede in den Ausprägungen der Bodeneigenschaften.....	64
7.3.1.1	Kornfraktionen	
7.3.1.2	Kalkgehalte	
7.3.1.3	Kurzfasit	
7.3.2	Möglichkeiten der Optimierung der Merkmalsausprägung der Bodenübersichtskarte 1:50.000	68
7.4	Fazit.....	70
8	Minimierung der Merkmalsvarianz durch Einsatz des Disaggregierungsmodells ..	71
8.1	Verminderung der Merkmalsvarianz durch Disaggregation auf Grundlage der Gesteinsverbreitung.....	71
8.1.1	Erfolg bei der Minimierung der Merkmalsvarianz der Kornfraktionen	71
8.1.2	Erfolg bei der Minimierung der Merkmalsvarianz der Kalkgehalte.....	78
8.2	Möglichkeiten und Grenzen der Minimierung der Heterogenität auf der Grundlage der Reliefsituation (Disaggregierungsstufe 2).....	81
8.2.1	Erfolg bei der Minimierung der Merkmalsvarianz der Kornfraktionen	81
8.2.2	Erfolg bei der Minimierung der Merkmalsvarianz der Kalkgehalte.....	85
8.3	Leistungsvermögens des Modells am Beispiel der Schluffgehalte	87
9	Welchen Einfluss haben optimierte Modelleingangsparameter auf die Modellierung der Bodenerosion?	93
9.1	Einstieg in die Problematik	93
9.2	Verbesserung des K-Faktors durch den Einsatz des Disaggregierungsmodells	94
9.3	Einfluss der Auflösung von Bodenbasisdaten auf die Prognose der Erosionsgefährdung am Beispiel Erosion-3D.....	97
9.3.1	Modellgrundlagen	97
9.3.2	Eingabe- und Ausgabeparameter sowie Datenaufbereitung und -modifikation des Modells	98
9.3.3	Untersuchte Szenarien	100
9.3.4	Der Einfluss des Basisdatensatzes „Körnung“ auf die simulierte Erosion.....	100
9.4	Fazit.....	111
10	Übertragung des Disaggregierungsmodells auf Gebiete ähnlicher räumlicher Ausstattung.....	112
10.1	Verwendete Kartenblätter zur Validierung des Verfahrens und Vorgehen	112
10.2	Übertragbarkeit des Modells.....	112
11	Fazit und Ausblick.....	116
12	Literaturverzeichnis	119
13	Anhang.....	119

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.1 a-f:	Hypothetische Modellvorstellungen der räumlichen Variation von Böden.....	18
Abbildung 4.2:	Skalenhierarchien	22
Abbildung 4.3 :	Skalen bei Bodenprozessen	24
Abbildung 4.4 a-c:	Klassifizierung möglicher Downscaling Methoden.....	25
Abbildung 5.1:	Verteilung der Schluffgehalte in einer Kartiereinheit der BÜK50: das Beispiel Braunerde auf Silikatgestein.....	33
Abbildung 5.2:	Vorkommende Bodenartenuntergruppen der BÜK50 und Bo5 im Untersuchungsgebiet.	34
Abbildung 5.3:	Vergleich verschiedener Indizes zur Beurteilung der Heterogenität von Kartiereinheiten.	37
Abbildung 6.1:	Der Ablauf der zweistufigen Disaggregation am Beispiel von Schluffgehalten in 10 cm Profiltiefe einer Braunerde auf Silikatgestein.....	42
Abbildung 6.2:	Inhaltlicher Aufbau und GIS-technische Umsetzung des Disaggregierungsmodells.....	44
Abbildung 7.1:	Homogenitätsindizes der Kornfraktionen in lössdominierten Kartiereinheiten.	49
Abbildung 7.2:	Interdezilbereiche I_{80} der Kornfraktionen in lössdominierten Kartiereinheiten.	51
Abbildung 7.3:	Mittlere Homogenitätsindizes der lössdominierten Profile für das Gesamtblatt.....	53
Abbildung 7.4:	Mittlere Interdezilbereiche I_{80} der lössdominierten Profile für das Gesamtblatt.....	53
Abbildung 7.5:	Homogenitätsindizes der Kornfraktionen in lössfreien Kartiereinheiten.....	55
Abbildung 7.6:	Interdezilbereiche I_{80} der Kornfraktionen in lössfreien Kartiereinheiten.....	57
Abbildung 7.7:	Mittlere (flächengewichtete) Homogenitätsindizes der lössfreien Profile für das Gesamtblatt.....	59
Abbildung 7.8:	Mittlere (flächengewichtete) Interdezilbereiche I_{80} der lössfreien Profile für das Gesamtblatt.....	59
Abbildung 7.9:	Homogenitätsindizes der Kalkgehalte.....	62
Abbildung 7.10:	Mittlerer absoluter Fehler (MAE_{fl}) der Kornfraktionen in lössdominierten Kartiereinheiten (BÜK50 - Bo5).	65
Abbildung 7.11:	Mittlerer absoluter Fehler (MAE_{fl}^{**}) der Kornfraktionen in lössfreien Kartiereinheiten (BÜK50 - Bo5).	66
Abbildung 7.12:	Vergleich des mittleren absoluten Fehlers (MAE_{fl}) der Kornfraktionen für originale- und modifizierte- Kartiereinheiten der BÜK50.....	69
Abbildung 8.1:	Disaggregation der Ausgangseinheiten der BÜK50 am Beispiel einer Braunerde auf Silikatgestein..	72

Abbildung 8.2:	Mittlere Homogenitätsindizes der Kornfraktionen in lössfreien-Kartiereinheiten nach dem ersten Disaggregationsschritt.	73
Abbildung 8.3:	Mittlere Interdezil ₈₀ -Bereiche der Kornfraktionen in lössfreien Kartiereinheiten nach dem ersten Disaggregationsschritt.	75
Abbildung 8.4:	Mittlere Homogenitätsindizes der lössfreien Profile für das Gesamtblatt nach dem ersten Disaggregationsschritt.	77
Abbildung 8.5:	Mittlere Interdezil ₈₀ -Bereiche der lössfreien Profile für das Gesamtblatt nach dem ersten Disaggregationsschritt.	77
Abbildung 8.6:	Homogenitätsindizes der Kalkgehalte nach dem ersten Disaggregationsschritt.	79
Abbildung 8.7:	Mittlere Homogenitätsindizes der Kornfraktionen in lössfreien Kartiereinheiten nach dem zweiten Disaggregationsschritt.....	82
Abbildung 8.8:	Mittlere Interdezil ₈₀ -Bereiche der Kornfraktionen in lössfreien Kartiereinheiten nach dem zweiten Disaggregationsschritt.	83
Abbildung 8.9:	Mittlere Homogenitätsindizes der lössfreien Profile für das Gesamtblatt nach dem zweiten Disaggregationsschritt.	84
Abbildung 8.10:	Mittlere Interdezil ₈₀ -Bereiche der lössfreien Profile für das Gesamtblatt nach dem zweiten Disaggregationsschritt.	84
Abbildung 8.11:	Homogenitätsindizes der Kalkgehalte nach dem zweiten Disaggregationsschritt.....	86
Abbildung 9.1 a-c:	Berechnete K-Faktoren für die BÜK50, die Bo5 und beide Disaggregierungsstufen.	95
Abbildung 9.2.1:	Maßstabsbedingter Einfluss von Bodendaten auf Simulationsergebnisse in E-3D. Beispiel: 2-jähriges Regenereignis von 10 Minuten Dauer bei der Nutzung Winterweizen im Monat Mai.	102
Abbildung 9.2.2:	Maßstabsbedingter Einfluss von Bodendaten auf Simulationsergebnisse in E-3D. Beispiel: 10-jähriges Regenereignis von 10 Minuten Dauer bei der Nutzung Winterweizen im Monat Mai.	103
Abbildung 9.2.3:	Maßstabsbedingter Einfluss von Bodendaten auf Simulationsergebnisse in E-3D. Beispiel: 100-jähriges Regenereignis von 10 Minuten Dauer bei der Nutzung Winterweizen im Monat Mai.	104
Abbildung 9.2.4:	Maßstabsbedingter Einfluss von Bodendaten auf Simulationsergebnisse in E-3D. Beispiel: 2-jähriges Regenereignis von 10 Minuten Dauer bei Saatbettkombination.	105
Abbildung 9.3:	Maßstabsbedingter Einfluss von Bodendaten auf Simulationsergebnisse in E-3D. Beispiel: 2-, 10- und 100-jähriges Regenereignis von 30 Minuten Dauer bei der Nutzung Winterweizen im Monat Mai.	107
Abbildung 9.4:	Differenzen zwischen den prognostizierten Nettoerosionen	108
Abbildung 9.5:	Unterschiede zwischen Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BÜK50) und der interpretierten Bodenschätzung (Bo5) bei der Prognose der Nettoerosion [t/ha]. Darstellung in Abhängigkeit von Schluffgehaltsdifferenz und Hangneigungsklasse am Beispiel eines 2-, 10- und 100-jährigen Regenereignisses.	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Zur Verfügung stehende Datengrundlagen.....	6
Tabelle 3.1:	Häufigkeiten von Profilnummern der BÜK50 im Untersuchungsgebiet sowie Bedeckungsgrade des Referenzdatensatzes (BO5) für diese Kartiereinheiten.	12
Tabelle 4.1:	Raumbezug bodenbildener Faktoren.....	16
Tabelle 5.1:	Einfache, relative, quadratische und proportionale Gütemaße.....	28
Tabelle 5.2:	Vergleich der flächengewichteten Fehlermaße: Mittlerer Fehler (ME_{fl}), Mittlerer Absoluter Fehler (MAE_{fl}) und Wurzel der Mittleren Quadrierten Differenz ($RMSE_{fl}$) bei der Beurteilung einer 15 Hektar großen lössdominierten Einheit.	30
Tabelle 5.3:	Heterogenitätsmaße.	31
Tabelle 5.4:	Durchschnittliche Spannweiten [Masse-%] der im Untersuchungsgebiet in 10 cm Profiltiefe vorkommenden Bodenartenuntergruppen....	35
Tabelle 7.1:	Berechnete zweite Verteilungsmaxima ($2V_{max}$) in den lössdominierten Kartiereinheiten.....	52
Tabelle 7.2:	Auswahl der in diesem Kapitel verwendeten Beispiele aus den lössfrenen Bodeneinheiten.....	54
Tabelle 7.3:	Berechnete zweite Verteilungsmaxima ($2V_{max}$) in den lössfrenen Kartiereinheiten.....	58
Tabelle 7.4:	Interdezilbereiche der Kalkgehalte in den untersuchten Kartiereinheiten.	63
Tabelle 7.5:	Mittlere Homogenitätsindizes der Kalkgehalte für das Gesamtblatt.....	63
Tabelle 7.6:	Mittlere Interdezil ₈₀ -Bereiche der Kalkgehalte für das Gesamtblatt.	64
Tabelle 7.7:	MAE_{fl} der Kalkgehalte.	67
Tabelle 8.1:	Verteilung der petrographischen Informationen auf lössfrenen und lössdominierte Kartiereinheiten der BÜK50	71
Tabelle 8.2:	Interdezilbereiche der Kalkgehalte in den untersuchten Kartiereinheiten nach dem Durchlaufen der ersten Disaggregierungsstufe.	78
Tabelle 8.3:	Mittlere Homogenitätsindizes der Kalkgehalte für das Gesamtblatt nach dem durchlaufen der ersten Disaggregierungsstufe.	80
Tabelle 8.4:	Mittlere Interdezil ₈₀ -Bereiche der Kalkgehalte für das Gesamtblatt nach dem Durchlaufen der ersten Disaggregierungsstufe.....	80
Tabelle 8.5:	Interdezil ₈₀ -Bereiche der Kalkgehalte nach dem Durchlaufen der zweiten Disaggregierungsstufe.....	85
Tabelle 8.6:	Flächenanteile der Abweichungsklassen (disaggregierte Daten – Referenzdatensatz). Beispiel: Schluffgehalten in 10 cm Bodentiefe.....	88
Tabelle 9.1:	Abweichungen der K-Faktoren auf dem Gesamtblatt.	96

Tabelle 9.2:	Varianz der Bodenabträge in Abhängigkeit vom K-Faktor.....	97
Tabelle 9.3:	Niederschlagssituation im Raum Ebergötzen.....	100
Tabelle 9.4:	Klassifizierte Abweichungen der Schluffgehalte (BÜK50-Bo5).....	110
Tabelle 9.5:	Partielle Korrelationskoeffizienten zwischen den Abweichungen in der Erosionsprognose sowie in den Unterschieden der Schluffgehalte der Bodeneingangskarten.....	110
Tabelle 10.1:	Auf den Validierungsblättern und im Untersuchungsgebiet vorhan- dene Kombinationen aus BÜK50-Einheit und Gesteinsuntergrund.	113
Tabelle 10.2:	Prüfung der Übertragbarkeit von Modellergebnissen für lössdominierte Einheiten.....	113
Tabelle 10.3:	Prüfung der Übertragbarkeit von Modellergebnissen für lössfreie Einheiten.	113
Tabelle 10.4:	Mittlere Flächen gewichtete Unterschiede zwischen dem Untersuchungsgebiet und den Validierungsblättern	114
Tabelle 10.5:	Maximale Abweichungen der H-Indizes für Verschneidungseinheiten der ersten Disaggregierungsstufe im Untersuchungsgebiet und auf den Validierungsblättern.	115
Tabelle A1:	Übersetzung der vorhandenen Bodenartenuntergruppen nach KA3 in metrische Gewichtsprozentangaben der drei Hauptkorngrößen.....	130
Tabelle A2:	Übersetzung der Carbonatgehalte nach KA3 in metrische Klassenmittelwerte.	131
Tabelle A3:	Übersetzung der Humusgehalte nach KA3 in metrische Klassenmittelwerte.	131
Tabelle A4:	Übersetzung der verwendeten petrographischen Kürzel.....	131

Kartenverzeichnis

Karte 3.1:	Lage des Untersuchungsgebietes	9
Karte 3.2:	Geologische Situation	13
Karte 3.3:	Höhenschichtenkarte	14
Karte 3.4:	Bodentypen	15
Karte 6.1:	Petrographie	46
Karte 6.2:	Flächenhafte morphographische Reliefeinheiten der Kategorie I (SARA I)	47
Karte 8.1:	Schluffgehalte in 10 cm Tiefe auf der Basis der BÜK50.	89
Karte 8.2:	Schluffgehalte in 10 cm Tiefe auf der Basis der interpretierten Bodenschätzung Bo5.	90
Karte 8.3:	Schluffgehalte in 10 cm Tiefe auf der Basis der Disaggregierungsstufe 2.....	91
Karte 8.4:	Abweichungen zwischen den disaggregierten Daten und dem Referenzdatensatz. Beispiel: Schluffgehalte in 10 cm Tiefe.	92

Verwendete Abkürzungen

ATKIS	Amtlich topographisches Kartenwerk
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Bo5	interpretierte Bodenschätzung 1:5.000
BÜK50	Bodenübersichtskarte 1:50.000.
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGM5	Digitales Geländemodell mit Strukturinformation (12,5m Raster)
DIGEM	Digitales Gelände-Modell
GIS	Geographisches Informationssystem
GK25	Geologische Karte 1:25.000
LGN	Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen
MeMaS	MethodenManagementSystem
NIBIS	Niedersächsisches Bodeninformationssystem
NLfb	Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
PEDOMETRICS	pedon(soil) metron (measurement)
SAGA	System for Automated Geoscientific Analyses
SARA	System for Automatic Relief Analysis
TK	Topographische Karte

Zusammenfassung

Die steigende Anfrage nach Bodeninformationen als Planungs- und Entscheidungshilfe in Umweltschutz, Raumplanung und Wirtschaft resultiert aus veränderten Umweltauflagen des Bundesbodenschutzgesetzes und aus dem zunehmenden Einsatz von meist GIS-gestützten Schätz-, Prognose- und Simulationsmodellen im Umwelt- und Agrarsektor. Das Hauptproblem beim Einsatz der Modelle liegt oft nicht mehr bei den Modellen selbst sondern in fehlenden oder zu gering aufgelösten Bodeneingangsdaten. Aufgrund dieses Mangels werden in Modellanwendungen, die für ein korrektes Modellergebnis eigentlich höher aufgelöste Daten benötigen, klein- oder mittelmaßstäbige Bodendaten genutzt. Diese Daten werden mittels Disaggregation aus klein- oder mittelmaßstäbigen Bodenkarten unter Zuhilfenahme anderer Informationen (z.B. Gesteinsuntergrund, Relief) abgeleitet. Zudem benötigen Nutzer mittelmaßstäbiger Bodenkarten Informationen zur Heterogenität der Kartiereinheiten, um die Unsicherheiten auf diesen Maßstabsebenen z.B. für die Modellierung besser quantifizieren zu können.

Die vorliegende methodische Arbeit liefert Lösungsvorschläge für diese Probleme:

Sie überprüft und entwickelt geeignete Heterogenitätsmaße für vektorbasierte Bodenkarten der mittleren Maßstabsebene. Diese Maße dienen

- zur Beurteilung der Heterogenität originärer Kartenwerke,
- zur Erfolgskontrolle der verschiedenen Disaggregierungsvarianten (Kombinationen aus Gesteinsuntergrund und ca. 30 Reliefparametern) und
- als Heterogenitätsmaße in zukünftigen Legendenkonzepten.

Sie präsentiert ein Modellkonzept zur Disaggregation mittelmaßstäbiger Bodenkarten.

Sie untersucht den Skaleneffekt von Bodendaten bei der Erosionsmodellierung auf Modelleingangsdaten und modellierte Größen.

Die in der Literatur gebräuchlichen Heterogenitätsmaße sind zur Beurteilung polymodaler Verteilungen von Bodenbasisdaten in diskreten Kartiereinheiten nur bedingt geeignet. Aus diesem Grund erfolgt die Entwicklung eigener Maße:

Der Homogenitätsindex ist ein Kriterium zur Beurteilung der zentralen Tendenz (Höhe) einer Verteilung. Er summiert den Flächenanteil im Histogramm auf, der vom Modalwert \pm eines parameterabhängigen Toleranzbereichs eingenommen wird.

Die Breite einer Verteilung wird durch den Interdezil₈₀-Bereich beurteilt. Hierzu wird das Wertespektrum in zehn, dem Flächeninhalt nach gleich große, Teile untergliedert (Dezile) Anschließend werden vom linken und rechten Rand der Verteilung 10 Flächenprozent subtrahiert. Der I_{80} berücksichtigt 80 % der Fläche des Wertespektrums und ermöglicht einen guten Überblick über die Breite einer Verteilung, ohne die Extremwerte mit einzubeziehen.

Das zweite Verteilungsmaximum (2Vmax) ermöglicht die Beurteilung, ob es neben dem durch den Homogenitätsindex bereits erfassten Verteilungsschwerpunkt noch weitere disaggregationswürdige Flächenanteile (Peaks) innerhalb der Verteilung existieren. Aus diesem Grunde wird das (prozentuale) Verhältnis von Modalwert zum „zweiten“ Peak gebildet.

Die entwickelten Maße sind in heutigen Bodeninformationssystemen durch GIS-Operationen leicht ableitbar und in zukünftige Legendeneinheiten integrierbar.

Die beste Reduzierung der Merkmalsheterogenität erzielt bei den Disaggregierungsvarianten ein zweistufiger Algorithmus. Dieser nutzt die Informationsschichten Petrographie und Relief (dreigliedrige morphographische Unterteilung der Reliefsituation in Scheitel-, Hang- und Senkenbereich).

Die originäre Bodenübersichtskarte 1:50.000 ist in den lössdominierten Arealen sehr homogen. Die Homogenitätsindizes liegen je nach Kornfraktion zwischen 75 %–95 %. Da der Homogenitätsindex die mittlere Wertespanne einer Bodenartenuntergruppe abdeckt, liegt somit auf 75 %–90 % der Fläche die Kornfraktionen innerhalb dieser Spanne. Eine Disaggregation bringt nur eine geringe Verbesserung des bereits sehr homogenen Datensatzes.

Die lössfreien Areale sind z.T. sehr heterogen aufgebaut. Die Homogenitätsindizes liegen im Mittel in den Oberböden für die Schluff- und Tongehalte bei etwa 50 % und für die Tongehalte bei 75 %. Minimale Indizes erreichen etwa 30 %. Eine Varianzminimierung innerhalb dieser Kartiereinheiten ist durch Generalisierung bedingt und kann nicht durch eine neue Attributierung erreicht werden. Innerhalb dieser Areale ist eine Homogenisierung nur durch Disaggregation zu erreichen.

Das Disaggregierungsmodell erzielt in der Disaggregierungsstufe 1 (Petrographie) größere Erfolge als in der Disaggregierungsstufe 2 (Relief). In den lössfreien Kartiereinheiten liegen alle Homogenitätsindizes nach dem Durchlaufen beider Disaggregierungsstufen zwischen 70 %–90 %. Minimale Indizes betragen etwa 50 %. Mittlere Steigerungsraten betragen etwa 20 %–25 %. Somit sind nach Modelleinsatz die Kornfraktionen homogen, da die mittlere Schwankungsbreite der Fraktionen die Spannweite einer Bodenartenuntergruppe kaum übersteigt.

Der Skaleneffekt von Bodendaten auf Modelleingangsparameter und modellierte Größen ist erheblich. Berechnete K-Faktoren der allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) unterscheiden sich in lössfreien Arealen im Mittel um 0,21. Mit den Daten aus dem Disaggregierungsmodell lässt sich dieser Unterschied auf 0,16 K-Einheiten absenken.

Der Skaleneffekt der Bodendaten (Maßstäbe 1:50.000 / 1:5.000) hat auch einen deutlichen Einfluss auf die Prognoseergebnisse physikalischer Erosionsprognosemodelle (Bsp. Erosion-3D). Bei einem 2-jährigen Regenereignis von 10 Minuten Dauer (Anbaufrucht Winterweizen) unterscheiden sich die Prognoseergebnisse im Mittel um 1,2 [t/(ha)]. Diese Werte erhöhen sich auf 2,2 [t/(ha)] bzw. 5,2 [t/(ha)], wenn es sich um ein 10- bzw. 100-jähriges Ereignis handelt. Die mit dem Disaggregierungsmodell erzeugten Bodendaten sind in der Lage, diese Differenz für ein 10-jähriges Ereignis um 25 % und für ein 100-jähriges Ereignis um etwa 30 % zu reduzieren. Die Werte der zweijährigen Regenereignisse unterscheiden sich für die einzelnen Simulationsläufe nur gering. Die Unterschiede in der Prognose bei der Verwendung unterschiedlicher Kartenmaßstäbe als Eingangsdaten für die Modellierung steigen also mit der Dauer und der Höhe eines Regenereignisses stark an.

Schlagworte: Bodenkarte, Heterogenität, Skalentransfer

Abstract

The increasing demand for soil data as a tool for planning- and decision making regarding ecological, regional and economical issues results from changed environmental conditions imposed by the German Federal Soil Protection Act and from the increasing application of GIS-based estimation, prognosis and simulation models used by the environmental and agricultural sector. The main problem in applying a model is often not the model itself but missing or low resolution soil data. For this reason low resolution or medium resolution soil data are being used for model applications, which require higher resolution data for a correct result. These data have to be deducted with the help of disaggregation and the inclusion of other information (e.g. bedrock, relief) from low or medium resolution soil maps.

In addition the user of medium scale maps needs information about the heterogeneity of the map units.

This methodical thesis offers suggestions for the solution of these problems:

Suitable heterogeneity measures for vector based medium scale soil maps are being examined and developed. These measures serve as

- an evaluation of the heterogeneity of original maps,
- control of the various disaggregation variables (a combination of bedrock and about 30 relief parameters) and
- heterogeneity measures for future legend concepts.

A model concept for disaggregation using medium scale soil maps is being developed.

In erosion modelling the scale effect of soil data, affecting model input data and modelled variables, is being examined.

The commonly used heterogeneity measures commonly found in literature are of only limited use for the evaluation of poly modal basic soil data in discrete map units. For this reason own measures were developed:

The homogeneity index is a measure for the evaluation of the central tendency (height) within a distribution. It is the sum of the area range occupied by the mode \pm a tolerance value depending on parameters.

The width of the distribution is being assessed by the interdecile range I_{80} . For this the range of the value spectrum is being divided into ten fractions of equal area content (deciles). Then 10 percent of the area is being subtracted from the left and right margins of the distribution. The I_{80} takes into account 80% of the value spectrum and offers a good overview regarding the width of distribution without including extreme values.

The second distribution maximum (2Vmax) shows the existence of additional area ranges (peaks) to which disaggregation could be applied, besides the principle distribution peak already determined by the homogeneity index. For this reason the (proportional) relation between mode and the "second" peak is being established.

Using GIS these measures are easily deductible in contemporary soil information systems and can be integrated into future legend units.

The best reduction of attribute heterogeneity is achieved by the disaggregation variable of a two level algorithm. It uses the information layers bedrock and relief [trinomial morphological division of the relief situation in summit areas, slopes, or bottom areas].

The original soil survey map 1:50.000 is very homogenous in loess dominated areas. The homogeneity indices amount to 75% to 95% depending on soil texture. As the homogeneity index covers the medium value range of the soil texture, this means that in 75% to 95% of the area the soil texture is within this range. Disaggregation provides only little improvement to the already very homogenous data.

The loess free areas are in part very heterogenic. For top soils the homogeneity indices show a mean percentage of about 50% for silt- and clay contents and for clay contents 75%. Minimal indices amount to about 30%. A variance minimization within the map units is caused by the generalization and can not be reached by a new attribute allocation. Within these areas a homogenization can only be achieved through disaggregation.

The disaggregation model reaches on disaggregation level I (bedrock) better results than on disaggregation level II (relief). In loess free map units the homogeneity indices after applying both disaggregation levels amount to 70% to 90%. Minimal indices reach about 50%. Mean increase rates are 20% to 25%. Thus, after the application of the model, the soil texture is homogenous because the mean fluctuation range of fractions does not exceed the range of the soil texture subdivision.

The scale effect of soil data affecting model input parameters and modelled variables is considerable. Calculated K-factors of the general soil erosion equation (Bodenabtragsgleichung, ABAG) vary in loess free areas on average by 0,21. This difference can be reduced to 0,16 K-units by using data from the disaggregation model.

The scale effect for soil data (scale 1:50.000 / 1:5.000) has also a significant influence onto the prognosis results for physical erosion prognosis models (e.g. Erosion-3D). Prognosis results based on a biennial rain incident of a 10 minute duration (crop: wheat), vary on average by 1,2 [t/(ha)]. These values increase to 2,2 [t/(ha)] respectively 5,2 [t/(ha)], when based on a decennial or centennial incident. The soil data achieved with the disaggregation model can reduce this difference for a decennial event by 25% and for a centennial event by about 30%. The values for biennial rain incidents vary inconsiderably when run through the different simulation processes. Thus, the difference in prognosis, when using input data from different map scales for modelling, increases with the duration and the intensity of the rain event.

Keywords: soil map, heterogeneity, scale transfer,

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die steigende Nachfrage nach hoch aufgelöster Bodeninformationen als Planungs- und Entscheidungshilfe in Wirtschaft und Politik resultiert aus veränderten Umweltauflagen des Bundesbodenschutzgesetzes (BÖHNER & KÖTHER, 2003) und aus der immer noch steigenden Zahl von meist GIS-gestützten Prognose- und Simulationsmodellen im Umwelt- und Agrarsektor.

Das Hauptproblem beim Einsatz derartiger EDV-gestützter Systeme bilden hierbei nicht die zu Verfügung stehenden Modelle, sondern die nicht vorhandenen oder zu gering aufgelösten Bodeneingangsdaten. So betonen z.B. WENKEL UND SCHULZ (1999), dass die Modellwahl in der Praxis primär von der vorhandenen Datenbasis abhängt und nicht von der Modellzielsetzung. JUST & POPE (1999) unterstreichen dies und bezeichnen das Fehlen hoch aufgelöster Daten als das Haupthindernis bei der Weiterentwicklung agrarökonomischer Fragestellungen. Darüber hinaus hat der Detaillierungsgrad von Bodeninformationen direkte Auswirkungen auf die Qualität der Ergebnisse von Wasser- und Stoffflussmodellen (vgl. PARK & VLEK, 2002, ZHU & MACKAY, 2001).

Eine wichtige Datengrundlage im Bereich der landschaftsökologischen Modellierung ist die Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BOESS et al., 1999). Sie steht als mittelmaßstäbiges (digitales) bodenkundliches Kartenwerk für weite Teile der Bundesrepublik zur Verfügung und bildet auf Grund mangelnder Verfügbarkeit großmaßstäbiger Eingangsdaten auch in Zukunft die wichtigste Grundlage für die Ableitung und Simulation landschaftshaushaltlicher Größen. Auf Grund des Maßstabes und des damit einher gehenden Generalisierungsgrades beschränkt sich der Informationsgehalt dieser Bodenkarten allerdings auf die Beschreibung eines idealisierten flächenrepräsentativen Bodentypen-Leitprofils. Dem Nutzer derartiger Kartenwerke wird hierdurch eine Arealshomogenität suggeriert, die so nicht existiert. Auf Grund des Generalisierungsgrades einer mittelmaßstäbigen Bodenkarte ist je nach Genese- und Landschaftstyp mit einer erheblichen Varianz der Bodenparameter zu rechnen. Erschwerend kommt hinzu, dass der Modellanwender auf Grund des Fehlens von Spannweiteangaben oder Auftretswahrscheinlichkeiten der Faktorausprägungen keinen Modellfehler abschätzen kann. DUTTMANN (1999) betont in diesem Zusammenhang, dass eine Aussage zur Heterogenität bodenkundlicher Basisdaten wertvoller ist als entsprechende Aussagen zu berechneten Kennwerten (z.B. Grundwasserneubildung), da geringe Veränderungen dieser zentralen Bodenmerkmale oftmals eine starke nichtlineare Veränderung der Ausgabegrößen von Modellanwendungen bewirken. Diese „Unsicherheiten“ bei der Modellierung waren im Jahr 1999 das Thema des dritten Kongresses der Arbeitsgruppe PEDOMETRICS [Pedometrics = pedon(soil) metron (measurement)] „Estimating Uncertainty in Soil“ (ODEH, I. A.O & MCBRATNEY, A. B., 2001).

Diese Problematik sowie der dringende Bedarf an hoch aufgelösten Daten macht deutlich, dass die Entwicklung von Disaggregierungsansätzen (Übertragung von Bodeninformationen aus mittleren in große Maßstäbe bzw. Skalen, vgl. Kapitel 4.2) unumgänglich ist. Ein derartiger Downscaling-Ansatz muss in der Lage sein, Bodentypenareale unter Zuhilfenahme höher aufgelöster Informationen (z.B. Gesteinsuntergrund oder Reliefsituation) regelbasiert in kleinere Teilflächen zu zerlegen. Dieser Ansatz fußt im Prinzip auf das bereits 1941 von JENNY entwickelte Modell der Bodenbildung. JENNY (1941) beschreibt das Bodensystem als eine Funktion der Variablen Klima, Organismen, Relief, Bodenausgangssubstrat und Zeit. Auch die Konzepte bei der Ableitung heutiger Bodenkarten beruhen, wenn auch mittlerweile

ausnahmslos GIS-gestützt, auf diesem deskriptiv-regelbasierten Modell (BÖHNER & KÖTHE, 2003). In diesem auch als traditioneller Konzeptkartenansatz (HAGEDORN, 1999) bezeichneten Verfahren wird allerdings bei der Merkmalskombination unterschiedlicher, meist ebenfalls klassifizierter bodenrelevanter Geofaktoren das Hauptaugenmerk auf die Ausweisung von Bodentypen-Gesellschaften gelegt. Die Regionalisierung bzw. Disaggregation sollte aus Sicht der Modellanwender jedoch für die Bodeneigenschaften (Korngrößenzusammensetzung, Kalkgehalte, Gründigkeit etc.) erfolgen. Es sind primär diese (metrischen) physikalischen oder chemischen Bodeneigenschaften und nicht die genetischen Aspekte (vgl. BOCK & KÖTHE, 2005), die in (hochaufgelöste) Modellanwendungen fließen. Zudem müssen Grenzlinienziehungen für bodengenetische Inhalte nicht identisch sein zu bodenphysikalischen oder -chemischen Eigenschaften.

Kritiker traditioneller (vektorbasierter) Konzeptkartenansätze bemerken zum Teil zu Recht, dass es bei der Umsetzung der bodenbestimmenden Variablen zu Schwierigkeiten bei der Abbildung kontinuierlicher Geofaktoren wie Relief oder Klima kommen kann und dies wiederum nur durch eine Klassifikation der Eingangsdaten gelöst werden muss. Zudem wird durch die Verschneidung diskreter Geofaktoren auch nur eine endliche Anzahl von Geometrien erzeugt (vgl. hierzu HAGEDORN, 1999). Diese Autoren fordern rasterbasierte Bodenkarten, um Kontinua besser abbilden zu können. Anhänger traditioneller Konzeptkarten halten dem hingegen den Arbeitsaufwand der Erstellung sowie den zur Verfügung stehenden Datenpool, der fast ausschließlich auf Vektorkarten basiert, entgegen. Darüber hinaus ist die Einflussstärke der (kontinuierlichen) Faktoren der Pedogenese wie z.B. das Klima auf allen Skalenbereichen unterschiedlich zu bewerten. Außerdem liegen Bodeneigenschaften (Bodenbasisdaten) auf Grund der klassischen Bodenaufnahme ebenfalls in klassifizierter (taxonomischer) Form vor. Die Rückwandlung dieser Daten in metrische Formen täuscht ein kontinuierliches Datenspektrum vor, das so in der Realität nicht besteht. Streng genommen müssten Klassenbreiten in die Analyse fließen. Des weiteren verweisen Vertreter von diskreten Modellansätzen zu Recht auf große homogene Landschaftsausschnitte wie etwa lössdominierte Areale hin, in denen Kontinua auf Grund der Arealsheterogenität auch auf relativ großen Maßstäben eine untergeordnete Rolle spielen dürften. Darüber hinaus werden nach Auskunft der Kartenvertreibenden Landesbehörden von Endnutzern Vektorkarten gefordert. Angebotene kontinuierliche Datenspektren (Rasterkarten) werden vom Verbraucher abgelehnt¹.

Weniger umstritten als die Konzepte zur Kartenerstellung ist die Forderung, dass dem Nutzer zukünftiger mittel- und kleinmaßstäbiger bodenkundlicher Standardwerke ein eventuell maßstabsabhängiges Heterogenitätsmaß an die Hand gegeben werden muss, um einen Eindruck über die potenzielle Varianz einer ausgewiesenen Bodeneinheit zu erhalten. An diesem Punkt stellt sich freilich die Frage, in welcher Form die von der Arbeitsgruppe PEDOMETRICS beschriebenen Unsicherheiten für Bodenmerkmale in heutigen Legendenkonzepten umgesetzt werden können. Neben der Wahl eines geeigneten Heterogenitätsmaßes ist auch zum jetzigen Zeitpunkt die visuelle Umsetzung der Darstellung unklar: BISHOP et al. (2001) verweisen auf diese Problematik: „Generally, in the production of maps, only magnitude is presented but the authors believe the spatial variation of uncertainty should also be presented. A problem then arises in how to visualize the uncertainty.“ Erste Ansätze in rasterbasierten Kartengrundlagen liefern HENGL (2003) und HENGL et al. (2004). Hier wird die taxo-

¹ Mündliche Mitteilung von K. FRIEDRICH, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, am 15.03.2005 auf dem Workshop „Methoden zur Datenaggregation und -regionalisierung in der Bodenkunde, der Bodengeographie und in Nachbardisziplinen“ in Jena.

nomisch bedingte Spannweite von klassifizierten Daten mit Hilfe verschiedener Farben in jedem Pixel visualisiert. Aus den Farben leitet HENGL den Confusion Index ab und nutzt diese Information, um Kartiereinheiten abzugrenzen und Bereiche erhöhter Konfusion auszuweisen.

Diese Heterogenitätsmaße sollten sich ebenfalls auf Bodenbasisdaten wie z.B. die Korngrößenzusammensetzung beziehen, da es gerade diese metrischen Werte und nicht die taxonomischen bodengenetischen Informationen sind, die in der Praxis gefordert werden. Auf Grund der traditionellen Kartierung und der damit einhergehenden Klassifizierung von Bodenbasisdaten bei der Erfassung müssen diese Maße in der Lage sein, sowohl ordinalskalierte als auch metrische Wertegruppen quantitativ zu beschreiben. Auch öffentliche Institutionen als Anbieter von raumrelevanten Daten müssen sich, wie in der Industrie oder freien Wirtschaft praktiziert, Gedanken zur Güte bzw. Leistungsfähigkeit ihrer Daten machen (SBRESNY, 1997).

Im Gegensatz zu klimatologischen (ZORITA & STORCH, 1997) bzw. hydrologischen (KLEEBERG, 1999; BECKER & LAHMER, 1997) Modellanwendungen existieren trotz steigenden Bedarfes keine bodenkundlichen Disaggregierungsmodelle für vektorbasierte Bodenkarten der mittleren Maßstabsebene. Lediglich für kleinmaßstäbige Anwendungen (BARETH, 2001; MURSCHEL & LIEBEMANN, 1995) wurden derartige Ansätze getestet. Diese verfolgten allerdings auch nur das Ziel einer möglichst homogenen Bodentypenvorhersage und nicht die Möglichkeit des Downscalings von Bodenbasisdaten. Die Integration möglicher Heterogenitätsmaße in traditionelle Legendenkonzepte wurden von LÖSEL & HENNINGS (2003) für kleinmaßstäbige Kartenwerke vorgestellt. Zur Neugestaltung von Legendenkonzepten der mittleren Maßstabsebene liefert FINKE (2000) erste Ergebnisse für Grundwasserkarten.

1.2 Zielsetzung

Die Ziele der hier vorgestellten Arbeit orientieren sich unmittelbar an die im Kapitel 1.1 beschriebenen Probleme. Sie resultieren aus dem in der Abteilung Physische Geographie und Landschaftsökologie am Geographischen Institut der Universität Hannover in Kooperation mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) durchgeführten DFG-Projekt „Maßstabsübergreifende Optimierung pedoökologischer Grundlagenkarten für die Modellierung von Boden- und Landschaftshaushaltsfunktionen“. Auf Grund des methodischen Schwerpunktes der Arbeit ist es nicht sinnvoll, wissenschaftliche und technische Zielsetzungen getrennt voneinander zu formulieren.

In Anlehnung an die bisherigen Ausführungen verfolgt das Projekt folgende Hauptziele:

1. Entwicklung eines GIS-basierten Disaggregierungsmodells für Bodenbasisdaten (Bodenart, Humus- und Kalkgehalte, Gründigkeit) vektorbasierter Bodenkarten der mittleren Maßstabsebene. Ziel ist, ausgehend von der Bodenübersichtskarte 1:50.000 (Blatt 4426, Ebergötzen), durch schrittweise Einbeziehung höher aufgelöster Informationen zu einer räumlich differenzierteren Abbildung bodenkundlicher Basisdaten zu gelangen.

Teilziele:

- Ermittlung geeigneter Downscaling-Parameter (Relief-, Substrat- sowie Landnutzungsparameter) aus dem zur Verfügung stehenden Datenpool (vgl. Kapitel 2.2).
- Integration dieser Parameter in den Kontext des Disaggregierungsmodells und Ableitung der am besten geeigneten Parameter zur Varianzminimierung („best fit“).
- Hauptprüfung des Disaggregierungserfolges anhand der verwendeten Heterogenitätsmaße (vgl. Teilziel 2).

2. Entwicklung geeigneter Heterogenitätsmaße zur Beurteilung der Varianz von Bodenbasisdaten originärer und disaggregierter Bodenkarten.
Teilziele:
 - Überprüfung der Eignung von Heterogenitätsmaßen aus der Literaturrecherche. Gegebenenfalls Entwicklung eigener Heterogenitätsindizes.
3. Bilanzierung der Ursprungsheterogenität sowie des Disaggregationserfolges nach Anwendung des entwickelten Modells auf der Grundlage der verwendeten Heterogenitätsmaße.
Teilziele:
 - Beurteilung der Effektivität der Einzelschritte bei der stufenweisen Disaggregation. Kalibrierung des Disaggregierungsmodells anhand der ermittelten Heterogenitätsindizes.
 - Bestimmung der „unteren“ Disaggregationsgrenze, bei der trotz weiterer Auflösung der Downscaling-Parameter keine weitere Verminderung der Merkmalsheterogenität mehr zu erreichen ist.
4. Ermittlung des Einflusses der Ursprungsheterogenität originärer Bodenkarten sowie der vorliegenden Heterogenität nach erfolgter Varianzminimierung durch Disaggregation auf Modelleingangsgrößen und Modellergebnisse. Szenarienberechnung für den K-Faktor im Hinblick auf die ABAG (Allgemeine Bodenabtragungsgleichung) sowie für modellierte Erosionsabträge mittels Erosion 3D (VON WERNER, 2002).
5. Prüfung der räumlichen Übertragbarkeit des Modells auf Gebiete ähnlicher räumlicher Ausstattung im Landschaftstyp Niedersächsisches Berg- und Hügelland.
6. Möglichkeiten und Grenzen zur Ableitung allgemein gültiger Heterogenitätsindizes für den Landschaftstyp Niedersächsisches Berg- und Hügelland.

Die Arbeit hat den Anspruch, einen methodischen Beitrag bei der skalenübergreifenden Regionalisierung von Bodenbasisdaten zu leisten. Durch Regionalisierung entstehen laut WENKEL UND SCHULZ (1999) zwangsläufig fehlerbehaftete Ergebnisse. Diese sind, so die Autoren, auf der einen Seite auf die Unsicherheit der Datenbasis (unbekannte räumliche aber auch zeitliche Variabilität sowie Messfehler bei der Erfassung der Modelleingangsdaten) als auch auf Unzulänglichkeiten bei der Modellbildung zurück zu führen. Darüber hinaus ist es gängige Praxis, dass skalenabhängige Modelle über alle Skalenbereiche eingesetzt werden (HEUVELINK, 1998). Diese Arbeit liefert sowohl einen Beitrag zur Bilanzierung der Unsicherheit der Datenlage von Bodenkarten der mittleren Maßstabsebene als auch Hinweise zur Unsicherheit beim Modelleinsatz auf unterschiedlichen Skalenniveaus. Auf das Wort „Fehler“ bei der Beurteilung der Güte von Bodenbasisdaten wird hierbei bewusst verzichtet. Vor allem im englischsprachigen Raum hat sich hierfür der weitaus bessere Begriff „uncertainty“ (Unsicherheit) durchgesetzt.

2 Methodische Vorgehensweise

2.1 Methodischer Ablauf

In Anlehnung an die Zielsetzung stellt sich die konzeptionelle Vorgehensweise wie folgt dar:

- Technische Datenaufbereitung sowie Festlegung der zu disaggregierenden Bodenbasisdaten (Kapitel 2.2).
- Literaturrecherche zum Forschungsstand bezüglich der Begriffe Heterogenität und Disaggregation (Kapitel 4).
- Entwicklung skalenübergreifender Heterogenitätsmaße zur Beurteilung der Unschärfe originärer Bodenkarten sowie Beurteilung des Disaggregationserfolges (Kapitel 5).
- Ableitung geeigneter Downscaling-Parameter aus den Informationsschichten Geologie, Relief und Landnutzung sowie Prüfung der Modellansätze und Festlegung des besten Disaggregierungsalgorithmus (Kapitel 6.1, Ergebnisse Kapitel 7–8).
- Umsetzung des angestrebten Modellaufbaus im Geographischen Informationssystem ArcGIS (Kapitel 6.2, Ergebnisse Kapitel 7–8).
- Programmierung von GIS-kompatiblen Access-Datenbanken zur automatischen Berechnung der Heterogenitätsindizes.
- Berechnung aller Heterogenitäts- und Kontrastmaße für das Untersuchungsgebiet für die originäre BÜK50 (Kapitel 7).
- Berechnung aller Heterogenitätsmaße für die Disaggregierungsstufe 1 und 2 und Feststellung der maximal möglichen Varianzminimierung (Kapitel 8).
- Prüfung des „Skaleneffekts“ von Bodendaten sowie des Disaggregationserfolges an Modelleingangsparametern und modellierte Größen (Kapitel 9).
- Validierung des Modells (Kapitel 10).

2.2 Datengrundlagen, untersuchte Bodeneigenschaften und technische Vorarbeiten

2.2.1 Datengrundlagen

Vom Projektpartner BGR (Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe) wurden über das NLFb (Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung) bzw. LGN (Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen) die in Tabelle 2.1 visualisierten Datengrundlagen zur Verfügung gestellt. Die Bodenkarten werden seitens des NLFb als ArcInfo Coverages abgegeben. Die Profildaten liegen hierbei als Punktdaten vor und können über eine Flächen-ID an das zugehörige Polygon geknüpft werden. Näheres zur Organisation der Datenbankstruktur des NIBIS® (Niedersächsisches Bodeninformationssystem) kann aus BOESS et al. (1999) entnommen werden.

Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BÜK50)

Die Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BÜK50) wurde in den Jahren 1994–1996 nach der Verabschiedung des Landes-Raumordnungsprogramms flächendeckend und digital für Niedersachsen vom NLFb erarbeitet. Da nach BOESS (1999) Anfang der 90er Jahre noch kein

flächendeckendes großmaßstäbiges Kartenwerk zur Verfügung stand, konnte bei der Erstellung der Kartenserie nur zum Teil die Bodenkarte auf der Grundlage der Bodenschätzung (DGK 5 B) bzw. die interpretierte Bodenschätzungskarte (Bo5) genutzt werden. Als Standardwerk für die Erstellung der Kartenserie konnte nach KLAUSING & OSTMANN (1993) auf die vorliegende Bodenkarte von Niedersachsen 1:25.000 (BK 25), die Bodenkundliche Standortkarte von Niedersachsen und Bremen 1:200.000 (BSK 200), die forstliche Standortkartierung sowie Kartenmaterial der historischen Landnutzung zurückgegriffen werden. Neu am Konzept der BÜK50 war, dass alle Daten nur in digitaler Form vorliegen und somit im Gegensatz zu anderen Kartenwerken keine Auflagendrucke erstellt werden, sondern die Bodenkarte nur nach Anfrage ausgedruckt bzw. digital veräußert wird. Zur Grenzlinienziehung wurden vor allem geologische Kartenwerke herangezogen. Als Grundgerüst für die Landschaftsgliederung wurden die Informationen der BSK 200 verwendet. Die Legende wurde nach Bodenvergesellschaften untergliedert.

Verfügbare Daten	Herkunft	Art	Auflösung
Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BÜK50), Blatt 4126, 4324, 4326, 4526	NLFB, NIBIS	Vektor	
Interpretierte Bodenschätzung (Bo5); Blätter 4126, 4225, 4226, 4325, 4326, 4327, 4426	NLFB, NIBIS	Vektor	
Geologische Karte 1:25.000 (GK25); Blätter 4126, 4225, 4226, 4325, 4326, 4327, 4226	NLFB, NIBIS	Vektor	
Amtlich topographisches Kartenwerk (ATKIS); Blatt 4426	NLFB, LGN	Vektor	
Digitales Geländemodell mit Strukturinformation (DGM5), Blatt 4426	NLFB, LGN	Raster	12.5 Meter
Topographische Karte 1:25.000 (TK 25); Blatt 4426	NLFB, LGN	Raster	1.25 Meter
Topographische Karte 1:50.000 (TK 50); Blatt 4526	NLFB, LGN	Raster	2.5 Meter

Tabelle 2.1: Zur Verfügung stehende Datengrundlagen

Geologische Karte 1:25.000 (GK25)

Für die Geologische Karte 1:25.000 werden laut ROHDE (1979) etwa 15–35 Handbohrungen je Quadratkilometer durchgeführt. Die Schichtfolgen liefern bis zu einer Tiefe von 2 Metern unter Geländeoberfläche Aussagen zur „Verbreitung, Art und Abfolgen von Gesteinen“ (ELBRACHT, 2001, 2000). Jede geologische Einheit enthält Informationen zur Altersstellung (Stratigraphie), Entstehungsart (Genese) sowie zur Beschaffenheit der Gesteine (Petrographie).

Für das Untersuchungsgebiet liegen die BÜK50, Blatt Duderstadt (4526) sowie die GK25 und das Blatt Ebergötzen (4426) vor. Alle übrigen in Tabelle 2.1 genannten BÜK50/GK25-Kartenblätter dienen zur Validierung.

2.2.2 Untersuchte Bodeneigenschaften (Bodenbasisdaten)

Im Vordergrund der Untersuchung stand auf Grund der besonderen landschaftsökologischen Bedeutung die Beurteilung der Heterogenität der Korngrößenzusammensetzung des Bodens in mittelmaßstäbigen Kartenwerken. Daneben wurden Kalkgehalte in die Analyse einbezogen. Gründigkeiten, Humusgehalte und Lagerungsdichten schieden aus, da als Referenzdatensatz zur Beurteilung der Heterogenität nur Bodenschätzungsdaten (primär Acker- sowie einzelne Grünflächen) zum Einsatz kamen und somit auf Grund der zu geringen Nutzungs-

differenzierung eine starke Varianz dieser Daten im Vorfeld bereits ausgeschlossen werden konnte. Die Skelettgehalte des Bodens ließen sich auf Grund der nicht klassifizierbaren taxonomischen Form der Daten nicht bearbeiten.

2.2.3 Technische Vorarbeiten

Aufbereitung der Bodenbasisdaten:

Da die Daten in den verschiedenen Kartenwerken allesamt nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA3; 3. Auflage; ARBEITSGRUPPE BODEN, 1982) klassifiziert vorlagen, mussten diese zunächst in metrische Datenformen umgewandelt werden. Die Übersetzung orientierte sich anhand der Methodendatenbank des Niedersächsisches Bodeninformationssystem NI-BIS bzw. des darauf operierenden MethodenManagementSystem MeMaS (zum Datenschlüssel vgl. OELKERS, 1984). Anhand des Bodenartendiagramms des Feinbodens werden für jede Bodenartenuntergruppe die Klassenmittelwerte [Masse-%] der Ton- und Schluffgehalte gebildet. Der Mittelwert der Sandgehalte errechnet sich aus der Differenz der Summe der Schluff- und Tongehalte zu 100 % (vgl. Anhang Tabellen A1–A3).

Um nachvollziehbare Ergebnisse beim Vergleich von Bodenprofilen zu erzeugen, dürfen nur identische Tiefen miteinander verglichen werden. Daher wurden alle Bodenprofile bis in eine Tiefe von 100 cm vertikal in 10 cm Schritte unterteilt. Um die Kompatibilität der Daten bei GIS-gestützten Prozessierungen (Verschneidungen etc.) zu erhalten, mussten diese aus einer vertikalen in eine horizontale Datenbankstruktur überführt werden.

Auf Grund der Vielzahl der Profile ist eine manuelle Umsetzung der Vertikal- in eine Horizontalstruktur nicht sinnvoll. Allein die Übersetzung der Daten der Bodenschätzung (3684 Profile) würden bei der Überführung der Hauptkorngrößen (vertikalen Auflösung von 10 cm bis in 100 cm Bodentiefe) 110520 Datenbankoperationen zur Folge haben. Daher wurden diese Daten skriptbasiert im GIS ArcView 3.2 übersetzt.

Für das Modell Erosion-3D (VON WERNER, M., 2002) mussten noch die verwendeten Bodenartenuntergruppenkürzel aus der KA3-Syntax (ARBEITSGRUPPE BODEN, 1982) in eine KA4 (ARBEITSGRUPPE BODEN, 1994) konforme Struktur übertragen werden. Die Übersetzung orientierte sich ebenfalls an MeMaS.

2.3 Statistische Methoden

Die statistische Methodik lässt sich in zwei Bereiche gliedern:

- Methoden zur Untersuchung der Merkmalsabhängigkeit (z.B. Körnung/Reliefparameter).
- Methoden zur Beschreibung der Heterogenität der Bodenbasisdaten mittelmaßstäbiger Bodenkarten (siehe Kapitel 5).

Die statistische Vorgehensweise bei der Untersuchung der Reliefabhängigkeiten (Kapitel 6.1) beruht auf der Berechnung von Abhängigkeitsmaßen. Da metrische Daten vorliegen und nach linearen Zusammenhängen gesucht wurde, kamen primär Korrelations- und Regressionsanalysen in Frage. Als Korrelationskoeffizient wurde der Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient nach PEARSON sowie als etwas schwächeres Maß der Rangkorrelationskoeffizient nach SPEARMAN berechnet. Signifikanztests wurden auf zweiseitigem Niveau (0,05 bzw. 0,01) durchgeführt. Prüfung auf Normalverteilung der Daten erfolgte mit Hilfe des F-Tests. (Zur Ableitung der Maße vgl. SACHS (1999)). Die statistische Untersuchung erfolgte für die Reliefanalyse mittels des Programms SPSS 12.

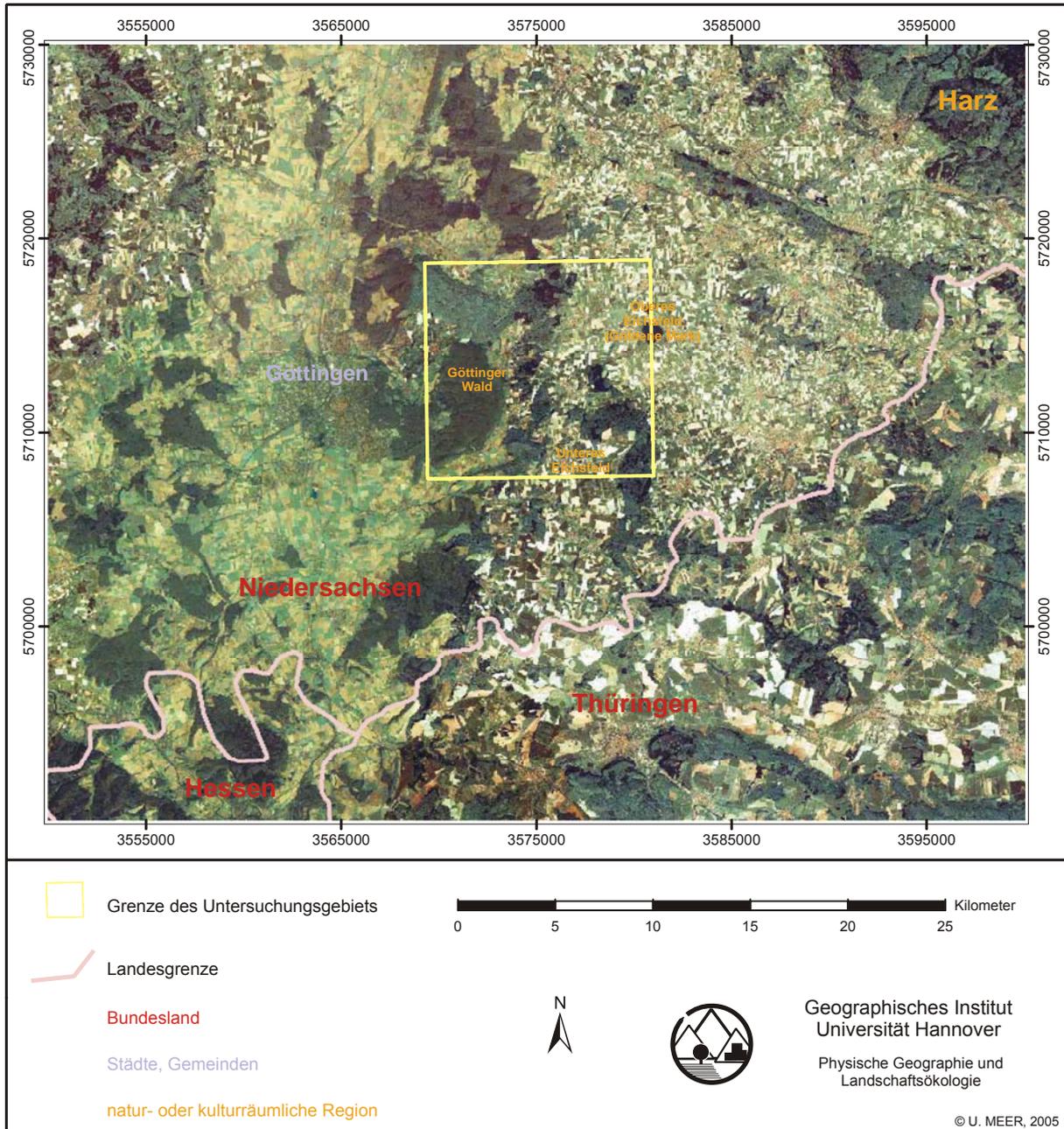
Die statistische Vorgehensweise zur Charakterisierung der Heterogenität lässt sich inhaltlich ebenfalls in zwei Teilbereiche gliedern: Kontrastmaße zeigen Differenzen zwischen zwei zu vergleichenden Kartenwerken bzw. Maßstäben. Hierbei werden die Merkmalsaus-

prägungen (Attribute) beider Kartenwerken in ein Verhältnis zueinander gebracht. Als Kontrastmaß wurde der flächengewichtete mittlere absolute Fehler (MAE_{fl}) gewählt. Der Kontrastindex vergleicht zwei Kartengrundlagen miteinander. Der MAE_{fl} kann demzufolge berechnet werden, wenn sowohl im Vergleichsdatensatz (BÜK50) als auch im Referenzdatensatz (Bo5) Daten vorliegen. Tritt nun der Fall ein, dass in der BÜK50 z.B. in 50 cm Profiltiefe noch eine Information vorhanden ist, aber der Modalwert des Referenzdatensatzes hier *No-Data* ergibt, so wird kein MAE_{fl} berechnet, da die Repräsentativität auf Grund der geringen Stichprobe nicht mehr gegeben ist.

Heterogenitätsmaße, wie sie in dieser Arbeit verstanden werden, zeigen zwar auch einen Unterschied zwischen zwei Kartenwerken, bringen aber nicht die Merkmalsausprägungen beider Kartenwerke miteinander in ein mathematisches Verhältnis. In diesem Falle werden z.B. die Heterogenitäten von Kartiereinheiten der BÜK50 anhand des Referenzdatensatzes Bo5 mit Hilfe eigens entwickelter Indizes beurteilt. In diesem Zusammenhang spielt die Wertausprägung der Bodenkarte 1:50.000 keinerlei Rolle. Allein die Grenzziehung der Polygone in der BÜK50 wird anhand des Referenzdatensatzes bewertet. Als Kennwerte zur Prüfung der Varianz in den Kartiereinheiten wurden eigens entwickelte Heterogenitätsindizes genutzt (siehe Kapitel 5). Die Visualisierung der Wertefelder erfolgt mittels Histogrammen. Diese Visualisierungsform ist ein einfaches, aber sehr effektives Darstellungsmittel für Verteilungsformen. Wertefelder werden hierzu in äquidistante Klassenbreiten eingeteilt. Die entwickelten Heterogenitätsmaße erklären die in Bodenkarten meist vorkommenden, polymodalen Histogrammverläufe hinreichend. Eine detaillierte Begründung zur Auswahl der Maße sowie eine ausführliche Beschreibung der verwendeten Maße findet sich in Kapitel 5.

3 Das Anwendungsgebiet Ebergötzen als Beispiel für den Landschaftstyp Niedersächsisches Berg- und Hügelland

Lage des Untersuchungsgebietes



Karte 3.1: Lage des Untersuchungsgebietes

3.1 Gestein und Relief

Im Untersuchungsgebiet sind Gesteine der Trias und des Quartärs zu finden. Die Vollformen werden vom Buntsandstein (s) des Untereichsfeldes und des Unteren Muschelkalkes (mu) im Göttinger Wald dominiert (siehe Karte 3.2). An den Muschelkalk des Göttinger Waldes

schließt sich zunächst der Obere Buntsandstein (so) an, um ungefähr auf der Linie Waake–Bösinghausen an den Mittleren Buntsandstein (sm) zu stoßen (vgl. THÖLE & MEYER, 1979). Gesteine des Unteren Buntsandsteins sind nicht zu finden. Die Gesteinspakete der Vollformen werden somit von West nach Ost älter und fallen mit 2–7° Neigung flach zum westlich gelegenen Leinegraben ab.

Der östliche Teil des Blattes 4426 wird neben sanften Kuppen des Buntsandsteins (HINZE, 1967) durch quartäre Deckschichten dominiert. Der Flächenanteil dieser geologisch jungen Sedimente nimmt hierbei von Süden nach Norden zu. Ursachen für diese Dominanz quartärer Deckschichten sind in der nach Osten abnehmenden Reliefenergie sowie in saxo-nischer Bruchschollentektonik bzw. in salinardynamischen Prozessen begründet. Nach BRUNOTTE & GARLEFF (1979) haben sich die durch rheinisch und herzynisch streichende Störungen zergliederten Buntsandsteinschollen auf Grund der Subrosion der Zechsteinsalze abgesenkt. Dies wird besonders im Bereich des Seeburger Sees sowie der Landolfshäuser Senke deutlich. Nach HERRMANN (1957, 1961) lagerten sich in diesen tektonisch entstandenen Hohlformen während der Weichsel-Eiszeit Löss ab. Laut BORK (1982) beträgt die Ablagerungsmächtigkeit mehrere Zehnermeter. Der Löss im Untersuchungsgebiet ist meist tiefgründig entkalkt und wird daher in der GK25 als Lösslehm ausgewiesen. Die Gesteine des Buntsandsteins sind im östlichen Kartenblatt meist der Detfurth- oder der Volpriehausen-Folge zuzuordnen. Da in der Volpriehausen-Folge sehr geringmächtige Wechsellagerungen von Ton-, Schluff- und Sandstein vorliegen, variiert die Gesteinszusammensetzung stark. Während der Weichsel-Eiszeit wurden die Gesteine durch Solifluktion von Fließerden überlagert. Auf Grund der Lössüberwehung wurden diese Fließerden noch während der Weichsel-Eiszeit durchmischt und weisen eine sehr starke Heterogenität auf. Die Talauen sind mit holozänem Auelehm gefüllt. Meist handelt es sich um fluviatil umgelagertes humoses Lössmaterial, welches in Abhängigkeit mit den umliegenden Gesteinspaketen auch von Muschelkalkgrus oder Buntsandsteinverwitterungsresten durchsetzt ist. Nach BORK (1982) vermischt sich an den Talschlüssen der Auelehm mit holozänem Schwemmlöss. Kolluviale Ablagerungen wie der Schwemmlöss finden sich im gesamten östlichen Untersuchungsgebiet und sind das Ergebnis andauernder Bodenerosion. Vor allem schwach geneigte Unterhänge sowie Hangfußbereiche und Talungen sind von Schwemmlöss bedeckt. Die Mächtigkeit der Bedeckung korreliert mit der Reliefenergie, so dass höhere Hanglagen oft nur dünne Schleier und Hangfüße mehrere Meter Mächtigkeit aufweisen können. Am Hangfuß des Göttinger Waldes sind zudem die sehr feuchten Rottöne z.T. weitflächig von holozänen Abrutschmassen des Muschelkalkes überdeckt. Im Bereich des Seeburger Sees treten vereinzelt Niedermoorbildungen auf.

Auf Grund der Wechsellagerung harter und weicher Gesteine der Trias Formationen und der damit verbundenen unterschiedlichern Verwitterungsresistenz hat sich im Untersuchungsgebiet ein ausgeprägtes Schichtstufenrelief entwickelt. Der Bausandstein der Sollingfolge (smSS) sowie der Wellenkalk des unteren Muschelkalks (muW) und der Trochitenkalk des oberen Muschelkalks (mo1) bilden auf Grund der starken Verwitterungsresistenz die Hochflächen und Geländestufen. Als Sockelbildner fungieren der mittlere Muschelkalk (mm) sowie, die Tonsteine des Röt (so) (SCHUNKE, 1979). Die ausgeprägte Wellenkalkschichtstufe erstreckt sich mit maximal 427m Höhe über etwa 15 Kilometer von Oberbillingshausen bis Groß Lengden im Süden (siehe Karte 3.3). Der obere Stufenhang besteht aus etwa 100m mächtigem Wellenkalk und ist mit 30–40° etwa doppelt so stark geneigt wie der im Rötton liegende untere Stufenhang. Durch die Verkarstung der Gipshorizonte im Röt und den hiermit einher gegangenen Erdfällen wirkt das Relief des unteren Stufenhanges sehr unruhig

(NAGEL & WUNDERLICH, 1979). Die westlich des Göttinger Waldes vorgelagerte Trochitenkalk-Schichtstufe ist auf Grund der geringeren Höhe weniger prägnant im Landschaftsbild. Die Schichtstufe ist durch westwärts führende Muldentäler des Göttinger Waldes in mehrere Abschnitte unterteilt. Als Sockelbildner fungieren Mergel und Tone des hier etwa 55m mächtigen mittleren Muschelkalks (mm). Der mit etwa 15m eher geringmächtige Trochitenkalk besteht im Wesentlichen aus dickbankigem Kalkgestein und wird ohne erkennbare Stufung vom Ceratitenkalk des oberen Muschelkalks (mo2) überlagert. Richtung Osten schließt sich eine weitere Schichtstufe an. Stufenbildner ist der Solling Bausandstein (smSS) und Sockelbildner sind die aus petrographischer Sicht sehr homogenen, tonigen Zwischenschichten der Solling Folge des mittleren Buntsandsteins. Ursache für die tiefe Zertalung der Stufenstirn ist laut ELBRACHT (2000) die Nähe zur Landolfshäuser Senke als lokale Erosionsbasis. Die Taleinschnitte haben ein kastenförmiges Querprofil und eine ausgeprägte Talsohle. Die steil abfallenden Talflanken sind nach SCHUNKE (1979) auf starke Seitenerosion mit ruckweiser Wasserführung während des Pleistozäns zurück zu führen.

3.2 Böden

Die Verbreitung der Bodentypen (vgl. Karte 3.4) ist in der BÜK50 eng an die Beschaffenheit des Ausgangsmaterials für die Bodenbildung gekoppelt und lässt sich analog zu den petrographischen Verhältnissen in Löss-, Karbonatstein-, Tonstein- und Silikatsteinverbreitungsgebiete differenzieren. Tabelle 3.1 zeigt eine kurze Übersicht über die Verteilung der Bodentypeneinheiten. Flächenmäßig dominieren Rendzinen, Braunerden sowie Pseudogley-Parabraunerden und Braunerde-Ranker.

Typisch für die Karbonatsteinverwitterungsgebiete der Wellenkalkschichtstufe (Göttinger Wald) sind flachgründige Rendzinen deren Ah- bzw. Ap-Horizonte bis maximal 25 cm und deren Cv-Horizonte bis ca. 40 cm Profiltiefe hinunterreichen. Vereinzelt auftretende Braunerden innerhalb des Göttinger Waldes sind auf lokale Lössvorkommen in Schutzlagen zurück zu führen. Im Südteil des Göttinger Waldes sind zudem lokal Pseudogley-Braunerden zu finden. Diese sind als z.T. lösshaltige Fließerden aus muschelkalkbürtigem Gesteinsmaterial des Göttinger Waldes entstanden.

Am Stufenhang der Wellenkalkschichtstufe schließt sich in diesem Ausstrichbereich der Röttone das Tonsteinverbreitungsgebiet an. Weitere Tonsteinverbreitungsgebiete sind im Südteil der östlich von Gr. Lengden anschließenden Schichtstufe zu finden. In diesen Gebieten haben sich Pelosole und Braunerde-Pelosole ausgebildet, deren (mit etwa 50 cm überaus mächtigen) P- bzw. Bv-P- Horizonte bis etwa 70 cm Gesamttiefe reichen.

Im Silikatsteinverwitterungsgebiet ist ebenfalls ein großes Spektrum an Bodentypen entstanden. Auf den exponierten Kuppen der dem Göttinger Wald ostwärts vorgelagerten Bausandsteinschichtstufen und im Süd-Osten des Blattes haben sich Ranker und Braunerde-Ranker entwickelt. Letztere besitzen einen Bv-Horizont mit maximal 40 cm Profiltiefe. Braunerden außerhalb der erwähnten Kartiereinheiten im Göttinger Wald entstanden in der Regel aus Fließerden, die zum großen Teil aus Verwitterungsmaterial des Buntsandsteins aufgebaut sind. Die Bv-Horizonte reichen bis etwa 50 cm Profiltiefe.

In den Lössverbreitungsgebieten vollzieht sich auf Grund des höheren Schluffanteils ein Bodentypenwandel von den Braunerden zu den Parabraunerden (vgl. GEHRT & BOESS, 1996). Auf Grund der fortschreitenden Lessivierung und der hiermit einhergehenden Bildung wasserstauer Substrate sind diese alle pseudovergleyt.

In den Talsohlen der Stufenrandtäler befinden sich Gley-Kolluvien, die aus Schwemmlöss gebildet wurden und deren Go-Horizonte in etwa 75 cm Profiltiefe beginnen. In der Tie-

fenlinie, die westlich Richtung Seeburger See entwässert, finden sich Gley-Auenböden bzw. Gleye. Nördlich und nordöstlich des Seeburger Sees sind einige Niedermoorstandorte zu finden.

eindeutige Profilnummer (Pronum50)	Bodentyp	Bodengroßlandschaft / Bodenlandschaft	Löss-einfluss	Kalk-haltig	Gründig-keit	Häufigkeit der Kartiereinheit auf dem Blatt der BÜK50	Areal-größe auf der BÜK50 [ha]	Anteil am Untersuchungsgebiet [%]	Bedeckungs-grad durch Bodenschätzungsdaten [ha]	Bedeckungs-grad durch Bodenschätzungsdaten [%]
0*	-	-	-	-	-	1	54.94	0.00	0.00	0.00
109	Gley-Auenboden	Lössbecken, Talsedimente	Nein	Nein	100	1	161.79	2.09	138.36	85.52
144	Pseudogley	Höhenzüge, Tonsteinverbreitungsgebiete	Ja	Nein	> 100	1	17.49	0.00	0.00	0.00
158	Pseudogley-Parabraunerde	Höhenzüge, Löss	Ja	Nein	> 100	10	1072.61	14.38	953.36	88.88
164	Pseudogley-Parabraunerde	Lössbecken, Löss	Ja	Nein	> 100	8	1568.94	21.31	1412.35	90.02
172	Gley	Höhenzüge, Löss	Ja	Nein	> 100	1	22.40	0.25	16.77	74.90
184	Gley-Kolluvium	Lössbecken, Geschiebelehmverbreitungsgebiete	Ja	Nein	> 100	9	365.06	4.34	287.95	78.88
378**	Niedermoor	Lössbecken, Torfe	Nein	Ja	> 100	4	44.99	0.00	0.00	0.00
491	Braunerde	Höhenzüge, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Ja	Ja	100	1	37.75	0.50	32.98	87.36
501	Pseudogley-Braunerde	Höhenzüge, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	Ja	> 100	1	11.61	0.12	8.19	70.59
510	Rendzina	Höhenzüge, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	Ja	20	4	953.86	0.81	53.51	5.61
511	Rendzina	Höhenzüge, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	Ja	25	1	808.13	0.49	32.43	4.01
513	Rendzina	Höhenzüge, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	Ja	40	1	970.86	2.50	165.57	17.05
514	Rendzina	Höhenzüge, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	Ja	40	3	289.17	2.55	168.74	58.35
517	Rendzina	Höhenzüge, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	Ja	20	1	91.50	0.13	8.57	9.36
520	Pelosol	Höhenzüge, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	Ja	60	1	319.02	3.28	217.68	68.23
526	Rendzina	Höhenzüge, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	Ja	15	3	475.35	1.50	99.15	20.86
532	Pseudogley-Parabraunerde	Höhenzüge, Silikatsteinverbreitungsgebiete	Ja	Nein	> 100	1	77.33	0.00	0.00	0.00
534	Braunerde	Höhenzüge, Silikatsteinverbreitungsgebiete	Ja	Nein	> 100	1	191.81	2.88	191.04	99.60
539	Braunerde	Höhenzüge, Silikatsteinverbreitungsgebiete	Nein	Nein	80	11	2259.02	29.24	1938.53	85.81
540	Braunerde	Höhenzüge, Silikatsteinverbreitungsgebiete	Nein	Nein	80	4	360.01	4.19	277.90	77.19
555	Braunerde-Ranker	Höhenzüge, Silikatsteinverbreitungsgebiete	Nein	Nein	40	7	2199.77	5.78	382.99	17.41
556	Braunerde-Ranker	Höhenzüge, Silikatsteinverbreitungsgebiete	Nein	Nein	40	2	91.63	0.64	42.59	46.48
594	Pseudogley	Höhenzüge, Tonsteinverbreitungsgebiete	Nein	Nein	> 100	1	21.91	0.33	21.91	100.00
611	Braunerde-Pelosol	Höhenzüge, Tonsteinverbreitungsgebiete	Nein	Nein	> 100	2	343.15	2.66	176.28	51.37
616	Ranker	Höhenzüge, Tonsteinverbreitungsgebiete	Nein	Ja	10	2	52.09	0.03	2.05	3.93
Summe							12862.17	100	6628.91	51.5

0*: die Profilnummer 0 bedeutet keine Bodendaten (Seeburger See, Abbaugelände etc.)

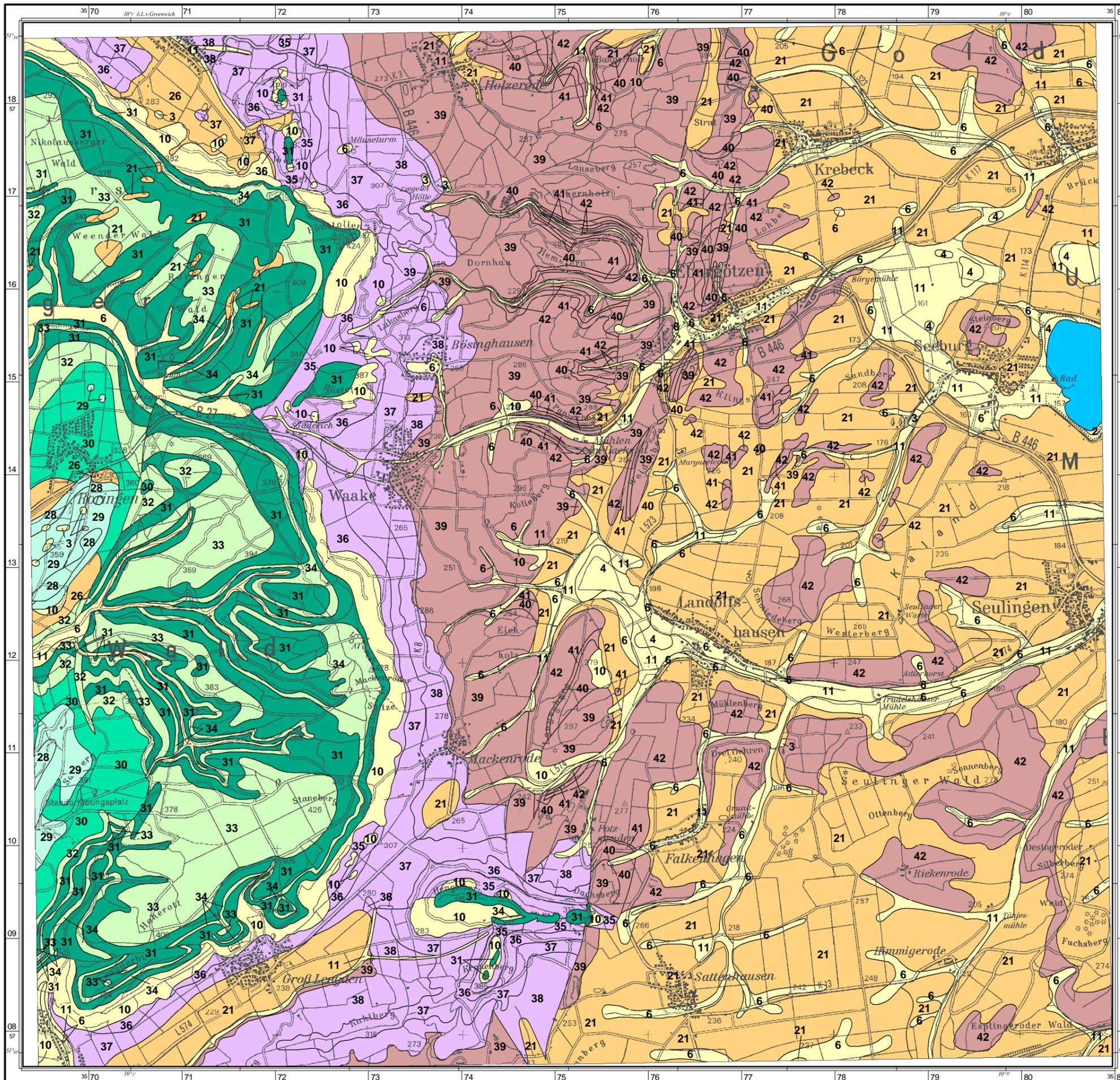
378**: da keine Bodenart vorliegt, wurde der Bereich Niedermoor durch NoData ersetzt

Tabelle 3.1: Häufigkeiten von Profilnummern der BÜK50 im Untersuchungsgebiet sowie Bedeckungsgrade des Referenzdatensatzes (BO5) für diese Kartiereinheiten.

3.3 Klima

Das Untereichsfeld gehört zur Klimaregion Oberes Leinebergland (Deutscher Wetterdienst, 1964). Auf Grund des Regenschattens des Göttinger Waldes entfallen auf das Untereichsfeld im Mittel 550–600mm Niederschlag pro Jahr, wobei die Verteilung auf das Winter- bzw. Sommerhalbjahr mit einer Differenz von etwa 50mm fast ausgeglichen ist. Während im kältesten Monat Januar die Durchschnittstemperatur zwischen -2 und 0 °C liegt, beträgt das Temperaturintervall im wärmsten Monat Juli zwischen 15 und 17 °C.

Karte 3.2: Geologische Situation

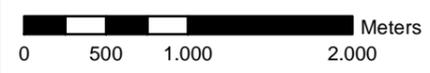


Darstellung mit Legendennr.	Stratigraphie	Petrographie und Hauptgemenge	Genese
2	qh	F	I
3	qh(y)	U - G	yb, yd, ym, ysd
4	qh	H	H
6	qh	U	Lou
10	qh	T - X	r, sh
11	qh	U	Lf
21	qw-qh	U	Lol, zt(un-Lo, ob-Lou)
26	qw-qs	T - G	fl
28	mo2	^k	
29	mo1	^k	
30	mm	^m	
31	muW1-muW3	^k	
32	muS	^kp	
33	muT	^k	
34	muOB	^k	
35	so4	^t	
36	so3	^t	
37	so2	^t	
38	so1	^t	
39	smSS	^fs - ^ms	
40	smST	^t - ^u	
41	smD	^gs - ^fs	
42	smV	wl(^fs-^ms-^f, ^u)	

Zeichenerklärung: siehe Anhang

Sonstiges

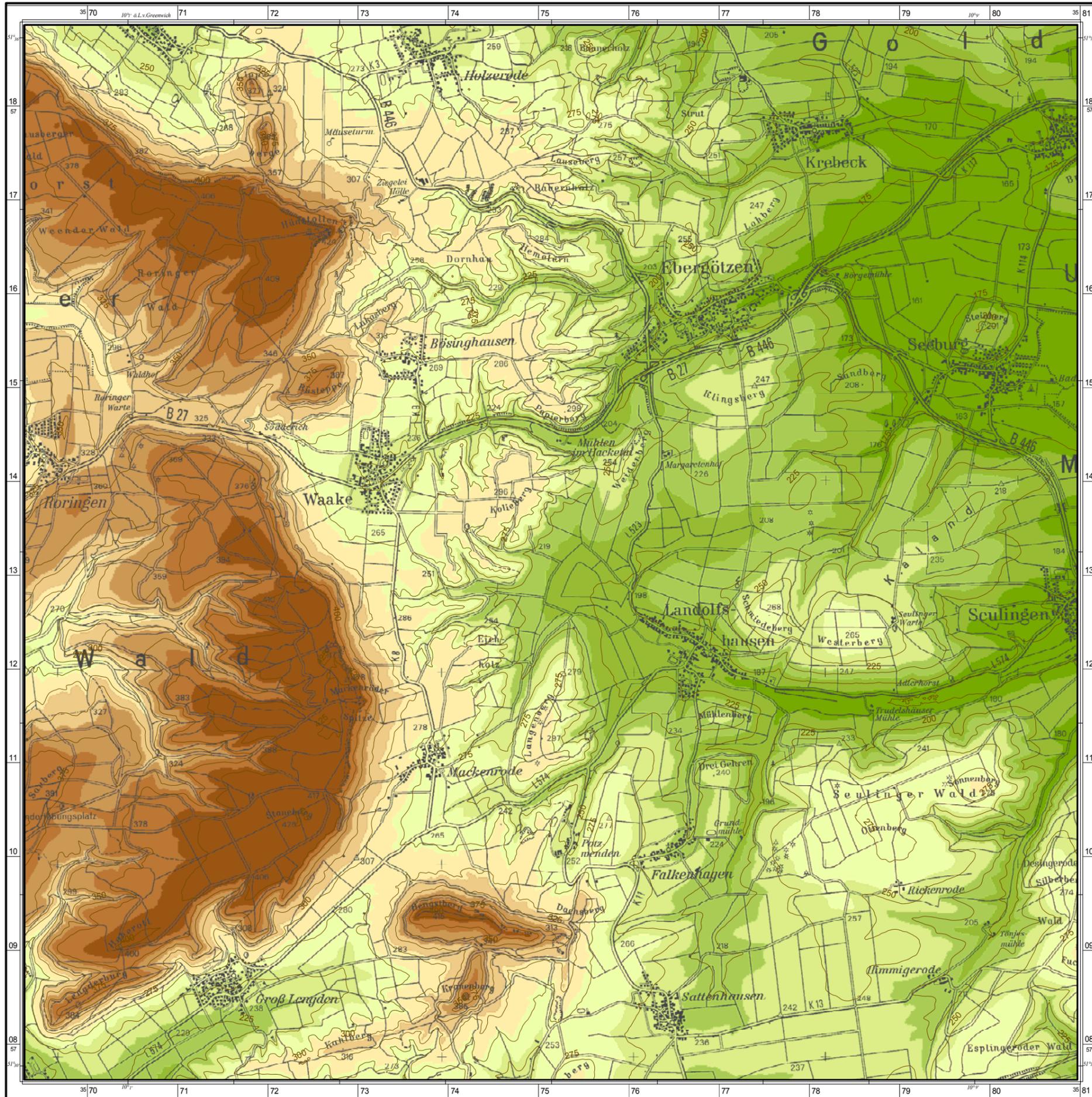
Seeburger See



Datengrundlage: Geologische Karte 1:25.000, Blatt 4426 (Ebergötzen)
 NifB (Platausgabe 2001)
 Rasterdaten der TK50, Blatt 4526 (Duderstadt)



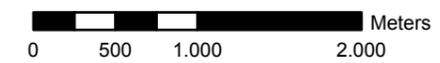
Universität Hannover
 Physische Geographie
 und Landschaftsökologie



Karte 3.3: Höhengschichtenkarte

Höhenangaben

-  156 m - 184 müNN
-  185 m - 210 müNN
-  211 m - 234 müNN
-  235 m - 258 müNN
-  259 m - 280 müNN
-  281 m - 306 müNN
-  307 m - 336 müNN
-  337 m - 365 müNN
-  366 m - 392 müNN
-  393 m - 427 müNN
- Höhenlinien

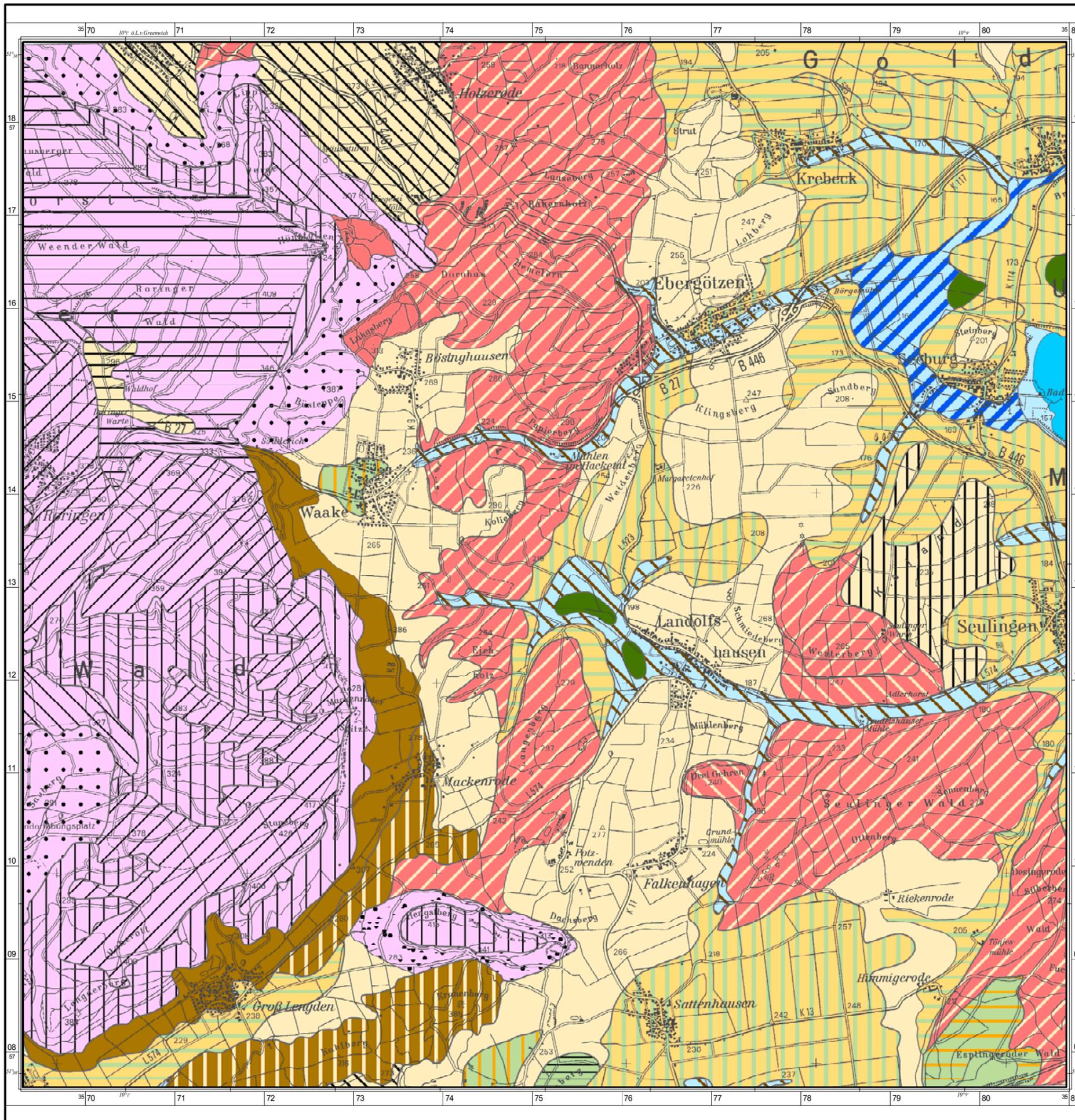


Datengrundlagen: DGM5; Blatt (NIFB; Plotausgabe 2001)
 Rasterdaten der TK50, Blatt 4526 (Duderstadt)



Universität Hannover
Physische Geographie
und Landschaftsökologie

Karte 3.4: Bodentypen



BODENREGION

Bodengroßlandschaft
Bodenlandschaft

BERGLAND

Lößbecken

Torfe

Niedermoor
Niedermoor // limnische Ablagerungen
Niedermoor / torf // Mude

Talsedimente

Gley-Auenboden
Auelehm = fluviatile Ablagerungen
toniger Schluff = Kies

Geschiebelehmverbreitungsgebiete

Gley-Kolluvium
Schwemmlöß // Fließerde
toniger Schluff // sandiger Lehm

Lösse

Pseudogley-Parabraunerde
Löß = Fließerde
toniger Schluff = sandiger Lehm

Pseudogley-Parabraunerde
Löß _ Fließerde
toniger Schluff _ sandiger Lehm

Höhenzüge

Lösse

Gley
Löß _ Fließerde
toniger Schluff _ sandiger Lehm

Karbonatsteinverbreitungsgebiet

Rendzina
Mesozoikum
toniger Lehm / Kalkstein

Rendzina
Verwitterungsmaterial / Mesozoikum
toniger Lehm / Kalkstein

Rendzina
Verwitterungsmaterial // Mesozoikum
toniger Lehm // Kalkstein

Rendzina
Verwitterungsmaterial // Mesozoikum
toniger Lehm // Kalkstein

Rendzina
Verwitterungsmaterial / Mesozoikum
toniger Lehm / Kalkstein

Rendzina
Verwitterungsmaterial \ Mesozoikum
toniger Lehm \ Kalkstein

Pelosoil
Verwitterungsmaterial // Mesozoikum
toniger Lehm / schluffiger Ton // Kalkstein

Braunerde
Löß // Verwitterungsmaterial = Mesozoikum
toniger Schluff // toniger Lehm = Kalkstein

Pseudogley-Braunerde
Fließerde = Mesozoikum
sandiger Lehm = toniger Lehm _ Kalkstein

Silikatsteinverbreitungsgebiet

Braunerde-Ranker
Verwitterungsmaterial // Mesozoikum
sandiger Lehm // Schluffstein

Braunerde-Ranker
Verwitterungsmaterial // Mesozoikum
sandiger Lehm // Schluffstein

Braunerde
Verwitterungsmaterial // Mesozoikum
sandiger Lehm // Schluffstein

Braunerde
Löß = Verwitterungsmaterial = Mesozoikum
toniger Schluff = toniger Lehm = Schluffstein

Braunerde
Hangbildungen //
Verwitterungsmaterial = Mesozoikum
sandiger Lehm // toniger Lehm = Schluffstein

Pseudogley-Parabraunerde
Löß // Fließerde _ Mesozoikum
toniger Schluff // sandiger Lehm =
toniger Lehm _ Schluffstein

Tonsteinverbreitungsgebiet

Ranker
Verwitterungsmaterial \ Mesozoikum
toniger Lehm / Tonstein

Braunerde-Pelosoil
Verwitterungsmaterial = Mesozoikum
toniger Lehm \ schluffigen Ton //
toniger Lehm = Tonstein

Pseudogley-Parabraunerde
Löß = Fließerde
toniger Schluff = sandiger Lehm

Pseudogley
Löß = Fließerde
toniger Schluff // sandiger Lehm

Pseudogley
Fließerde // Mesozoikum
sandiger Lehm // schluffigen Ton

Nachrichtlich

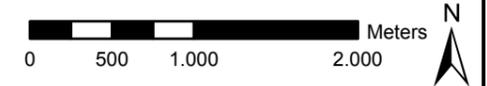
Seeburger See

Zeichenerklärung:

\ Schichtwechsel zwischen 0 und < 2 dm unter Geländeoberfläche
/ Schichtwechsel zwischen 2 und < 4 dm unter Geländeoberfläche
// Schichtwechsel zwischen 4 und < 8 dm unter Geländeoberfläche
= Schichtwechsel zwischen 8 und < 13 dm unter Geländeoberfläche
_ Schichtwechsel zwischen 13 und < 20 dm unter Geländeoberfläche

BH Berhang
BK Bergkuppe
BR Bergrücker

N 2 mäßig schwach geneigt (5 - 9% Hangneigung)
N 3 mittel geneigt (9 - 18% Hangneigung)



Datengrundlage: Bodenübersichtskarte 1:50.000,
Blatt L 4526 (Duderstadt; NfB (Platausgabe 2000)
Rasterdaten der TK 50, Blatt 4526 (Duderstadt)



Universität Hannover
Physische Geographie
und Landschaftsökologie

4 Theoretische Vorüberlegungen und Stand der Forschung: Heterogenität und Disaggregation

4.1 Aspekte zur Heterogenität von Bodenmerkmalen

Der Boden ist ein dreidimensionaler, in Zeit und Raum sehr variabler Körper. Die aktuelle Ausprägung eines Bodens ist das Ergebnis von zeitlich variablen und durch Rückkopplungen miteinander verbundenen Prozessen der Pedogenese. Die Steuerungsfaktoren sind mit unterschiedlicher Intensität und räumlicher Wirksamkeit an der Pedogenese beteiligt.

Der Boden ist eine Funktion der Variablen Klima, Relief, Bodenausgangssubstrat, Wasserzuschuss und Zeit. Strittig ist die Frage, ob sich die Bodenausprägung annähernd „mathematisch“ vorhersagen lässt und es somit eine quantitative Erfassung der Merkmalsvarianz gibt. Mit dem Begriff „mathematische Lösung“ ist natürlich keine streng algebraische Umsetzung des Wortes gemeint. So schließt z.B. BIRKELAND (1999, p.144f) eine streng deterministische Prognose der Bodenausprägung aus. Die Vielzahl der Autoren ist sich allerdings einig, dass es zwar keine quantitative Komplettlösung einer Bodenprognose geben kann, aber dass sich durch deskriptiv-regelbasierte Modelle zumindest eine Teillösung erzielen lässt.

In älteren Publikationen werden die Ursachen für die Schwierigkeiten bei der Umsetzung auf die unzureichende Datenbasis und den Entwicklungsstand der Auswertungsmethoden zurückgeführt (vgl. YAALON, 1975). Etwas jüngere Arbeiten führen die Probleme auf die sich gegenseitig und nicht linear beeinflussenden Variablen der Bodengleichung zurück (RICHARDSON & EDMONT, 1987), welche sich zudem auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalenniveaus bewegen können. Der Faktor Klima spielt eher auf der Makroskala (Regionischer Bereich, LESER 1997, S.199ff) eine entscheidende Rolle für die Bodenvariabilität und die Faktoren Bodenausgangsmaterial und Relief kommen mehr auf der Mesoskala (unterer chorischer Bereich) zum Tragen. SCHMIDT (1997) weist anhand der unterschiedlichen Einflussstärke den einzelnen Faktoren folgende Skalenbereiche zu:

Geographische Dimension	Bodenbildende Faktoren
Regionische Integrationsfaktoren (übergeordnet, zonal)	Makroklima Vegetationsformation Morphotektonisch-paläogeographische Struktur Zeit
Chorische Differenzierungsfaktoren (untergeordnet, landschaftsbezogen)	Ausgangssubstrat Relief Zuschusswasser Standortvegetation und Edaphon Lokalklima Menschliche Tätigkeit

Tabelle 4.1: Raumbezug bodenbildener Faktoren

Quelle: SCHMIDT (1997) nach HAASE (1973)

Auf Grund der komplexen und schwer ersichtlichen Beeinflussung der Faktoren untereinander sucht eine Vielzahl von Autoren einen Lösungsansatz mit nur zwei Variablen und einer definierten Maßstabsebene. Einen sehr guten Überblick über relevante Arbeiten und verwendete Variablen und Methoden zur Bodenvorhersage liefert MCBRATNEY et al. (2003). Gemäß dieser Übersicht haben nur wenige Autoren die Vorhersage von Bodenbasisdaten für mittlere und großmaßstäbige Kartenwerke erforscht.

HENNINGS (1991) gliedert die theoretischen Modellvorstellungen in Anlehnung an (WILDING & DREES, 1983; PERRIER & WILDING, 1986; TRANGMAR et al., 1985) zur Vorhersage der Bodenvariabilität in zwei Bereiche:

- Die systematische Komponente der Variation resultiert aus dem Produkt der bodenbildenden Faktoren, speziell „der Steuerung der Pedogenese durch das Relief, sowie dem Einfluss menschlicher Bewirtschaftung“.
- Die zufällige, nicht funktionale Komponente der Variation, für die das Raummuster trotz vergleichbarer bodenbildender Faktoren nicht aus der Pedogenese erklärbar ist.

Somit ist jede dieser hergeleiteten Bodengleichungen mehr oder weniger im Sinne einer Zufallsfunktion zu verstehen. Die Variation hat hierbei sowohl eine *räumliche* als auch eine *zeitliche* Dimension, so dass Bodenmerkmale sowohl dynamisch (z.B. Bodenfeuchte) als auch eher statisch (z.B. Korngrößenzusammensetzung, Gründigkeit etc.) gesehen werden können. In der Literatur wird für die räumliche Differenziertheit von landschaftlichen Strukturen und Prozessen der Begriff Heterogenität benutzt, während für die Veränderlichkeit mit/in der Zeit der Begriff Variabilität bevorzugt wird (NEUMEISTER, 1999).

HEUVELINK & WEBSTER (2001) zeigen, welchen Anteil die zeitliche und welchen die räumliche Variation bei der Modellbildung von Anfang der 60er Jahre bis heute inne hatte. So wurde bei den Modellbildnern die zeitliche Variation bis Anfang der 90er Jahre völlig ausgeklammert. Die räumliche Komponente der Variation wurde diskret (bis Anfang der 80er Jahre) über kontinuierlich (80er Jahre) bis hin zur Berücksichtigung beider Phänomene (90er Jahre) berücksichtigt. Ebenfalls in den 90er Jahren wurden erstmals wahrscheinkeitsbasierte Faktoren in deterministische Modelle implementiert (state-space-approach), welche allerdings nur die zeitliche Variation berücksichtigten. Mitte der 90er Jahre gab es einen Trend, in dem die räumliche Variation vernachlässigt wurde und zunächst Zeitreihen im Mittelpunkt des Interesses standen. Ab Mitte der 90er Jahre wurden beide Variationsebenen in Modellbildungen berücksichtigt und mit meist geostatistischen Methoden umgesetzt (space-time-geostatistics). Seit der Jahrhundertwende stehen Modelle, die auf physikalische Gesetze und Beobachtungen fußen, im Vordergrund der Entwicklungen. Innerhalb dieser Modelle werden beide Variationsebenen berücksichtigt, da räumliche und zeitliche Wahrscheinkeitsvariablen (spatial state-space approach) implementiert sind.

Die räumliche Variation wird von SINOWSKI (1995) in Anlehnung an BURROUGH (1993) wie folgt dargelegt (Abbildung 4.1 a–f):

- a) Im Raum existieren Grenzen, an denen sich Bodeneigenschaften diskret ändern.
- b) Die Variation von Bodeneigenschaften innerhalb einer Kartiereinheit ist wesentlich geringer als zwischen den Bodeneinheiten. Dies ist die methodische Grundlage und Begründung für konventionelle, vektorbasierte Bodenkarten. SINOWSKI (1995) bezeichnet dies als „stochastische Variante von Modell a“.
- c) Es existieren allmähliche, nicht abrupte Änderungen bei der Variation der Bodeneigenschaften im Raum. Dieser Ansatz basiert auf vielen gängigen Modellen, die Punktinformationen durch Interpolation regionalisieren.
- d) Vorstellung d) basiert auf der Annahme von Abbildung 4.1c, allerdings unter der Annahme einer zwar allmählichen kontinuierlichen Variation mit mehr oder weniger kurzräumigen Schwankungen.

- e) Die räumliche Variation ist einem Trend unterworfen. Weder Ansätze, die auf Diskreta noch auf Kontinua aufbauen, können diesen Trend eindeutig wiedergeben.
- f) Es existiert eine zufällige Variation innerhalb der Ausprägung der Bodenmerkmale. Es ist keine strukturelle Information aus dem Datensatz isolierbar. Die Anwendung der Ansätze a–d würde falsche Raumstrukturen hervorbringen.

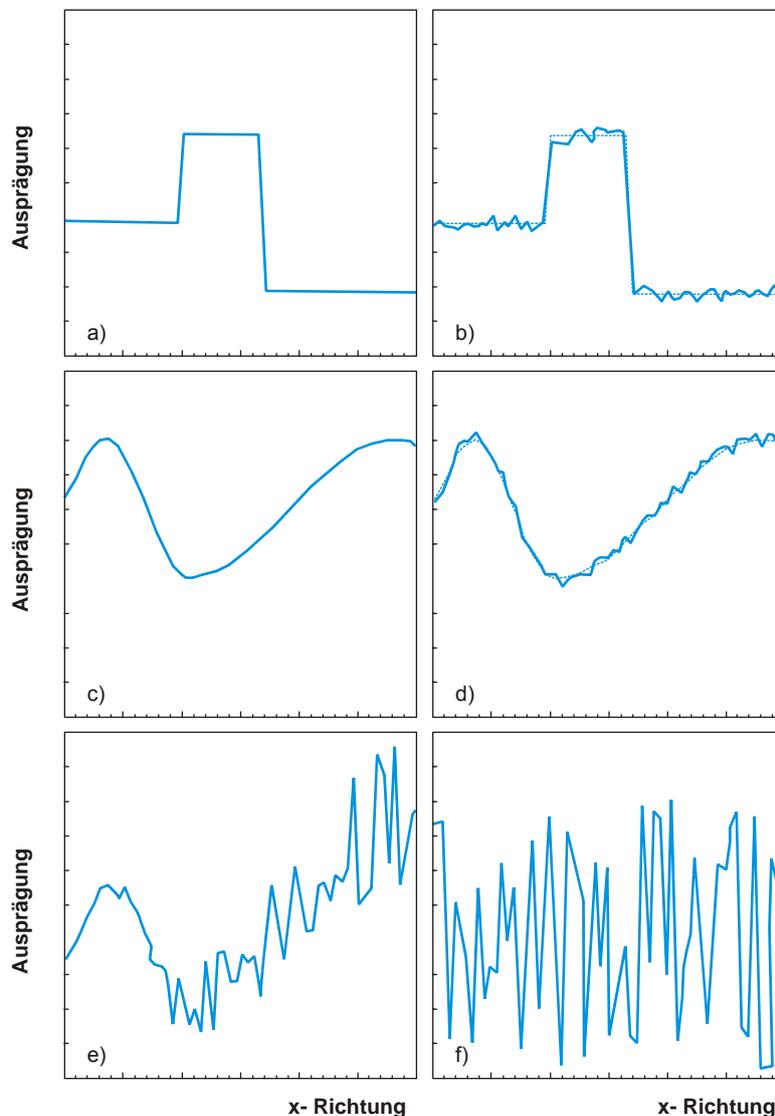


Abbildung 4.1 a–f: Hypothetische Modellvorstellungen der räumlichen Variation von Böden

Quelle: verändert durch SINOWSKI (1995) nach BURROUGH (1993)

Da die zeitliche Variation von Bodeneigenschaften für diese Arbeit eine untergeordnete Rolle spielt, wird auf eine tiefere theoretische Betrachtung verzichtet. HENNINGS (1991) fasst allgemeine Gesetzmäßigkeiten in Bezug auf die Bodenvariabilität wie folgt zusammen:

- Das Ausmaß der pedologischen Vielfalt korreliert mit der Intensität der rezenten Morphodynamik (SCHMIDT, 1987, S.202), d.h. in jüngeren Reliefgenerationen ist die Variabilität höher als in älteren.

- Das Ausmaß der Heterogenität von Böden ist eng an das geologische Ausgangsmaterial gekoppelt. Böden aus umgelagertem Material sind heterogener als in situ entstandene Verwitterungsböden (BECKETT & WEBSTER, 1971, S.3).
- Das Ausmaß der Variabilität nimmt in der Rangfolge Löss – Geschiebelehm – fluviatile Sedimente – tektonisch beanspruchte Festgesteine – Marschen zu (WILDING, 1985, S.175; OTTE 1988, S.56).
- Oberböden sind weniger variabel als Unterböden. Dabei sind statische Bodeneigenschaften (Körnung, Mächtigkeit, Farbe) weniger heterogen als dynamische (kf-Wert, Wassergehalt).
- Das Ausmaß der Variabilität nimmt parallel zur Größe der Untersuchungsfläche zu (Beckett & WEBSTER, 1971, S.3–7). Die Distanzweite ist maßstabsabhängig und für jede Bodeneigenschaft anders.

Einige Autoren (NICOLIS & PRIGOGINE, 1989; PHILLIPS, 1993) vermuten allerdings ein (deterministisches) chaotisches Verhalten des Bodens wie z.B. in physikalischen Phänomenen wie der turbulenten Strömung oder in atmosphärischen Vorgängen. Auch WEBSTER (2000) stellt die Frage: „Is soil variation random?“ Diese Frage lässt sich so nicht beantworten. Eher sollten Modellierer prüfen, ob die Realität durch die Modellannahmen abgebildet wird. Für sehr lokale Prognosen oder Fragestellungen ist der Einsatz statistischer/wahrscheinlichkeitsbasierter Parameter in Modellanwendungen wohl unverzichtbar. Für andere Skalenbereiche (zum Begriff Skale vgl. Kapitel 4.2) wiederum scheint eine diskrete (stationäre) Abbildung des Bodens gerechtfertigt. Auf Grund der Komplexität der Pedogenese scheinen Böden auch innerhalb eines Skalenbereichs manchmal eher systematisch und manchmal chaotisch verteilt. Die Frage, ob Boden zufällig oder systematisch verteilt ist, ist aber sekundär und stellt sich eigentlich nicht in dieser polarisierenden Form, denn sie lässt sich bei der unendlichen Vielzahl der Böden so nicht beantworten. Verschiedene Modellansätze und -techniken werden immer unterschiedliche Unsicherheiten im Modell zur Folge haben. Auf den Begriff „Fehler“ im Hinblick auf Modellergebnisse wird hier bewusst verzichtet, da ein Fehler impliziert, dass dieser beliebig zu verkleinern ist, wenn die Datenlage oder der Modellalgorithmus verbessert wird (vgl. WENKEL & SCHULZ, 1999). Dies ist allerdings realitätsfern. Daher ist es hinreichend, dass Modellentwickler prüfen, ob Modellergebnisse unter den gegebenen Umständen logisch erscheinen und somit für akkurate und praxisrelevante Vorhersagen genutzt werden können.

Wie kann Heterogenität dargestellt werden? Eine erste Möglichkeit zur Darstellung von Heterogenität bilden zahlreiche Methoden der klassischen Statistik. Kenngrößen der deskriptiven Statistik sollen in der Lage sein, eine Menge von betrachteten Daten summarisch darzustellen. Auf der einen Seite existieren Lokalisationsparameter, welche die zentrale Tendenz einer beobachteten Wahrscheinlichkeitsverteilung wiedergeben sollen (Mittelwert, Median, Modus, Perzentile etc.). Darüber hinaus soll die Streuung oder Dispersion einer Verteilung erfasst werden (Varianz, Standardabweichung, Spannweite, Interquartilbereiche, etc.). Die Wahl des geeigneten deskriptiven Maßes hängt primär vom Skalenniveau (Nominal-, Ordinal-, Intervall- bzw. Ratioskala) und der Verteilungsform der Variable ab. Eine Anwendung dieser – aus der klassischen Statistik kommender – Parameter zur Beurteilung der räumlichen Variation von Bodenparametern ist bei BRINKMANN (2002), DREYHAUPT (2002) oder SCHOLTEN (2003) zu finden. Durch die Interpretation der deskriptiven Maße lassen sich statistische Hypothesen ableiten, welche dann mit Hilfe so genannter Signifikanztests über-

prüft werden. Warum klassische statistische Maße innerhalb dieser Arbeit bei der Überprüfung der Heterogenität keine Verwendung finden, wird im Folgenden erläutert.

Die Beurteilung der Heterogenität erfolgt innerhalb dieser Arbeit an eigens entwickelten Indizes. Bodendaten liegen meist in taxonomischer Form in diskreten Kartiereinheiten vor. Werden diese klassifizierten Daten metrisiert, entstehen in Arealen mit unterschiedlichen Werteausprägungen meist polymodale Histogrammverläufe. Diese lassen sich nur schwer mit Hilfe der klassischen deskriptiven Statistik beschreiben. Für die Beschreibung derartiger Kurvenverläufe wurden spezielle Indizes gewählt und z.T. selber entwickelt. Eine Vorstellung und tiefer gehende Diskussion der Indizes liefert Kapitel 5.

In Modellanwendungen machen Heterogenitäten die Fehlerabschätzung der Ergebnisse sehr schwierig. Dabei müssen die folgenden drei Modelltypen unterschieden werden (DREYHAUPT (2002) nach BOSSEL (1994)):

- Im Whitebox-Modell sind alle Prozesse sowie die innere Struktur des Modells bekannt. Alle Parameter sind messbar.
- In Greybox-Modellen ist die innere Struktur nicht vollständig bekannt, da im Modellalgorithmus nicht nur prozessbasierte Größen, sondern auch empirische und halbempirische Ansätze berücksichtigt werden.
- In Blackbox-Modellen sind keinerlei Kenntnisse der inneren Struktur vorhanden und eine Abschätzung von Modellgrößen erfolgt nur mittels empirischer und halbempirischer Ansätze.

Auf Grund der Kenntnis der inneren Struktur kann die Variation der Eingangsdaten in Whitebox-Modellen durch Berücksichtigung von Intervallen in das Modell einhergehen. Mittels Verfahren der Intervallarithmetik (NEUMAIER, 1990 in DREYHAUPT 2003) können Fehlerfortpflanzungen und Auswirkungen auf Ausgabegrößen abgeschätzt werden. Sehr breite Intervalle in komplexeren Whitebox-Modellen sind allerdings sehr problematisch, da kaum verwertbare Aussagen geliefert werden können. Methoden der Sensitivitätsanalyse können hierbei diese Problematik eingrenzen. Hierbei wird der Einfluss von Modelleingangsgrößen auf Ausgabegrößen untersucht. Intervallbereiche der Eingangswerte mit dem stärksten Einfluss müssen hierbei beim so genannten Präprozessing (Aufbereitung der Eingangsgrößen) mit besonders großer Sorgfalt festgelegt werden. In Greybox- und Blackbox-Modellen ist eine Abschätzung der Variationsbreite bei den Eingangsdaten auf die Ausgabegrößen nur schwer möglich.

4.2 Was ist Disaggregation?

4.2.1 Skalenhierarchien

Disaggregation ist die Datenübertragung von größeren auf kleinere Flächen. Dabei werden Skalen- bzw. Maßstabsgrenzen überschritten. Um den Transfer (Aggregation oder Disaggregation) näher betrachten zu können, muss zunächst der Begriff Skale im Sinne einer ökologischen Raumgliederung ausführlicher diskutiert werden.

Skale oder in der anglo-amerikanischen Literatur "scale", wird vor allem von Hydrologen (vgl. BLÖSCHL, 2004) zum Teil als Synonym für den in der Landschaftsökologie gebräuchlichen Begriff der Dimension genutzt. Skalen sind somit wie Dimensionen eine Größenordnung für den (realen) Raum. Eine Literaturrecherche ergab allerdings recht ausgeprägte Unterschiede bei der Definition von Begriffen wie Skale oder auch Regionalisierung. Daher ist es nicht verwunderlich, dass KLEEBERG UND CEMUS (1992) die nicht einheitliche Verwendung des Begriffes Regionalisierung in der Hydrologie stark kritisieren. BLÖSCHL (2004) hat sich

diesem Themenkomplex umfangreich gewidmet und definiert wie folgt: Hydrologen definieren Skalen als charakteristische Längen bzw. Zeiten in der Hydrologie. Mit charakteristischen Längen oder Zeiten können hierbei Prozesse, Beobachtungen oder auch Modelle gemeint sein (BLÖSCHL & SIVAPALAN, 1995). Die modellhafte Abbildung von Prozessen basiert allerdings meist auf sehr kleinen Zeitskalen. Den Begriff Skalierung/Scaling erklärt BLÖSCHL (2004) als „das Übertragen von Informationen zwischen unterschiedlichen Raum-Zeit Skalen“. Regionalisierung in der Hydrologie meint den Transfer von Informationen von einer Lokalisation (z.B. einem Einzugsgebiet) auf einen anderen Ort (benachbartes Einzugsgebiet). Regionalisierung fokussiert also den Raum, während sich der Begriff Scaling auf Raum und Zeit bezieht.

Der Grundgedanke für eine Gliederung des Raumes in der Landschaftsökologie geht auf die von Ernst NEEF (1963) beschriebene Theorie der geographischen Dimensionen zurück. NEEF beschreibt Dimensionen als Maßstabsbereich, „in welchem gleiche inhaltliche Aussagen möglich sind, gleiche methodische Ziele verfolgt werden und ein bestimmtes Methodeniveau eingehalten wird“. (NEEF, 1963, S.361; LESER, 1997, S.198). Somit ist der Begriff der Dimension eindeutig von dem des Maßstabes zu unterscheiden. Ein Maßstab ist ein rein kartographisches Mittel. Für die vorliegende Arbeit sind die zwei unteren landschaftsökologischen Dimensionsstufen relevant:

Topische Dimension:

Landschaftsökologische Grundeinheit mit homogenem Inhalt. Als homogen wird ein Areal erachtet, wenn Struktur und Wirkungsgefüge gleich sind und somit ein einheitlicher Mechanismus beim Stoff- und Energiehaushalt vorliegt. Die Forderung der Homogenität eines Areals ist aber als relativ zu sehen. Für die festgelegten Bezugsgrößen werden Intervalle definiert, in denen Schwankungen toleriert werden. Für die topische Dimension lässt sich keine feste räumliche Größenordnung festlegen, da bei unterschiedlichen Landschaftstypen und Fragestellungen eine stoffliche und funktionale Homogenität im Bereich von einigen Zehner m² bis hin zu einer Flächengröße von etwa einem Hektar beobachtet werden kann. Beispiele sind Hangsegmente, kleine Terrassenflächen aber auch Kleinst Einzugsgebiete.

Chorische Dimension:

Setzt sich aus homogenen, topischen Raumelementen zusammen und besitzt eine für diese Dimension angemessene gleichartige Raumstruktur, ist aber im Vergleich der Topen untereinander als heterogen anzusehen. Die Ausweisung erfolgt nach landschaftsgenetischen Merkmalen der Chore. Beispiele sind Raumeinheiten wie Kleinst einzugsgebiete, Schichtstufen oder Plateaus. Vorschläge zur chorischen Raumgliederung liefert SYRBE (1999).

DUTTMANN (1999) weist in Anlehnung an PLATE (1992) und BECKER (1992) die in der Hydrologie üblichen Begriffe nanoscale der supertopischen-, microscale der topischen-, mesoscale der chorischen- und macroscale der regionischen Dimension zu. Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass die Bezeichnungen zur Gliederung des Raumes im Sinne von Skalen oder Maßstabsgrenzen nicht nur zwischen den einzelnen Wissenschaftsfeldern sondern auch innerhalb von Fachdisziplinen stark variieren. Als Beispiele für diese unterschiedliche Nutzung von Begrifflichkeiten in der Hydrologie sind die Arbeiten von BLÖSCHL (2004), POESEN et al. (1996), PLATE (1992) sowie BECKER (1992) und für die Meteorologie die Arbeiten von PENLAP ET AL. (2003), ZORITA & VON STORCH (1997), RAUPACH UND FINNIGAN (1995), AVISSAR (1995) zu nennen. WENKEL UND SCHULZ (1999, S.22) verweisen aus Sicht der Landschafts-

ökologie auf diese Problematik und lehnen den Versuch einer allgemein gültigen Definition der Begriffe ab.

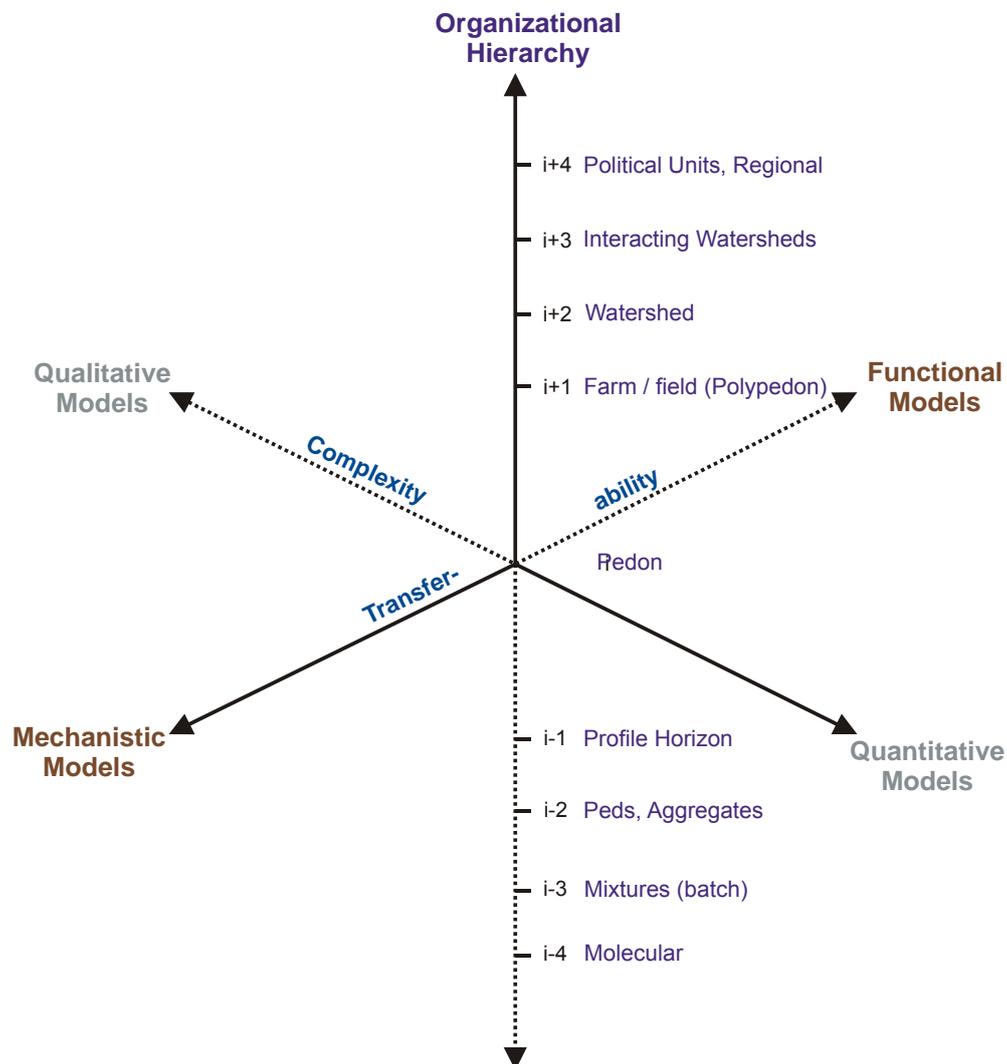


Abbildung 4.2: Skalenhierarchien

Quelle: verändert nach WAGENET (1998)/ HOOSBEEK & BOUMA (1998);
Grundlage: HOOSBEEK & BRYANT (1992)

Trotz der unterschiedlichen Nutzung von Begrifflichkeiten für verschiedene Raumebenen sind im Kern der Aussage dennoch Gemeinsamkeiten vorhanden. Neben dem hierarchischen Aufbau des Skalenkonzeptes betonen alle Autoren die Tatsache, dass auf unterschiedlichen Skalenebenen unterschiedliche Prozesse wirksam sind. Letzteres trifft genau den Punkt der Skalenabgrenzung. Nicht die unterschiedlichen Begrifflichkeiten sind relevant, denn Wissenschaftler unterschiedlicher Fachdisziplinen sprechen nun einmal eine andere Fachterminologie als ein Landschaftsökologe. Das Grundverständnis, dass Prozesse, die wir zu erforschen versuchen, auf unterschiedlichen Skalen mit unterschiedlichen Methoden zu erfassen und zu quantifizieren sind, ist Grundlage für das Verständnis des Skalenkonzeptes. So ist es denkbar, dass Aussagen oder Prognosen auf unterschiedlichen Skalenebenen auch durch unterschiedliche Prozessgrößen getätigt werden müssen.

Zur Visualisierung des hierarchischen Aufbaus des Skalensystemes greifen fast alle Fachrichtungen auf das von HOOSBEEK und BRYANT (1992) publizierte Hierarchie-Modell zurück, welches auf den Aussagen von DIJKERMAN (1974) basiert (vgl. Abbildung 4.2). Nur die Anzahl der Hierarchien sowie deren Bezeichnungen variieren leicht innerhalb der einzelnen Fachdisziplinen. Jede Hierarchie-Skala wird hierbei als ein eigenes System verstanden, welches durchaus als eine Kombination von Subsystemen niedrigerer Level oder selbst als Subsystem einer höheren Skala fungieren kann. Die Hierarchie kommt noch an einem weiteren Punkt zum Ausdruck: Das Verständnis für ein System niedrigen Levels und der damit einhergehende Versuch einer modellhaften Abbildung der Prozesse setzt immer voraus, dass der Mechanismus von Prozessen höherer Ebenen verstanden sein muss.

Auf jeder Skala hat sich der Modellierer von landschaftsökologischen Prozessen/Prozessgrößen zu entscheiden, welcher Aufwandsgrad nötig bzw. sinnvoll ist, um das gewünschte Ergebnis herbei zu führen. Daher liefern höhere Skalen eher empirische/qualitative und niedere Skalen eher mechanistisch/quantitative Aussagen.

In der Praxis werden, unabhängig von der vorhandenen Datenlage, Aussagen, Prognosen oder Risikoabschätzungen zu ökologischen Umständen und Prozessen gefordert. Aussagen für eine Skalenebene, auf der keinerlei Beobachtungspunkte vorliegen, stellen ein schwerwiegendes Problem dar (MCBRATNEY, 1998, p.51). In Anlehnung an MCBRATNEY (1998) sind folgende Szenarien denkbar:

1. Es wird eine Aussage zu einem beliebigen Kennwert auf der Skala s benötigt. Ein Modell zur Berechnung des Kennwertes ist auf der Skala s vorhanden. Falls keine Eingangsdaten für die Modellierung vorliegen müssen diese entweder von einer Skala „s–“ aggregiert oder von einer Skala „s+“ disaggregiert werden.
2. Eingangsdaten sowie Modellanwendung sind auf der Skala s vorhanden. Die Modellierung erfolgt auf diesem Skalenniveau und wird anschließend durch Aggregation auf eine Skala „s–“ oder durch Disaggregation auf eine Skala „s+“ angepasst.
3. Die Eingangsdaten liegen für die Skala s vor. Die Ergebnisse der Modellierung sind auf der Skala „s–“, oder „s+“ anzuordnen, sprich das Modell ist auf Grund des Algorithmus in der Lage Daten auf höheren oder niederen Skalen auszugeben.

Für die Thematik Bodenkarten tritt Fall 1 am häufigsten auf, da für die Bundesrepublik in den meisten Fällen mittelmaßstäbige Bodenkarten als mögliche Eingangsdaten für die Modellierung vorliegen (vgl. LÖSEL, 2005, S.7). Aus Sicht der landschaftsökologischen Modellierung steigt die Nachfrage bezüglich höher aufgelöster Daten weiter an. Ursache hierfür sind die Algorithmen der von uns verwendeten Modelle, die primär für niedere Skalen konzipiert wurden, da die zu Grunde liegenden Prozesse auf diesem Skalenniveau erforscht wurden.

Der Fall 2, die Modellierung auf der Skala s mit anschließender Transformation der Modellergebnisse auf eine höhere oder niedere Skala, ist aus Sicht von Modellierern ein schwieriges Problem. Hierzu müssen die Modellergebnisse aggregiert (höhere Skala) oder disaggregiert (niedere Skala) werden. Bei der Aggregation der Ergebnisse bereiten Generalisierungen bzw. adäquate Klassenbildungen Probleme, während für eine Disaggregation häufig die Algorithmen fehlen.

Der Fall 3 impliziert indirekt, dass der Modellalgorithmus in der Lage ist, den Skalentransfer zu vollziehen. In den meisten Fällen sind Modellierungen allerdings für einen streng definierten Skalenbereich gültig.

In Anlehnung an Abbildung 4.3 existieren für Bodenprozesse unterschiedliche Skalenebenen. Bodenmodelle sind für eine bestimmte Skale konzipiert, kalibriert und validiert. Somit müssen auch Bodendaten, die in diese Modelle einhergehen, zu dem im Modell benutzten Skalenniveau passen.

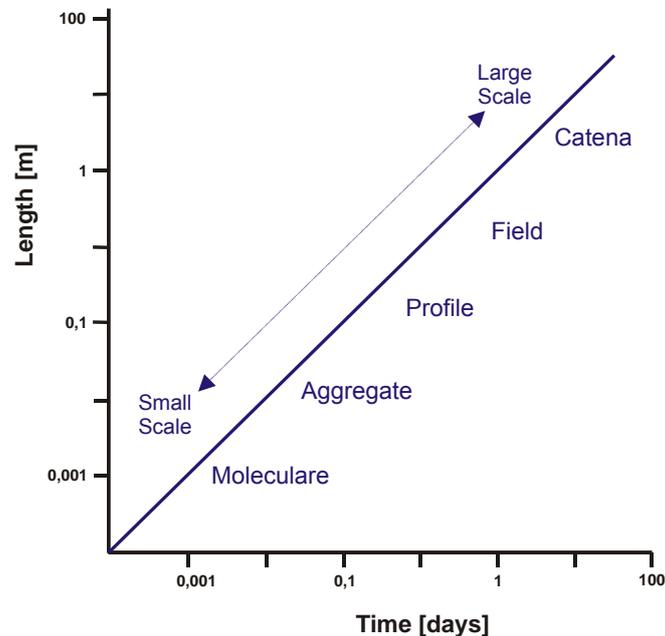


Abbildung 4.3: Skalen bei Bodenprozessen

Quelle: WAGENET (1998)

4.2.2 Klassifizierung von Disaggregierungsmethoden

BIERKENS et al. (2000) klassifizieren Disaggregierungs-Methoden in drei Problem-Bereiche. Abbildung 4.4 a–c visualisiert den Hintergrund dieser drei Ansätze.

Deterministisch:

Der Mittelwert des Parameters ist in der Skale s_2 bekannt. Es gibt eine mathematische Funktion, welche die zeitliche und räumliche Varianz der Skale s_1 anhand dieses (gemeinsamen) Mittelwertes exakt beschreibt.

Bedingt stochastisch:

Der Mittelwert des Parameters ist in der Skale s_2 bekannt. Es existieren mehrere Funktionen, welche die zeitliche und räumliche Varianz der Skale s_1 beschreiben. Hierbei ist der bekannte Mittelwert der Skale s_2 gleich der Mittelwerte jeder einzelnen realisierten Funktion. Der Begriff stochastisch soll hierbei verdeutlichen, dass nicht eine, sondern eine abgrenzbare Anzahl von Funktionen die Variation von s_1 in s_2 zu beschreiben vermag. Die Autoren betonen, dass durch die Verwendung mehrerer Funktionen die Unsicherheit über die tatsächliche Verteilung ausgedrückt werden kann. Dies hat allerdings zur Folge, dass bei Nutzung derartiger Funktionen für weitere Analysen oder Modellierungen nicht eine Lösung, sondern ein „Paket“ von Lösungen (Wahrscheinlichkeitsverteilung) zu erwarten ist. Aus statistischer

Sicht gleicht dieses Verfahren einer Monte Carlo Simulation und findet bei der Abschätzung von Risiko-Szenarien seine Anwendung.

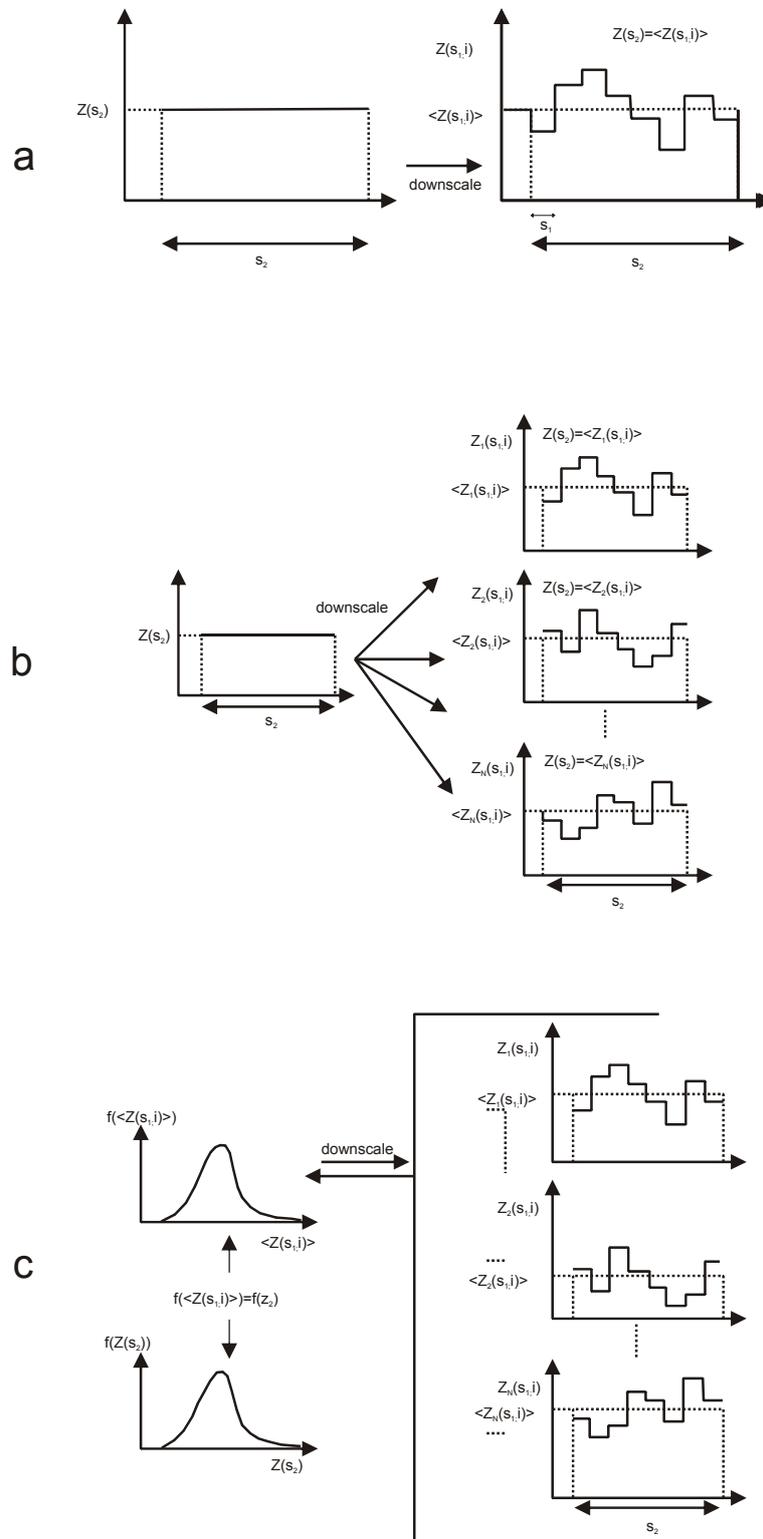


Abbildung 4.4 a–c: Klassifizierung möglicher Downscaling Methoden

Quelle: grafisch aufbereitet nach BIERKENS et al. (2000)

Unbedingt stochastisch:

Der Mittelwert des Parameters ist in der Skale s_2 nicht exakt bekannt. Anstelle dessen ist eine mögliche Verteilungsfunktion des Mittelwertes bekannt. Es existieren mehrere Funktionen, welche die zeitliche und räumliche Varianz der Skale s_1 beschreiben, so dass die Wahrscheinlichkeitsfunktion der s_2 -Mittelwerte gleich der bekannten Wahrscheinlichkeitsfunktion des Mittelwertes ist. Da die exakte Verteilung der Skale s_2 nicht bekannt ist, müssen nicht alle Realisationen (Teilfunktionen) den gleichen Mittelwert besitzen. Es ist hinreichend, dass die S_2 -Mittelwerte aller Realisationen zusammen die gleiche Wahrscheinlichkeitsfunktion des Mittelwertes besitzen.

Die vorliegende Arbeit liefert einen methodischen Beitrag sowohl zu den Aspekten der Heterogenität von Bodenmerkmalen auf verschiedenen Skalenebenen als auch zu den Möglichkeiten der Disaggregation von Bodenbasisdaten mittelmaßstäbiger Kartenwerke.

Im Hinblick auf die von SINOWSKI (1995) dargelegten Modellvorstellungen ist zu prüfen, wie homogen Bodeneigenschaften in einem klassischen Konzeptkartenansatz mittels diskreter Kartiereinheiten auf verschiedenen Skalenebenen abzubilden sind. Der Vergleich der Ausgangsheterogenität der Bodenübersichtskarte 1:50.000 mit dem Referenzdatensatz liefert Erkenntnisse zum „Skaleneffekt“ von Bodenbasisdaten.

Die berechneten Heterogenitätsindizes werden zeigen, wie eng das Ausmaß der Heterogenität an das geologische Ausgangsmaterial bzw. an Reliefparameter gekoppelt ist und ob eine Korrelation zwischen Kartiereinheitsgröße und dem Ausmaß der Variabilität nachzuweisen ist (vgl. hierzu BECKETT & WEBSTER, 1971).

Der gewählte Disaggregierungsansatz fußt auf den hierbei gewonnenen Kenntnissen. Gleichzeitig liefert der Ansatz Aussagen, welcher Anteil der Variation durch die Pedogenese erklärbar und wie hoch die nicht-funktionale Variation der Bodenbasisdaten ist (vgl. hierzu HENNINGS, 1991).

5 Heterogenitätsmaße

5.1 Einleitung

Heterogenitätsmaße sind Indikatoren für die Ausprägung von Werten (Bodeneigenschaften oder Bodenkennwerten) innerhalb einer betrachteten und klar abzugrenzenden Einheit. FUCHS (2002, S.44) unterscheidet zwischen Heterogenitäts- und Diversitätsmaß:

- Diversität bezeichnet die quantifizierbaren Größen, die mit der Proportion der Häufigkeiten berechnet werden.
- Heterogenität bezeichnet die quantifizierbaren Größen, die mit der Proportion der Flächengrößen berechnet werden.

Auf Grund des GIS-gestützten Ansatzes werden innerhalb dieser Arbeit nur flächengewichtete Maße genutzt. Demzufolge werden nach FUCHS (2002) nur Heterogenitätsmaße verwendet. Häufig werden in der Literatur die Begriffe Variabilität, Heterogenität, Kontrast oder Diversität sehr unterschiedlich verstanden und genutzt. Diese Arbeit orientiert sich an folgenden Begriffsinhalten:

Heterogenitätsmaße sind Indizes, welche die Varianzbreite von (Boden)-Daten aufzeigen. In dieser Arbeit wird in den Kartiereinheitengrenzen der BÜK50, später auch in den Disaggregierungsstufen 1 und 2, die Varianz (Heterogenität) der Bodenbasisdaten anhand des Referenzdatensatzes bestimmt. Es erfolgt eine Überprüfung der Grenzlinienziehung bzw. der hiermit einhergehenden Heterogenität. Demzufolge wird kein Kontrast (Differenz) zwischen den Bodeneigenschaften (z.B. Schluffgehalten) der BÜK50 und den Bodenschätzungsdaten gebildet. Da mit Hilfe der Heterogenitätsindizes Varianzen bzw. Variabilität erklärt werden, sind innerhalb dieser Arbeit die Begriffe synonym zu verstehen.

Kontrastmaße sind dagegen Indikatoren für den Vergleich zwischen zwei Wertegruppen (hier Maßstäben). Hierbei werden Differenzen (Kontraste) zwischen zwei vergleichenden Kartengrundlagen gebildet. Die Nutzung des Begriffes „Kontrast“ unterscheidet sich somit von dem Gebrauch durch ALTMANN & HAASE (1984), die unter Kontrast die Spannweite von Mess- oder Kennwerten in einem fest definierten Raumausschnitt verstehen.

5.2 Verwendete Kontrastmaße

Kontrastmaße sind Prüfgrößen zur Beurteilung von Prognosen. In dieser Arbeit bedeutet dies, dass Differenzen zwischen den Karteninhalten (z.B. Ton-, Schluff- und Sandgehalte, Kalkgehalte) der Bodenübersichtskarte 1:50.000 und des Referenzdatensatzes Bo5 gebildet werden. GIS-technisch ist diese Gegenüberstellung mittels Verschneidung beider Kartenebenen zu erzielen. Da die Kontrastmaße zu unterschiedlichen Flächengrößen gehören, muss bei GIS-gestützten Analysen immer ein flächengewichtetes Maß gebildet werden.

Innerhalb dieser Arbeit werden nur metrische Bodeneigenschaften bewertet und daher werden nur Indizes für metrische Skalen als mögliche Kontrastmaße geprüft. Demzufolge ist der Einsatz taxonomischer Kontrastmaße für ordinal skalierte Größen, wie z.B. der Kontrastindex von AMOS & WHITESIDE (1975, vgl. LÖSEL, 2005), weniger sinnvoll. WEBER (1995) liefert in Anlehnung an DAMMERS (1993) Aussagen zu Auswahlmöglichkeiten und speziellen Charakteristiken von metrischen Gütemaßen. DAMMERS (1993) unterscheidet hierbei einfache, relative, quadratische und proportionale Gütemaße wie folgt:

Einfache Gütemaße	
$Dev_t = (P_t - O_t)$	Abweichung (Deviation)
$AE_t = P_t - O_t $	Absoluter Fehler (Absolute Error)
$ME = \frac{1}{M} \sum (P_t - O_t)$	Mittlerer Fehler (Mean Error)
$MAE = \frac{1}{M} \sum P_t - O_t $	Mittlerer absoluter Fehler (Mean Absolute Error)
Relative Gütemaße	
$PE_t = \frac{(P_t - O_t)}{O_t} \cdot 100\%$	Prozentualer Fehler (Percentage Error)
$APE_t = \left \frac{(P_t - O_t)}{O_t} \cdot 100\% \right $	Absoluter prozentualer Fehler (Absolute Percentage Error)
$MPE = \frac{1}{M} \sum \frac{(P_t - O_t)}{O_t} \cdot 100\%$	Mittlerer prozentualer Fehler (Mean Percentage Error)
$MAPE = \frac{1}{M} \sum \left \frac{(P_t - O_t)}{O_t} \right \cdot 100\%$	Mittlerer absoluter prozentualer Fehler (Mean Absolute Percentage error)
$AMAP = \frac{1}{M} \sum \frac{ P_t - O_t }{\frac{1}{2}P_t + O_t} \cdot 100\%$	Angepasster mittlerer absoluter prozentualer Fehler (Adjusted Mean Absolute Percentage Error)
Quadratische Gütemaße	
$MSE = \frac{1}{M} \sum (P_t - O_t)^2$	Mittlerer quadratischer Fehler (Mean Square Error)
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum (P_t - O_t)^2}$	Wurzel aus Mittlerem quadratischen Fehler (Root Mean Square Error)
$R^2 = \frac{1}{M} \frac{\sum ((P_t - \bar{P}) \cdot (O_t - \bar{O}))^2}{s_p^2 \cdot s_o^2} \cdot 100\%$	Determinationskoeffizient (Coefficient Of Determination)
$RMSP = \sqrt{\frac{1}{M} \sum \frac{(P_t - O_t)^2}{O_t^2}} \cdot 100\%$	Wurzel aus mittlerem quadratischem prozentualen Fehler (Root Mean Square of Percentage Error)
Proportionale Gütemaße	
$Q_{1t} = \frac{P_t}{O_t}$	Keyfitz's Q1
$Q_{2t} = \frac{(P_t - O_T)}{(O_t - O_T)}$	Keyfitz's Q2
$if \dots O \geq P, EF = \frac{O_t}{P_t} \dots if \dots O < P, EF = \frac{P_t}{O_t}$	Fehlerfaktor (Error Factor)

t Zeitpunkt t
 P_t Vorhergesagter (Predicted) Wert zum Zeitpunkt t
 O_t Beobachteter (Observed) Wert zum Zeitpunkt t

Tabelle 5.1: Einfache, relative, quadratische und proportionale Gütemaße.

Quelle: WEBER (1995) in Anlehnung an DAMMERS (1993)

Die einfachen Gütemaße zeigen an, wie groß die Abweichung zwischen den vorher gesagten (Predicted) und beobachteten (Observed) Werten ist. Mittlere Fehler wie der ME erlauben eine Aussage, inwiefern die vorhergesagten Werte im *Durchschnitt* den beobachteten Werten entsprechen. Somit sind Vergleiche auf der Kardinalskala möglich. Beim Vergleich von zwei Prognosen (P1, P2) ließe sich z.B. aus einer Halbierung des ME schließen, dass Prognose 1 doppelt so gut ist wie Prognose 2. Problematisch beim ME ist, dass sich Über- und Unterschätzungen ausgleichen können. Dies kann durch den Einsatz des MAE unterbunden werden, welcher alle Prognosefehler gleich gewichtet.

Relative Prognosemaße setzen die beobachteten Werte zu den vorhergesagten Werten in Beziehung. Beim prozentualen Fehler können sich negative und positive Werte ausgleichen. Dies ist bei den anderen relativen Gütemaßen nicht der Fall.

Die quadratischen Gütemaße haben etwa den gleichen Einsatzbereich wie die einfachen Gütemaße. Im Gegensatz zu letzteren werden allerdings die Abweichungen zwischen den vorhergesagten und beobachteten Werten quadriert. Durch das Quadrieren werden größere Abweichungen stärker gewichtet. Diese Gewichtung ist etwas problematisch, da der MSE sehr empfindlich auf einzelne Ausreißer reagiert. Dies gilt auch für den RMSE, obwohl dieser den Vorteil besitzt, dass er die gleiche Maßeinheit wie die Beobachtungswerte besitzt. Dies erleichtert die inhaltliche Interpretation. Der RMSE ist das in der Literatur am häufigsten verwendete quadratische Maß für die Beurteilung von Prognosen.

Proportionale Fehlermaße berechnen den Prognosefehler als den Quotienten aus Prognosewert und beobachtetem Wert. Bedingungen wie bei der Definition des EF/MEF sorgen dafür, dass nur positive Werte aufsummiert werden. Proportionale Maße können einfache Verhältniszahlen wie z.B. Hervorgesagter Wert/Gemessener Wert sein (KEYFITZ Q1, vgl. KEYFITZ (1972)) oder z.B. Differenzen zwischen vorhergesagten (oder beobachteten) Werten und der Größe dieser Werte zu einem festen Zeitpunkt. KEYFITZ (1972) erklärt dies anhand der Vorhersage der Population in den Vereinigten Staaten: 1935 wurde die Bevölkerungszahl für 1970 prognostiziert. Schätzungen ergaben eine Bevölkerungszahl von 155 Mill. Menschen. Tatsächlich lebten im Jahr 1970 203 Mill. Menschen in den USA. Der Fehler scheint mit 48 Mill. enorm. Q1 ergibt mit $155/203 = 0.76$. Als die Prognose getätigt wurde (1935), lebten 127 Mio. Menschen in den USA. Würden diese von den vorhergesagten und beobachteten Werten subtrahiert werden, so ergäbe sich ein $Q2 = 0,37$. KEYFITZ unterstreicht damit, dass bei Prüfung der Qualität einer Vorhersage bei proportionalen Maßen immer die Bezugsgröße beobachtet werden muss.

Innerhalb dieser Arbeit wird auf Grund der Fehlergewichtung und seiner anschaulichen Interpretation der $MAE_{\#}$ genutzt. Der Index $\#$ weist darauf hin, dass die Indizes mit der Flächengröße gewichtet wurden. Die Gewichtung ist im Fall GIS-gestützter Analysen von besonderer Bedeutung, da Fehler auf der Basis unterschiedlicher Flächeninhalte gewichtet werden müssen. Auf Grund des Vektoransatzes können auf kleinsten Verschneidungseinheiten sehr große Kontraste entstehen. Aus diesem Grunde ist der Einsatz eines quadrierten Fehlermaßes weniger sinnvoll. Die Nutzung relativer Gütemaße bot sich ebenfalls nicht an, da bereits die Fehler als Prozentangaben (z.B. Masseprozent Schluff) vorliegen. Tabelle 5.2 zeigt den Vergleich zwischen dem RMSE, dem ME und dem MAE für eine fiktive 15 Hektar große Kartiereinheit der BÜK50.

Polygon-Nr.	Flächeninhalt	BÜK50	Bo5	Differenz	Differenz, gewichtet	Differenz, gewichtet, quadriert
	[m ²]	[Masse-%]	[Masse-%]	[Masse-%]	[m ²]*[Masse-%]	([m ²]*[Masse-%]) ²
1	5.26	76	2	74	389.24	28803.76
2	500.12	76	93	-17	-8502.04	144534.68
3	5000.15	76	93	-17	-85002.55	1445043.35
4	5000.09	76	76	0	0	0
5	4494.38	76	12	64	287640.32	18408980.48
Summe	15000				194524.97	20027362.27
Summe, Betrag					381534.15	

ME _f	MAE _f	RMSE _f
[Masse-%]	[Masse-%]	[Masse-%]
13.0	25.4	36.5

Tabelle 5.2: Vergleich der flächengewichteten Fehlermaße: Mittlerer Fehler (ME_f), Mittlerer Absoluter Fehler (MAE_f) und Wurzel der Mittleren Quadrierten Differenz (RMSE_f) bei der Beurteilung einer 15 Hektar großen lössdominierten Einheit.

Aus den Werten wird ersichtlich, wie unterschiedlich die einzelnen Fehlermaße sein können. Beim RMSE_f verstärkt die große Differenz beim Polygon Nummer 6 das Kontrastmaß. Der mittlere Fehler zeigt ein deutlich zu geringes Fehlermaß an, da sich positive und negative Abweichungen ausgleichen. Der mittlere absolute Fehler zeigt eine adäquate Wiedergabe des Fehlermaßes und wurde somit in Kapitel 7 zur Beurteilung des Kontrastes zwischen der BÜK50 und dem Referenzdatensatz verwendet.

5.3 Neu Entwickelte Heterogenitätsmaße

Heterogenitätsmaße sollen neben Aussagen zur Homogenität eines Areals auch als Indiz für die weitere Disaggregationwürdigkeit einer Einheit (Festlegung von Schwellenwerten für die Indizes) sowie als Maß für die Verbesserung eines Downscaling-Schrittes dienen. Darüber hinaus ist es denkbar, dass diese Maße in zukünftige Legendenkonzepte integriert werden, um den Nutzer mittelmaßstäbiger Bodenkarten quantitative Informationen zur Varianz einzelner Bodeneigenschaften zu liefern.

Bevor die eigens entwickelten Maße näher erläutert werden, soll ein Einblick in die in der Literatur gefundenen Heterogenitätsmaße gegeben werden. Eine sehr gute Übersicht sowie eine ArcInfo-konforme Plattform zur Berechnung der Maße liefert Tabelle 5.3 in Anlehnung an FUCHS (2002).

Die Shannon-Indizes sind Entropiemaße und basieren auf den Untersuchungen von SHANNON & WEAVER (1949, S.19–26). Shannons Diversitäts-Index summiert die verschiedenen Bedeckungsgrade (Anteil der Merkmalsausprägung xy innerhalb der untersuchten Kartiereinheit an der Gesamtarealgröße dieser Kartiereinheit) auf. Der Index steigt durch höhere Klassenanzahl (richness) sowie durch zunehmende flächenmäßige Gleichverteilung (evenness). Die Werte schwanken zwischen 0 (1 Klasse) bis zum theoretisch unendlich großen Logarithmus naturalis der Klassenanzahl. Beim Shannons Ebenheits-Index handelt es sich um ein normiertes oder standardisiertes Format des SHDI, welches das Verhältnis der aktuellen Heterogenität zur maximalen Heterogenität ausdrückt. Eine Anwendung des Shannons-Indexes liefert LANG (1999). Der Shannon-Diversitäts-Index wird in der Literatur auch als Shannon-Wiener Function (SHANNON & WEAVER, 1948; WIENER, 1948) bezeichnet.

Die Simpson-Indizes gehen auf die Arbeiten von SIMPSON (1949) zurück. Der Simpsons Diversitäts-Index Diversität berechnet die Wahrscheinlichkeit, dass zufällig ausgewählte Flä-

chen verschiedenen Typen angehören. Zur ausführlichen Beschreibung der Maße kann die Arbeit von FUCHS (2002) Seite 70ff herangezogen werden.

$SHDI = - \sum_{i=1}^m (p_i \cdot \ln p_i)$	$0 \leq SHDI \leq \ln m$	Shannons Heterogenitäts-Index
$SIDI = 1 - \sum_{i=1}^m p_i^2$	$0 \leq SIDI < 1$	Simpsons Heterogenitäts-Index
$MSIDI = 1 - \ln \sum_{i=1}^m p_i^2$	$MSIDI \geq 0$	Modifizierter Simpsons Heterogenitäts-Index
$SHEI = \frac{- \sum_{i=1}^m (p_i \cdot \ln p_i)}{\ln m}$	$0 \leq SHEI < 1$	Shannons Ebenheits-Index
$SIEI = \frac{1 - \sum_{i=1}^m p_i^2}{1 - \frac{1}{m}}$	$0 \leq SIEI < 1$	Simpsons Ebenheits-Index
$MSIEI = \frac{1 - \sum_{i=1}^m p_i^2}{\ln m}$	$0 \leq MSIEI < 1$	Modifizierter Simpsons Ebenheits-Index
$PR = m$	$m = \text{Anzahl der Flächentypen/Klassen}$	Anzahl von Flächentypen
$PRD = \frac{m}{A} (10000)(X)$	$PRD > 0$ $A = \text{Flächengröße in m}^2$	Anzahl pro Hektar

$p_i = \text{Proportion von Flächeninhalt des Wertes } x / \text{gesamten Flächeninhalt } \sum_1^n X_i$
 $m = \text{Anzahl der Klassen}$

Tabelle 5.3: Heterogenitätsmaße.

Quelle: (FUCHS, 2002)

In der Biosystemforschung wird unter Diversität die Artenvielfalt und unter Heterogenität die Varianz der abiotischen Faktoren verstanden. BAUMANN (2001) zeigt ein einfaches Entropie-maß, welches im Prinzip nur den Quotienten aus dem beobachteten Flächeninhalt zum gesamten Flächeninhalt (p_i , s.o.) bildet. Allerdings ist die Vorgehensweise bei der Klassenfindung in kontinuierlichen Datenspektren erwähnenswert: Nach der Prüfung auf Normalverteilung wird der Datensatz ggf. in eine Normalverteilung transformiert. Danach wird der Mittelwert der Verteilung (\bar{x}) und die Standardabweichung (σ) berechnet. Die Klassenbildung geschieht anschließend wie folgt:

$$(x < \bar{x} - \sigma < x < \bar{x} - \frac{1}{2}\sigma < x < \bar{x} < x < \bar{x} + \frac{1}{2}\sigma < x < \bar{x} + \sigma < x)$$

↓

↓

↓

↓

↓

↓

1
2
3
4
5
6
[Klasse]

Hiernach erfolgt die Zusammenlegung der Klassen und Berechnung des Entropiemaßes. In der Literatur sind noch weitere gebräuchliche, allerdings nicht so weit verbreitete Indizes, zur Messung der Diversität/Heterogenität zu finden. Beispiele auf die nicht näher eingegangen wird, sind der Brillouin-Index (BRILLOUIN, 1962), der PIE Diversitäts-Index (HURLBERT, 1971), der McIntosh's-Index (MCINTOSH, 1967), Margalef's Diversity-Index (Margalef, 1958), Menhnick's Index (MENHINICKS, 1964) oder Smith & Wilson Evenness-Index (SMITH & WILSON, 1996).

FUCHS (2002) nutzt die vorgestellten Formeln der Entropie, um Merkmalsausprägungen in fest definierten Kartiereinheiten zu beschreiben. Problematisch für den Anwender sind die nur schwer zu interpretierenden Werteausprägungen, die diese Indizes annehmen können. So stellt sich die Frage, worin z.B. die Unterschiede bestehen, wenn der SIEI Werte von 0,7 oder 0,9 annimmt. Zwar weiß der Anwender, bei welchem Wert die Fläche weniger heterogen ist, allerdings ist beim Vergleich von Werten untereinander der Homogenitätsunterschied nur schwer zu durchschauen. Fuchs (2002) liefert mit dem auf ArcInfo basierende Programm z.B. bei der Kartenerstellung sehr gute Beiträge, da die Heterogenität für verschiedene Grenzziehungen schnell geprüft werden kann. Er nutzt in der Literatur gebräuchliche Maße um den Generalisierungsfehler bei der Aggregation von Kartiereinheiten zur Erstellung von Kartenwerken mit kleineren Maßstäben möglichst gering zu halten. Als Heterogenitätsmaße für zukünftige Legendeneinheiten sind diese Maße aber für den Nutzer von Bodenkarten wohl zu schwer zu interpretieren.

Aus diesen Gründen wurden eigene Indizes entwickelt, die

- Kartiereinheiten bezüglich der Heterogenität anhand von Histogrammen beurteilen können,
- relativ einfache statistische Maße verwenden (im Hinblick auf die Verwendbarkeit in zukünftigen Legendenkonzepten und der Handhabbarkeit durch den Nutzer) und
- auf der Basis der Informationsgrundlage des NIBIS zu berechnen sind.

Auf Grund der meist polymodalen und asymmetrischen Verteilungsform der Bodenbasisdaten (vgl. Abb. 5.1) ist die Verwendung gebräuchlicher Lokalisations- und Dispersionsmaße wie Mittelwert, Standardabweichung oder Varianz nicht sinnvoll. Aus diesem Grunde wurden die folgenden Heterogenitätsmaße für die Beurteilung der Arealsheterogenität entwickelt und auf ihre Aussagekraft und allgemeine Anwendbarkeit geprüft. Die Indizes basieren z.T. auf bekannten statistischen Maßen (z.B. Interdezilbereiche). Ihre Kombination und der Kontext der Anwendung sind dagegen neu. Im Gegensatz zur allgemeinen Statistik werden in Geographischen Informationssystemen die Häufigkeiten immer mit dem Flächeninhalt gewichtet. Abbildung 5.1 zeigt die verwendeten und entwickelten Heterogenitätsmaße, die im Folgenden näher vorgestellt werden.

Hauptprüfmaße

Homogenitätsindex (H-Index):

Zur Beurteilung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen muss zunächst die zentrale Tendenz der Verteilung ermittelt werden. Aus der Statistik bietet sich der Modalwert oder Modus der Verteilung an.

Der Homogenitätsindex ist ein eigens entwickeltes Maß zur Beurteilung der zentralen Tendenz einer Verteilung. Er summiert sich aus dem Flächenanteil, der vom Modalwert \pm eines parameterabhängigen Toleranzbereichs eingenommen wird. Im vorliegenden Beispiel (siehe Abbildung 5.1) beträgt der Modalwert 25 [%](Schluff-Peak bei 76 [Masse-%]). In der Spanne (Toleranzbereich ± 10 [Masse-%]) liegen 5 Peaks, deren Flächeninhalt summiert 55,5 [%] ergibt. Somit beträgt der H-Index 55%.

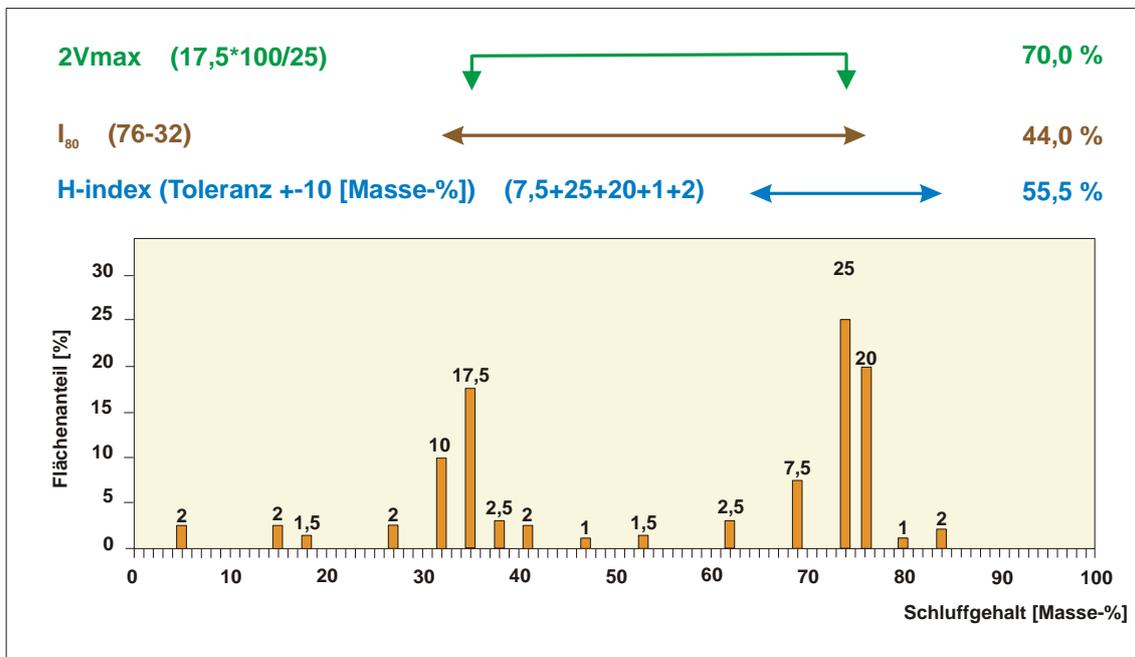


Abbildung 5.1: Verteilung der Schluffgehalte in einer Kartiereinheit der BÜK50: das Beispiel Braunerde auf Silikatgestein

Der Name des Indexes ist ein eigens erdachter Begriff und hat nichts mit dem gleichnamigen Maß im Sinne der Guttman-Skala (vgl. LOEVINGER, 1948, LIENERT & RAATZ, 1994, S.100) zu tun.

Festlegung des Schwellenwerts für die Berechnung des Homogenitätsindexes:

Es wurden zunächst H-Indizes mit unterschiedlichen Schwellenwerten für die Ton-, Schluff- und Sandfraktion berechnet. Der Schwellenwert wurde direkt aus dem zugehörigen Bodenartendiagramm (vgl. Abbildung 5.2) der Bodenartenuntergruppen nach KA3 (1982) ermittelt. Es handelt sich hierbei um die mittlere Klassenbreiten der einzelnen Bodenartenuntergruppen.

Diese betragen für die Tongehalte 10 %, für die Schluffgehalte 21 % und für die Sandgehalte 27 %. Bei der Betrachtung der mittleren Klassenbreiten aller im Untersuchungsgebiet vorkommenden Bodenartenuntergruppen ergibt sich, ohne Berücksichtigung der Flächenanteile der einzelnen Bodenartenkürzel, eine mittlere Klassenbreite beim Ton von etwa 9 %, beim Schluff etwa 22 % und beim Sand von 27 %. Die Schwellenwerte sind somit fast identisch und somit wären Toleranzbereiche (\pm) von 5 % beim Ton, 10 % beim Schluff und 13 % beim Sand denkbar. Würde diese Schwellenwerte zur Berechnung des Homogenitätsindex herangezogen, würde dieser bezüglich der Korngrößenanteile etwa eine Klassenbreite abdecken. Dies hätte allerdings zur Folge, dass die Ton-, Schluff- und Sand-Homogenitätsindizes nicht mehr direkt untereinander vergleichbar wären. Darüber hinaus

werden Bodenartenuntergruppen metrisiert, um diese für Modellanwendungen zu nutzen. Um die Heterogenitätsindizes bei Modellanwendungen zu berücksichtigen, müssen die Spannweiten äquidistant sein. Eine Schwellenwertfestlegung, die auf der Spannweite einer Klassenbreite beruht, würde aus Sicht eines Modellanwenders zudem eine erneute Regruppierung dieser metrischen Daten beinhalten. Daher kam nur die Wahl eines festen Schwellenwertes für alle drei Kornfraktionen in Betracht. Im Hinblick auf die mittleren Klassenbreiten der drei Fraktionen wurde dieser Wert bei 20 % festgelegt. Der Homogenitätsindex ist somit sofort für den Anwender als eine Flächengröße interpretierbar, die 20 % des möglichen Korngrößenspektrums beinhaltet. Hinsichtlich der Klassenbreite des Schwellenwertes bedeutet dies, dass etwa eine Klassenbreite der Schluffgehalte, zwei Klassenbreiten der Tongehalte und etwa 0,75 Klassenbreiten der Sandfraktionen abgedeckt werden.

Die Festlegung von Schwellenwerten ist, auf Grund der besonderen Klasseneinteilung im Bodenartendiagramm, nur für die Kornfraktionen sinnvoll. Daher wurden die Schwellenwerte bei der Berechnung der H-Indizes für die Kalkgehalte auf 0 gesetzt. Dies hat zur Folge, dass der Homogenitätsindex dem Modalwert entspricht.

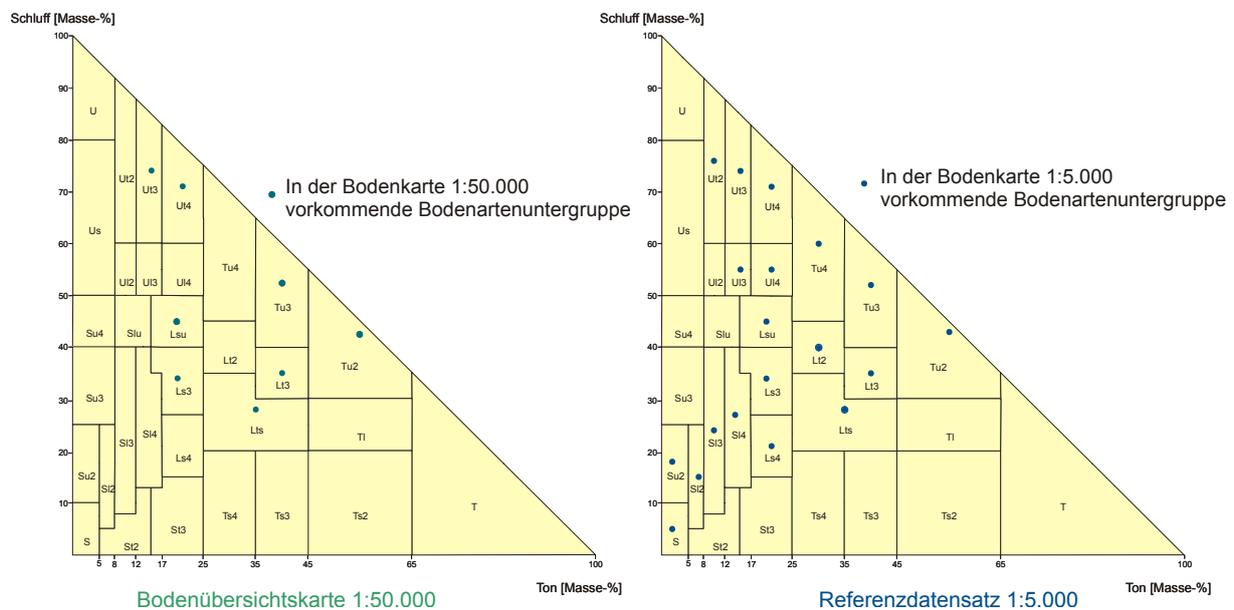


Abbildung 5.2: Vorkommende Bodenartenuntergruppen der BÜK50 und Bo5 im Untersuchungsgebiet

In Abbildung 5.2 werden die Bodenartenuntergruppen beider Maßstabsebenen für alle Profiltiefen vorgestellt. Wie aus der Anordnung für den Referenzdatensatz ersichtlich, sind die Tongehalte z.B. für die Bodenartenuntergruppenkürzel Ls4, Ls3, Lsu, UI4 und Ut4 nahezu identisch mit 21 % bzw. 20 % ausgewiesen. Für die Schluffgehalte lässt sich auf Grund der unterschiedlichen Klasseneinteilung diese Homogenität höchstens bei den Bodenartenuntergruppen UI3 und UI4 feststellen. Somit ist an dieser Stelle bereits davon auszugehen, dass die Tongehalte homogener als die beiden anderen Fraktionen sind. Die Ergebnisse in Kapitel 7 bestätigen dies.

Wird diese Tatsache flächengewichtet z.B. für die Tiefe 10 cm ausgewertet, so ergibt sich folgendes Bild für die Lössprofile (vgl. Tabelle 5.4). Dass lössdominierte Profile bei den Sand- und Schluffgehalten breitere mittlere Spannweiten als lössfreie Kartiereinheiten aufweisen,

ist zunächst verwunderlich. Die Erklärung liegt in der vergleichbar größeren Spannweite der im Löss auftretenden Bodenartenuntergruppen. Dies sind vor allem Ut3 und Ut4, welche Spannweiten von über 30 % sowohl beim Schluff als auch beim Sand ausweisen (Abbildung 5.2). Die daneben im Untersuchungsgebiet zu beobachtenden Bodenarten wie Lt3 und Lts haben im Schluff mit etwa 20 % geringere Spannweiten, sind aber mit Spannen über 30 % beim Sand ebenfalls für den Anstieg der Mittelwerte verantwortlich. Lediglich Ls3 hat für die Sandgehalte mit 20 % und bei den Schluffgehalten mit 12 % eine relativ geringe Klassenbreite.

	flächengewichtet			nach Bodenartenuntergruppen		
	Ton	Schluff	Sand	Ton	Schluff	Sand
alle Profile	7.52	28.62	32.01	8.13	25.88	30.36
lössdominiert	6.02	34.97	35.89	6.73	31.97	33.97
lössfrei	8.68	23.69	29.03	8.75	23.16	28.75

Tabelle 5.4: Durchschnittliche Spannweiten [Masse-%] der im Untersuchungsgebiet in 10 cm Profiltiefe vorkommenden Bodenartenuntergruppen.

Interdezilbereich I_{80} :

Neben dem Homogenitätsindex als Zentralmaß (Modus +/- Schwellenbereich) für die Höhe von Histogrammen ist im nächsten Schritt für eine adäquate Beurteilung der Breite einer Verteilung ein weiteres Streuungsmaß erforderlich. Als anschaulicher Indikator können die aus der allgemeinen Statistik bekannten Streuungs- oder Dispersionsmaße wie z.B. der Interquantilbereich fungieren. Da der Interquantilbereich nur 50 % des Flächeninhalts berücksichtigt und zudem auf mehrgipfelige Verteilungen weniger gut anwendbar ist, musste ein Streuungsmaß gefunden werden, welches die Fläche repräsentativ berücksichtigt und gleichzeitig Ausreißer der Verteilung nicht einbezieht. Da die Spannweite zu stark von Extremwerten abhängt, wurde der Interdezilbereich I_{80} verwendet. Der I_{80} berücksichtigt 80 % der Fläche des Wertespektrums (vgl. Abbildung 5.1) und ermöglicht einen guten Überblick über die Breite einer Verteilung, ohne die Extremwerte mit einzubeziehen. Hierzu wird das Wertespektrum in zehn, nach Flächeninhalt gleich große Teile, untergliedert (Dezile). In der Abbildung 5.2 werden vom linken und rechten Rand der Verteilung 10 Flächenprozent subtrahiert. Dies bedeutet, dass auf der linken Seite der Verteilung 4 Peaks ($2+2+1,5+2 = 7,5$) und auf der rechten Seite zwei Peaks ($2+1 = 3$) eliminiert werden. Die Peaks bei 32 % und bei 76 % sind vom Flächeninhalt so hoch, dass diese bei Addition den Schwellenwert überschreiten würden. Somit liegt der Interdezilbereich im gewählten Beispiel bei 44 %.

Zusätzliche Prüfmaße

Zweites Verteilungsmaximum (2Vmax):

Dieses Kriterium ermöglicht die Beurteilung, ob es neben dem durch den Homogenitätsindex bereits erfassten Verteilungsschwerpunkt noch weitere disaggregierungswürdige Flächenanteile (Peaks) innerhalb der Verteilung existieren. Aus diesem Grunde wird das (prozentuale) Verhältnis von Modalwert zum „zweiten“ Peak gebildet.

Der 2Vmax wird einmal prozentual zum Modalwert der Verteilung berechnet und in einem weiteren, eher GIS internen Schritt zur Hilfe bei der Abschätzung der weiteren Disaggregierungswürdigkeit, auch als absoluten Flächeninhalt [Prozent] innerhalb des Histogramms angegeben. Während die Prozentangabe bei der Validierung der Ergebnisse bzw. bei der Erstellung von „Idealhistogrammen“ für die gewählten Faktorkombinationen (BUEK50, Petrographie, SARA1) von Interesse ist, war der gesamte Flächeninhalt dieses zweiten Ver-

teilungsschwerpunktes eher bei der Kalibrierung des Modells von Interesse. In der Abbildung 5.1 beträgt der zweite Verteilungsschwerpunkt 17,5 % Flächenanteil. Bei einem Modalwert von 25 % Flächenanteil ergibt sich ein 2VMax von 70 %.

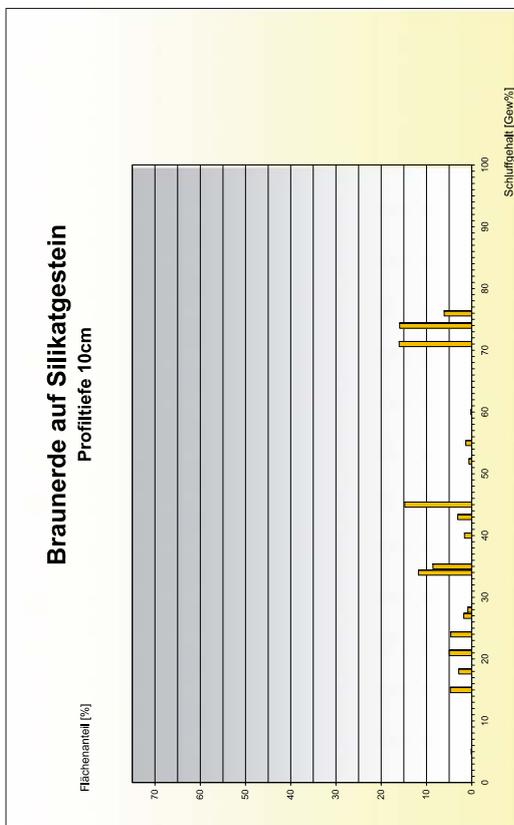
Restfläche:

Sinkt der Flächeninhalt der Polygone nach Ausführung der ersten Disaggregierungsstufe bzw. des ersten Verschneidungsschritts unter einen definierten Schwellenwert von 100m², wird dies in der Datenbank vermerkt. Die Fläche bleibt dann bei weiteren Disaggregierungsschritten unberücksichtigt. Diese Maßnahme verhindert die Entstehung von zu kleinen und damit unrepräsentativer Verschneidungsflächen.

Berechnung der Indizes

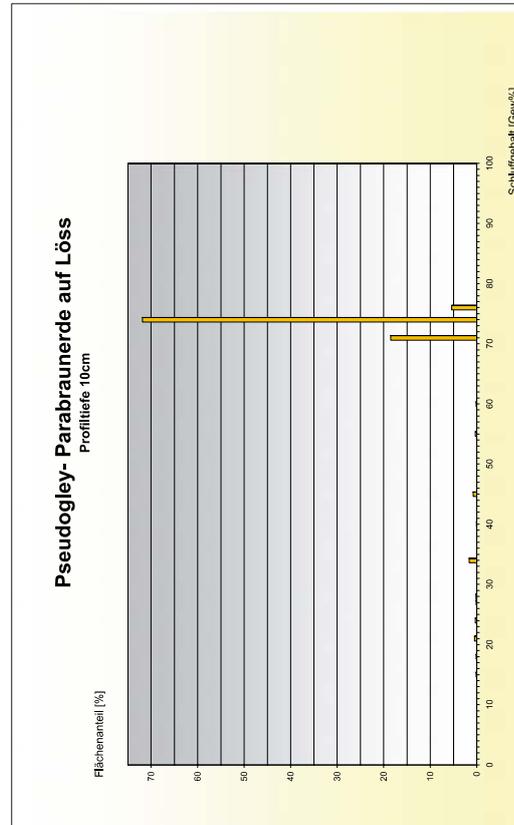
Die Berechnung der Indizes erfolgt direkt aus dem GIS mittels Personal-Geodatabase-Struktur durch angekoppelte SQL-Abfragen in MS-Access (vgl. Kapitel 6.2). Ein Disaggregierungsschritt ist als erfolgreich anzusehen, wenn für alle drei Maße Verbesserungen zu verzeichnen sind. Allerdings wird eine Fläche auch unterteilt, wenn nur der H-Index größer bzw. der Interdezilbereich kleiner bei der Zerschneidung der ursprünglichen Einheiten wird. Die Verbesserungen oder ggf. Verschlechterungen der Indizes werden in den GIS-Datenbanken nach jedem Verschneidungsschritt fortgeführt.

Zum Abschluss des Kapitels wird der Praxiseinsatz der Heterogenitätsmaße für den Nutzer noch einmal an einem Beispiel erläutert. Abbildung 5.3 visualisiert die Schluffgehalte von einer Braunerde auf Silikatgestein und eines Parabraunerde-Pseudogleys auf Löss in 10 cm Profiltiefe. Während die Schluffgehalte der Braunerde eine extrem heterogene Häufigkeitsverteilung aufweisen, ist der Pseudogley als sehr homogen einzustufen. Anhand der eigens entwickelten Heterogenitätsmaße kann der Nutzer derartiger Maße sich ein sehr genaues Bild der Histogramme machen. Der sehr hohe H-Index sowie der geringe Interdezilbereich und 2Vmax können bei der Pseudogley-Parabraunerde sofort als ein stark eingipfeliger Kurvenverlauf mit einer sehr geringen Spannweite und keinem zweiten Verteilungsschwerpunkt gedeutet werden. Die eigens entwickelten Heterogenitätsmaße für die Braunerde lassen anhand der Indizes auf einen flachen, zumindest zweigipfeligen Kurvenverlauf schließen, der abzüglich der Ausreißer mindestens 50 % der Spannweite der Schluffgehalte abdeckt. Somit ist der Nutzer derartiger Indizes, neben der Ersteinstufung bezüglich der Heterogenität, auch in der Lage, zwei Werteverteilungen miteinander in Bezug zu setzen. Die ist bei den in der Literatur üblichen Indizes nicht ohne weiteres möglich. Der gebräuchliche Shannons Heterogenitäts-Index variiert z.B. zwischen $0 < \text{SHDI} < \ln m$ ($m = \text{Klassenanzahl} = \text{Patches}$). Auf Grund der unterschiedlichen Anzahl der Klassen in den beiden vorgestellten Kartiereinheiten sind somit unterschiedliche Maxima beim SHDI möglich, die so nicht ohne Weiteres untereinander zu vergleichen sind. Der Anwender sieht auch beim SHDI, dass die Pseudogley-Parabraunerde homogener (0,92) als die Braunerde (2,43) ist. Der Kurvenverlauf der Werteverteilungen lässt sich aber so nicht abschätzen. Der SIDI von Simpson sowie die beiden Ebenheits-Indizes erlauben schon eher einen Vergleich von zwei Kartiereinheiten, da hier die Werte unabhängig von der Klassenanzahl zwischen 0 und 1 schwanken. Allerdings sind auch diese Werte als Legendenerweiterung für Kartennutzer nur schwer interpretierbar.



BRAUNERDE	
Shannons Heterogenitäts Index (SHDI)	2.43
Simpsons Heterogenitäts Index (SIDI)	0.89
Modifizierter Simpson Heterogenitäts Index (MSIDI)	2.23
Shannons Ebenheits Index (SHEI)	0.84
Simpsons Ebenheits Index (SIEI)	0.95
Modifizierter Simpson Ebenheits Index (MSIREI)	0.77
Patch-Anzahl im Cover	1597
Patch-Typen-Anzahl im Cover (100 ha)	18.00
Patch-Typen-Dichte im Cover (100 ha)	0.93

BRAUNERDE		
Homogenitäts- Index	38.1	[Flächen- %]
Interdezi ₁₀ - Bereich	53.0	[Masse- %]
2Vmax	92.0	[%]



PSEUDOOGLEY - PARABRAUNERDE	
Shannons Heterogenitäts Index (SHDI)	0.92
Simpsons Heterogenitäts Index (SIDI)	0.45
Modifizierter Simpson Heterogenitäts Index (MSIDI)	0.60
Shannons Ebenheits Index (SHEI)	0.33
Simpsons Ebenheits Index (SIEI)	0.48
Modifizierter Simpson Ebenheits Index (MSIREI)	0.22
Patch-Anzahl im Cover	666
Patch-Typen-Anzahl im Cover	16.00
Patch-Typen-Dichte im Cover (100 ha)	1.1281

PSEUDOOGLEY - PARABRAUNERDE		
Homogenitäts- Index	95.8	[Flächen- %]
Interdezi ₁₀ - Bereich	3.0	[Masse- %]
2Vmax	2.2	[%]

Abbildung 5.3: Vergleich verschiedener Indizes zur Beurteilung der Heterogenität von Kartiereinheiten.

6 Konzept und Aufbau eines Disaggregierungsmodells für reliefierte Gebiete

6.1 Downscaling – Varianten für Bodenkarten der mittleren Maßstabsebene auf Grundlage von Gesteinsuntergrund und Reliefsituation.

6.1.1 Gesteinsuntergrund

Als Datengrundlage für die Disaggregierungsstufe 1 wurde nur die petrographische Information der Geologischen Karte 1:25.000 benutzt. Hierdurch reduziert sich die Anzahl der unterschiedlichen Einheiten in der Karte von 620 Polygonen (Grenzziehung durch Stratigraphie, Petrographie und Genese) auf 241 Polygone (Grenzziehung durch Petrographie). Von den ehemals 42 unterschiedlichen Legendeneinheiten bleiben nach dem Zusammenführen der Karteninformation auf der Basis der Petrographie 15 unterschiedliche Einheiten übrig. Karte 6.1 zeigt die petrographischen Einheiten der GK25.

Es wurde die Informationsschicht Petrographie verwendet, denn

- im Hinblick auf die Praxistauglichkeit ist es nicht zu erwarten, dass als Eingangsgrundlage eine detaillierte, geologische Karte im Maßstab 1:25.000 vorliegt,
- der zusätzliche Disaggregierungserfolg bei der Nutzung der Informationsschicht „Geologie“ gegenüber der Datengrundlage „Petrographie“ relativ gering war,
- die Nutzung der GK25 in ihrer ursprünglichen Form zu sehr vielen Zersplitterungsflächen bei der Disaggregierung führt und
- das petrographische Ausgangsmaterial und nicht die Altersstellung primär für die Ausprägung der Bodeneigenschaften verantwortlich ist.

Nach ROSSITER (2000, S.37) beträgt die minimale darstellbare Flächengröße (MLA = Minimum delineation size) auf einer Karte im Maßstab 1:25.000 etwa 2,5 ha und auf einer Karte im Maßstab 1:50.000 ca. 10 ha. Die Werte wurden von ROSSITER (2000) nach dem Cornell-Ansatz (Cornell University Group on Adequacy of Soil Resource Inventories) berechnet. Dieser besagt, dass in publizierten Bodenkarten nur selten Flächen vorkommen, deren Flächeninhalt kleiner 0,4 cm² ist. VINK (1975) in FUCHS (2002) erachtet eine Mindestgröße von 0,25 cm² als Minimum, und erniedrigt somit den MLA einer Bodenkarte im Maßstab 1:50.000 auf 6,25 ha. 96,4 % der Polygone in der petrographischen Ausgangskarte haben einen Flächeninhalt >10 ha. Somit liegt die Informationsdichte in der neu geschaffenen petrographischen Karte etwa im Maßstab 1:50.000.

6.1.2 Relief

Das Relief ist ein entscheidender Steuerfaktor für die Bodenbildung (siehe dazu MILNE, 1935; MILNE, 1947; YOUNG, 1976; DIKAU ET AL., 1999; PARK et al., 2001; MCBRATNEY et al., 2003; MACMILLAN et al., 2004; MÖLLER; 2005)

Innerhalb dieser Arbeit soll geprüft werden, welche Reliefattribute für einen Downscaling-Ansatz genutzt werden können. Somit wurde basierend auf dem DGM5 zunächst eine detaillierte Reliefanalyse durchgeführt. Für die Untersuchung standen die Programme DIGEM (**D**igitales **G**elände-**M**odell, vgl. CONRAD, 1998), ArcInfo® 8.x (Esri®) und SARA (**S**ystem for **A**utomatic **R**elief **A**nalysis, KÖTHE & LEHMEIER, 1994) zur Verfügung. Zu einem späteren Zeitpunkt konnte noch das Modell **SAGA** (**S**ystem for **A**utomated **G**eoscientific **A**nalyses) der

Abteilung Physische Geographie der Universität Göttingen für weitergehende Untersuchungen genutzt werden. Folgende Reliefparameter wurden im Rahmen dieser Arbeit berechnet und werden an dieser Stelle in Anlehnung an CONRAD (1998) kurz vorgestellt.

Lokale Reliefparameter

Höhe (altitude) [m]

Höhe der Rasterzelle über Bezugspunkt NN.

Hangneigung (slope) [Grad] [%]

Winkel des stärksten Gefälles.

Exposition (aspect) [Grad]

Richtung des stärksten Gefälles.

Wölbung (curvature) [Grad d m^{-1}]

Wird durch Vertikal- oder Horizontalwölbung ausgedrückt.

Vertikalwölbung (profile curvature) [Grad m^{-1}]

Änderung der Hangneigung mit der Distanz.

Horizontalwölbung (plan curvature) [Grad m^{-1}]

Änderung der Exposition mit der Distanz.

Divergenz-Konvergenz-Index (Divergence Convergence Index) [%]

Wurde von KÖTHE & LEHMEIER (1994) konzipiert und ist ähnlich wie die Wölbung aufgebaut. Berücksichtigt allerdings die Abweichungen der Expositionswerte aller Nachbarzellen von der Richtung zur zentralen Rasterzelle.

Komplex-analytische Reliefparameter

Einzugsgebietsgröße (catchment area) [m²]

Gibt die Größe des Gebiets an, aus der eine Rasterzelle Abfluss erhält.

Spezifische Einzugsgebietsgröße [m]

Normiert die Einzugsgebietsgröße, indem diese durch die Länge der Höhenlinie, über die der Abfluss stattfindet, dividiert wird.

Angepasste Einzugsgebietsgröße [m²]

Nach BÖHNER IN HAGEDORN ET AL. (1999) modifizierte Einzugsgebietsgröße, dient zur Berechnung des Wetness-Indexes (s.u.).

Einzugsgebietsneigung [Grad]

Mittlere Hangneigung des Einzugsgebiets.

Einzugsgebietshöhe (upslope height) [m]

Durchschnittliche Höhe des Einzugsgebiets.

Fließweg (flow path length) [m]

Maximale Weglänge, die der Abfluss bis zum Erreichen eines Punktes zurücklegt; entspricht dem Faktor Hanglänge der Universal Soil Loss Equation (MOORE ET AL, 1994).

Abflussgebietsgröße (dispersal area) [m²]

Gebiet, das von einer Abflussmenge bis zum Erreichen der Tiefenlinie durchstrichen wird.

Höhe über Tiefenlinie (distance to channel network) [m]

Höhenunterschied für jede Rasterzelle bis zur zugehörigen Tiefenlinie.

relative Hanglänge

Quotient zwischen dem vom Abfluss bis zu einer Rasterzelle zurückgelegten Fließweg und dem Fließweg, der noch bis zum Erreichen des Talbodens zurückgelegt werden muss.

Distanz zur Wasserscheide (distance to watershed) [m]

Höhenunterschied für jede Rasterzelle bis zur Wasserscheide.

Komplex-analytische Reliefparameter

Bodenfeuchte-Index (Wetness Index)

Logarithmis naturalis des Quotienten aus spezifischer Einzugsgebietsgröße/Tangens der Hangneigung; Maß für die Beurteilung des Bodenwasserhaushaltes.

Modifizierter Bodenfeuchte-Index

Verwendet nach BÖHNER IN HAGEDORN ET AL. (1999) statt der spezifischen Einzugsgebietsgröße die angepasste Einzugsgebietsgröße.

Streampower-Index

Produkt aus Einzugsgebietsgröße und dem tangens der Hangneigung; Maß für die erosive Kraft des fließenden Wassers (MOORE ET AL., 1993).

Erosions-Index (sediment transport Index)

Ähnlich wie der Streampower-Index zu berechnen; berücksichtigt einige empirische Maßzahlen.

Die Anwendung der regressions- und korrelationsstatistischen Verfahren erbrachten ernüchternde Ergebnisse. Bei den Kornfraktionsgehalten lagen die meisten bivariaten Korrelationskoeffizienten [PEARSON] nahe Null. Somit konnten keine „einfachen“ linearen (mathematischen) Beziehungen zwischen den Kornfraktionen und den etwa 25 berechneten morphometrischen Kennwerten hergestellt werden. Auch multiple Korrelationsanalysen brachten keine nennenswerten Verbesserungen. MOORE ET AL. (1993) hingegen berechneten für die Kornfraktionen bzw. für die Humusgehalte multiple Korrelationskoeffizienten mit Bestimmtheitsmaßen von bis zu 63 %. Allerdings basierten die Berechnungen auf einem sehr kleinräumigen Gebiet in dem homogene Substrateigenschaften vorherrschten. HAGEDORN et al. (1999) fanden ebenfalls nur äußerst schwache Korrelationen und wendeten daher ebenfalls einen multivariaten Ansatz an, indem sie die geostatistischen Beziehungen zwischen ausgewählten Reliefmerkmalen und Bodenattributen untersuchen (Universal Krigging).

Der Untersuchungsweg führte demzufolge in die Richtung flächenhafter morphographischer Einheiten als Disaggregierungsparameter. Diese passen auf Grund der Polygonisierung der Ausgabeeinheiten auch besser zum ausgewählten Vektoransatz. Es bot sich an, dass Modell SARA (KÖTHE & LEHMEIER, 1994) zu nutzen. SARA kann in zwei Teilbereiche gegliedert werden: SARA-GR liefert als Kernprogramm eine morphographische Reliefauswertung (Kategorie 1, 2 und 3, s.u.) während SARA-ME als Unterstützungsprogramm für SARA-GR sich auf die Berechnung geomorphometrischer Reliefparameter (Höhe, Neigungsstärke, Exposition, Vertikal- und Horizontalwölbung, Ausweisung von Einzugsgebieten) beschränkt. SARA-GR erzeugt die folgenden drei Kategorien morphographischer Reliefeinheiten:

Kategorie 1 gliedert das Reliefgefüge in Scheitel, Hang und Tiefenbereiche sowie abflusslose Senkenbereiche.

Kategorie 2 gruppiert das Relief feiner. Es untergliedert das Relief der Hangrichtung folgend in Bereiche mit divergenten und konvergenten Abflussverhältnissen.

Kategorie 3 untergliedert das Relief der Hangfallrichtung folgend in Flächen zwischen konvexen und konkaven Neigungsunstetigkeiten (Kanten, Knicke).

Die verwendeten Algorithmen lassen sich KÖTHE & LEHMEIER (1994) entnehmen.

Die Verwendung der Reliefeinheiten der Kategorie 1 (vgl. hierzu Karte 6.2) zeigten die besten Ergebnisse bei der Minimierung der Merkmalsvarianz in der Disaggregierungsstufe 2 und wurden somit für die Disaggregierungsstufe 2 verwendet. Die Kategorien 2 und 3 lieferten viel zu detaillierte Informationen und waren nicht in das verwendete Vektormodell zu integrieren. Die Kategorie Sara 1 unterteilt das Reliefgeschehen in vier morphographische Einheiten (Scheitel, Hang- und Senkenbereiche sowie Ebenen). Um den Disaggregierungsalgorithmus nach ersten Versuchsläufen noch weiter zu verfeinern, wurde noch ein von REUTER (2004) umgesetzter Algorithmus [nach PENNOCK ET AL. (1987, 1994)] im Hinblick auf die Verwendbarkeit in der Disaggregierungsstufe 2 getestet. PENNOCK untergliedert das Reliefgeschehen in Anlehnung an SARA 1 in elf Kategorien, indem die in SARA 1 ausgewiesenen Kategorien in divergente, konvergente und planare Bereiche unterteilt werden. Die feinere Untergliederung des Reliefgeschehens brachte aber keinerlei Varianzminimierungen hinsichtlich der untersuchten Bodeneigenschaften. Hauptursache hierfür waren die viel zu kleinräumig ausgewiesenen Scheitelareale im Ansatz von PENNOCK. Demzufolge wurde die SARA-Kategorie 1 als Informationsgrundlage für die Disaggregierungsstufe 2 ausgewählt.

Der gewählte Disaggregierungsansatz soll an dieser Stelle anhand eines Beispiels verdeutlicht werden. Die Abbildung 6.1 zeigt den gewählten Disaggregierungsansatz für die Schluffgehalte in 10 Zentimeter Bodentiefe in der Profileinheit 539, einer Braunerde auf Sillikatgestein. Auf der linken Seite ist die Ausgangssituation innerhalb dieser Kartiereinheit dargestellt. Das Histogramm basiert auf Berechnungen, die auf der Grundlage des Referenzdatensatzes Bo5 durchgeführt wurden und zeigt die „reale“ Heterogenität dieser Kartiereinheit. Im ersten Verschneidungsschritt wird die Petrographie mit den Kartiereinheiten der BÜK50 verschritten. Im ausgewählten Beispiel sind nur die vier größten Verschneidungseinheiten (Minimum >40 ha) dargestellt. Es wird deutlich, dass die ursprünglich sehr flache und breite Verteilung in der Ausgangssituation bereits durch den ersten Verschneidungsschritt in die einzelnen Schwerpunkte der Ursprungsverteilung separiert (disaggregiert) werden kann. Die Schluff-, Sand- und Tonsteineinheiten zeigen deutliche Unterschiede bezüglich der untersuchten Schluffgehalte. Die Histogrammverläufe in diesen ersten Verschneidungseinheiten haben unterschiedliche Schwerpunkte sowie eine geringere Spannweite als die Ursprungseinheit. Lediglich die Wechsellagerungen zeigen rein optisch keine Verbesserung gegenüber der Ausgangssituation. Im nächsten Schritt erfolgt die Verschneidung der Kombinationen aus Kartiereinheit BÜK50/Petrographie mit der Reliefinformation. In der petrographischen Einheit Schluff zeigt eine Untergliederung in Scheitel-, Hang- und Senkenbereiche kaum Unterschiede zum Histogrammverlauf in der Disaggregierungsstufe 1. Die Verteilungen in lössdominierten Einheiten sind demzufolge in diesem Beispiel nicht durch die Reliefsituation beeinflusst bzw. die neben den sehr dominanten Lösspeaks (Ut3, Ut4) zu beobachtenden geringeren Schluffgehalte lassen sich nicht durch eine Reliefinformation separieren. Allerdings ist die Varianz bereits in der Disaggregierungsstufe 1 als relativ gering zu bewerten. In den Sandstein- bzw. Tonstein-Einheiten zeigt sich ein ähnliches Bild. Zwar gelingt es in den Scheitelbereichen der sanddominierten Einheiten, eine deutlich rechtslastige (linksschiefe)

Abbildung 6.1:
Der Ablauf der zweistufigen
Disaggregation am Beispiel
von Schluffgehalten in 10cm
Profiltiefe einer Braunerde auf
Silikatgestein.



Verteilung zu erzeugen, allerdings weisen die Hang- und vor allem die Senkenbereiche eine ähnliche Varianz wie in der Disaggregierungsstufe 1 auf. Tonsteine zeigen ebenfalls eine deutliche Minimierung der Varianz nach dem ersten Verschneidungsschritt. Diese bereits sehr homogenen Verhältnisse können zumindest in diesem Beispiel nicht weiter erhöht werden. Für die Wechsellagerung zeigt sich eine sehr gute Separierung der höheren Schluffgehalte in den Senkenbereichen. Somit ist die Disaggregierungsstufe 2 vor allem in den Bereichen wirksam, wo nach dem ersten Verschneidungsschritt noch erhebliche Varianzen zu beobachten sind.

6.2 Inhaltlicher Aufbau und GIS-technische Umsetzung des gewählten Disaggregierungsmodells

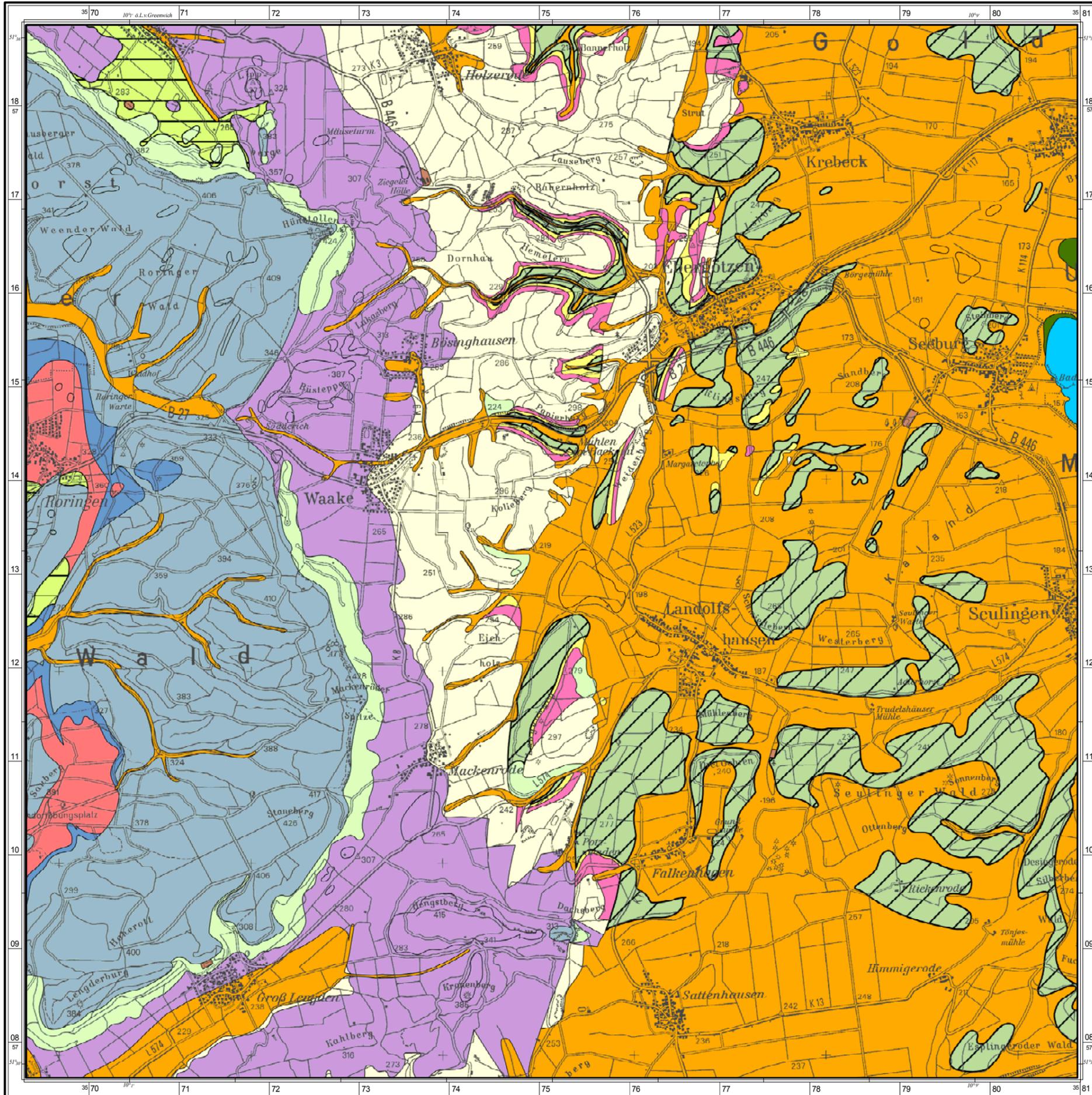
Abbildung 6.2 visualisiert den schematischen Aufbau der GIS-gestützten Umsetzung des Disaggregierungsverfahrens. Im ersten Schritt wird die Ausgangsheterogenität der Kartiereinheiten der BÜK50 festgestellt. Da keinerlei Grenzen verschoben werden, kann auch von einer inhaltlichen – im Gegensatz zu einer räumlichen – Bewertung gesprochen werden. Um die Heterogenität der als homogen in der BÜK50 ausgewiesenen Einheit zu überprüfen, muss zunächst die Bodenkarte 1:50.000 mit der Referenzkarte 1:5.000 (Bo5) im GIS verschritten werden. Im gewählten Beispiel wird die Kartiereinheit (I) aus 5 Untereinheiten der Bo5 (1, 2, 3, 4, 5) aufgebaut. Nach dem Verschneidungsschritt würden sich demzufolge aus einem Datenbankeintrag in der ursprünglichen Attributtabelle fünf neue Datensätze in der Verschneidungs-Datenbank ergeben. Das Histogramm für diese Einheit wird am Beispiel von Schluffgehalten in 10 cm Bodentiefe visualisiert. Auf der Basis dieser Histogrammverläufe erfolgt im nächsten Schritt die Berechnung der Heterogenitätsmaße.

Die Berechnung der Maße wird anhand von SQL-Programmierungen in Access-Datenbanken vorgenommen. Es wurde das Programm Access gewählt, da dieses Datenbanksystem ab ArcGIS Version 8.x über so genannte Personal Geodatabases vollständig kompatibel zum Geographischen Informationssystem der Firma ESRI ist. Für jede der drei zu prüfenden Heterogenitätsindizes wird eine eigenständige Datenbank programmiert. Die Programmierung ist – je nach untersuchten Bodeneigenschaften (Kornfraktionen, Kalkgehalte) – unterschiedlich. Die Berechnung der Indizes für die Kornfraktionen wurde für alle drei Kornfraktionen und zehn untersuchten Tiefen in einer Datenbank umgesetzt. Allein für die eine im Beispiel visualisierte Kartiereinheit der BÜK50 würden sich für die Berechnung eines Index für die Kornfraktionen bereits 5 (Datenbankeinträge = Untereinheiten der Bo5) \cdot 3 (Kornfraktionen) \cdot 10 (Tiefen) = 150 Datenbankoperationen ergeben. Für die Untersuchung der BÜK50 ergeben sich auf Grund der etwa 5440 Datenbankeinträgen nach einer Verschneidung BÜK/Bo5 etwa 160000 Datenbankabfragen und für die Disaggregierungsstufe 2 bereits etwa 510000 Rechenoperationen für die Berechnung eines Indexes (z.B. Homogenitätsindex) für die drei Kornfraktionen.

Es erfolgt nach der Berechnung der Heterogenitätsindizes für jeden Datenbankeintrag eine flächengewichtete Neuberechnung der Indizes für a) die ursprüngliche Kartiereinheit der BÜK50 und b) das gesamte Untersuchungsgebiet. Die Gewichtung der Indizes auf die Kartiereinheit muss erfolgen, um die Ergebnisse (Bewertung 1, 2, 3) untereinander vergleichbar zu machen. Die Berechnung der Indizes für das Gesamtblatt dient zur Feststellung, welche Varianzminimierungen im gesamten Untersuchungsgebiet möglich sind. Auf Grund der Struktur des gewählten Systems konnten die ebenfalls in Access gewichteten und neu berechneten Heterogenitätsindizes anhand von Identifiern (eindeutige Identifizierungsnummer der BÜK50-Kartiereinheiten) über diese Schnittstelle an die gewünschte Attributtabelle an-

gehängt werden. Anschließend erfolgt die Berechnung der Ausgangsheterogenität der Bodenkarte 1:50.000 (Kapitel 7).

Für die Disaggregierungsschritte 1 und 2 verläuft die Berechnung analog. Nach den Verschnidungen werden die Indizes zunächst für alle Datenbankeinträge berechnet und anschließend für jede einzelne ursprüngliche Kartiereinheit der BÜK50 flächengewichtet. Hierbei wird kontrolliert, ob sich in den einzelnen Kartiereinheiten bzw. für das Gesamtblatt gesehen, die Indizes verschlechtert oder verbessert haben.



Karte 6.1: Petrographie

Petrographie

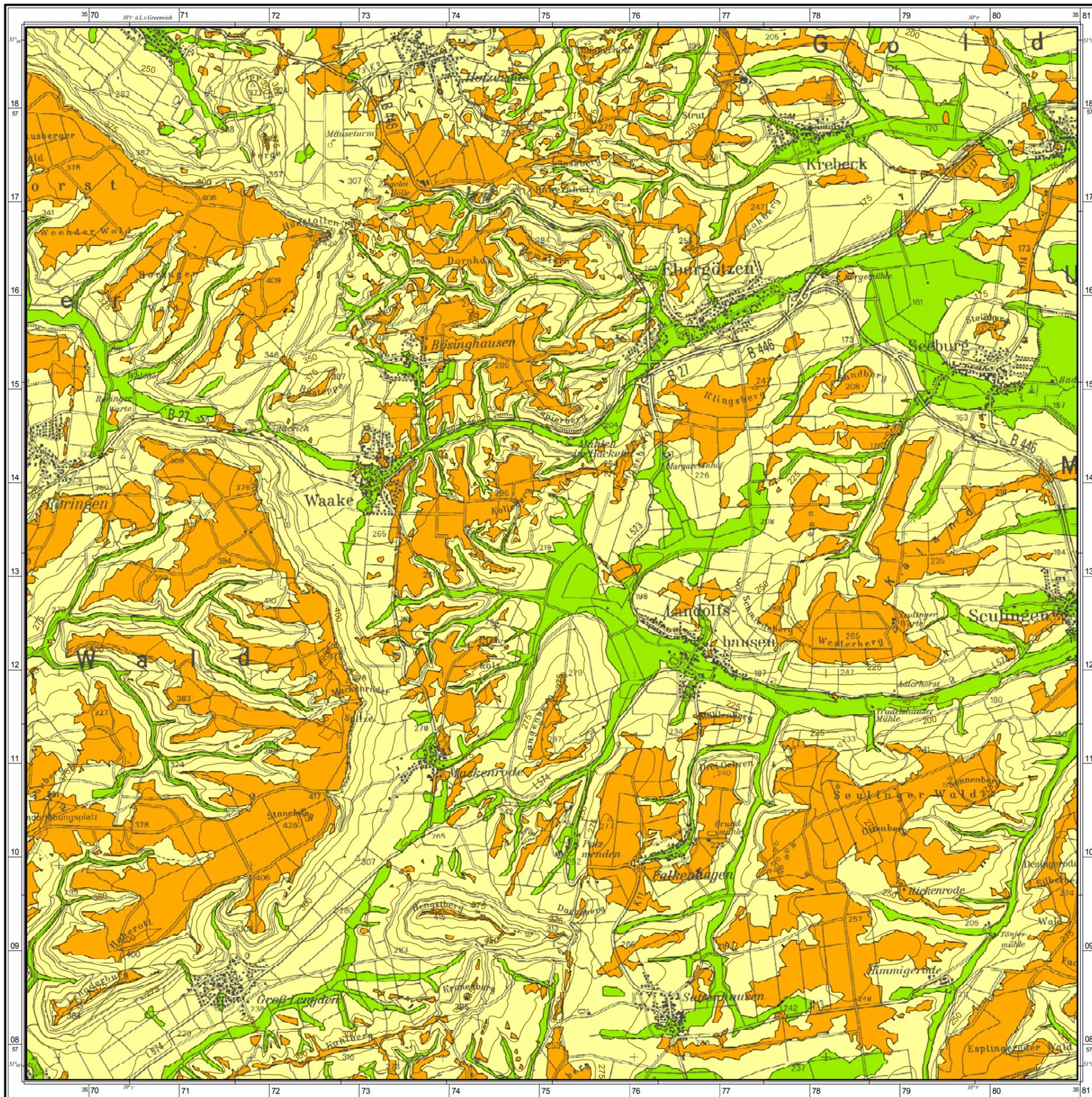
- Feinsandstein Mittelsandstein
- Grobsandstein Feinsandstein
- Kalkstein
- Mergelstein
- Mudde
- Schaumkalk
- Schluff
- Schluff Kies
- Ton Kies
- Ton steinig
- Tonstein
- Tonstein Schluffstein
- Wechsellagernd
(Feinsand, Mittelsand, Sapropel Gesteine, Schluffstein)
- Torf
- Seeburger See



Datengrundlage: Geologische Karte 1:25.000, Blatt 4426 (Ebergötzen)
 NIFB (Plotausgabe 2001)
 Rasterdaten der TK50, Blatt 4526 (Duderstadt)



Universität Hannover
Physische Geographie
und Landschaftsökologie



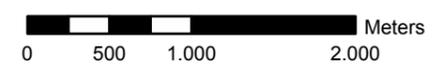
Karte 6.2: Flächenhafte morphographische Reliefeinheiten der Kategorie I (SARA I)

Morphologischer Bereich

- Hangbereich
- Scheitelbereich
- Senkenbereich

Sonstiges

- Höhenlinien



Datengrundlage: DGM5, Blatt (NifB; Plotausgabe 2001)
 Rasterdaten der TK50, Blatt 4526 (Duderstadt)
 System zur automatischen Relief-Analyse SARA (Köthe & Lehmeier, 1994)



Universität Hannover
Physische Geographie
und Landschaftsökologie

7 Heterogenität bodenkundlicher Basisdaten in bestehenden mittelmaßstäbigen Bodenkarten

7.1 Einführung

Um einen möglichen Homogenitätsgewinn durch einen Disaggregierungsansatz beurteilen zu können, muss zunächst die Heterogenität der Ausgangskarte (Bodenübersichtskarte 1:50.000, BÜK50) auf der Basis des Referenzdatensatzes (interpretierte Bodenschätzung 1:5.000, Bo5) untersucht werden. Hierbei sind zwei Fragestellungen von Belang:

1. Wie hoch ist die Heterogenität innerhalb der einzelnen Kartiereinheiten der BÜK50?
2. Wie unterschiedlich sind hierbei die Ausprägungen (Kontraste) der Bodeneigenschaften zwischen der BÜK50 und dem Vergleichsdatsatz der Bo5?

Die Klärung dieser Fragen geschieht unter Zuhilfenahme verschiedener Indizes: Während der ersten Frage mit Hilfe der in Kapitel 5 vorgestellten Heterogenitätsmaßen nachgegangen wird, geschieht dies bei Frage 2 unter Einbeziehung von Kontrastwerten. Als Kontrastmaß für den Vergleich der Ausprägungen BÜK50/Bo5 wird der flächengewichtete mittlere absolute Fehler (MAE_{fl}) genutzt.

Die berechneten Heterogenitäts- und Kontrastmaße werden für die Korngrößenzusammensetzung nach lössdominierten und lössfreien Gebieten getrennt vorgestellt, da Lössareale auf Grund der besonderen Homogenität des Ausgangsmaterials auch eine besondere Stellung bezüglich der Heterogenität der Ton-, Schluff- und Sandgehalte einnehmen. Für die Kalkgehalte ist eine derartige Separierung nicht sinnvoll.

7.2 Die Heterogenität hinsichtlich der Grenzlinienziehung der Bodenübersichtskarte 1:50.000

7.2.1 Die Heterogenität der Kornfraktionen

7.2.1.1 Lössdominierte Kartiereinheiten

Homogenitätsindizes

Abbildung 7.1 visualisiert die Homogenitätsindizes (H-Indizes) für die drei Kornfraktionen (Ton-, Schluff- und Sandgehalte) der lössdominierten Profile für alle zehn untersuchten Horizonttiefen. Anhand der Farbspektren wird deutlich, dass Lössprofile bezüglich der Korngrößenzusammensetzung relativ homogen sind. Etwa die Hälfte der berechneten H-Indizes liegen mit Werten über 80 Prozent über dem Schwellenwert, für den eine Disaggregation sich als sinnvoll erwiesen hat. Besonders hervorzuheben ist hierbei, dass auch große Kartiereinheiten wie die Profilnummer 164 bei allen drei Kornfraktionen sowie aller Horizonttiefen, extrem homogen ist. Die Homogenitätsindizes der Tongehalte fallen im Mittel höher aus als die der Schluff- und Sandgehalte. Ursache hierfür ist, wie bereits in Kapitel 5 bei der Schwellenwertfestlegung für den Homogenitätsindex diskutiert, unter anderem auch im Aufbau des Korngrößendreiecks begründet.

Bei geringeren Homogenitätsindizes (z.B. Pronum 172, 184 oder 491) ist die Ursache hierfür meist in der Generalisierung der mittelmaßstäbigen Karte zu suchen. Die BÜK50-Einheiten sind auf Grund der Generalisierung nicht in der Lage, den Lössseinfluss so differenziert wiederzugeben wie die Bo5. Im Profil 491 wird dies z.B. in den oberen 60 cm des Profils und

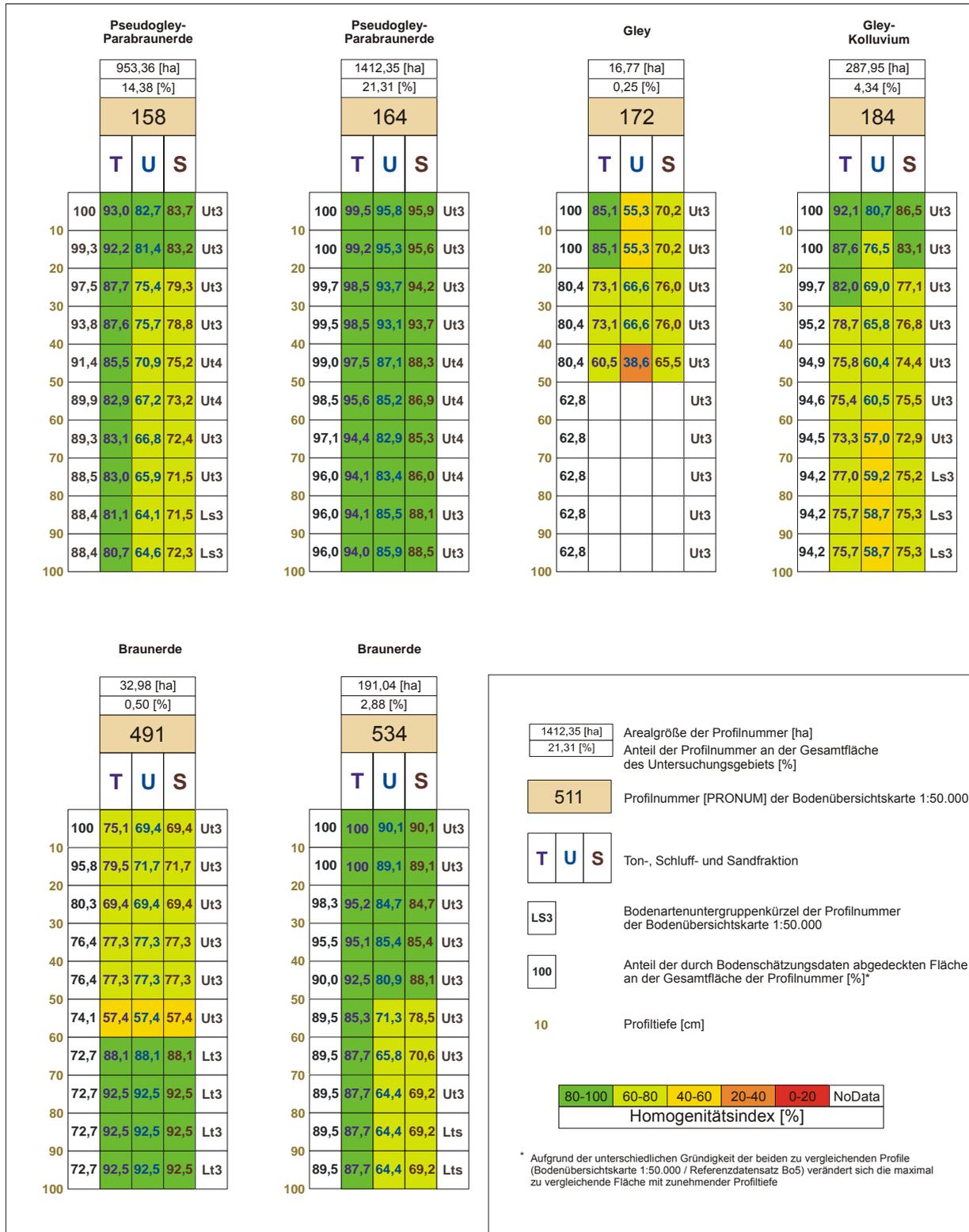


Abbildung 7.1: Homogenitätsindizes der Kornfraktionen in lössdominierten Kartiereinheiten.

besonders in 50–60 cm Profiltiefe deutlich. Innerhalb dieser Kartiereinheit der BÜK50 weist die Bo5 z.T. lösshaltige Ut3/Ut4, aber auch kalksteinhaltige Lt3, Horizonte aus. Ab einer Profiltiefe von 60 cm stimmen beide Maßstabsebenen dann wieder fast überein, da sowohl die BÜK50 als auch die Bo5 dann die Bodenartenuntergruppen des mesozoischen Kalksteins

(Lt3) ausweisen. In der Pronum 184 zeigt sich ein ähnliches Bild: Hier ist es der Schwemmlöss, der auf den Fließerden aufgelagert ist. Während in den ersten 2–3 Dezimetern beide Kartenwerke lösshaltige Ut3-Bodenartenuntergruppen ausweisen, ist das darunter liegende heterogene Material der Fließerden nur von der hoch aufgelösten Bo5 so differenziert darstellbar.

Interdezilbereiche

Abbildung 7.2 visualisiert die Interdezil₈₀-Bereiche der lössdominierten Kartiereinheiten der BÜK50. Für die Interdezilbereiche ergibt sich ein ähnliches Bild bezüglich der Heterogenität wie bei den bereits diskutierten Homogenitätsindizes. Auffällig ist erneut die bereits beobachtete, ungewöhnlich geringe, Varianz der Profilnummer 164. Obwohl der Flächeninhalt dieser Kartiereinheit immerhin fast so groß ist wie die Summe der Flächeninhalte aller übrigen lössdominierten Profile, überschreiten die Interdezilbereiche mit zunehmender Tiefe nicht einmal eine durchschnittliche Klassenbreite. Die Kartiereinheit 158, die mit etwa 950 ha relativ groß ist, hat mit einem Interdezilbereich von etwa 40 % für die Schluffgehalte eine leicht erhöhte Varianz. Wird allerdings die mittlere Klassenbreite berücksichtigt, so sind auch diese Werte als relativ homogen zu interpretieren. Bei den Profilnummern 164 und 158 handelt es sich um Pseudogley-Parabraunerden, welche vom bodenartigen Profilaufbau tonigen Schluff über sandigem Lehm ausweisen. Obwohl die Profilnummern der Bodenübersichtskarte 1:50.000 eine fast identische Ausprägung besitzen, lassen sich dennoch bereits anhand der BÜK50 die Unterschiede der Interdezilbereiche erklären: Während der Schichtwechsel bei der Profilnummer 164 erst in 130 cm Tiefe und damit außerhalb der untersuchten Profiltiefe liegt, erfolgt dieser bei der Profilnummer 158 bereits in 80 cm Profiltiefe. Dies ließe allerdings nicht die geringen Indizes in Profiltiefen <80 cm erklären. Hier kommt eine weitere Komponente zum Tragen: Das Idealprofil 158 ist als lössdominierte Pseudogley-Parabraunerde sowohl in den Lössbecken als auch als lössbeeinflusstes Profil in den Tonsteinverbreitungsgebieten ausgewiesen, was zwangsläufig mit der Erhöhung der Varianz der Kornfraktionen einher geht. Ob dies ein Fehler innerhalb der BÜK50 ist, ließ sich trotz Rückfragen beim NLFb nicht klären. Für die Profilnummer 184 wurden die höchsten Interdezilbereiche berechnet. Hier bestätigen sich bereits die bei den Homogenitätsindizes erzielten Eindrücke, dass Fließerden als besonders inhomogen anzusehen sind. Dies war auch bereits aus der Literatur zu erwarten (vgl. hierzu HENNINGS, 1991, S.18). Insgesamt fallen die Interdezilbereiche der Schluffgehalte etwas höher aus als die der Sandgehalte. Tongehalte besitzen wie oben diskutiert die geringsten Interdezilbereiche.

2Vmax

Tabelle 7.1 zeigt sowohl den Prozentwert als auch den absoluten Wert bzw. Flächeninhalt des 2Vmax für alle 10 Tiefen. Falls keine Werte ausgewiesen werden, bedeutet dies, dass für den 2Vmax *NoData* (keine Bodenartenuntergruppenangabe, da Gründigkeit erreicht) ausgewiesen wurde oder es nur einen Peak innerhalb der Verteilung gibt.

Auch der 2Vmax bestätigt die bislang gewonnen Ergebnisse: Für die Profilnummern 172 und 491 hat der 2Vmax mit Werten zwischen 15 % und 42 % einen erheblichen Anteil an der Gesamtverteilung. Somit bestätigen sich die etwas geringeren H-Indizes und höheren Interdezil₈₀-Bereiche bei diesen Profilen. Zudem sind die prozentualen Anteile des 2Vmax am Modalwert mit Werten zwischen 28 % bis 75 % als relativ hoch einzustufen. Hieraus lässt sich zumindest auf eine stark zweigipfelige oder mehrgipfelige, flache Verteilung der Histogrammverläufe schließen, welche mit einer erhöhten Varianz einher geht. Die überpro-

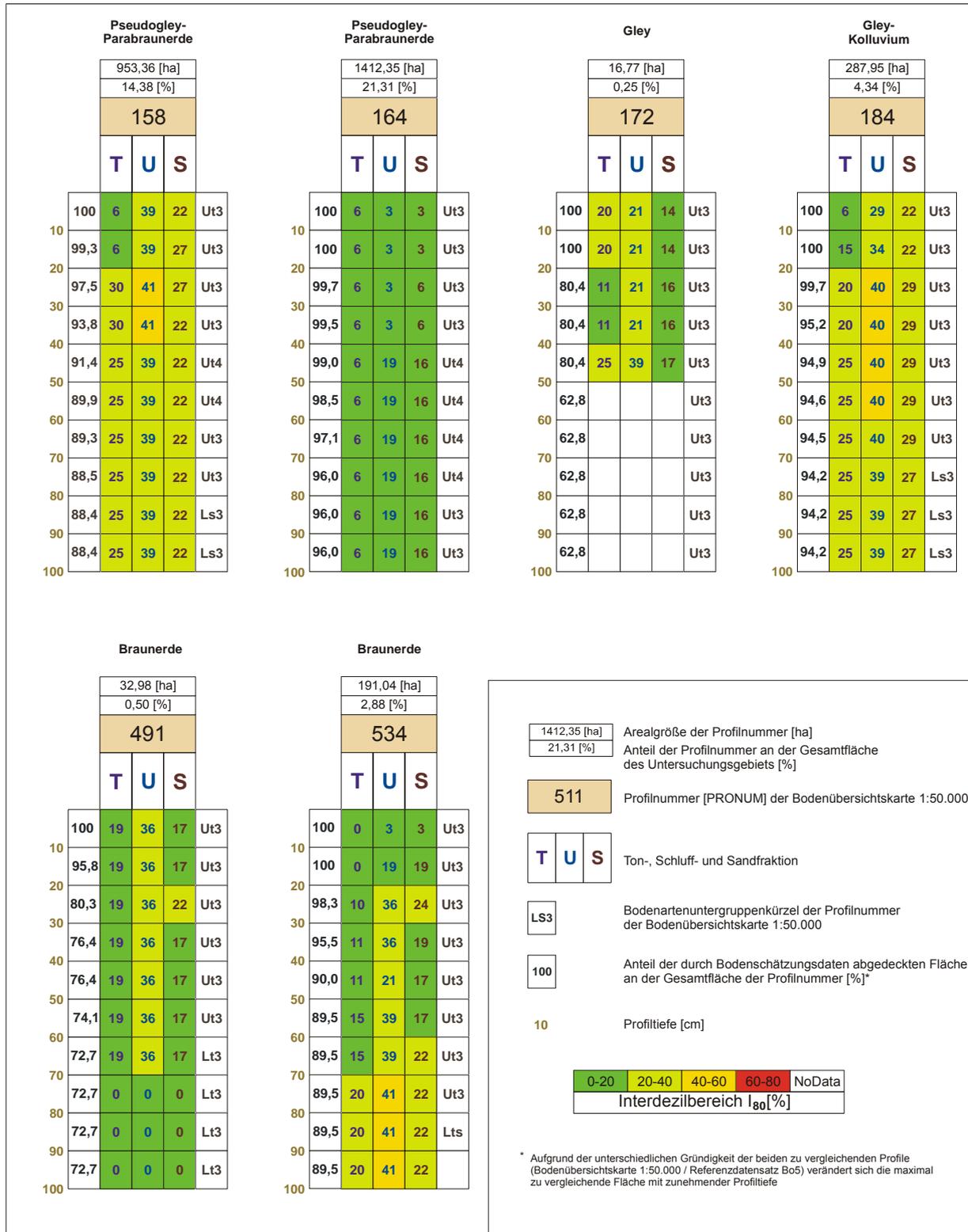


Abbildung 7.2: Interdezilbereiche I₈₀ der Kornfraktionen in lössdominierten Kartiereinheiten.

portionale Homogenität der Profilnummer 164 wird sowohl durch die geringen Flächenanteile des 2Vmax als auch den – zumindest im Oberboden sehr geringen – prozentualen Anteil am Modalwert bestätigt. Aus den berechneten Indizes lässt sich für dieses Profil auf eine ein-

gipfelige, hohe Verteilungsform schließen. Im Profil 534 ist auffällig, dass mit zunehmender Tiefe die Ton- und Schluffgehalte keinen 2Vmax ausweisen, aber für die Schluffgehalte noch Indizes berechnet wurden. Für die Ton- und Schluffgehalte bedeutet dies, dass der 2Vmax bereits aus *NoData* gebildet wird (Gründigkeit erreicht), während dies für die Schluffgehalte nicht der Fall ist.

Profiltiefe [cm]	2Vmax I: Anteil [%] des 2VMax am Flächenanteil des Modalwerts der betrachteten Verteilung																	
	158			164			172			184			491			534		
10	10.5	10.4	10.4	0.3	2.3	2.3	37.8	75.6	75.6	9.3	9.3	6.8	35.9	35.9	35.9	7.6	7.6	7.6
20	9.3	10.3	10.3	0.5	2.3	2.3	37.8	75.6	75.6	18.8	11.2	9.5	28.6	28.6	28.6	7.2	7.2	7.2
30	13.9	13.9	13.9	0.7	3.0	3.0				15.0	15.4	14.9	53.9	53.9	53.9	10.4	10.4	10.4
40	15.4	15.0	15.0	0.8	2.7	2.7				17.3	17.2	15.5						
50	18.6			2.4	12.4	10.5				24.3	24.6							
60	27.9			5.8	12.8	10.1				26.5	23.3	17.9	74.2	74.2	74.2			
70	29.7			8.4	16.8	13.3				37.5	22.9	15.4						40.1
80				10.3	19.3	15.2				37.7	24.5	15.1						47.0
90	35.4			10.6	14.7	11.0				40.9	27.3	15.4						47.0
100	35.9			10.7	13.8	10.1				40.7	27.3	15.4						47.0

Profiltiefe [cm]	2Vmax II: Flächenanteil [%] des 2VMax innerhalb der betrachteten Verteilung																	
	158			164			172			184			491			534		
10	6.0	5.8	5.8	0.2	1.6	1.6	14.9	29.8	29.8	4.3	4.2	3.1	24.9	24.9	24.9			6.4
20	5.2	5.7	5.7	0.4	1.7	1.7	14.9	29.8	29.8	8.1	4.7	4.0	20.5	20.5	20.5			6.0
30	7.4	7.3	7.3	0.5	1.9	1.9				5.7	5.7	5.5	30.6	30.6	30.6	4.5	5.9	5.9
40	8.3	7.9	7.9	0.5	1.7	1.7				6.3	6.1	5.5						
50	9.7			1.3	6.8	5.7				7.9	7.7							
60	12.5			3.2	6.8	5.3				8.4	7.0	5.6	42.6	42.6	42.6			
70	12.9			4.5	8.6	6.8				11.5	6.5	5.0						14.2
80				4.8	8.6	6.7				12.9	7.3	5.6						15.6
90	14.7			4.8	6.5	4.8				13.7	7.9	5.7						15.6
100	14.9			4.9	6.0	4.4				13.7	7.9	5.7						15.6

TON	Schluff	Sand
-----	---------	------

Tabelle 7.1: Berechnete zweite Verteilungsmaxima (2Vmax) in den lössdominierten Kartiereinheiten.

Abbildung 7.3 visualisiert die mittleren Homogenitätsindizes für das gesamte Untersuchungsgebiet. Die Werte für alle Fraktionen sind mit Beträgen deutlich über 70 % für das Gesamtblatt sehr hoch und somit fast identisch zu den bereits diskutierten Indizes bei den Einzelprofilen: Die Homogenitätsindizes der Tongehalte liegen über alle Tiefen gemittelt bei über 90 %. Diese sind somit im Unterboden etwa um 5 % und in den Oberböden bis etwa 12,5 % homogener als die Werte der beiden anderen Fraktionen. Auffällig ist die negative Steigung der Kurven ab 40 cm Profiltiefe. Hier zeigt sich auch für das Gesamtblatt sehr deutlich, dass die Varianz der Kornfraktionen bei einem Substratwechsel in der Tiefe auf einer mittelmaßstäbigen Karte nicht so detailliert darstellbar ist.

Abbildung 7.4 zeigt die mittleren Interdezil₈₀-Bereiche der lössdominierten Profile für das Gesamtblatt. Auch für das Gesamtblatt weisen die Tongehalte über die gesamte Profiltiefe gesehen die geringsten Interdezilbereiche aus. Die Schluff- und Sandgehalte zeigen auf Grund der bereits in Kapitel 6 erwähnten engen Korrelation einen optisch identischen Kurvenverlauf, der im Mittel über alle Profiltiefen für die Schluffgehalte etwa 12 % und für die Sandgehalte etwa 4 % über dem Interdezil₈₀-Niveau der Tongehalte liegt. Die Schluffgehalte beinhalten wiederum die höchsten Interdezilbereiche. Dies war nicht zu erwarten, da die mittleren Klassenbreiten der Schluffgehalte in lössfreien Arealen (vgl. Tabelle 5.2) sogar etwas gerin-

ger waren als die der Sandgehalte. Somit bildet die Kornfraktion Schluff die heterogenste Komponente in den drei Fraktionen.

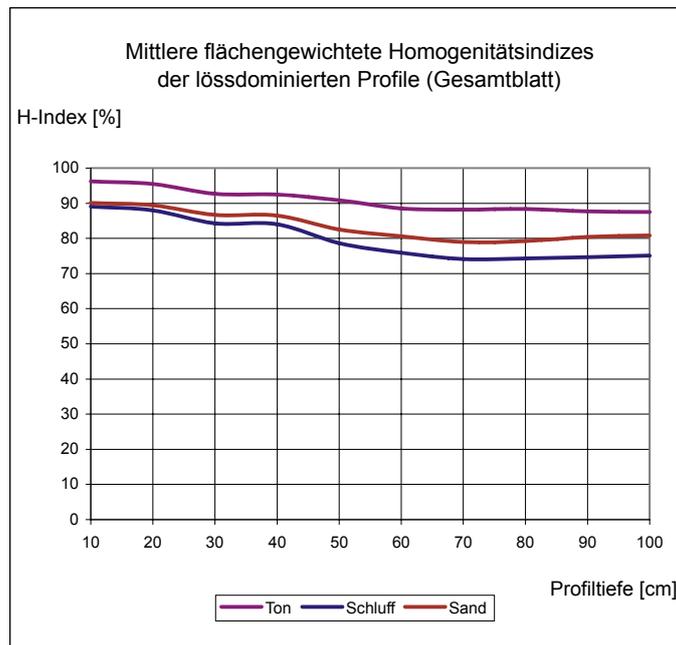


Abbildung 7.3: Mittlere Homogenitätsindizes der lössdominierten Profile für das Gesamtblatt.

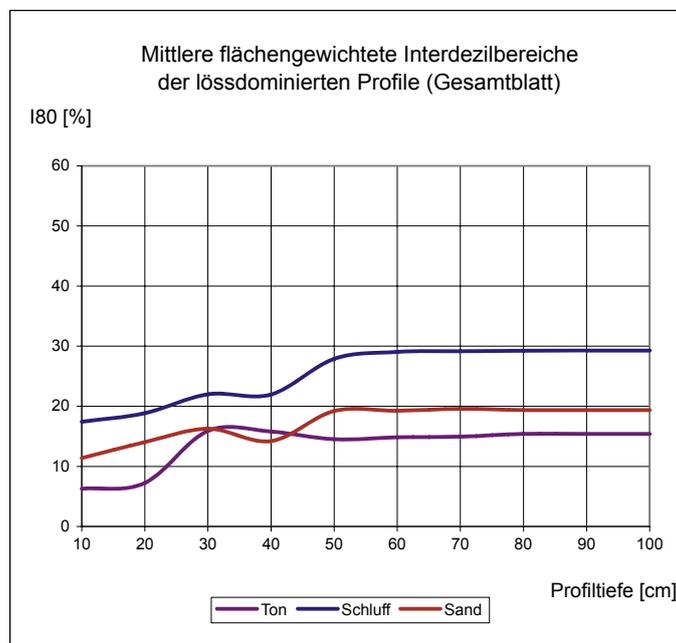


Abbildung 7.4: Mittlere Interdezilbereiche I_{80} der lössdominierten Profile für das Gesamtblatt.

Kurzfasit: Korngrößenzusammensetzung in lössdominierten Arealen

Die durchschnittlichen Homogenitätsindizes des Gesamtblatts für alle zehn untersuchten Tiefen lagen bezüglich der Korngrößenzusammensetzungen für den Ton im Mittel bei 90 %, für den Schluff bei 79 % und für den Sand bei 83 %. Oberböden zeigen insgesamt eine etwas geringere Varianz als Unterböden. Die Interdezilbereiche umfassen aber auch hier nur etwas mehr als eine Klassenbreite. Dies bedeutet, dass die Information Löss, welche aus einer 1:50.000er Bodenkarte abgeleitet wurde, sehr präzise lokalisiert ist, da der Referenzdatensatz stark übereinstimmende Werte ausgibt. Somit können die Aussagen von BECKETT und WEBSTER (1971, S.3–7), dass das Ausmaß der Variabilität parallel zur Größe der Untersuchungsfläche zunimmt, für lössdominierte Areale nicht bestätigt werden. Darüber hinaus unterstützt dieses Untersuchungsergebnis den traditionellen Konzeptansatz bei der Bodenkartenerstellung, denn es sind nicht nur Kontinua bzgl. der Bodeneigenschaften im Raum zu beobachten, sondern große Bereiche lassen sich sehr wohl durch Diskreta abbilden. Abweichungen zwischen der BÜK50 und Bo5 treten vor allem bei Substratwechseln in der Tiefe sowie bei heterogenen Böden wie Fließerdern auf. Treten keine Substratwechsel auf Grund höherer Lössmächtigkeiten auf, ist das Profil als äußerst homogen (H-Indizes >80 %, Interdezil₈₀-Bereiche >20 %) anzusehen. Aus diesem Grund ist die Anwendung des Downscaling-Modells, wenn eine Kosten bzw. Aufwand/Nutzenanalyse betrachtet wird, für lössdominierte Einheiten weniger sinnvoll.

7.2.1.2 Lössfreie Kartiereinheiten

Von den 16 lössfreien Profilnummern der BUEK50 können bezüglich der Korngrößenzusammensetzung auf Grund des Umfanges der Berechnungen nur Beispiele (in Tabelle 7.2 gelb hervorgehoben) vorgestellt werden. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass alle gewählten Profilnummern aus Gründen der Repräsentativität einen Bedeckungsgrad durch Bodenschätzungsdaten >150 ha haben und aus unterschiedlichen Bodenlandschaften (Silikatstein-, Karbonatstein- und Tonsteinverbreitungsgebiete) stammen, und somit ein möglichst breites Bodentypenspektrum aufzuweisen. Ein Schwellenwert von 150 ha (vgl. Tabelle 7.2) wurde auf Grund der Repräsentativität der Areale festgelegt.

Profilnummer Prorum 50	Bodentyp	Bodengroßlandschaft / Bodenlandschaft	lössbeeinflusst	Häufigkeit der Kartiereinheit auf dem Blatt der BÜK50	Arealgröße auf der BÜK50 [ha]	Arealgröße auf der BÜK50 [%]	Bedeckungsgrad durch Bodenschätzungsdaten [ha]	Bedeckungsgrad durch Bodenschätzungsdaten [%]
539	Braunerde	Höhenzuege, Silikatsteinverbreitungsgebiete	Nein	11	2259.02	17.56	1938.53	29.24
555	Braunerde-Ranker	Höhenzuege, Silikatsteinverbreitungsgebiete	Nein	7	2199.77	17.10	382.99	5.78
540	Braunerde	Höhenzuege, Silikatsteinverbreitungsgebiete	Nein	4	360.01	2.80	277.90	4.19
520	Pelosol	Höhenzuege, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	1	319.02	2.48	217.68	3.28
611	Braunerde-Pelosol	Höhenzuege, Tonsteinverbreitungsgebiete	Nein	2	343.15	2.67	176.28	2.66
514	Rendzina	Höhenzuege, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	3	289.17	2.25	168.74	2.55
513	Rendzina	Höhenzuege, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	1	970.86	7.55	165.57	2.50
109	Gley-Auenboden	Lößbecken, Talsedimente	Nein	1	161.79	1.26	138.36	2.09
526	Rendzina	Höhenzuege, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	3	475.35	3.70	99.15	1.50
510	Rendzina	Höhenzuege, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	4	953.86	7.42	53.51	0.81
556	Braunerde-Ranker	Höhenzuege, Silikatsteinverbreitungsgebiete	Nein	2	91.63	0.71	42.59	0.64
511	Rendzina	Höhenzuege, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	1	808.13	6.28	32.43	0.49
594	Pseudogley	Höhenzuege, Tonsteinverbreitungsgebiete	Nein	1	21.91	0.17	21.91	0.33
517	Rendzina	Höhenzuege, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	1	91.50	0.71	8.57	0.13
501	Pseudogley-Braunerde	Höhenzuege, Karbonatsteinverbreitungsgebiete	Nein	1	11.61	0.09	8.19	0.12
378	Niedermoor	Lößbecken, Torfe	Nein	4	44.99	0.35	0.00	0.00
616	Ranker	Höhenzuege, Tonsteinverbreitungsgebiete	Nein	2	52.09	0.41	2.05	0.03

Tabelle 7.2: Auswahl der in diesem Kapitel verwendeten Beispiele aus den lössfreien Bodeneinheiten.

Homogenitätsindizes

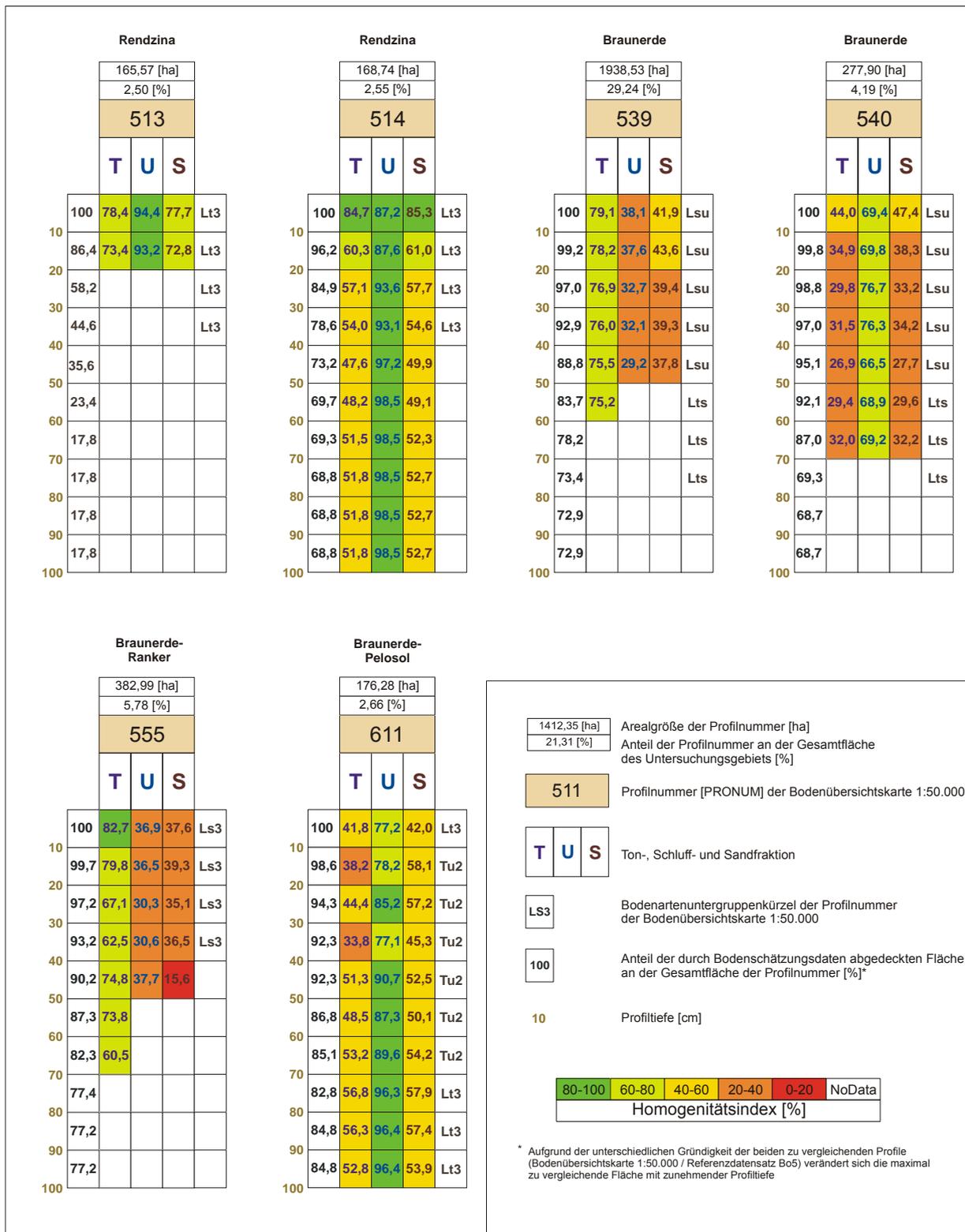


Abbildung 7.5: Homogenitätsindizes der Kornfraktionen in lössfreien Kartiereinheiten.

Die Homogenitätsindizes der sechs lössfreien Bodeneinheiten liegen viel niedriger als in den lössdominierten Arealen. Nur in der Profilnummer 513 weisen die Indizes von >70 % auf eine

relativ homogene Einheit hin. Alle anderen Profile zeigen kein einheitlich klares Bild. In den lössdominierten Profilen war die überproportionale Homogenität der Tongehalte sehr auffällig. Dies ist bei den lössfreien Profilen nicht der Fall. So zeigen z.B. die Schluffgehalte in den Profilnummern 611 und 514 sehr hohe H-Indizes, während die Werte der beiden anderen Fraktionen in diesem Profil zwischen 40 % und 60 % liegen. Gründe: In der Kartiereinheit 514 werden vom Referenzdatensatz primär Lt3 und Tu2 ausgegeben. Die Klassenmitten der Schluffgehalte dieser beiden Bodenartenuntergruppen liegen mit 8 % Unterschied so eng zusammen, dass diese durch den Schwellenwert des Homogenitätsindex erfasst werden. Da dies für die Tongehalte und somit rein rechnerisch auch für die Sandgehalte (Summe der drei Fraktionen ergibt 100) nicht so ist, sind diese Indizes um genau den Anteil dieses zweiten Verteilungspeaks (etwa 40 %) geringer. Im Profil 611 zeigt sich ein ähnliches Bild: Im Referenzdatensatz werden im Oberboden primär die Bodenartenuntergruppen Lt3 und Tu2, aber auch Ut4, und im Unterboden mit Werten über 90 % Flächenanteil fast ausschließlich Tu2 und Lt3 ausgegeben. In der Profilnummer 540 werden durch die Bodenschätzung neben diesen beiden Bodenartenuntergruppen auch noch Lt2, Lsu und Ls3 innerhalb des Homogenitätsindex ausgewiesen. Die Verteilung ist damit viel flacher und die Heterogenitätsindizes der beiden anderen Kornfraktionen demzufolge mit Werten um 30 % noch sehr viel geringer als in den anderen Kartiereinheiten. In den Profilnummern 539 und 555 sind wiederum die Tongehalte relativ homogen, obwohl seitens der anderen Kornfraktionen flache, breite Verteilungen zu erwarten sind. Hier sind die bereits diskutierten geringen Klassenbreiten verantwortlich für die überproportionale Homogenität der Tongehalte. Auffällig ist bei der Profilnummer 514 die geringe Übereinstimmung bei der Gründigkeit zwischen der BÜK50 und dem Referenzdatensatz.

Interdezilbereiche (Abbildung 7.6)

Die Kartiereinheit 514 hat die geringsten Interdezilbereiche. Dies ließ sich, vor allem bei der Betrachtung der Homogenitätsindizes der Ton- und Sandgehalte, nicht vermuten. Der Grund hierfür ist eine sehr rechtssteile Verteilung der Tongehalte. Die beiden äußeren Peaks nehmen, bei 15 % der Spannweite zwischen den Kornfraktionsgehalten, fast 100 % der Fläche ein. Da der Schwellenwert des Homogenitätsindex 10 % Spannweite beträgt, wird durch den Homogenitätsindex nur ein Peak der zweigipfeligen Verteilung erfasst und somit scheinen die H-Indizes eine größere Heterogenität vorzutäuschen. Alle anderen Profilnummern zeigen seitens der Interdezilbereiche eine Homogenität, wie sie bereits bei den H-Indizes abgeschätzt wurde. Vor allem die Sandgehalte der Profilnummern 540 und 555 haben mit einer Interdezil₈₀-Spanne von über 70 % eine sehr große Heterogenität. Diese wird vor allem durch die Grenzziehung der Kartiereinheiten verursacht. Innerhalb der Pronum555 sind z.B. in 10 cm Tiefe alle Bodenartenuntergruppen zu finden, die überhaupt im gesamten Untersuchungsgebiet auftreten. In der Profilnummer 540 sind es immerhin noch 16 Bodenartenuntergruppen. Die Profilnummer 539 zeigt auf Grund der extremen Größe dieser Kartiereinheit auf der BÜK50 eine Breite der Indizes von über 50 % für die Schluff- und Sandgehalte. Die Profilnummer 611 zeigt von den Interdezilbereichen ein Bild, wie es bereits bei der Diskussion der Homogenitätsindizes zu vermuten war. Die Indizes liegen meist zwischen 20 % und 30 % und nehmen für lössfreie Profileinheiten eine Mittelstellung bezüglich der Heterogenität ein.

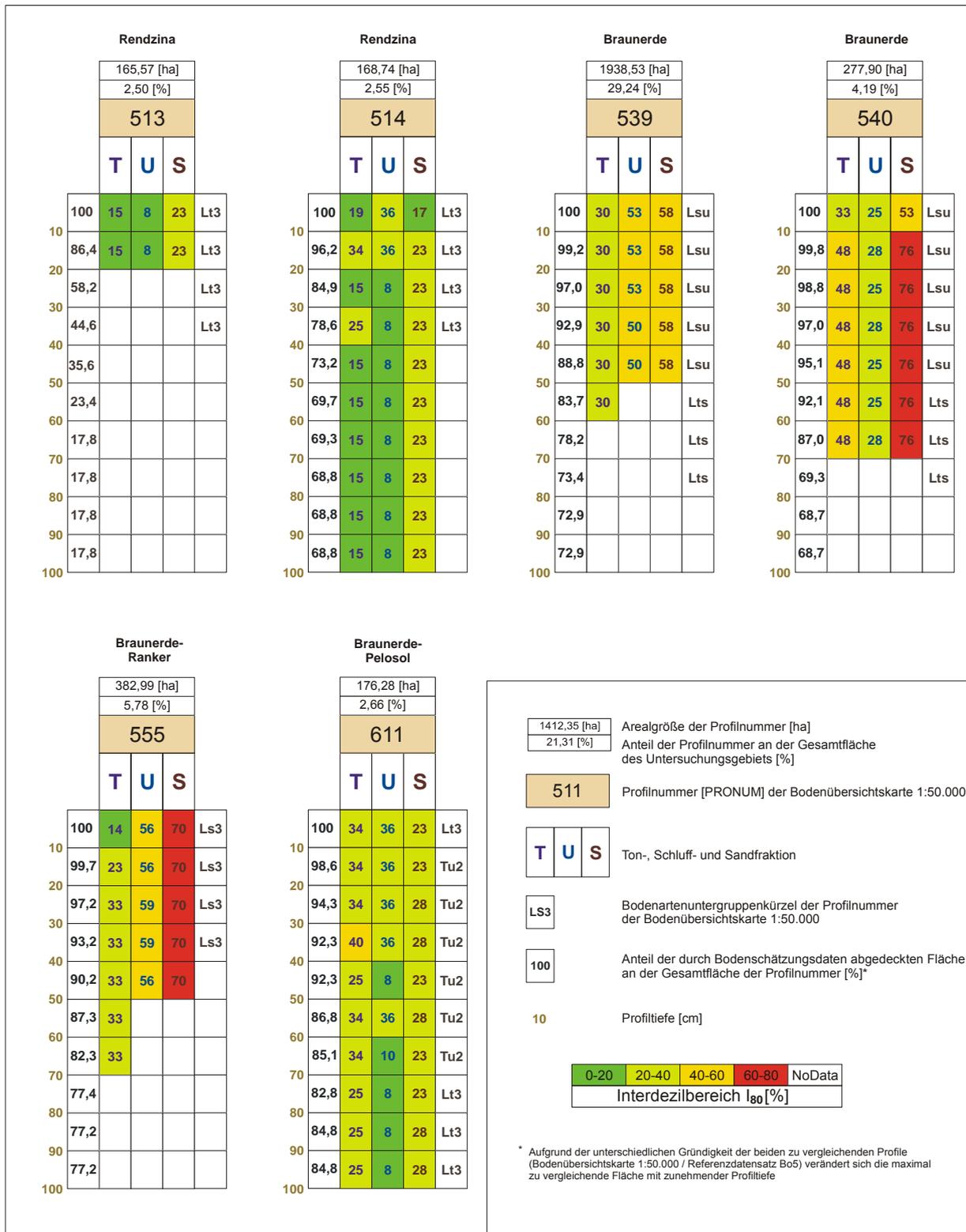


Abbildung 7.6: Interdezilbereiche I₈₀ der Kornfraktionen in lössfreien Kartiereinheiten.

2Vmax

Die überaus hohen Anteile des 2Vmax (vgl. Tabelle 7.3) am Modalwert nehmen mit Werten von z.T. über 90 % in der Profilnummer 555 eine gesonderte Position ein. Hieraus wird klar, dass selbst der zweite Peak innerhalb des Histogramms fast so stark ausgeprägt ist wie der Modalwert. Demzufolge liegt eine breite – und bei Durchsicht der Flächenanteile des 2Vmax – sehr flache Verteilung vor. Die vermutete Zweigipfeligkeit des Histogramms 514 wird bei der Betrachtung des 2Vmax in dieser Einheit bestätigt. Vor allem die Anteile der Schluff- und Tongehalte des 2Vmax sind im Unterboden ähnlich hoch, wie in der Profilnummer 555. Allerdings weist der absolute Flächenanteil des 2Vmax mit Werten über 40 % deutlich auf ein zweigipfeliges Histogramm hin und nicht auf eine breite, flache Verteilung wie in der Profilnummer 555. Für die Profilnummer 611 gelten ähnliche Überlegungen wie für die Profilnummer 514. Auch hier liegt auf Grund des 2Vmax für die Schluff- und Sandgehalte die Vermutung nahe, dass eine zweigipfelige, hohe Verteilung vorherrscht. Die Profilnummer 540 deutet anhand des Anteils des 2Vmax am Modalwert ebenfalls auf eine zumindest zweigipfelige Verteilung hin. Die absoluten Flächenanteile des 2Vmax zeigen, dass die Kurve der Werteverteilung eher flach verläuft. Auf die Profilnummer 539 sind letztgenannte Überlegungen übertragbar.

Profiltiefe [cm]	2Vmax I: Anteil [%] des 2VMax am Flächenanteil des Modalwerts der betrachteten Verteilung																	
	513		514				539				540				55		611	
10	22.9	6.5	23.1	16.4	15.6	15.6	34.6	92.0	88.7	35.7	28.3	36.1	26.2	94.6	94.6	94.4	44.7	95.3
20	29.2		29.5	49.1	21.2	49.1	32.6	90.9	89.1	44.7	37.8	45.3	31.2	94.3	94.3	93.7	42.5	93.2
30				67.4		67.4	30.6	87.1	87.1	93.2	35.6	94.8	54.3	72.4	72.4	66.3	25.5	65.9
40				80.6		80.6	34.6	75.8	75.8	89.8	34.5	91.4	41.9	70.3	70.3	91.9	33.1	91.3
50				94.0		94.0				73.1	48.2	71.6		86.5	86.5	89.1		89.5
60				94.0		94.0				64.7	42.7	64.7				94.8		95.9
70						86.2				62.6		62.6				79.4		80.2
80						84.9										79.0		79.0
90						84.9										76.0		76.0
100						84.9										89.6		89.6

Profiltiefe [cm]	2Vmax II: Flächenanteil [%] des 2VMax innerhalb der betrachteten Verteilung																	
	513		514				539				540				55		611	
10	16.8	4.8	16.8	12.7	12.1	12.1	9.2	14.8	14.8	12.4	9.7	12.4	7.1	15.1	15.1	35.9	16.8	35.9
20	20.5		20.5	26.9	11.6	26.9	8.1	14.5	14.5	12.5	10.4	12.5	7.0	14.8	14.8	35.7	16.2	35.5
30				36.5		36.5	8.5	16.2	16.2	22.4	8.4	22.4	10.7	11.3	11.3	29.5	11.3	29.3
40				39.1		39.1	9.0	14.7	14.7	20.6	7.8	20.6	8.8	11.0	11.0	31.1	11.2	30.9
50				44.8		44.8				19.7	13.0	19.2		12.0	12.0	39.6		39.6
60				45.3		45.3				19.0	12.6	19.0				38.1		38.1
70						44.4				20.0		20.0				35.9		35.9
80						44.0										38.9		38.9
90						44.0										37.2		37.2
100						44.0										40.7		40.7

TON	Schluff	Sand
-----	---------	------

Tabelle 7.3: Berechnete zweite Verteilungsmaxima (2Vmax) in den lössfreien Kartiereinheiten.

Die Homogenitätsindizes für lössfreie Profileinheiten in Abbildung 7.7 nehmen im Vergleich zu den lössdominierten Einheiten einen ungewöhnlichen Kurvenverlauf. Während in den Löss-Einheiten alle H-Indizes sowohl in den Ober- als auch in den Unterböden einen fast identischen Kurvenverlauf mit sehr hohen Indizes beinhalten, sinken in den lössfreien Böden die H-Indizes der Schluff- und Sandgehalte bis in etwa 50 cm Profiltiefe ab, um danach in den Unterböden auf das höchste Niveau zu steigen. Erwartet wurde ein Kurvenverlauf wie es

die Tongehalte zeigen, da Oberböden im Vergleich zu Unterböden im Allgemeinen homogener aufgebaut sind (HENNING, 1991, S.18f).

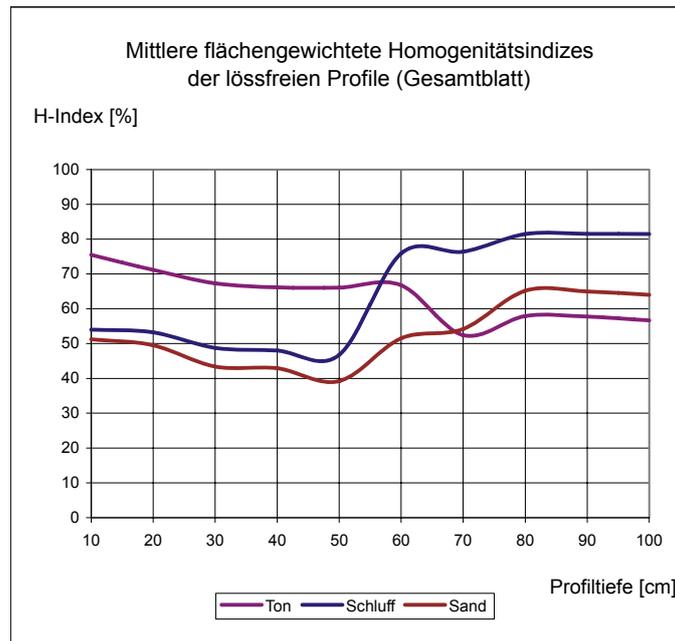


Abbildung 7.7: Mittlere (flächengewichtete) Homogenitätsindizes der lössfreien Profile für das Gesamtblatt.

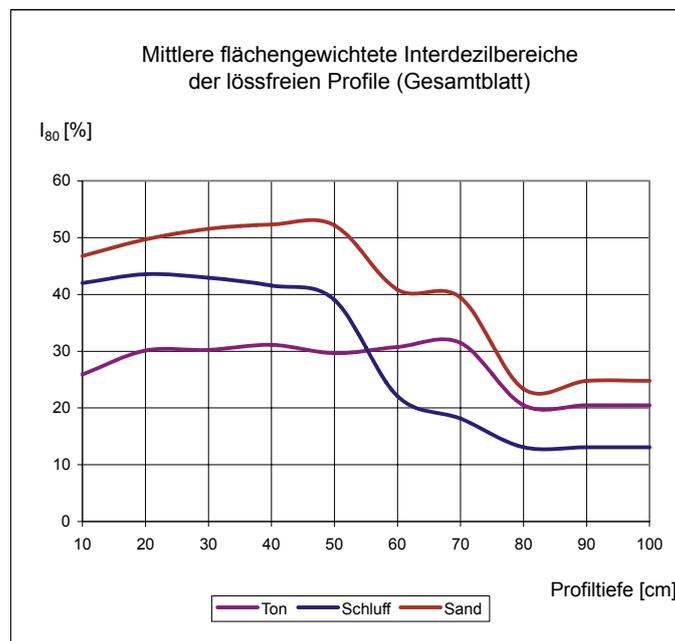


Abbildung 7.8: Mittlere (flächengewichtete) Interdezilbereiche I_{80} der lössfreien Profile für das Gesamtblatt.

Die unerwarteten Befunde lassen sich im Untersuchungsgebiet wie folgt erklären: Die Profilnummer 539 hat bei diesen Flächen gewichteten Indizes auf Grund der Größe dieser Einheit einen überproportionalen Einfluss auf die Heterogenität. Ab einer Profiltiefe von >50 cm (Sand- und Schluffgehalte) bzw. >60 cm (Tongehalte) wird in der sehr großen Kartiereinheit 539 für den Homogenitätsindex *NoData* vom Referenzdatensatz ausgegeben. Mit dem Wegfall der sehr heterogenen Schluff- und Sandgehalte dieser Einheit steigen die Homogenitätsindizes im Mittel für das Gesamtblatt für diese beiden Fraktionen stark an. Schluffgehaltsindizes steigen gegenüber den Sandgehaltsindizes stärker an, da zum einen die Höhe der Indizes der Schluffgehalte in der Kartiereinheit 539 geringer ist und zum anderen der Einfluss der Profile 540, 514 und 611 von dieser Tiefe an aus den bereits diskutierten Gründen sehr viel höher ist. Da die Tongehalte mit Homogenitätsindizes von etwa 75 % sehr hoch sind und zudem noch bis 60 cm Profiltiefe ausgewiesen werden, hat dies für diese Fraktion ab einer Tiefe >60 cm den genau umgekehrten Effekt.

Nach dieser Grenze haben die wesentlich tieferen H-Indizes der Profilnummern 540, 514 und 611 einen erhöhten Einfluss auf die Mittelwerte des Gesamtblattes. Somit sinken die Indizes für die Tongehalte ab. Ebenso sind es diese tiefgründigeren Profile, die für die relativ hohen Indizes der Schluffgehalte mit durchschnittlich etwa 80 %, sowie etwa 60 % für die Sand- und Tongehalte ab 80 cm Profiltiefe verantwortlich sind.

Die eher unerwarteten Kurvenverläufe sind somit anhand der Gründigkeit sowie des Einflusses überproportional großer Einheiten erklärbar. Die flachgründigeren Profile zeigen hingegen die erwartete Abnahme der Indizes mit der Tiefe.

Die Interdezilbereiche für das Gesamtblatt in Abbildung 7.8 bestätigen die bereits bei den H-Indizes gemachten Beobachtungen. Sehr deutlich ist z.B. der Einfluss der Profilnummer 539 anhand der abknickenden Kurvenverläufe zu sehen. Nach dieser Grafik erscheinen die Unterböden geringere Interdezilbereiche aufzuweisen als die Oberböden. Dies ist allerdings aus den bereits diskutierten Gründen auf den Einfluss der Pronum 539 zurück zu führen.

Kurzfasit Korngrößenzusammensetzung in lössfreien Arealen

Die lössfreien Areale sind sehr viel inhomogener aufgebaut als die lössdominierten Einheiten. Die Braunerden (Pronum 539 und 540) erweisen sich als besonders heterogen. Dies ist zum Teil, wie bei der Profilnummer 539, durch die Größe der Kartiereinheit bedingt. Reduzierungen der Heterogenität ließen sich demzufolge nur durch eine neue Grenzziehung mit einhergehender Unterteilung des Polygons erwirken. Zudem ist neben der Größe der Kartiereinheit auch bereits aus der BÜK50-Legende eine erhöhte Varianz ersichtlich, da es innerhalb des ersten Meters des Profils einen Substratwechsel gibt. Über dem Schluffstein liegen Horizonte von sandigem und tonigem Lehm. Bei dem auch sehr heterogen aufgebauten Braunerde Ranker (Pronum 555) gibt es ebenfalls einen Substratwechsel in den ersten 100 cm Tiefe. Dies ist allerdings nicht die Hauptursache für die vorherrschende Heterogenität. Sandgehalte über die maximale Spannweite (2 %–93 %) weisen auf eine ungünstige Abgrenzung der Kartiereinheiten hin. Die Ranker im Untersuchungsgebiet wurden vom Kartierer der BÜK50 primär auf den Bergkuppen fixiert. Laut SARA liegen diese aber fast zu 100 % auf den Bergrücken, die sehr viel inhomogener aufgebaut sind und laut Geologischer Karte zudem noch von Lössen und Wechsellagerungen bei den Sanden durchzogen sind. Mit Hilfe dieser Beobachtungen lässt sich die ermittelte Varianz erklären.

7.2.2 Die Heterogenität der Kalkgehalte

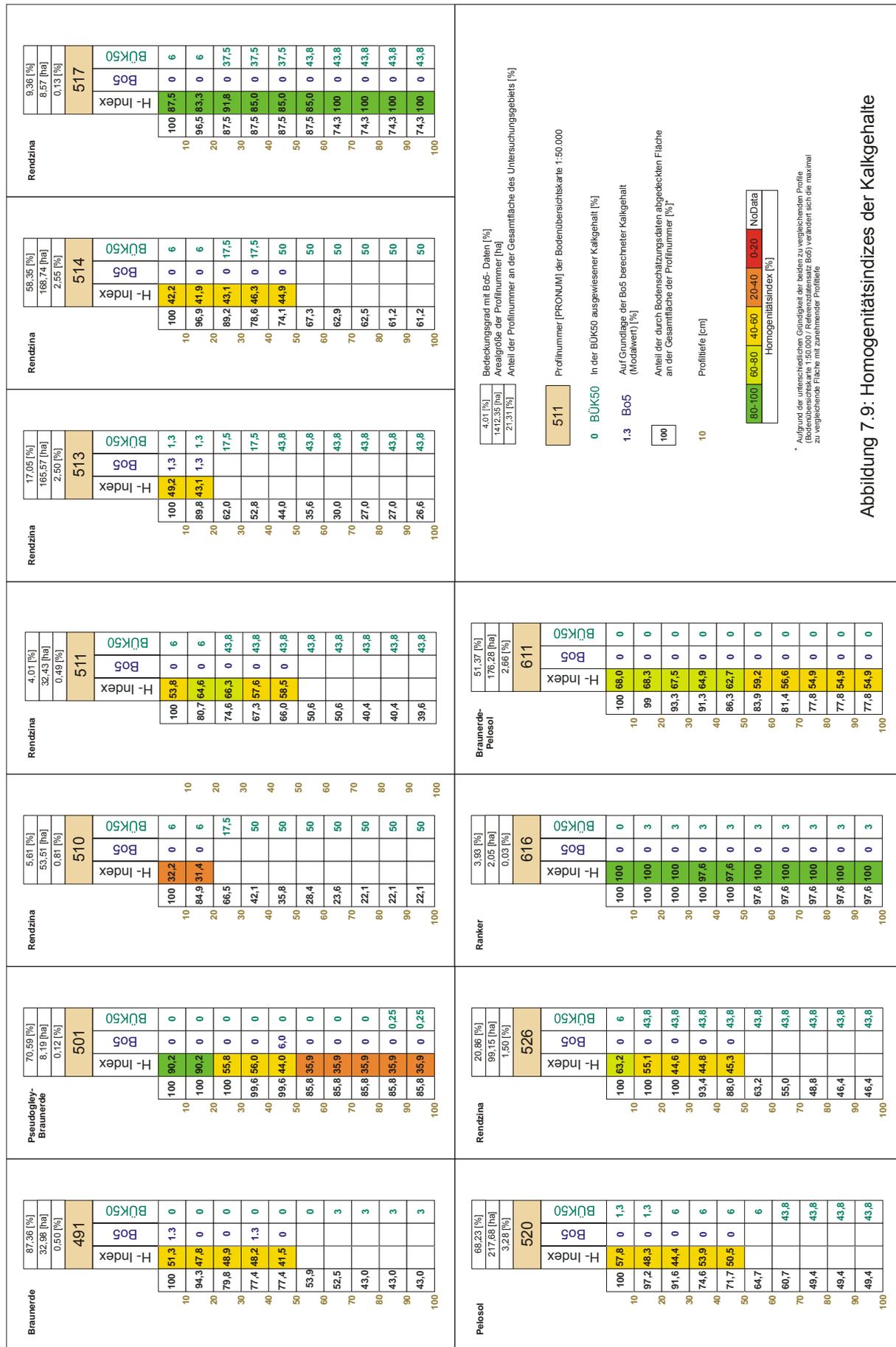
Beim Kalkgehalt gestaltete sich der Vergleich des BÜK50- und Bo5- Datensatzes besonders schwierig, da folgende Randbedingungen gegeben sind: In der BÜK50 ist jede Profilnummer bis in 200 cm Tiefe mit einer Information zum Kalkgehalt ausgewiesen. Die Daten des Referenzdatensatzes Bo5 berücksichtigen maximal eine Profiltiefe bis 100 cm. Allerdings gibt es viele Profile, vor allem bei den flachgründigen, kalkhaltigen Böden, die z.B. nur bis 20 cm Tiefe eine Information vorliegen haben. Für tiefer liegende Horizonte können bei diesen flachgründigen Profilen keinerlei Rückschlüsse auf den Kalkgehalt getätigt werden. Dies hat zur Folge, dass der ohnehin geringe Anteil der kalkhaltigen Kartiereinheiten der BÜK50 durch die Bo5-Daten mit der Tiefe noch weiter sinkt und somit eine Repräsentativität der Stichprobe mit zunehmender Tiefe zumindest hinterfragt werden muss.

Homogenitätsindizes

Die Kartiereinheiten (Abbildung 7.9) zeigen ein recht unterschiedliches Bild bezüglich der Höhe der H-Indizes. Sie schwanken zwischen etwa 31 % (Pronum 510) und 100 % (Pronum 616, 517). Mit Ausnahme der Profilnummer 501 ergeben sich innerhalb der Profile keine größeren Schwankungen, so dass ein Trend der Indizes für Ober- bzw. Unterböden nicht abschätzbar ist. Bis auf die Kartiereinheiten 517, 616 und den Oberboden der Pronum 501 liegen die Modalwerte meist zwischen 40 %–60 %. Die Unterböden der Pronum 501 sowie der Oberboden des Profils 510 weisen mit etwa 35 % die geringsten Indizes aus. Somit sind die Kalkgehalte innerhalb der gewählten Grenzen der einzelnen Kartiereinheiten sehr heterogen.

Der Grund für diesen Befund lässt sich aus der Betrachtung der zugehörigen Kalkgehalte der H-Indizes ableiten: Bis auf die Profilnummer 491 und 513 sowie zumindest in einem Horizont der Pronum 501 sind alle aus dem Referenzdatensatz berechneten Modalwerte kalkfrei. Der Referenzdatensatz und die BÜK50 (vgl. hierzu Kapitel 7.2) weisen also kaum Übereinstimmungen auf. Ursache für die niedrigen Indizes ist primär der geringe Stichprobenumfang. Der Referenzdatensatz hat nur Informationen über die landwirtschaftlich genutzten Böden. Diese liegen – zumindest was die Rendzinen betrifft – in den Übergangsbereichen zu anderen Ausgangssubstraten oder zumindest noch relativ tiefgründigen, kalkhaltigen Lockerböden.

Die Kartiereinheiten 491, 501, 514 und 520 lassen aber auf weitere Ursachen schließen. In der Profilnummer 491 sind die Oberböden laut BÜK50 kalkfrei. Zwar weist der Modalwert mit etwa 50 % Flächenanteil des Referenzdatensatzes auch den Wert 0 aus, allerdings sind demzufolge über 50 % der Fläche mehr oder minder kalkhaltig. Für die Unterböden der Pronum 491, die laut BÜK50 gering kalkhaltig sind, lässt sich keine Aussage erzielen, da in der Bo5 auf der Mehrzahl der Flächen keine Information vorliegt. Die Profilnummer 501 hat laut BÜK50 ab 80 cm Profiltiefe kalkhaltige Horizonte. Die zu den berechneten H-Indizes gehörenden Kalkgehalte der Bo5 sind bis 80 cm Profiltiefe ebenfalls null, allerdings zeigt die geringe Höhe der Indizes, dass vor allem ab 50 cm Profiltiefe etwa 64 % der Horizonte des Referenzdatensatzes eine kalkhaltige Information haben. Hier spielt auch der abnehmende zu vergleichende Flächenanteil mit der Tiefe keine Rolle, da dieser bei etwa 86 % der Ausgangsfläche liegt. Die Pronum 514 hat laut BÜK50 bis etwa 50 cm Profiltiefe Kalkgehalte zwischen 6 % und 50 %. Der Referenzdatensatz zeigt aber, dass etwa 40 % aller Flächen kalkfrei sind. Gleiches gilt für die Profilnummern 520 und 526.



Interdezilbereiche

Innerhalb der Kartiereinheiten schwanken die Interdezilbereiche in Tabelle 7.4 zwischen 1,3 % und 17,5 %. Hierbei ist auffällig, dass die höchsten Spannen nicht unbedingt mit den niedrigsten Homogenitätsindizes einher gehen. So sind in der Profilnummer 501 die niedrigsten H-Indizes mit etwa 35 % zu finden, aber mit 6 % nicht die höchsten Interdezilbereiche. Hieraus lässt sich schließen, dass für die niedrigen Indizes innerhalb der einzelnen Kartiereinheiten der BÜK50 nicht unbedingt breite Spannweiten der Kalkgehalte verantwortlich sein müssen. Innerhalb der Profilnummern können geringe Änderungen in der Höhe des Kalkgehalts vorliegen. Diese liegen dann allerdings räumlich gesehen so dicht beieinander, dass die relativ großen Kartiereinheiten der mittelmaßstäbigen Karte kein homogenes Bild ermöglichen.

Profilnummer	Interdezilbereich I_{80}									
	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm	100cm
491	1.3	6.0	6.0	6.0	6.0	*	*	*	*	*
501			1.3	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
510	6.0	17.5	*	*	*	*	*	*	*	*
511	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	*	*	*	*	*
513	6.0	17.5	*	*	*	*	*	*	*	*
514	6.0	17.5	17.5	17.5	17.5	*	*	*	*	*
517	6.0	6.0	6.0	17.5	17.5	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
520	1.3	6.0	6.0	17.5	17.5	*	*	*	*	*
526	1.3	6.0	6.0	6.0	17.5	*	*	*	*	*
611	1.3	1.3	6.0	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5
616										

*	Modalwert ist NoData, daher keine Intedezilwert- Ausweisung
	nur ein Peak bildet den Bereich ab, daher kein Interdezilbereich

Tabelle 7.4: Interdezilbereiche der Kalkgehalte in den untersuchten Kartiereinheiten.

Die Indizes für das gesamte Untersuchungsgebiet liegen laut Tabelle 7.5 im Schnitt zwischen 50 %–60 %. Die berechneten Werte sind mit steigender Tiefe allerdings auf Grund der geringen berücksichtigten Fläche (über 85 % *NoData* ab etwa 50 cm Profiltiefe) auf der Basis dieses geringen Stichprobenumfangs zu beurteilen. Es sind die Profilnummern 517 und 616 mit H-Indizes von 100 %, welche die Indizes der beiden anderen tiefgründigeren Profile (611 und 501) überproportional erhöhen. Allerdings sei an dieser Stelle erwähnt, dass fast alle H-Indizes als Modalwert Co (kalkfrei) ausgewiesen haben. Im Hinblick auf diese Tatsache sind alle Kartiereinheiten der BÜK50 als sehr heterogen einzustufen. In Abbildung 7.9 kommt diese Tatsache stärker zum Ausdruck, da in dieser Abbildung die Kontraste zwischen den beiden Kartenwerken visualisiert werden.

Profiltiefe	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm	100cm
H-Index [%]	54.8	51.5	51.4	54.5	52.4	60.1	57.9	56.5	56.5	56.5
berücks. Fläche [%]	100	95.4	69.4	61.3	57.6	14.7	13.9	12.9	12.9	12.9

Tabelle 7.5: Mittlere Homogenitätsindizes der Kalkgehalte für das Gesamtblatt.

Die Interdezilbereiche für das Gesamtblatt zeigen in Tabelle 7.6 bereits ab 40 cm Profiltiefe mittlere Interdezilbereiche von 14 %–17 %. Im Oberboden treten maximale I_{80} von etwa 3 %–

9,6 % auf. Die Interdezilbereiche sind demzufolge in den Oberböden als moderat, allerdings für die Unterböden als zu hoch einzustufen.

Profiltiefe	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm	100cm
I_{80} [%]	3.4	6.8	8.2	8.4	11.4	17.0	17.0	16.9	16.9	16.9
berücks. Fläche [%]	99	98.9	82.0	84.5	86.1	26.3	27.5	29.0	29.2	29.3

Tabelle 7.6: Mittlere Interdezil₈₀-Bereiche der Kalkgehalte für das Gesamtblatt.

Fazit zum Kalkgehalt

Die Grenzen der Kartiereinheiten der BÜK50 sind auf Grund des Generalisierungsgrades der Karte, aber auch auf Grund der Grenzziehung nicht in der Lage, homogene Areale bezüglich der Kalkgehalte auszuweisen.

7.3 Die Heterogenität der Merkmalsausprägung der Bodenübersichtskarte 1:50.000

Aus Kapitel 7.1 ist bekannt, wie homogen die einzelnen Kartiereinheiten der BÜK50 bezüglich der Bodenbasisdaten aufgebaut sind. Die berechneten Maße erlauben die Beurteilung der Heterogenität in den gewählten Grenzen der BÜK50. Sie liefern allerdings keine Aussage darüber, wie gut oder schlecht der in der BÜK50 ausgewiesene Wert dies widerspiegelt. So ist denkbar, dass eine Kartiereinheit der BÜK50 einen Homogenitätsindex von 100 hat, da im Vergleichsdatensatz der Bo5 innerhalb dieser Profilvernummer z.B. nur ein Wert vorkommt. Dieser Wert muss allerdings nicht mit dem in der BÜK50 ausgewiesenen Wert übereinstimmen. In diesem Fall wäre zwar die Grenzziehung in der BÜK50 optimal gelöst, die Attributierung der Einheiten aber verbesserungswürdig. Somit stellt sich an diesem Punkt die Frage, wie gut oder schlecht die BÜK50 bezüglich der Werteausprägung ist. Daher wird im Folgenden anhand von Kontrastwerten dieser Unterschied heraus gearbeitet. Als Kontrastmaß wurde der (flächengewichtete) mittlere absolute Fehler (MAE_{fl}) gewählt. Hinweis: Da der (MAE_{fl}) als Kontrastmaß in diesem Falle zwischen zwei Maßstabsebenen fungiert, kann auch nur ein Wert berechnet werden, wenn auch eine Information in der Kartenebene BÜK50 vorliegt. Daher können im Vergleich zu den vorhergehenden Abbildungen Unterschiede vorliegen. So konnten z.B. in der Profilvernummer 514 noch H-Indizes in Profiltiefen über 40 cm berechnet werden. Dies ist bei den MAE_{fl} -Werten nicht möglich, da die BÜK50 nur Bodenartenuntergruppen bis 40 cm ausweist.

7.3.1 Unterschiede in den Ausprägungen der Bodeneigenschaften

7.3.1.1 Kornfraktionen

Abbildung 7.10 und 7.11 zeigen die berechneten mittleren absoluten Fehler für die Korngrößenzusammensetzung in lössfreien und lössdominierten Kartiereinheiten.

In den lössdominierten Arealen treten, mit Ausnahme der Profilvernummer 491, erst ab Profiltiefen <70 cm mittlere absolute Fehler >20 % aus. Ursache hierfür ist meist die unterschiedliche Lössmächtigkeit. Vor allem bei einem Substratwechsel innerhalb des Bük50-Profiles (z.B. Ls3 in Pronum 158 und 184, Lts in Pronum 534) entstehen erhebliche Abweichungen, wenn der Referenzdatensatz noch lössdominierte Bodenartenuntergruppen (Ut3, Ut4) ausweist. Allerdings ist dies auch in der Profilvernummer 491 der Fall, ohne dass es bei diesem Substratwechsel zu einer Erhöhung des Fehlers käme. Innerhalb dieser Profileinheit ist die Situation genau umgekehrt: Von der BÜK50 ausgewiesene, lösshaltige Bodenartenuntergruppen im

Oberboden haben einen größeren Fehler als lössfreie Bodenartenuntergruppen im Unterboden. Ursache hierfür ist allerdings ebenfalls die mangelnde Übereinstimmung bezüglich des Lösseinflusses in den beiden Maßstabebenen. Während die BÜK50 bis in 60 cm Tiefe eine lössdominierte Bodenart ausweist, ist laut Referenzdatensatz dieser Lösseinfluss im Ober-

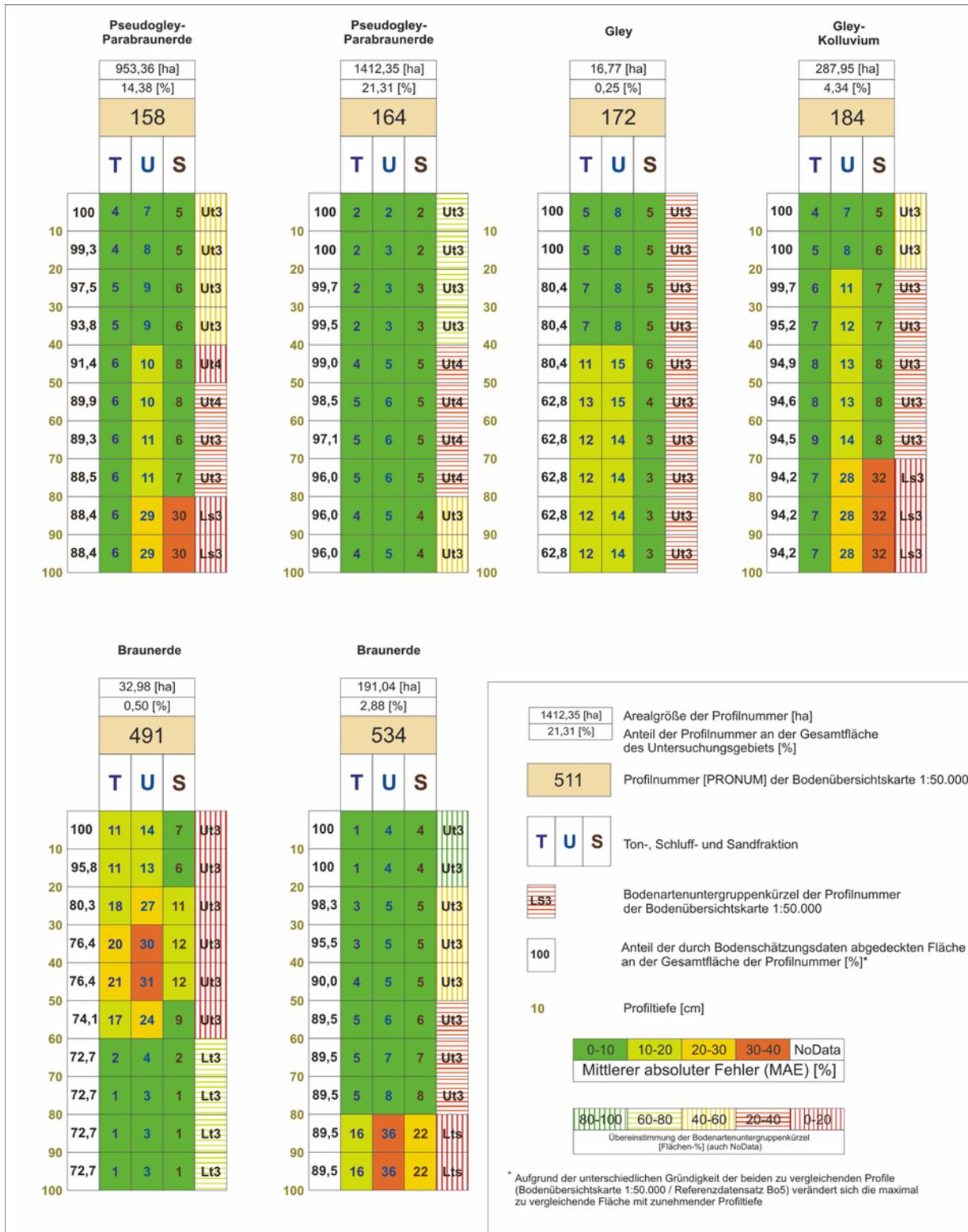


Abbildung 7.10: Mittlerer absoluter Fehler (MAE_{fi}) der Kornfraktionen in lössdominierten Kartiereinheiten (BÜK50 - Bo5).

boden nicht gegeben. Beim Vergleich der beiden Bodenartenuntergruppen (BÜK50/Bo5) wird deutlich, dass eine mangelnde Übereinstimmung dieser klassifizierten Daten nicht unbedingt mit einem großen MAE_{fi} einhergehen muss.

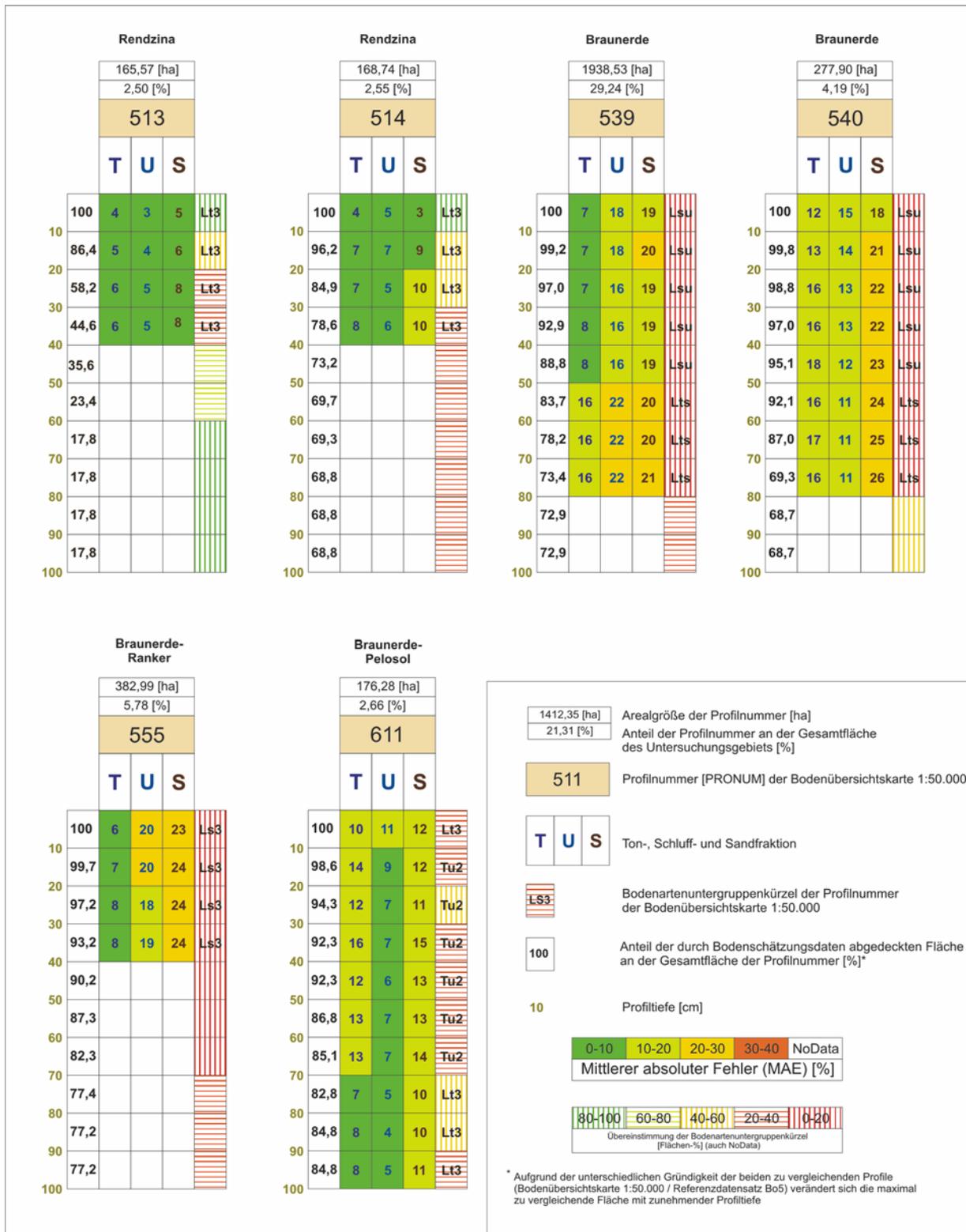


Abbildung 7.11: Mittlerer absoluter Fehler (MAE_{fi}***) der Kornfraktionen in lössfreien Kartiereinheiten (BÜK50 - Bo5).

Bei den Profilnummern 164 oder 534 stimmen z.B. die Bodenartenuntergruppen nur auf 20 %–40 % der Fläche überein obwohl der MAE_{fl} aller drei Fraktionen unter 8 liegt. In den lössfreien Profilnummern 539, 540 und 555 treten Abweichungen >20 % bereits in Profiltiefen <20 cm auf. Während die Rendzinen relativ geringe MAE_{fl} zeigen, ist dies bei den Braunerden nicht der Fall. Mit Differenzwerten um 15 %–20 % sind diese Beträge fast doppelt so hoch wie bei den Kalkböden.

Im Vergleich zwischen lössdominierten und lössfreien Profilen treten bei ersteren im Einzelfall höhere MAE_{fl} auf. Ursache hierfür sind die hohen Schluff- und niedrigen Sandgehalte bei den lössdominierten Bodenartenuntergruppen Ut3 und Ut4. Werden hier vom Kartierer „falsche“ Bodenartenuntergruppen ausgewiesen, entstehen sehr große Differenzen beim MAE_{fl} auf.

7.3.1.2 Kalkgehalte

Profiltiefe	Profilnummer																							
	491	491_A	501	501_A	510	510_A	511	511_A	513	513_A	514	514_A	517	517_A	520	520_A	526	526_A	611	611_A	616	616_A		
10cm	0.7	100.0	0.1	100.0	4.3	100.0	4.8	100.0	1.1	100.0	4.5	100.0	5.2	100.0	1.0	100.0	5.3	100.0	0.6	100.0	0.0	100.0		
20cm	0.9	94.3	0.6	100.0	4.3	84.9	5.3	80.7	1.9	89.8	4.8	96.9	5.3	96.5	1.5	97.2	42.7	100.0	0.8	99.0	3.0	100.0		
30cm	0.8	79.8	1.0	100.0	14.1	66.5	43.2	74.6	14.9	62.0	13.2	89.2	37.4	87.5	4.3	91.6	42.4	100.0	1.1	93.3	3.0	100.0		
40cm	1.2	77.4	1.2	99.6	46.8	42.1	42.7	67.3	14.9	52.8	12.9	78.6	35.8	87.5	4.7	74.6	42.2	93.4	1.9	91.3	3.0	100.0		
50cm	1.7	77.4	3.0	99.6	46.2	35.8	42.4	66.0	41.6	44.0	45.2	74.1	35.8	87.5	4.5	71.7	42.3	88.0	3.8	86.3	3.0	100.0		
60cm	1.2	53.9	2.5	85.8	46.1	28.4	43.0	50.6	42.1	35.6	45.2	67.3	43.7	74.3	4.7	64.7	42.5	63.2	3.5	83.9	3.0	97.6		
70cm	2.6	52.5	2.5	85.8	45.9	23.6	42.6	50.6	42.2	30.0	44.8	62.9	43.7	74.3	40.6	60.7	42.5	55.0	3.8	81.4	3.0	97.6		
80cm	2.8	43.0	2.5	85.8	46.0	22.1	42.9	40.4	42.1	27.0	44.8	62.5	43.7	74.3	40.8	49.4	43.0	48.8	4.1	77.8	3.0	97.6		
90cm	2.8	43.0	2.4	85.8	46.0	22.1	42.9	40.4	41.8	27.0	44.8	61.2	43.7	74.3	40.8	49.4	43.1	46.4	4.1	77.8	3.0	97.6		
100cm	2.7	43.0	2.4	85.8	46.0	22.1	42.7	39.6	41.9	26.6	44.8	61.2	43.7	74.3	40.8	49.4	43.1	46.4	4.1	77.8	3.0	97.6		

Tabelle 7.7: MAE_{fl} der Kalkgehalte.

Bei den blau visualisierten Werten ist nur ein eingeschränkter Vergleich möglich, da der Modalwert des Referenzdatensatzes Bo5 für diese Tiefen bereits *NoData* beträgt. Die maximal zu vergleichende Fläche [%] lässt sich aus der Angabe *_A* entnehmen.

In den Profil-Einheiten 511, 514 und 517 sind die mittleren absoluten Fehler mit Werten zwischen 35 %–45 % in einigen Tiefenbereichen viel zu hoch. Auffällig ist, dass die erhöhten Abweichungen erst ab Profiltiefen >20 cm auftreten. Die Profilnummern 491, 501, 611 und 616 haben mittlere Fehler, die allesamt kleiner als 4,1 % sind und somit als gering einzustufen sind. Dies war nach der Diskussion der H-Indizes (vgl. Abbildung 7.9) nicht zu erwarten. Die relativ geringen Interdezilbereiche lassen aber keine starken Schwankungen innerhalb der Verteilungen zu. Auffällig ist, dass es sich bei diesen Profilen nicht um Rendzinen handelt. Im Vergleich zum Referenzdatensatz werden demzufolge geringe Kalkgehalte seitens der BÜK50 sehr gut abgebildet. Größere Abweichungen zwischen den beiden Kartenwerken treten vor allem bei den Rendzinen auf, da die BÜK50 die Kalkgehalte mit zunehmender Profiltiefe überschätzt.

7.3.1.3 Kurzfazit:

Der Unterschied der Korngrößenzusammensetzung in den beiden Kartenwerken beträgt meist weniger als eine Klassenbreite. Differenzen >30 % treten vor allem in den lössdominierten Arealen auf, da lokale lössfreie Inseln in den lössdominierten BÜK50-Einheiten relativ große Differenzen hervorrufen. Die Kalkgehalte sind auf Grund des eingeschränkten Stichprobenumfanges kaum adäquat zu beurteilen.

7.3.2 Möglichkeiten der Optimierung der Merkmalsausprägung der Bodenübersichtskarte 1:50.000

Bei der Berechnung der Kontrastwerte werden Differenzen zwischen den Merkmalsausprägungen beider Kartenebenen gebildet. Ein hoher Kontrast bzw. Fehler in den Kartiereinheiten der BÜK50 kann sowohl durch die Grenzlinienziehung als auch durch eine nicht optimale Attributierung (Hinterlegung des Karteninhalts) seitens des Kartierers bedingt sein. Wird die Grenzlinienziehung nicht in Frage gestellt, sondern nur die hinterlegten Inhalte miteinander in Bezug gesetzt, so wird dies als inhaltlicher Fehler bezeichnet. Bei der Bewertung eines inhaltlichen Fehlers wird geprüft, ob die Attributierung dieser Kartiereinheit der BÜK50 innerhalb der Grenzziehung optimal ist. Eine optimale Attributierung der BÜK50 wäre gegeben, wenn das hinterlegte Merkmal dem Modalwert des Referenzdatensatzes entspräche, da in diesem Fall der MAE_{fi} minimal wäre. Zur Bestimmung des inhaltlichen Fehlers werden zwei lössfreie und zwei lössdominierte Profile untersucht.

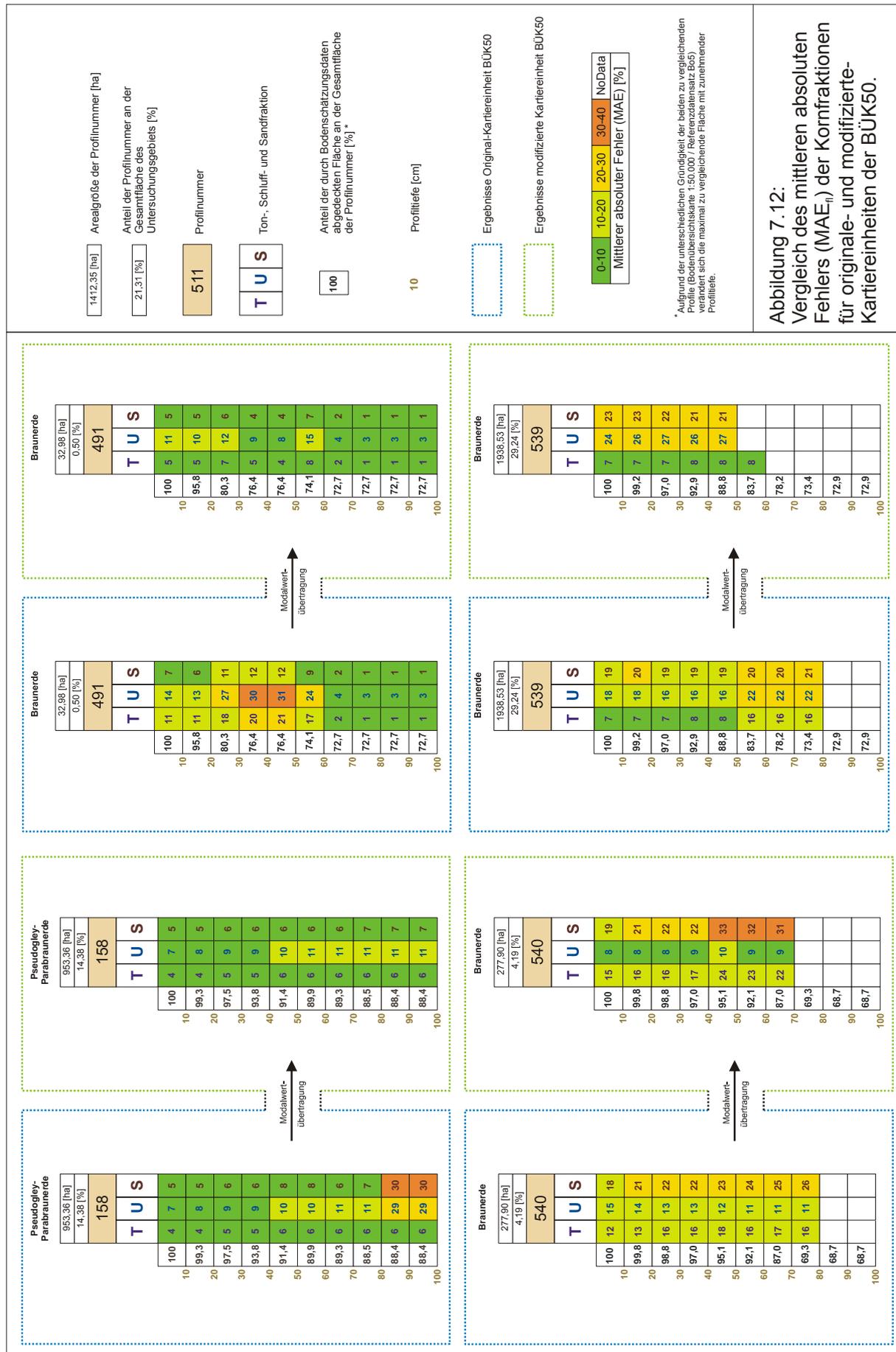
Der MAE_{fi} wird für jedes Profil zweifach bestimmt:

1. Differenzbildung zwischen dem Referenzdatensatz und dem Karteninhalt der originären BÜK50.
2. Differenzbildung zwischen dem Referenzdatensatz und einem modifizierten Karteninhalt der BÜK50. Hierbei wird der Modalwert der Kartiereinheit, welcher auf Basis des Referenzdatensatzes bestimmt wurde, hinterlegt.

Die Unterschiede in den Kontrastmaßen würden einen Hinweis geben, inwiefern die Größe der Kartiereinheit bzw. die vorliegende Grenzziehung sich auf die Höhe des berechneten Kontrastwertes auswirkt. Würden sich nur geringfügige Änderungen ergeben, wären für die Höhe des Kontrastwertes die Arealgröße bzw. Grenzziehung verantwortlich und nicht die hinterlegten Karteninhalte dieser Einheit.

Die Ergebnisse werden in Abbildung 7.12 dargestellt. Die Profilnummer 158 steht stellvertretend für die lössdominierten Profile, bei denen auf Grund eines Substratwechsels im Profil hohe Fehler berechnet wurden. Wäre der Kartierer hier in der Lage, den Lösseinfluss differenzierter darzustellen, würden die Kontraste (MAE_{fi}) mit zunehmender Tiefe stark zurückgehen. Die Profilnummer 491 ist ein typisches Profil, welches laut BÜK50 im Oberboden stark lösshaltig ist. Dieser Lösseinfluss ist aber laut Referenzdatensatz nicht so stark ausgeprägt. Nach der neuen Attributierung der Polygone sind die Abweichungen zwischen der BÜK50 und der Bo5 nur noch gering. Für die lösshaltigen Profile gilt somit: Wäre es auf einer mittelmaßstäbigen Karte möglich, die hinterlegten Karteninhalte zu optimieren, wären die Abweichungen zwischen den beiden Maßstabsebenen und somit auch der Generalisierungseffekt sehr gering.

In den lössfreien Einheiten sind kaum Reduzierungen des MAE_{fi} möglich. Zwar sind leichte Reduzierungen des Fehlers bei den Schluffgehalten im Profil 540 zu verzeichnen, aber im gleichen Zuge verschlechtert sich der berechnete Fehler der Ton- und Sandgehalte. In der Profilnummer 539 bleibt zwar der Fehler der Tongehalte gleich, allerdings steigen die Kontrastwerte für die Schluff- und Sandgehalte stark an. Somit ist eine Reduzierung des Kontrastwertes in lössfreien Arealen nicht durch eine neue Attributierung der Polygone zu erzielen. Der Fehler ist somit durch den Maßstab gegeben, und etwaige Reduzierungen können nur anhand von Grenzverschiebungen oder Polygonverkleinerungen erreicht werden.



7.4 Fazit

Die Heterogenität der Korngrößen ist in lössfreien Gebieten erheblich höher als in lössdominierten Arealen. Während die Löss-Kartiereinheiten fast ausschließlich H-Indizes >80 % aufweisen, sind vor allem die Schluff- und Sandgehalte der Oberböden der lössfreien Einheiten mit Werten um 50 % deutlich geringer. Von den lössfreien Arealen sind es vornehmlich die Braunerden der Silikatsteinverbreitungsgebiete, bei denen die geringste Homogenität zu verzeichnen ist. Indikatoren für eine erhöhte Homogenität können bereits aus der mittelmaßstäbigen Karte abgeleitet werden. So sind Profile mit Substratwechselln innerhalb der ersten 100 cm Profiltiefe sowie Fließerden ein eindeutiger Hinweis auf eine erhöhte Varianz.

Die Varianz der Kalkgehalte innerhalb der Grenzen der BÜK50 ist zu hoch. Die erhöhte Varianz wird besonders beim Vergleich der Kalkgehalte zwischen den beiden Maßstabsebenen deutlich. Die größten Flächenanteile innerhalb der einzelnen Profildnummern sind laut Referenzdatensatz kalkfrei, obwohl laut BÜK50 Kalk vorhanden sein müsste.

Die gewonnenen Kenntnisse bestätigen sich beim Vergleich der beiden Maßstabebenen auch beim Kontrastwert. In den lössdominierten Profilen sind die Kontraste der Kornfraktionen insgesamt gesehen zwischen den beiden Kartenwerken etwas geringer als in den lössfreien Arealen. Wie aus der Beurteilung des inhaltlichen Fehlers der Kartiereinheiten hervorgeht, könnte durch eine optimale Attributierung der Einheiten der MAE_{fl} der Kornfraktionen in den lössdominierten Einheiten stark gesenkt werden. Dies ist in den lössfreien Arealen nicht möglich. Hier kann der Kontrastwert nur mit Hilfe von Grenzverschiebungen bzw. Disaggregation der Polygoninformationen verringert werden. Für die Kalkgehalte sind die berechneten Unterschiede zu hoch. Eine Varianzminimierung lässt sich hier ebenfalls nicht durch eine neue Attributierung der Polygoninhalte der BÜK50 zu erzielen.

8 Minimierung der Merkmalsvarianz durch Einsatz des Disaggregierungsmodells

8.1 Verminderung der Merkmalsvarianz durch Disaggregation auf Grundlage der Gesteinsverbreitung

Insgesamt treten im Untersuchungsgebiet 15 unterschiedliche petrographische Einheiten auf. Diese sind wie folgt auf die lössfreien und lössdominierten Einheiten der BÜK50 verteilt:

BÜK50- Kartiereinheiten					
Petrographische Information	Kürzel	lössfrei [ha]	lössfrei [%]	lössdominiert [ha]	lössdominiert [%]
Feinsandstein- Mittelsandstein	[^] fs- [^] ms	616.5	16.5	46.3	1.6
Grobsandstein - Feinsandstein	[^] gs- [^] fs	34.7	0.9	3.2	0.1
Kalkstein	[^] k	115.9	3.1	14.9	0.5
Schaumkalk	[^] kp	45.9	1.2	0.0	0.0
Mergelstein	[^] m	75.2	2.0	0.0	0.0
Tonstein	[^] t	827.7	22.2	38.0	1.3
Tonstein - Schluffstein	[^] t- [^] u	52.7	1.4	7.9	0.3
Torf-Kies	T-G	99.2	2.7	0.0	0.0
Ton-Stein	T-X	60.4	1.6	1.9	0.1
Schluff	U	1208.3	32.4	2614.3	90.3
Schluff-Kies	U-G	4.4	0.1	1.0	0.0
Wechsellagernd (Feinsandstein-Mittelsandstein, Sapropel-Gesteine, Schluffstein)	wl([^] fs- [^] ms, [^] f, [^] u)	590.4	15.8	150.8	5.2
Torf	H	3.0	0.1	17.8	0.6
Wasser (z. B. Seeburger See)	W	0.0	0.0	0.3	0.0
Mudde	F	0.0	0.0	0.2	0.0
Summe		3734.3	100.0	2896.6	100.0

Tabelle 8.1: Verteilung der petrographischen Informationen auf lössfreie und lössdominierte Kartiereinheiten der BÜK50

Nach der Verschneidung der BÜK50-Einheiten mit den Informationen zum Gesteinsuntergrund treten nach der Entfernung der Torf- und Wasser- Standorte im Untersuchungsgebiet 96 verschiedene Kombinationen aus BÜK50-Profilnummer/petrographischer Information auf. Von diesen neuen Kartiereinheiten sind 70 lössfrei und werden im Modell berücksichtigt. Abbildung 8.1 visualisiert die auf Kartiereinheiten der BÜK50 basierte Vorgehensweise am Beispiel der Profilnummer 539, einer Braunerde auf Silikatgestein. Das ursprüngliche etwa 1938 ha große Areal der Pronum 539 wird anhand der Petrographie in sieben unterschiedliche Einheiten unterteilt. Jeder dieser Untereinheiten wird das wahrscheinlichste Profil durch Modalwertübertragung zugeordnet. Um nicht nur H-Indizes für das gesamte Kartenblatt vergleichen zu können, sondern auch die Veränderungen der Indizes auf der Basis der Kartiereinheiten der BÜK50 beurteilen zu können, werden die berechneten Homogenitätsindizes der Untereinheiten (I–VII) flächengewichtet zu einem H-Index für die ursprüngliche Kartiereinheit zusammengefasst. Diese Ergebnisse werden im Folgekapitel vorgestellt.

8.1.1 Erfolg bei der Minimierung der Merkmalsvarianz der Kornfraktionen

Abbildung 8.2 zeigt das Ergebnis für die Homogenitätsindizes der Kornfraktionen. Wie aus dem Vergleich mit Ausgangsheterogenität der BÜK50 (in der Abbildung links über den jeweiligen Profilen) ersichtlich, ist es nach dem ersten Disaggregationsschritt zu einer deutlichen Erhöhung der Indizes gekommen. Nach dem ersten Disaggregationsschritt treten die niedrigen Homogenitätsklassen 0 %–20 % und 20 %–40 % überhaupt nicht mehr auf. Die Homogenitätsindizes schwanken bezüglich der Tongehalte zwischen 42 % und 90 %, für die Schluffgehalte zwischen 56 % und 100 % und für die Sandgehalte zwischen 44 % und 86 %. Vor allem in den ehemals sehr heterogenen Braunerden (Profilnummern 539 und 540) ver-

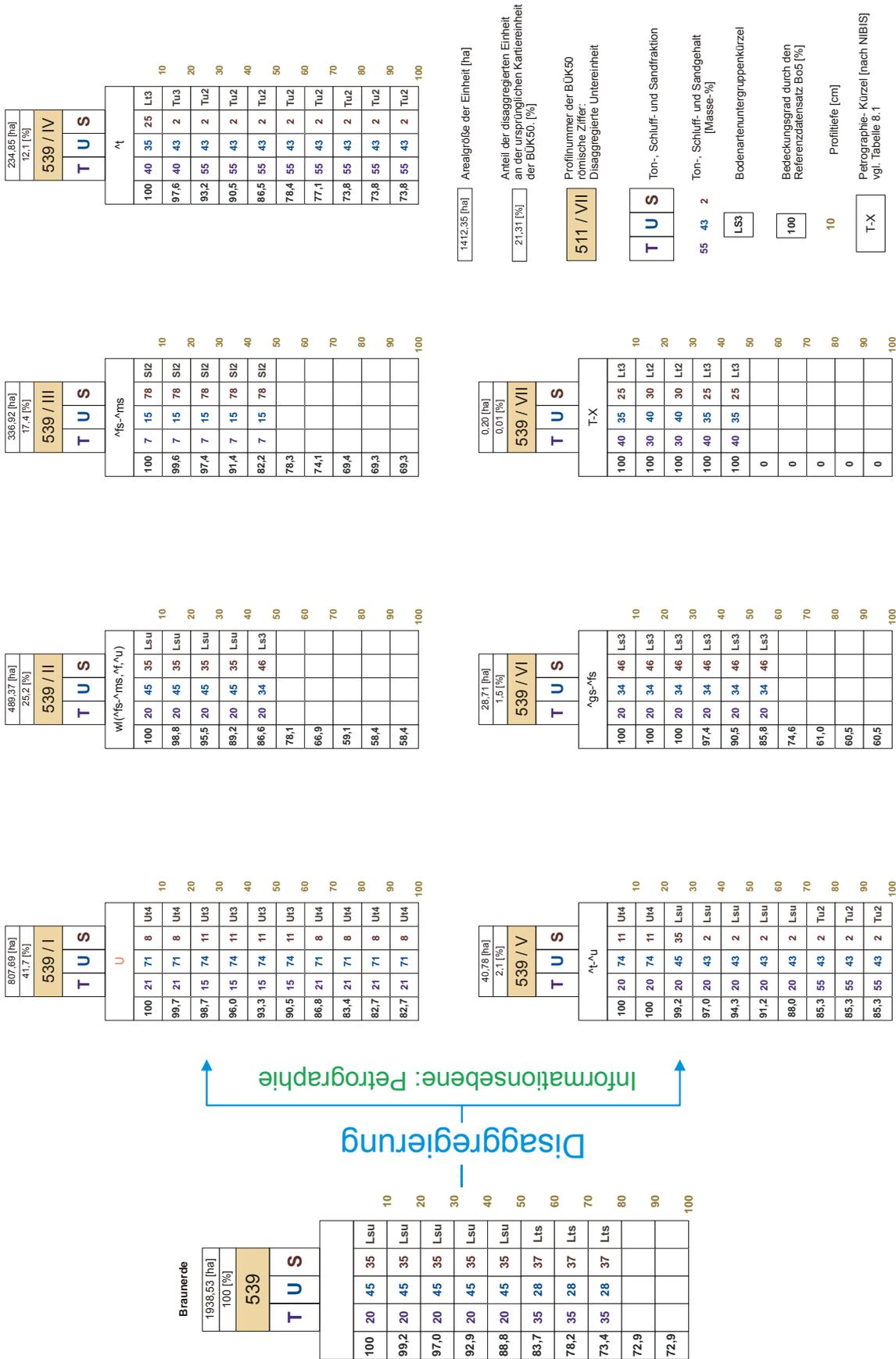


Abbildung 8.1: Disaggregation der Ausgangseinheiten der BÜK50 am Beispiel einer Braunerde auf Silikatgestein.

mochte das Modell mit Steigerungsraten der Indizes beim Ton von maximal 41 %, beim Schluff von maximal 31 % und beim Sand von maximal 23 % die Varianz sehr deutlich zu reduzieren.

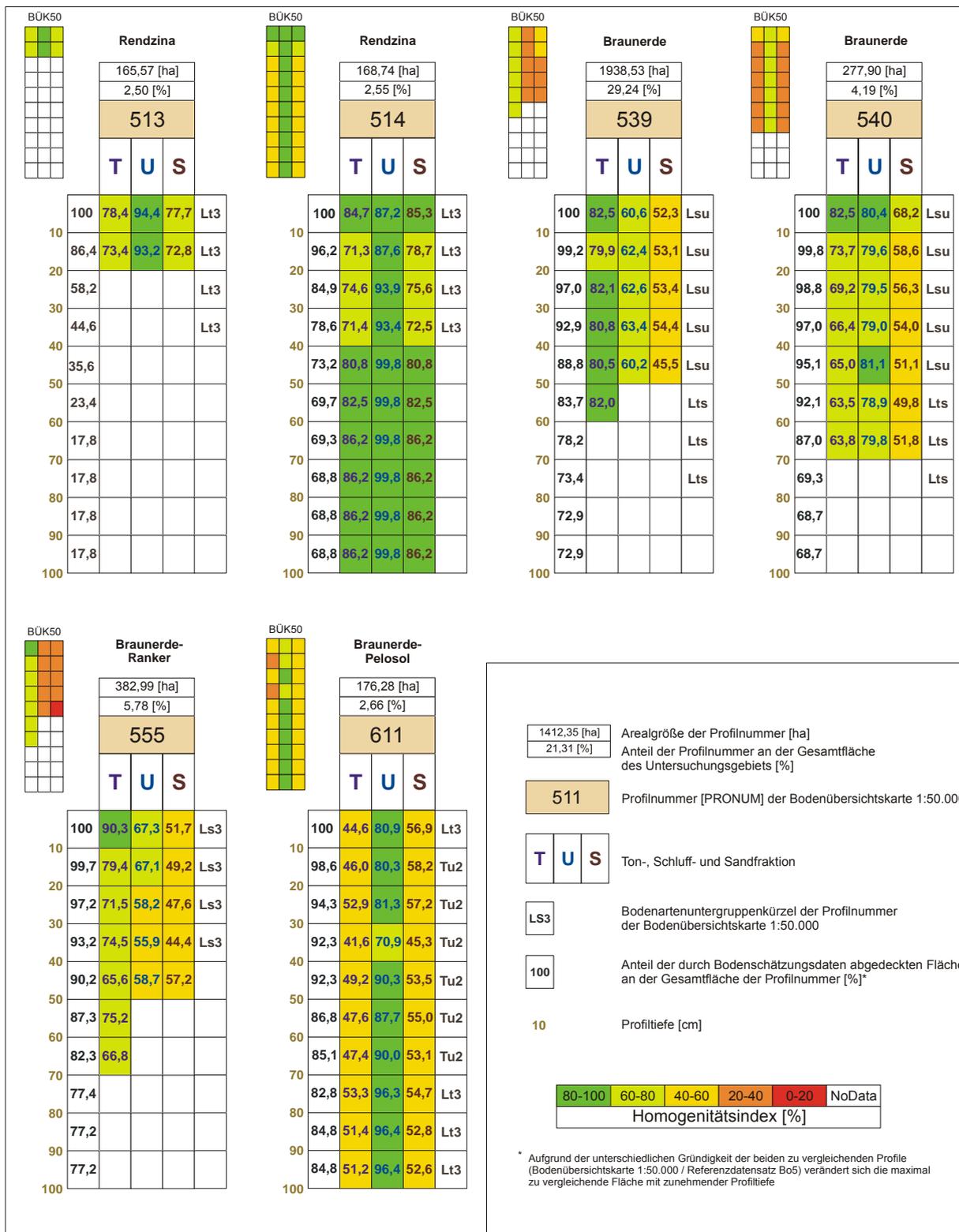


Abbildung 8.2: Mittlere Homogenitätsindizes der Kornfraktionen in lössfreien Kartiereinheiten nach dem ersten Disaggregierungsschritt.

Aber auch in flachgründigeren Braunerden, den Braunerde-Rankern (Pronum 555), sind Zunahmen der Indizes z.B. bei den Schluffgehalten in Höhe von 31 % möglich. In der Rendzina (Profilnummer 514) wurden die Werte durch den Einsatz des Modells bei den ehemals sehr heterogenen Schluff- und Sandgehalten der Unterböden um maximal 35 % erhöht. In der flachgründigen Rendzina (Profilnummer 513) konnten die Indizes nicht weiter gesteigert werden. Allerdings lagen bei dieser Einheit auch vor dem Einsatz des Modells mit H-Indizes über 70 % bei den Sand- und Tongehalten und von über 90 % bei den Schluffgehalten sehr homogene Verhältnisse vor. Im Übergangsbereich der Braunerden zu den Pelosolen (Profilnummer 611) vermochte der Algorithmus vor allem in den Oberböden die Homogenität der Ton- und Schluffgehalte zwischen 10 %–18 % zu erhöhen.

Abbildung 8.3 zeigt die Interdezil₈₀-Bereiche der ausgewählten Profile nach dem ersten Disaggregierungsschritt. Im Vergleich zur Ausgangssituation in der BÜK50 (in der Abbildung links über den jeweiligen Profilen) zeigen wiederum die Braunerden (Profilnummern 539 und 540) sowie Braunerde-Ranker (Profilnummer 555) eine sehr drastische Reduzierung der Indizes. Hohe Interdezilbereiche (60 %–80 %) treten nach dem Einsatz des Modells nicht mehr auf. Relativ hohe I₈₀-Werte (40 %–60 %) sind nach Durchlaufen des Algorithmus nur noch vereinzelt zu finden. Für die Tongehalte konnten maximale Reduzierungen des Interdezil₈₀-Bereichs von etwa 26 % erzielt werden. Für die Schluffgehalte betragen diese Verringerungen maximal 22 % und für die Sandgehalte 41 %.

Es sind vor allem die Braunerden und Braunerde Ranker bei denen, speziell die I₈₀ der Sandgehalte, große Verringerungen der Interdezilbereiche durch das Disaggregierungsmodell zu erreichen sind. Die Veränderungen der Rendzina (Pronum 513) und Braunerde-Pelosole (Pronum 611) sind eher als gering einzustufen, da diese Einheiten bereits in der originären BÜK50 relativ geringe Interdezilbereiche haben.

Wovon hängt die unterschiedliche Varianzminimierung ab?

Folgende Zusammenhänge sind zu erkennen:

Die *Anzahl* der petrographischen Einheiten in den Kartiereinheiten zeigt zunächst keinen linearen Zusammenhang zum Ausmaß der Heterogenität. Alle Kartiereinheiten bestehen im Mittel aus sechs bis acht unterschiedlichen petrographischen Einheiten, sind aber sehr unterschiedlich heterogen.

Wird neben der *Anzahl* der petrographischen Einheiten auch deren *Flächenanteil* innerhalb der Kartiereinheit berücksichtigt, sind erste Zusammenhänge erkennbar: Durch den vektorbasierten Ansatz des Disaggregierungsmodells treten sehr viele kleine Zersplitterungsflächen auf. Diese gehen zwar in die Anzahl der petrographischen Informationen innerhalb der einzelnen Kartiereinheiten ein, besitzen aber wenig Raumrelevanz. Bleiben diese Flächen bei der Betrachtung unberücksichtigt und ist somit eine Kartiereinheit von mehreren ähnlich großen petrographischen Einheiten aufgebaut, steigt die Heterogenität mit der Anzahl der Informationen zum Gesteinsuntergrund. In der Profilnummer 555 (Braunerde-Ranker) existieren laut GK25 z.B. acht verschiedene petrographische Einheiten, von denen aber nur drei Einheiten etwa 92 % der Fläche einnehmen.

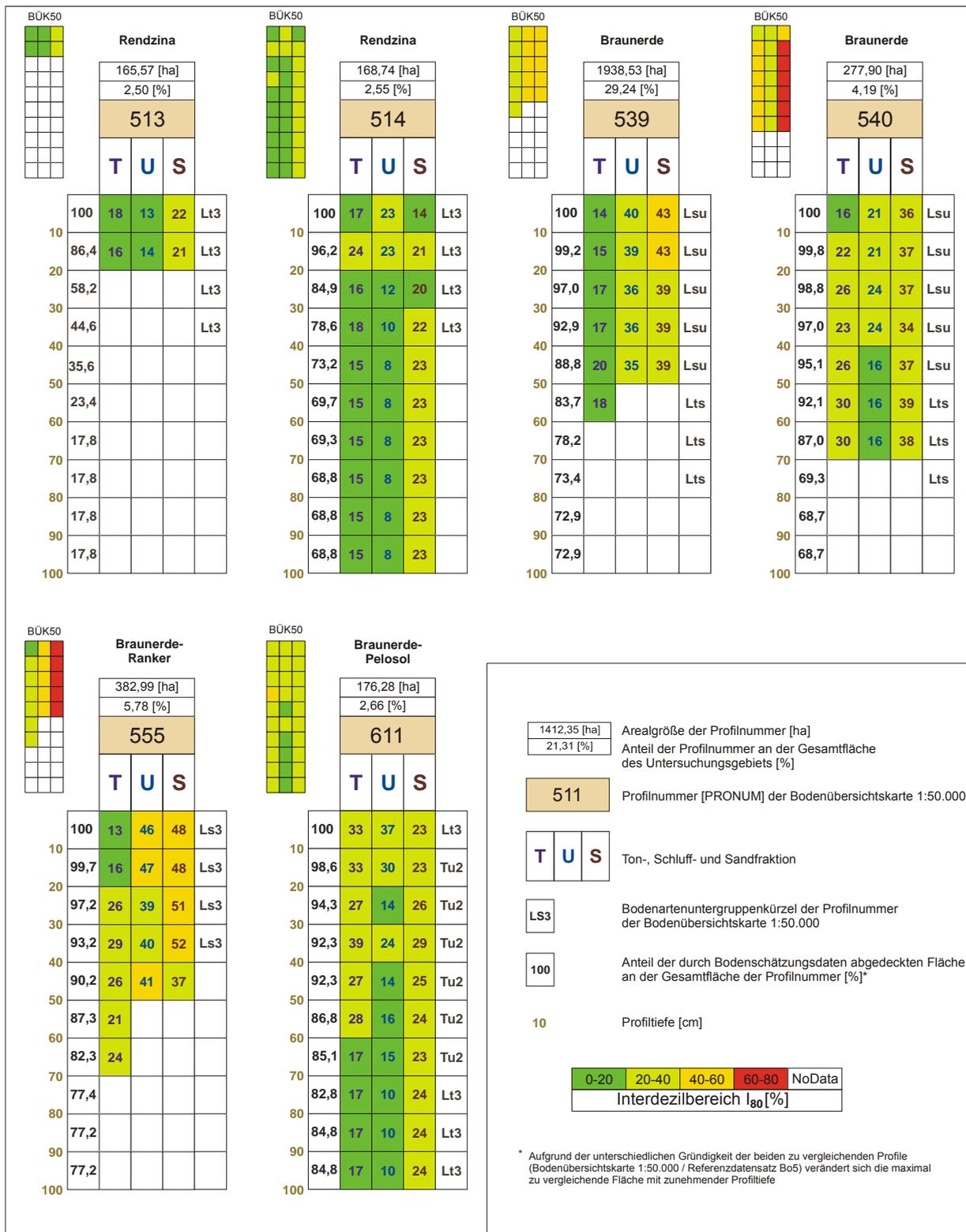


Abbildung 8.3: Mittlere Interdezil₈₀-Bereiche der Kornfraktionen in lössfreien Kartiereinheiten nach dem ersten Disaggregierungsschritt

Bleiben Zersplitterungsflächen bei der Korrelationsanalyse unberücksichtigt, so ist neben der *Anzahl* der petrographischen Informationen auch die *Beschaffenheit des Gesteinsuntergrundes* relevant: In der Pronum 513 (Rendzina) sind z.B. sechs unterschiedliche petrographische Einheiten vorhanden, aber nur drei der sechs Einheiten sind flächenrelevant: Mit etwa

87 % der Fläche besitzen die Kalk- und Mergelsteine sowie der Schaumkalk die größten Anteile. Da aber die Verwitterungsprodukte der drei petrographischen Ausgangssubstrate ähnliche Bodenartenuntergruppen hervorrufen, ist folglich nur eine sehr geringe Heterogenität vorhanden. Somit ist neben dem Flächenanteil und der Größe der petrographischen Einheit auch die (Boden-) Art der Verwitterungsprodukte ein Faktor für die Abschätzung der Heterogenität. Besonders deutlich wird dies auch in der Profilnummer 540 (Braunerde). Obwohl innerhalb dieser Kartiereinheit sechs petrographische Informationen vorliegen, sind es die drei Ausgangsmaterialien Feinsand-Mittelsandstein, Tonstein und Ton/Kies, die etwa 95 % der Fläche abdecken. Durch den Einsatz des Disaggregierungsmodells ist es nun möglich, die Bodenarten Sl4 in den sandigen Arealen und Lt3 in tonigen Einheiten zu separieren. Dies hat zur Folge, dass die Homogenitätsindizes der Tongehalte im Mittel um 40 % und die Sandgehalte um 20 % gesteigert werden können.

Sehr große Heterogenitäten in den Kartiereinheiten werden durch Lössareale verursacht, die aufgrund des Generalisierungsgrades der BÜK50 z.T. nicht darstellbar sind. Für sehr kleine, lokale Lössvorkommen ist dies nicht zu ändern. Allerdings sind große Lösszonen, wie das etwa 800 Hektar große Areal in der Profilnummer 539 (Braunerde auf Silikatgestein), durchaus als eigenständige Kartiereinheit abzutrennen. Die Heterogenitäten der Schluff- und Sandgehalte können nach dem Einsatz der ersten Modellstufe durch die Separierung dieser Lössareale um etwa 30 % bei den Schluff- und etwa 12 % bei den Sandgehalten verringert werden. Lössanteile sind somit bezüglich des Ausmaßes der Heterogenität der sensitivste Faktor.

In den lössfreien Arealen lässt sich zwar keine eindeutige lineare Korrelation zwischen der Größe einer Kartiereinheit und dem Ausmaß der Heterogenität ableiten. Allerdings ist eine Braunerde-Einheit wie die Profilnummer 539 auch aufgrund der überproportionalen Größe von 1938 Hektar derartig heterogen aufgebaut.

Varianzminimierung für das Gesamtblatt

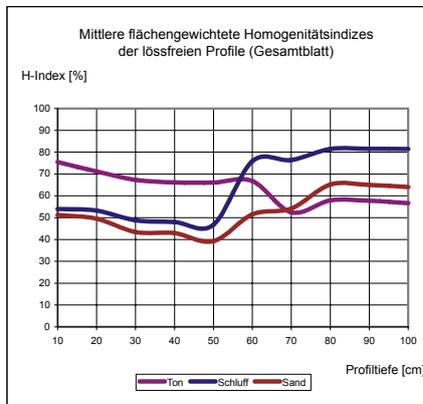
Abbildung 8.4 zeigt die mittleren H-Indizes für das Gesamtblatt nach dem ersten Disaggregationsschritt. Im Vergleich zu den originären Einheiten der BÜK50 (kleines Bild, Abbildung 7.7) konnten die H-Indizes durch die erste Downscaling-Stufe für die Oberböden stark erhöht werden. Bis 60 cm Profiltiefe lassen sich die Indizes um etwa 30 % steigern. Somit liegen alle Werte etwa zwischen 70 % und 90 %. Da die Unterböden aus den bereits diskutierten Gründen sehr homogen bezüglich der Kornfraktionen sind, sind die Steigerungsraten gegenüber den Oberböden geringer. Allerdings ist es möglich, die Werte für Tongehalte in den Unterböden um etwa 20 % und für die Sandgehalte um 10 % zu erhöhen.

Die stärkste Reduzierung der Interdezilbereiche kann im Oberboden erzielt werden (Abbildung 8.5). Die Interdezilbereiche der Sandgehalte lassen sich um 20 %–25 % verringern. Die Ton- und Sandgehalte können um 10 %–20 % vermindert werden. In den Unterböden zeigen die Schluffgehalte eine leichte Erhöhung der Interdezilbereiche.

Kurzfasit zur Optimierung der Datenbasis „Kornfraktionen“:

Durch den Einsatz der Disaggregierungsstufe 1 lassen sich sowohl für einzelne Kartiereinheiten als auch für das Gesamtblatt große Reduzierungen der Varianzen erzielen. Die Ho-

mogenitätsindizes sind nach Modelleinsatz im Mittel um etwa 25 % – 30 % höher und die Interdezilbereiche liegen –bis auf wenige Ausnahmen– nur noch zwischen 20 %–40 %. Die H-Indizes für das Gesamtblatt erreichen Werte um 70 % und die I_{80} verringern sich auf etwa 15 %–30 %.



BÜK50
(vgl. Abbildung 7.7)

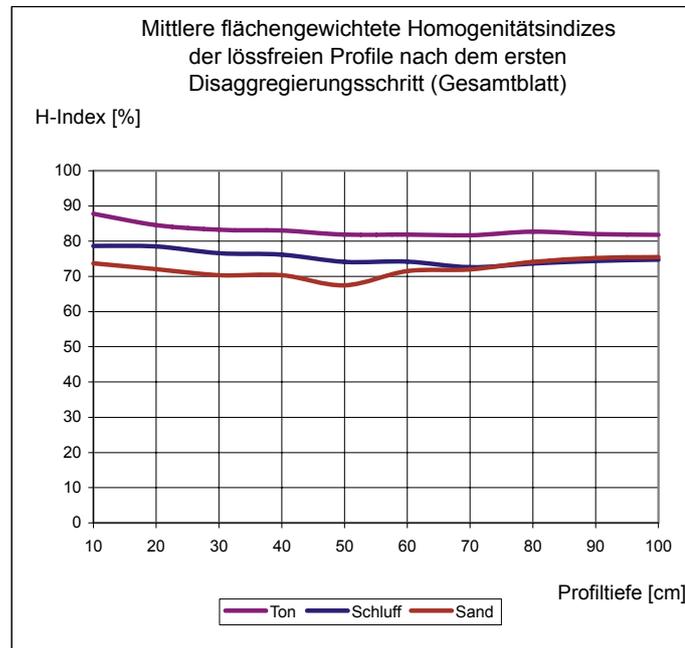
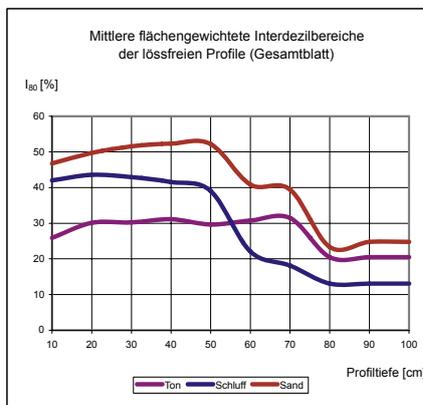


Abbildung 8.4: Mittlere Homogenitätsindizes der lössfreien Profile für das Gesamtblatt nach dem ersten Disaggregierungsschritt.



BÜK50
(vgl. Abbildung 7.8)

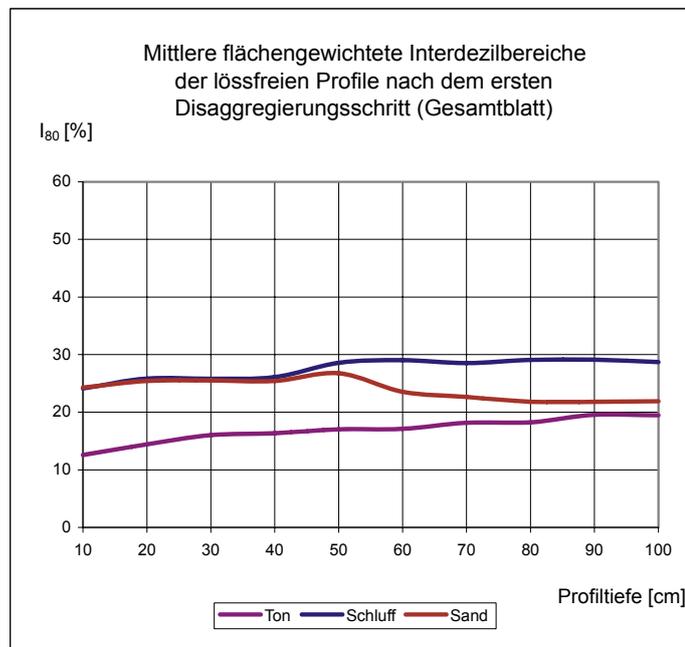


Abbildung 8.5: Mittlere Interdezil₈₀-Bereiche der lössfreien Profile für das Gesamtblatt nach dem ersten Disaggregierungsschritt.

8.1.2 Erfolg bei der Minimierung der Merkmalsvarianz der Kalkgehalte

Abbildung 8.6 zeigt die Veränderungen der Homogenitätsindizes der Kalkgehalte nach dem ersten Disaggregierungsschritt. Im Vergleich zur BÜK50 zeigen nur die Unterböden der Profilnummer 501 (Pseudogley- Parabraunerde) deutliche Reduzierungen der Varianz von über 20 % (Differenz $H\text{-Index}_{\text{Disag 1}} - H\text{-Index}_{\text{BÜK50}}$, vgl. Abbildung). In den Oberböden der Profilnummer 514 (Rendzina) ermöglicht das Modell eine Steigerung der Homogenität um ca. 12 %. In der Braunerde-Einheit (Profilnummer 491) sind noch Erhöhungen des Indexes zwischen 5 %–6 % und bei der Rendzina (Pronum510) um 8 % durch die Disaggregierungsstufe 1 zu erzielen.

In den übrigen Profilen lassen sich die Indizes durch die Disaggregierungsstufe 1 nur gering steigern. Hauptursache bei den Profilnummern 517 (Rendzina) und 616 (Ranker) ist die bereits sehr hohe Ausgangshomogenität.

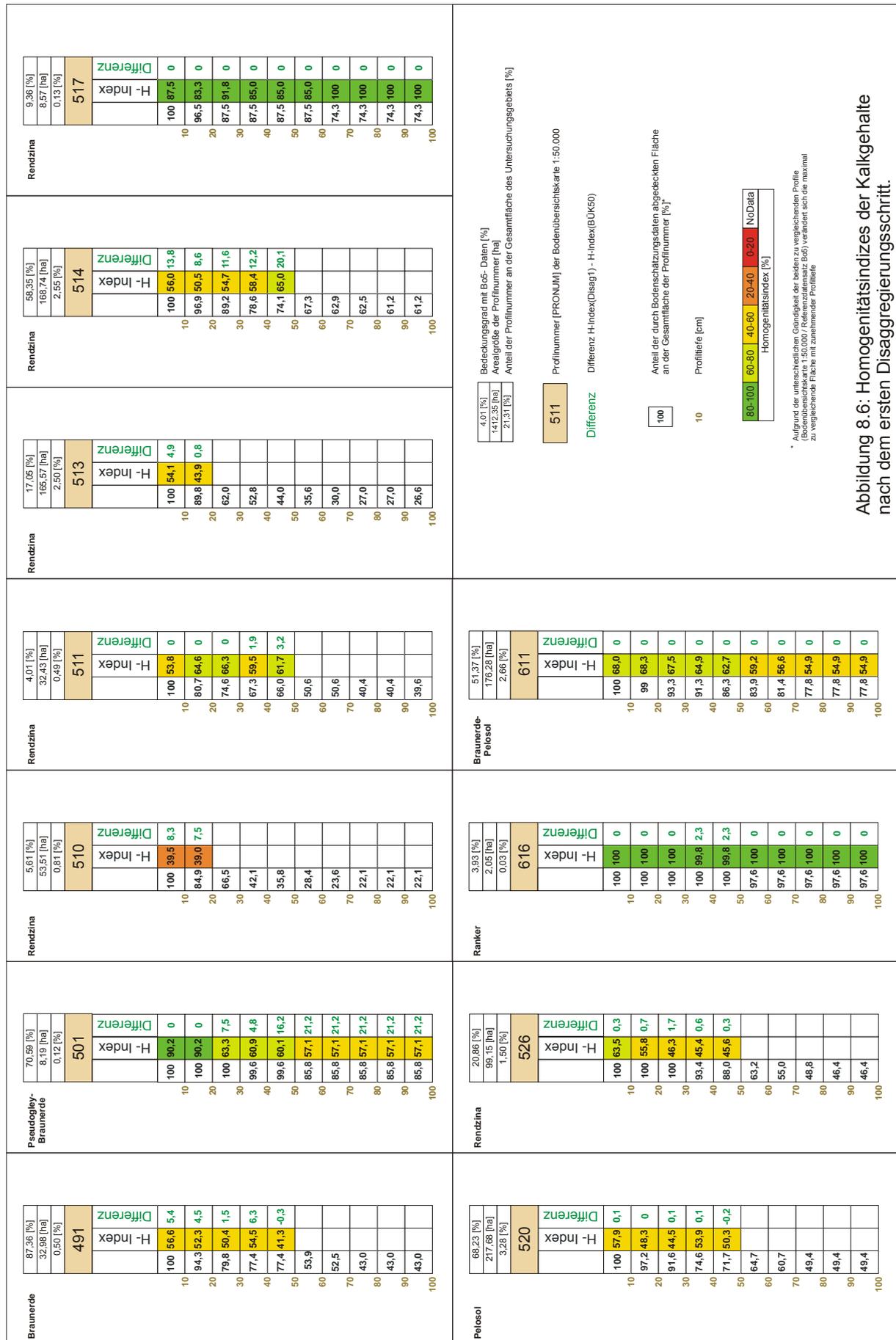
Auf Grund des gewählten Schwellenwerts beim Homogenitätsindex von 0 % waren bei den Kalkgehalten nicht so große Erfolge wie bei den Kornfraktionen zu erwarten. Allerdings ist das Disaggregierungsmodell in der Lage, den Homogenitätsindex um maximal 20 % zu steigern. Hingegen existieren in größeren Kartiereinheiten weite Bereiche, in denen das Verteilungsmuster der Kalkgehalte, vor allem der abrupte Wechsel mit immer wieder eingeschobenen Arealen, die laut Bo5 kalkfrei sind, nicht erklärt werden kann. Die Angaben der Bodenschätzungsdaten in Bezug auf die Kalkgehaltsangaben sind zumindest an dieser Stelle zu hinterfragen.

Die Interdezilbereiche in Tabelle 8.2 zeigen nach dem ersten Disaggregierungsschritt gegenüber den Homogenitätsindizes stärkere Verbesserungen bezüglich der Varianzminimierung.

Profilnummer	Interdezilbereich I_{80}									
	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm	100cm
491	1.3	1.3	0.8	0.8	3.8	*	*	*	*	*
501			2.6	2.6	5.1	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
510	11.0	7.8	*	*	*	*	*	*	*	*
511	7.7	2.1	1.0	1.3	1.4	*	*	*	*	*
513	4.0	7.3	*	*	*	*	*	*	*	*
514	7.0	12.2	12.3	12.1	10.0	*	*	*	*	*
517	6.0	1.3		6.0	6.0					
520	1.2	5.7	6.0	5.7	6.0	*	*	*	*	*
526	1.2	3.1	3.2	5.8	3.1	*	*	*	*	*
611	1.3	1.3	5.2	5.2	14.5	14.7	14.6	15.3	15.3	15.3
616										

*	Modalwert ist NoData, daher keine Interdezilwert- Ausweisung
	nur ein Peak bildet den Bereich ab, daher kein Interdezilbereich

Tabelle 8.2: Interdezilbereiche der Kalkgehalte in den untersuchten Kartiereinheiten nach dem Durchlaufen der ersten Disaggregierungsstufe.



So treten Interdezilbereiche >10 % nur noch in der von der BÜK50 als kalkfrei ausgewiesenen Profilnummer 611 (Braunerde-Pelosol) und in den Rendzinen (Pronum 514 und 510) auf. Im Vergleich zu den ursprünglichen Kartiereinheiten der BÜK50 sind 38 Indizes verbessert, 12 Werte bleiben gleich und 7 Indizes haben sich verschlechtert. Bei der Rendzina (Pronum 514) konnten durch den Einsatz des Modells die Indizes bei einer ehemaligen Spannweite von 17,5 % um maximal 7,5 % reduziert werden. In den Unterböden der Braunerde-Pelosole (Pronum 611) liegen diese maximalen Verringerungen der Varianz bei 3 %. Analog zur Diskussion der erzielten Steigerungen der Heterogenitätsindizes lassen sich auch Interdezilbereiche besonders homogener Kartiereinheiten nur geringfügig reduzieren. Für die Profilnummern 517 und 520 können ähnlich wie bei den Homogenitätsindizes keinerlei Varianzminimierungen erzielt werden. In den Rendzinen 511 und 526 wurden für die H-Indizes keine Verbesserungen festgestellt. Hier hingegen schafft es der Disaggregierungsansatz, die Interdezilbereiche so zu reduzieren, dass die Unterböden der Kartiereinheit 511 bereits als homogen zu bezeichnen sind und die Interdezilbereiche der Kartiereinheit 526 entscheidend minimiert werden.

Für das Gesamtblatt betrachtet liegen die Homogenitätsindizes der Kalkgehalte laut Tabelle 8.3 zwischen 54 % und 61 %. Somit konnten die Indizes im Mittel über das Gesamtblatt gesehen nur noch gering gesteigert werden. Die Interdezilbereiche (Tabelle 8.4) zeigen in den Unterböden auch nach der Disaggregation mit etwa 14 % relativ breite Spannweiten auf. Die Informationsschicht Petrographie ist demzufolge nicht in der Lage, die Interdezilbereiche der Unterböden entscheidend einzuschränken.

Profiltiefe	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm	100cm
H-Index [%], Disag1	58.8	53.5	54.5	57.3	56.3	61.2	58.9	57.5	57.5	57.5
H-Index [%], Disag1-BÜK50	3.9	2.0	3.1	2.9	3.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
berücks. Fläche [%]	100.0	100.0	73.7	67.9	62.3	18.6	18.0	17.4	17.4	17.4

Tabelle 8.3: Mittlere Homogenitätsindizes der Kalkgehalte für das Gesamtblatt nach dem durchlaufen der ersten Disaggregierungsstufe.

Profiltiefe	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm	100cm
I80 [%], Disag1	3.5	5.8	6.4	6.5	8.3	14.2	14.1	14.8	14.8	14.8
I80 [%], Disag1-BÜK50	0.2	-1.0	-1.8	-1.9	-3.1	-2.8	-2.9	-2.1	-2.1	-2.1
berücks. Fläche [%]	99.0	98.9	82.0	84.5	86.1	26.3	27.5	29.0	29.2	29.3

Tabelle 8.4: Mittlere Interdezil₈₀-Bereiche der Kalkgehalte für das Gesamtblatt nach dem Durchlaufen der ersten Disaggregierungsstufe.

Kurzfasit zu Optimierung der Datenbasis „Kalkgehalte“

Die Heterogenität der Kalkgehalte lässt sich nur in einigen Fällen durch die Einbeziehung der Informationsebene Petrographie entscheidend reduzieren. Auf Grund der Klassifizierungsform der Kalkgehalte mit schmalen Wertebereichen in den unteren und sehr weiten Wertebereichen in den oberen Klassen konnte beim Homogenitätsindex kein eindeutiger Schwellenwert festgelegt werden. Da der Schwellenwert folglich auf Null gesetzt wurde, sind für die Kalkgehalte keine so großen Reduzierungen wie bei den Kornfraktionen zu erwarten. Gründe für die teilweise mangelnde Reduzierung der Varianz sind:

- a) Die ursprüngliche Kartiereinheit der BÜK50 war bereits so homogen, dass keine weitere Reduzierung mehr möglich ist. Beispiele: Rendzina, Pronum 517 oder Ranker, Pronum 616).
- b) Die Informationsschicht Petrographie eignet sich aus inhaltlichen Gründen nicht zur Erklärung der Varianzen in den Ursprungseinheiten (Beispiel: Pelosol, Pronum 520).

Hauptgrund für die geringe Reduzierung der Varianzen ist aber der geringe Flächenanteil der kalkhaltigen Kartiereinheiten am Gesamtblatt. Sehr kleine Areale lassen sich in Disaggregierungsverfahren nur noch weiter unterteilen, wenn eine noch detailliertere Information zur Verfügung steht. Im Untersuchungsgebiet sind fünf der elf kalkhaltigen Kartiereinheiten kleiner als 55 ha. Auf der petrographischen Karte, die als Eingangsgrundlage für die Disaggregierungsstufe 1 dient, haben relativ kleine Polygone (< als 25 ha) nur einen Flächenanteil von etwa 7,8 %, da bei einer derartig „groben“ Karte relativ große Polygone dominieren. Aus diesem Grunde sind sehr kleine Kartiereinheiten in Disaggregierungsverfahren kaum zu homogenisieren.

8.2 Möglichkeiten und Grenzen der Minimierung der Heterogenität auf der Grundlage der Reliefsituation (Disaggregierungsstufe 2)

Die Disaggregierungsstufe 2 gewinnt die neuen Areale durch Verschneidung der Kombinationen aus BÜK50-Kartiereinheit und Gesteinsuntergrund mit den Reliefinformationen aus Sara1 (Scheitel-, Hang und Senkenbereiche). Dies ergibt insgesamt 241 verschiedene Kombinationen aus BÜK50-Kartiereinheit, Gesteinsuntergrund und Reliefhöhe, von denen 175 in lössfreien Kartiereinheiten der BÜK50 liegen.

8.2.1 Erfolg bei der Minimierung der Merkmalsvarianz der Kornfraktionen

Abbildung 8.7 zeigt die berechneten Homogenitätsindizes der Kornfraktionen nach dem zweiten Disaggregierungsschritt. Im Vergleich zur Disaggregierungsstufe 1 (in der Abbildung links über den jeweiligen Profilen) ist durch die Disaggregierungsstufe 2 eine weitere Varianzminimierung zu erreichen. Für die Braunerde-Pelosole (Profilnummer 611) erhöht sich der Index der Ton- und Sandgehalte im Mittel um 10 %, während dieser Wert für die bereits sehr homogenen Schluffgehalte 7 % beträgt. Die maximale durch das Modell zu erzielende Homogenität der Braunerde-Pelosole liegt somit für die Ton- und Sandgehalte bei etwa 60 % und für die Schluffgehalte zwischen 80 % im Ober- und über 90 % im Unterboden. Bei den Braunerde-Rankern (Pronum 555) sind noch maximale Steigerungen von 11 % bei den Ton- und etwa 5 % bei den Sandgehalten möglich, während die Indizes für die Schluffgehalte sich kaum verändern. Die Homogenität der Braunerden (Pronum 539 und 540) erhöht sich durch den zweiten Disaggregierungsschritt nur noch um etwa 5 %. In den bereits sehr homogenen Rendzinen (Profilnummern 513 und 514) lassen sich die Varianzen nur noch gering vermindern. Die Information Reliefhöhe reduziert also die Varianz deutlich geringer als der Gesteinstyp. Dies war in einem gewissen Umfang zu erwarten, da primär das Ausgangsmaterial und nicht die Reliefsituation für die Ausprägung des Körnungsspektrums verantwortlich ist.

Nach dem Einsatz der Disaggregierungsstufe 2 liegen –abgesehen von wenigen Ausnahmen– die Interdezilbereiche aller Kornfraktionen unter 40 % (Abbildung 8.8). Für die Sand- und Schluffgehalte verbleiben demzufolge Spannweiten von etwa zwei Klassenbreiten. Maximale Reduzierungen gegenüber der Disaggregierungsstufe 1 liegen für die Ton- und Sandgehalte bei etwa 5 % und für die Schluffgehalte bei 10 %.

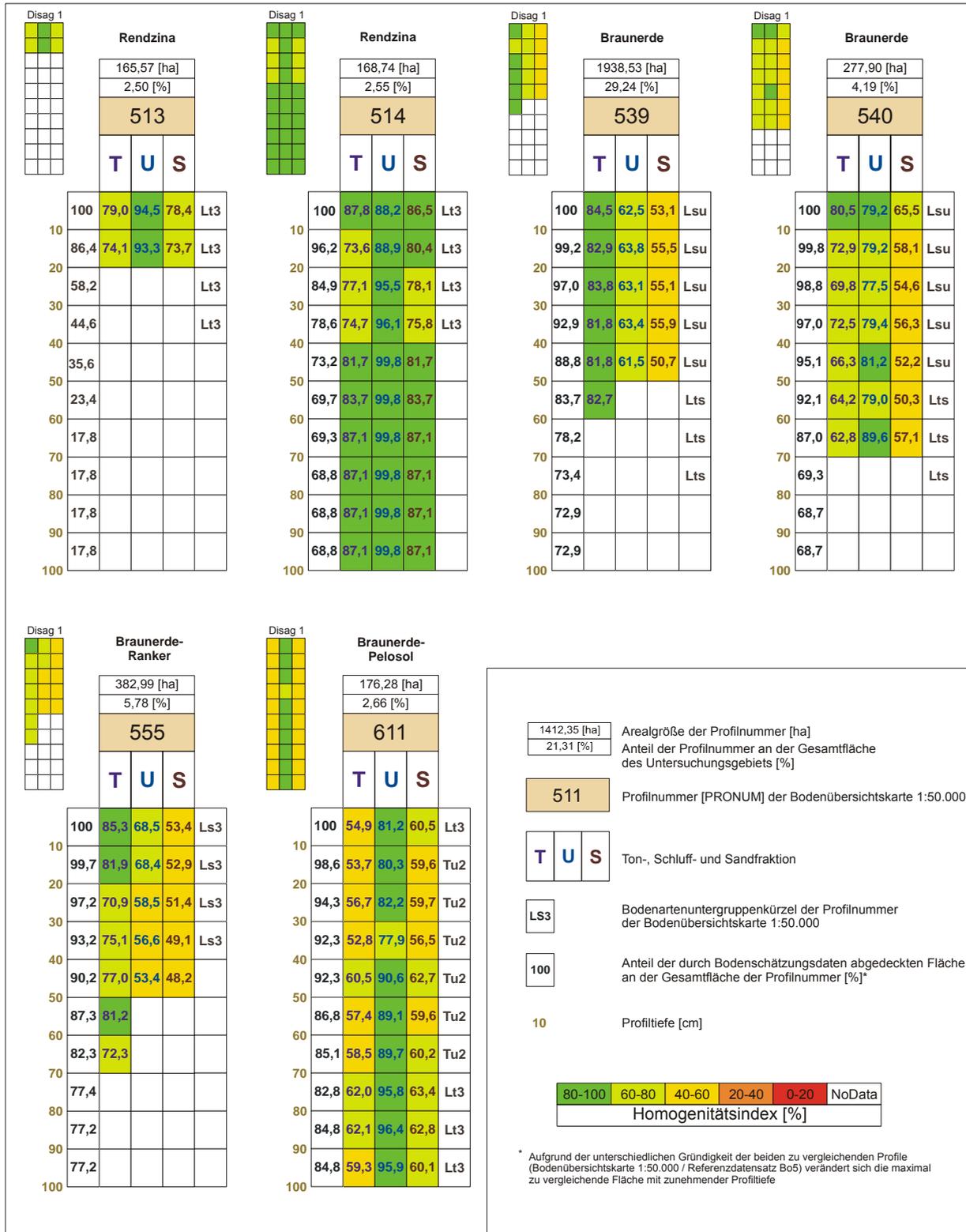


Abbildung 8.7: Mittlere Homogenitätsindizes der Kornfraktionen in lössfreien Kartiereinheiten nach dem zweiten Disaggregierungsschritt.

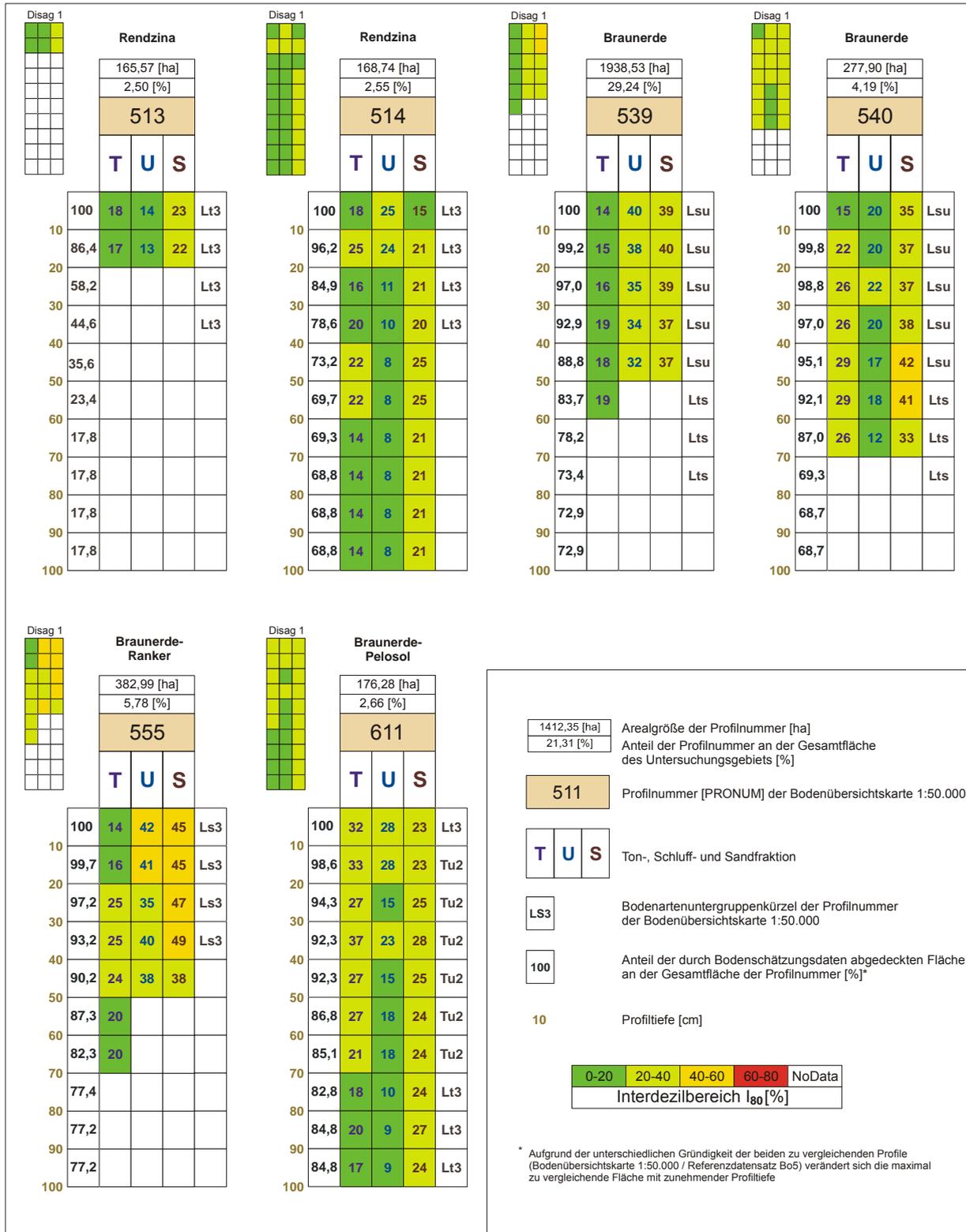
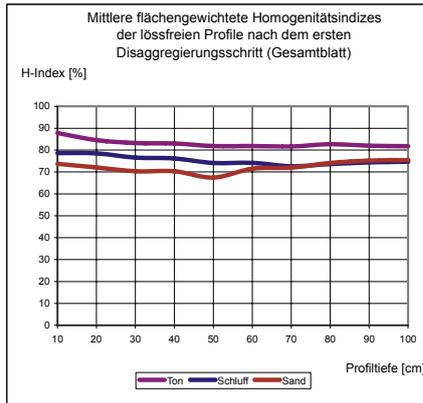


Abbildung 8.8: Mittlere Interdezil₈₀-Bereiche der Kornfraktionen in lössfreien Kartiereinheiten nach dem zweiten Disaggregierungsschritt.



Disaggregierungsstufe 1 (vgl. Abbildung 8.4)

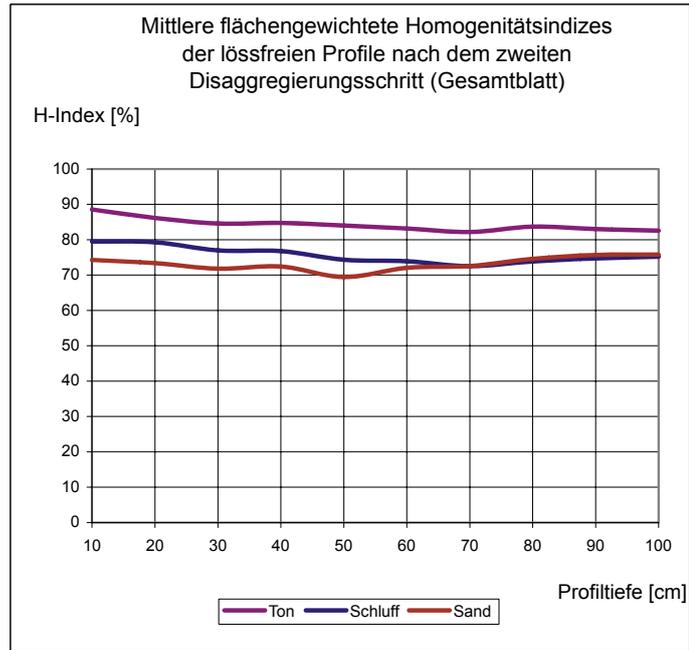
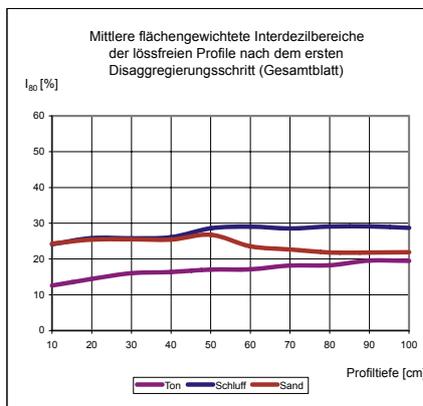


Abbildung 8.9: Mittlere Homogenitätsindizes der lössfreien Profile für das Gesamtblatt nach dem zweiten Disaggregierungsschritt.



Disaggregierungsstufe 1 (vgl. Abbildung 8.5)

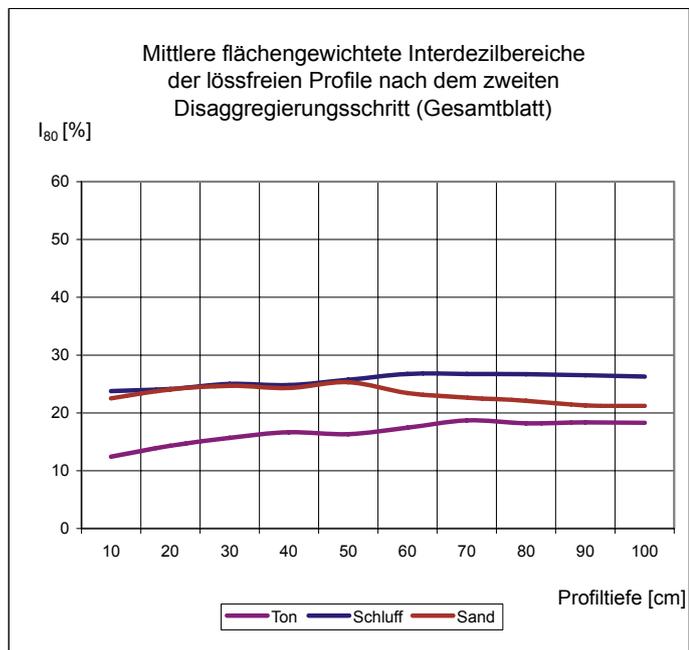


Abbildung 8.10: Mittlere Interdezil₈₀-Bereiche der lössfreien Profile für das Gesamtblatt nach dem zweiten Disaggregierungsschritt.

Die Abbildungen 8.9 und 8.10 visualisieren die mittleren Homogenitätsindizes bzw. Interdezilbereiche der Kornfraktionen für das Gesamtblatt nach dem Durchlauf der zweiten Disaggregierungsstufe. Während in der ersten Disaggregierungsstufe noch bedeutende Steigerungen des Homogenitätsindex von über 30 % für die Kornfraktionen in den Oberböden

möglich waren, sind für die Disaggregierungsstufe 2 die Steigerungen mit maximal 2 % als gering einzustufen. Auch für die Interdezilbereiche können kaum Veränderungen des Index nach dem Durchlauf der zweiten Disaggregierungsstufe mehr festgestellt werden.

8.2.2 Erfolg bei der Minimierung der Merkmalsvarianz der Kalkgehalte

Alle H-Indizes (vgl. hierzu Abbildung 8.11) liegen über 40 %. Die bereits sehr homogenen Profileinheiten 517 und 616 können nur noch gering gesteigert werden. Bemerkenswerte Erhöhungen des Indexes sind vor allem im Unterboden der Pronum 501 und 511 möglich. Alle anderen Profile zeigen fast keinerlei Veränderungen gegenüber der Disaggregierungsstufe 1.

Tabelle 8.5 zeigt die berechneten Interdezil₈₀-Bereiche der Kalkgehalte nach der zweiten Disaggregierungsstufe. Im Vergleich zur Disaggregierungsstufe 1 sind Reduzierungen der Interdezilbereiche von etwa 2 % möglich. Dies ist selbst bei der Betrachtung der engen Spannweiten der Kalkgehalte als gering einzustufen. Auch über das Gesamtblatt gesehen (nicht visualisiert) sind die Varianzminimierungen als gering einzustufen. Nach dem Durchlaufen beider Disaggregierungsstufen liegen die H-Indizes bei etwa 60 % und die Interdezilbereiche zwischen 6 % im Ober- und 13 % im Unterboden.

Die Merkmalsvarianz der Kalkgehalte lässt sich mittels einer Reliefgliederung kaum weiter einschränken. Ursachen hierfür sind primär die bereits in der Disaggregierungsstufe 1 festgestellten relativ kleinen Flächeninhalte der kalkhaltigen Kartiereinheiten. Darüber hinaus ist zunächst das Ausgangsmaterial für die Entstehung kalkhaltiger Bodentypeneinheiten verantwortlich. Es wäre allerdings denkbar, Umlagerungsprozesse von kalkhaltigem Ausgangsmaterial über eine Reliefgliederung näher einzugrenzen. Für eine derartig feine Gliederung sind die kalkhaltigen Einheiten wiederum zu klein.

Pronum50	Interdezilbereich I ₈₀									
	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm	100cm
491	1.4	1.4	1.0	2.0	4.9	*	*	*	*	*
501			1.7	3.4	4.7	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
510	11.5	6.6	*	*	*	*	*	*	*	*
511	5.8	1.6	1.7	1.3	1.3	*	*	*	*	*
513	4.5	5.7	*	*	*	*	*	*	*	*
514	6.4	11.3	11.6	12.4	11.8	*	*	*	*	*
517	4.9	4.9	1.0	7.6	7.6					
520	1.2	5.7	6.0	5.7	5.8	*	*	*	*	*
526	1.2	3.0	5.4	5.4	3.0	*	*	*	*	*
611	1.1	4.5	4.9	6.1	14.7	13.6	13.5	14.1	14.1	14.1
616										

Tabelle 8.5: Interdezil₈₀-Bereiche der Kalkgehalte nach dem Durchlaufen der zweiten Disaggregierungsstufe.

Kurzfasit zur Disaggregierungsstufe 2

Die berechneten Heterogenitätsmaße zeigen, dass die Varianzminimierungen gegenüber der Disaggregierungsstufe 1 als eher gering einzustufen sind. Die H-Indizes und Interdezilbereiche der Kornfraktionen lassen sich maximal um etwa 12 % verbessern. Für die Kalkgehalte sind kaum Veränderungen gegenüber der Disaggregierungsstufe 1 festzustellen. Dies wurde bereits nach der Disaggregierungsstufe 1 auf Grund der geringen Bedeckungsgrade durch den Referenzdatensatz prognostiziert. Eine abschließende Bewertung des Disaggregierungserfolges erfolgt in Kapitel 8.11.

8.3 Leistungsvermögens des Modells am Beispiel der Schluffgehalte.

Die Karten 8.1 bis 8.3 zeigen die Schluffgehalte in 10 cm Profiltiefe für die Bodenübersichtskarte 1:50.000, für die interpretierte Bodenschätzung sowie für die Disaggregierungsstufe 2.

Beim Vergleich der Karten wird folgendes deutlich:

- Die Bodenübersichtskarte 1:50.000 ist aufgrund ihrer Generalisierung nicht in der Lage, die kleinräumige Verteilung der Kornfraktionen wiederzugeben. In der BÜK50 sind nur vier unterschiedliche Schluffgehalte hinterlegt. Diese lassen sich grob den Lössbereichen im Ostblatt, den Kalken des Göttinger Waldes sowie den Bausandsteinschichtstufen und den diesen Vollformen umlagernden Bereichen zuordnen.
- In der interpretierten Bodenschätzung werden 18 unterschiedliche Schluffgehalte ausgewiesen. Es sind vor allem die dem Göttinger Wald vorlagernden Tonsteine sowie die nähere Umgebung der Bausandsteinschichtstufen, die deutliche Unterschiede zur BÜK50 zeigen. Die sehr homogenen Lössbereiche werden annähernd identisch auf beiden Blättern ausgewiesen. Dies haben auch die Ergebnisse aus Kapitel 7 eindeutig gezeigt. Große Teile der Karte haben keinerlei Information, da die Bodenschätzung nur Informationen für Acker- und Grünlandstandorte enthält.
- Das Disaggregierungsmodell ist in der Lage, die Schluffgehalte annähernd so gut aufgelöst wie die Bodenschätzungsdaten wiederzugeben. Lediglich in Bereichen, in denen laut Bodenschätzung ein sehr kleinräumiger Wechsel der Schluffgehalte vorherrscht, kann das Modell die Kornfraktionen nur fast so detailliert abbilden (z.B. Landolfshausen). Im Gegensatz zur Bodenschätzung ist durch die Werteübertragung auf Flächen gleicher Ausprägung (BÜK50-Kartiereinheit/ Petrographie/SARA1) eine fast vollständige Schließung der Karteninhalte möglich.

Der Vergleich der Karten zeigt eindrucksvoll das sehr gute Leistungsvermögen des Modells. Es ist in der Lage, die Kornfraktionen in einer sehr hohen Auflösung abzubilden. Darüber hinaus ist der Nutzer durch den Modellalgorithmus in der Lage „NoData“- Bereiche zu schließen. Obwohl in diesen Übertragungsbereichen keinerlei Angaben zur Aussagesicherheit getätigt werden können (ein derartig detaillierter Validierungsdatensatz liegt nicht vor), sind die logisch erscheinenden Werte ein großer Schritt zur Datenbereitstellung in hoch auflösenden Modellanwendungen.

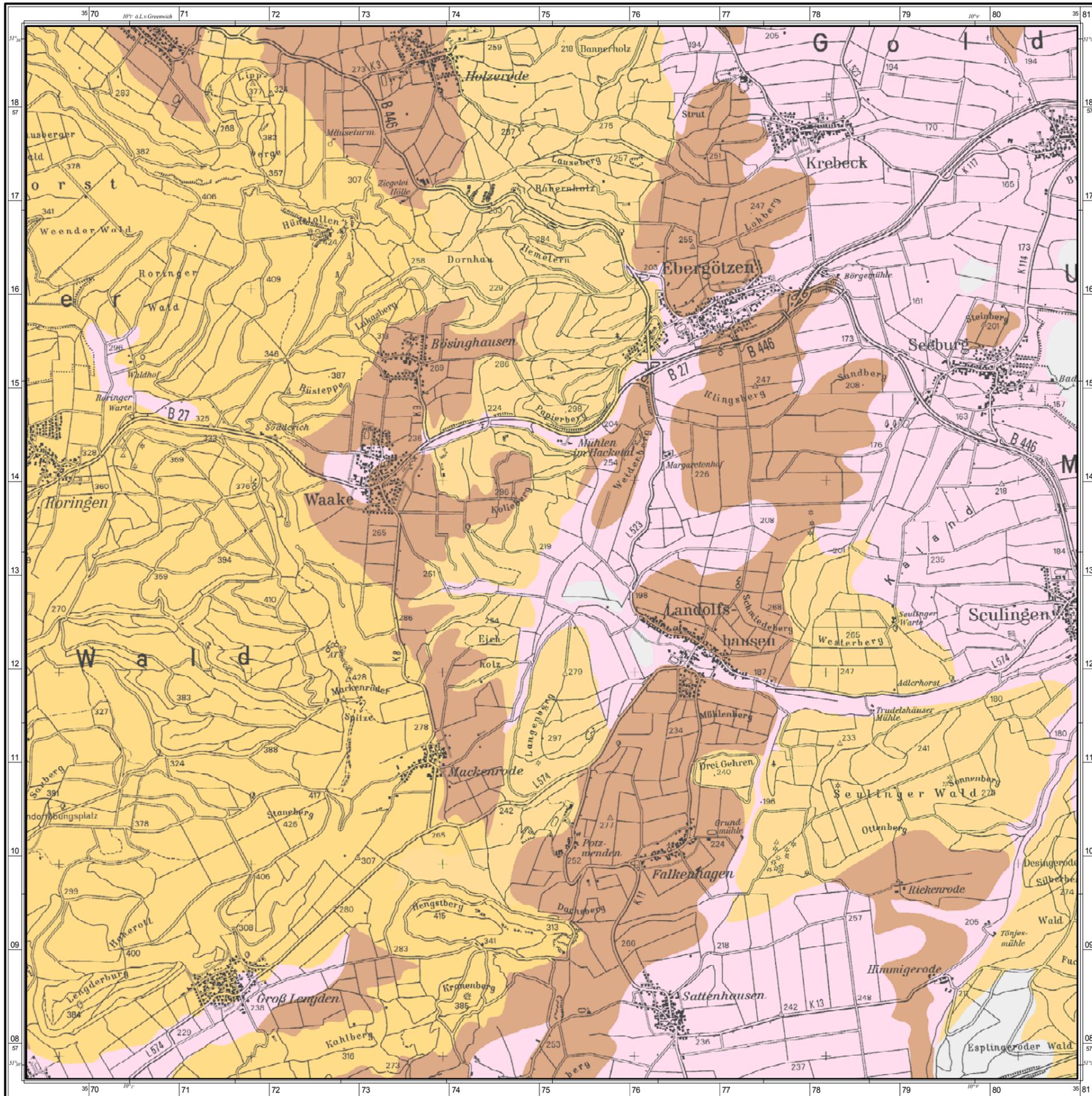
Zum Abschluss dieses Kapitels stellt sich die Frage, wie wahrscheinlich die Werteausprägungen in der Disaggregierungsstufe 2 sind. Karte 8.4 zeigt die Abweichungen der Schluffgehalte zwischen den disaggregierten Daten und dem Referenzdatensatz. In den Lössarealen sind kaum Unterschiede zwischen den beiden Kartenebenen zu finden. Die gilt ebenso für die Tonstein-Areale, die dem Göttinger Wald vorgelagert sind. Die größten Differenzen sind in Arealen zu beobachten, wo der mittlere Buntsandstein, speziell die Volpriehausen-Folge (SmV), durch die Lössdecke stößt. In diesen reliefierten Bereichen kommen primär Wechsellagerungen (Feinsandstein, Mittelsandstein, Sapropel-Gesteine und Schluffstein) laut petrographischer Karte vor. Das Disaggregierungsmodell ist nicht in der Lage, diesen kleinräumigen Wechsel in den Kornfraktionen exakt zu prognostizieren.

Allerdings sind die Bereiche erhöhter Abweichung sehr gering. Tabelle 8.6 zeigt die Flächenanteile, mit der die verschiedenen Abweichungsklassen beobachtet werden.

Klasse der Abweichung [%]	Flächeninhalt [m ²]	Flächeninhalt [%]
0	35486508.38	53.3
< 10	17409207.64	26.1
< 20	4218288.01	6.3
< 40	7767725.32	11.7
> 40	1694019.15	2.5

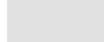
Tabelle 8.6: Flächenanteile der Abweichungsklassen (disaggregierte Daten - Referenzdatensatz). Beispiel: Schluffgehalten in 10 cm Bodentiefe.

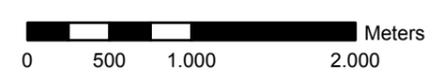
Auf etwa 50 % der Karte werden identische Schluffgehalte vorhergesagt. 25 % der Fläche unterscheiden sich lediglich um maximal 10 %. Da die mittlere Spannweite der Schluffgehalte im Bodenartendiagramm etwa 20 % beträgt, ist etwa 85 % der Karte innerhalb dieser Toleranzschwelle abzubilden.



Karte 8.1: Schluffgehalte in 10cm Tiefe auf der Basis der BÜK 50

Schluffgehalt [Masse-Prozent]

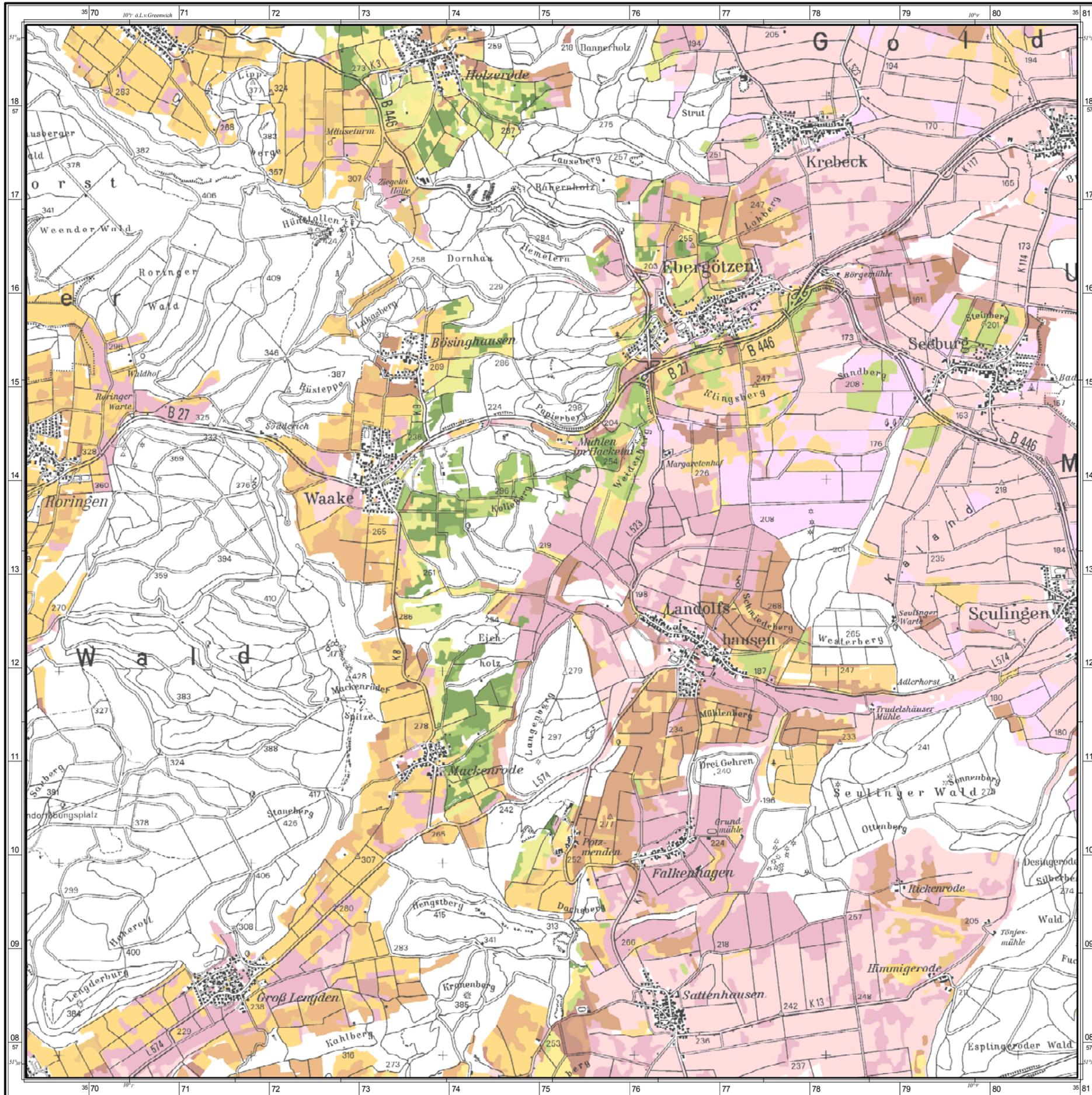
	34
	35
	45
	74
	keine Daten



Datengrundlagen: Bodenübersichtskarte 1 : 50.000, Blatt L 4526 (Duderstadt);
 NfB (Plotausgabe 2000)
 Rasterdaten der TK 50, Blatt 4526 (Duderstadt)

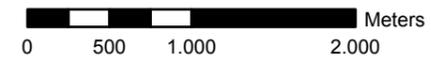
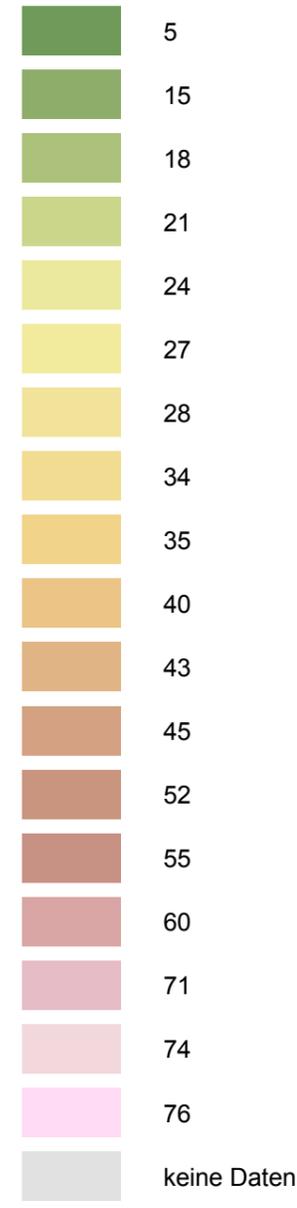


Universität Hannover
Physische Geographie
und Landschaftsökologie



Karte 8.2: Schluffgehalte in 10cm Tiefe auf der Basis der interpretierten Bodenschätzung Bo5

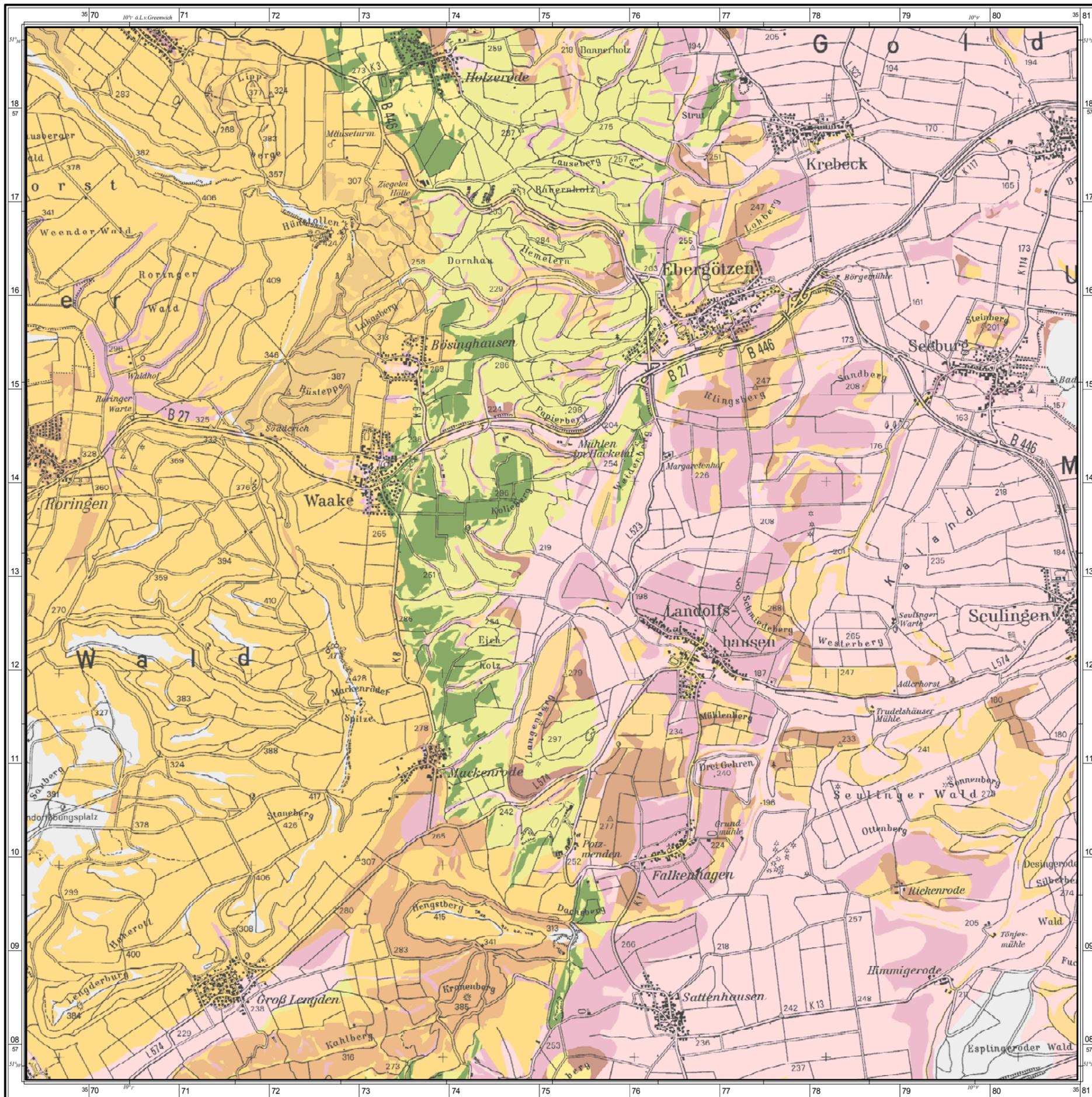
Schluffgehalt [Masse-Prozent]



Datengrundlagen: interpretierte Bodenschätzung Bo5, Blatt 4426 (Ebergötzen); NifB Rasterdaten der TK 50, Blatt 4526 (Duderstadt)

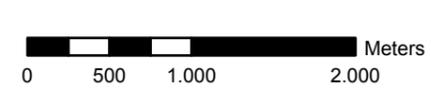
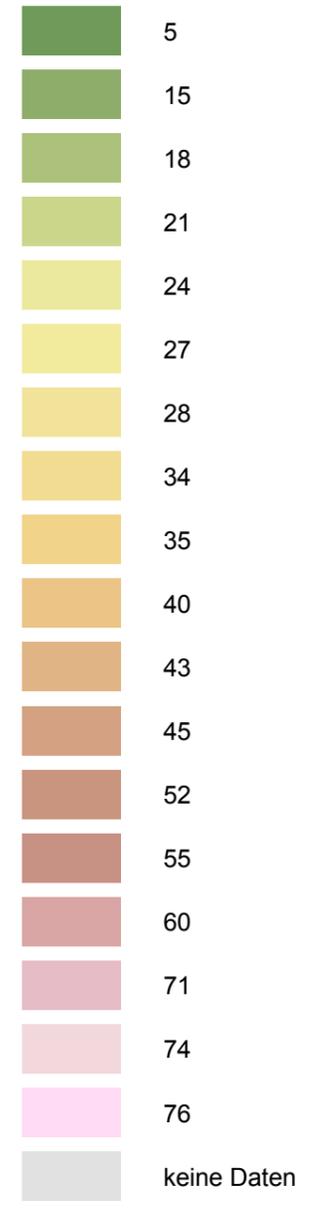


Universität Hannover
Physische Geographie
und Landschaftsökologie



Karte 8.3: Schluffgehalte in 10cm Tiefe auf der Basis der Disaggregierungsstufe 2

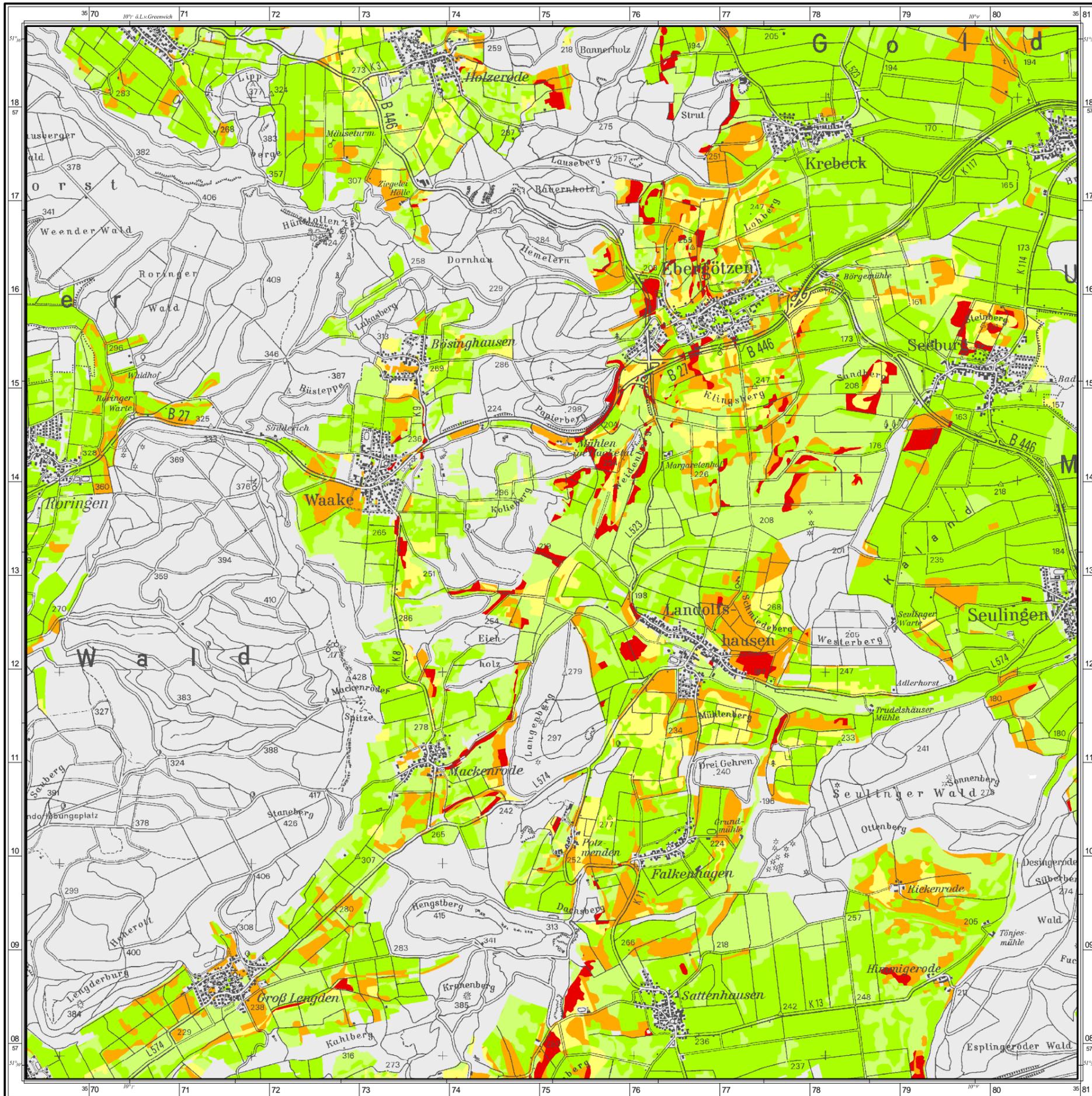
Schluffgehalt [Masse-Prozent]



Datengrundlagen: Rasterdaten der TK 50, Blatt 4526 (Duderstadt)

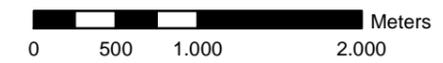
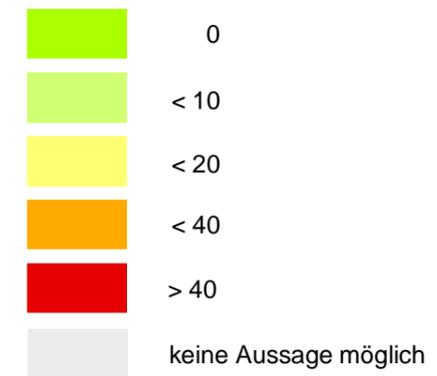


Universität Hannover
Physische Geographie
und Landschaftsökologie



**Karte 8.4: Abweichungen zwischen den disaggregierten Daten und dem Referenzdatensatz.
Beispiel: Schluffgehalte in 10cm Tiefe.**

Abweichungen [Masse-Prozent]



Datengrundlagen: Rasterdaten der TK 50, Blatt 4526 (Duderstadt)



Universität Hannover
Physische Geographie
und Landschaftsökologie

9 Welchen Einfluss haben optimierte Modelleingangsparameter auf die Modellierung der Bodenerosion?

9.1 Einstieg in die Problematik

Die Quantifizierung der Bodenerosion durch Wasser mittels Modell gestützter Computerverfahren ist ein komplexes Problem. Es sind vor allem die extremen Niederschlagsereignisse, die das Ausmaß der Erosion bestimmen. Die schwierige Lokalisation (z.B. lokale Gewitterzelle) dieser Extrema bzw. die örtlich oftmals sehr speziellen Bodeneigenschaften (sehr variable Ausgangsbedingungen) erschweren die Prognosemöglichkeiten erheblich. Zudem verändert sich das Erosionsgeschehen durch die Entwicklung der Anbaumethoden und durch die Veränderung der Flurstrukturen sowie durch Erosionsschutzmaßnahmen (vgl. RICHTER 1965, HARD 1970 in DIKAU 1986).

Modelltechnisch werden empirische, stochastische und deterministische (physikalische) Modellansätze unterschieden (vgl. DUTTMANN, 1999). Das bekannteste empirische Modell bildet die in den USA entwickelte USLE (Universal Soil Loss Equation; WISCHMEIER & SMITH, 1965, 1978). SCHWERTMANN (1990) hat diese auf bayerische Verhältnisse adaptiert (ABAG = Allgemeine Bodenabtragungsgleichung). Ein Beispiel für die EDV-gestützte Umsetzung der USLE/ABAG ist das Programm dABAG. Der Funktionsumfang bietet eine Erweiterung der schlagbezogenen Abschätzung durch die ABAG, da durch den Einsatz digitaler Geländemodelle eine flächendifferenzierte Berechnung des Bodenabtrages möglich ist. Ein weiteres bekanntes Modell ist AGNPS (Agricultural Nonpoint Source, YOUNG ET AL., 1989). Zur Berechnung der Erosion wird eine modifizierte Form der USLE verwendet. Stochastische Modelle, deren Stärken bei zeitlich und räumlich variablen Merkmalen und Prozessen zum Tragen kommen, haben laut DUTTMANN (1999) eine geringe Bedeutung bei der Bodenerosionsmodellierung. Deterministische Modelle versuchen Prozesszusammenhänge auf Grund physikalischer Gesetzmäßigkeiten umzusetzen. Diese Modelle simulieren meist Einzelprozesse der Bodenerosion und sind, da die Algorithmen auf physikalisch definierten Modellparametern beruhen, laut Schmidt (1998, S.140) zumindest vom Ansatz her räumlich übertragbar. Physikalische Modelle stellen hohe Anforderungen an Datenauflösung bzw. Datenverfügbarkeit (WICKENKAMP ET AL., 2000, S.132) sowie an die Fachkompetenz der Anwender derartiger EDV-gestützter Verfahren. Bekannte Modelle sind CREAMS (Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems, KNISEL [Ed.], 1980), WEPP (Water Erosion Prediction Project, LANE & NEARING, 1989) sowie das in dieser Arbeit verwendete Programm Erosion-3D (VON WERNER, 2002). Eine Übersicht zum Vergleich von empirischen und physikalischen Modellen liefern DEINLEIN UND BÖHM (2000), S.171 f oder DE ROO (1993) in VON WERNER (1995).

Aus den Kapiteln 7 und 8 ist bekannt, wie hoch die Heterogenität bestehender Kartenwerke ist bzw. um welche Beträge diese Varianzen durch den Einsatz eines Disaggregierungsmodells minimiert werden können. Es wurde die Heterogenität von Bodeneigenschaften untersucht, da geringe Veränderungen dieser zentralen Bodenmerkmale oftmals eine starke nichtlineare Veränderung der Ausgabegrößen (Kennwerte) von Modellanwendungen bewirken (DUTTMANN, 1999). Wie sich diese Heterogenität in den Bodendaten auf Modelleingangsfaktoren bzw. modellierte Größen auswirkt, ist Gegenstand dieses Kapitels. Die Auswirkungen der skalenbedingten Heterogenität auf modellierte Kennwerte sowie die Möglichkeiten zur Minimierung dieser Varianzen durch Disaggregierungsalgorithmen werden hierbei

sowohl an Modelleingangsfaktoren empirischer Modellen (Bsp. Bodenerodierbarkeitsfaktor, Kapitel 8.1) als auch anhand von physikalischen Modellen (Erosion-3D, Kapitel 8.2) geprüft.

9.2 Verbesserung des K-Faktors durch den Einsatz des Disaggregierungsmodells

Obwohl die Erodibilität des Bodens von vielen Bodeneigenschaften abhängt, lässt sich diese nach WISCHMEIER & SMITH (1965, 1978) in SCHWERTMANN ET AL. (1990) durch fünf Eigenschaften hinreichend quantifizieren:

- Gehalt [%] an der Korngröße 0,002–0,1 mm (Schluff + Feinstsand)
- Gehalt [%] an der Korngröße 0,1 mm (Sand – Feinstsand)
- Gehalt [%] an organischer Substanz
- Aggregatklasse
- Durchlässigkeitsklasse

Der K-Faktor kann hierbei wie folgt berechnet werden:

$$K = 2,77 \cdot 10^{-6} \cdot M^{1,14} \cdot (12 - OS) + 0,043 \cdot (A - 2) + 0,033 \cdot (4 - D)$$

M	=	(% Schluff + Feinstsand) * (% Schluff + % Sand)
OS	=	% organische Substanz, für OS >4 %: OS = 4
A	=	Aggregatklasse
D	=	Durchlässigkeitsklasse

Die exakten Werte lassen sich nur im Labor bestimmen. Es ist jedoch möglich, Werte mit Hilfe von Regressionsberechnungen abzuleiten. Für diese Arbeit wurde eine für das südniedersächsische Berg- und Hügelland modifizierte Berechnung des K-Faktors verwendet. Diese Regression fand Eingang in die von MOSIMANN & SANDERS (2004) entwickelten Schlüssel für eine Erosionsabschätzung in Südniedersachsen:

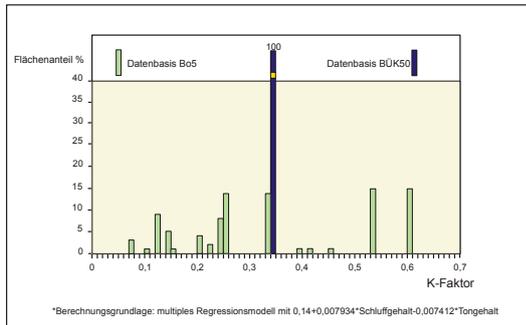
$$K = 0,14 + 0,007934 \cdot \text{Schluffgehalt}[\%] - 0,007412 \cdot \text{Tongehalt}[\%]$$

Diese multiple Regression hat sich im Praxiseinsatz bewährt, da diese Werte auch aus gängigen Eingangsquellen wie Bodenkarten ableitbar sind.

K-Faktoren wurden für alle Bodenkartenmaßstäbe und Disaggregierungsstufen berechnet. Die Berechnungen lieferten z.T. erhebliche Abweichungen und gute bis sehr gute Varianzminimierungen durch den Einsatz des Disaggregierungsmodells:

Abbildung 9.1(a–c) verdeutlicht dies am Beispiel einer ca. 1938 ha großen Bodeneinheit der Bodenübersichtskarte 1:50.000 (Braunerde auf Silikatstein). Abbildung 9.1a zeigt den ermittelten K-Faktor f der Bodenübersichtskarte 1:50.000 sowie die „reale“ Verteilung der K-Faktoren innerhalb dieses Bodenareals, welche anhand der Bodenschätzungsdaten berechnet wurde. Die Abbildungen 9.1b und 9.1c präsentieren die optimierte räumliche Modellierung in den einzelnen Disaggregierungsstufen. Die vorgestellte Bodeneinheit der Bodenübersichtskarte gibt nur für 14 % der Fläche übereinstimmende K-Faktoren an (BÜK50 = Bo5). In der Disaggregierungsstufe 1 liegen hingegen auf 52 % und in der Disaggregierungsstufe 2 auf 67 % der Fläche identische K-Faktoren vor, d.h. der Flächenanteil mit korrekter Angabe des K-Faktors konnte durch die Anwendung der ersten Modellstufe um das 3,7–fache und in der zweiten Stufe um das 4,8–fache gesteigert werden. Aus der Abbildung 9.1 wird zudem deutlich, dass in der Disaggregierungsstufe 1 bereits die Verteilungsschwer-

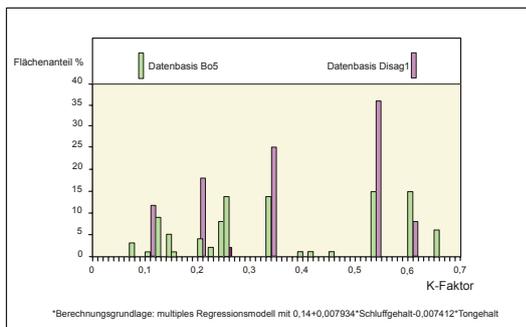
punkte des K-Faktors gut getroffen und in der zweiten Stufe dann auch der Histogrammverlauf gut abgebildet werden kann.



a



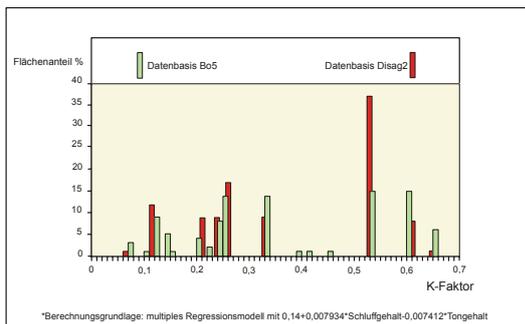
Vergleich mit BÜK50



b



Vergleich mit der Disaggregierungsstufe 1



c



Vergleich mit Disaggregierungsstufe 2

Abbildung 9.1 a–c: Berechnete K-Faktoren für die BÜK50, die Bo5 und beide Disaggregierungsstufen.

Tabelle 9.1 zeigt, wie das Disaggregierungsmodell die Varianz über das Gesamtblatt zu minimieren vermag. Über das Gesamtblatt gesehen ist die Fläche, auf denen identische K-Faktoren vorliegen, um etwa 10 % durch das Disaggregierungsmodell zu steigern.

Die Steigerung ist vor allem auf die Reduzierung der Klassenbreite <0,4 zurück zu führen. Bei der Differenzierung des Untersuchungsgebiets in lössdominierte und lössfreie Flächen treten allerdings größere Unterschiede zwischen den einzelnen Bodeneingangsebenen auf: Während in den lössdominierten Arealen fast keinerlei Abweichungen zwischen der BÜK50 und der Disaggregierungsstufe 2 auftreten, sind die lössfreien Areale sehr unterschiedlich. Das Disaggregierungsmodell vermag auf 53 % der Gesamtfläche identische K-Faktoren wie die Bodenschätzung auszuweisen, während dieser Wert für die BÜK50 bei 26,7 % liegt. Insgesamt werden in der Disaggregierungsstufe 2 auf 87 % der Fläche K-Faktoren ausgewiesen, die eine geringere Abweichung als 0,2 haben. Für die BÜK50 beträgt dieser Wert lediglich etwa 70 %.

	Bodenübersichtskarte 1:50.000 [%]			Disaggregierungsstufe 2 [%]		
	Gesamt	lössfrei	lössdominiert	Gesamt	lössfrei	lössdominiert
identische K-Faktoren	43.4	26.7	63.3	53.4	43.2	65.5
Abweichungen < 0.2	36.1	43.9	26.8	34.2	41.3	25.6
Abweichungen < 0.4	16.7	25.4	6.3	7.8	9.4	6
Abweichungen < 0.6	3.8	4.0	3.6	4.6	6.1	2.9
mittlere K-Faktor Differenz	0.16	0.21	0.10	0.13	0.16	0.09

Tabelle 9.1: Abweichungen der K-Faktoren auf dem Gesamtblatt [Flächenprozent]

Auf dem gesamten Kartenblatt weichen die K-Faktoren der betrachteten Maßstabsebenen mit 0,05 im Mittel nur in den lössfreien Arealen etwas stärker ab. Die maximalen Unterschiede betragen allerdings 0,6.

Die Berechnungen verdeutlichen mit welcher Schwankungsbreite K-Faktoren, die aus mittelmaßstäbigen Bodenkarten berechnet wurden, in empirische Modelle Eingang finden. Der Einfluss des K-Faktors auf die nach ABAG berechneten Bodenabträge wird durch folgendes Beispiel verdeutlicht:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (\text{ABAG})$$

A: Langjähriger, mittlerer jährlicher Bodenabtrag [t/(ha·a)].

R: Regen- und Oberflächenabflussfaktor.

K: Bodenerodierbarkeitsfaktor.

L: Hanglängenfaktor.

S: Hangneigungsfaktor.

C: Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor.

P: Erosionsschutzfaktor.

Folgende Werte gelten für eine typische Fruchtfolge (Raps, Winterweizen, Winterweizen) an einem Hang (Höhe: 255 m ü. NN.; 165 m Hanglänge; 10 % Hangneigung, schräg zum Gefälle verlaufende Bearbeitung) in Südniedersachsen (Quelle: MOSIMANN & SANDERS, 2004).

$$A = 55 \cdot K \cdot 3,56 \cdot 0,08 \cdot 0,97$$

Der K-Faktor für eine Bodenart Ut2 liegt nach der von MOSIMANN & SANDERS (2004) berechneten Regression bei 0,66. Die Variation des K-Faktors (vgl. Tabelle 9.1) auf die berechneten Abtragsmengen beeinflusst die berechneten Abträge wie folgt:

Bei einer Variation des K-Faktors von 0,5 unterscheiden sich die berechneten Bodenabträge um das vier- bis fünffache (Rundungen). Zum jetzigen Zeitpunkt ist davon auszugehen, dass jeder Eingangsfaktor aus einer mittelmaßstäbigen Bodenkarte, der korrigierend auf den K-Faktor einwirken könnte (Humusgehalte, Steinbedeckung etc), eine derartige Varianz aufweist. Streng genommen müssten somit sämtliche Eingangsdaten zufällig aus den jeweils möglichen Spannweiten entnommen und miteinander kombiniert werden, um eine Werteverteilung (und nicht einen Wert) als Ergebnis ableiten zu können (z.B. durch Monte-Carlo-Simulation). Derartige stochastische Ansätze werden aber bei der Erosionsmodellierung bisher wenig verwendet (DUTTMANN, 1999). Zudem ist der Bearbeitungsaufwand hoch und das fachliche Know-How für die Umsetzung und Berechnung in der Praxis (z.B. Betriebsleiter) nicht vorhanden. Neuere Ansätze gehen daher andere Wege.

K-Faktor	Abtrag [t/(ha*a)]
0.66	10.0
0.56	8.5
0.46	7.0
0.36	5.5
0.26	4.0
0.16	2.4
0.06	0.9

Tabelle 9.2: Varianz der Bodenabträge in Abhängigkeit vom K-Faktor.

9.3 Einfluss der Auflösung von Bodenbasisdaten auf die Prognose der Erosionsgefährdung am Beispiel Erosion-3D.

9.3.1 Modellgrundlagen

Nach von WERNER (2002) ist Erosion-3D „ein physikalisch-begründetes Prozessmodell zur Prognose der durch einzelne oder Sequenzen von Niederschlägen verursachten Bodenerosion in Wassereinzugsgebieten.“ Das Modell wurde ursprünglich von SCHMIDT (1991) als ein auf einzelne Hänge anwendbares Prognosemodell (Erosion-2D, E-2D, SCHMIDT ET AL., 1996) konzipiert und durch von WERNER in den Folgejahren (vgl. von WERNER, 1995) weiter entwickelt. Beide Modelle sind nach von WERNER (2002) in umfangreichen Feldversuchen validiert worden. Das Modell E-3D wird in der Planungspraxis auf kommunaler und regionaler Ebene eingesetzt.

Es ist bei einer minimalen äquidistanten Rasterlaufweite von etwa einem Meter bis zu einer Flächengröße von etwa 400km² anwendbar. E-3D ist in zwei Komponenten gegliedert: Während in der Preprocessing-Komponente eine digitale Reliefanalyse (Neigung, Exposition, Fließrichtung, Fließakkumulation etc.) umgesetzt wird, umfasst die Processing-Komponente die eigentliche Simulationsberechnung. Diese beinhaltet eine Simulation der Niederschlagsinfiltration nach dem Green-Ampt-Ansatz (vgl. GREEN & AMPT, 1911) und der Abflussbildung des Infiltrationsüberschusses mit der daran gebundenen Loslösung der Bodenpartikel sowie – in Abhängigkeit von der Transportkapazität – die Sedimentbewegung bzw. Deposition.

Das Modell benötigt als digitale Eingabeparameter ein Geländemodell (Empfehlung: DGM5), eine Bodenkarte (z.B. BÜK50), eine Landnutzungskarte (z.B. ATKIS) sowie Regenschreiberaufzeichnungen (Intensitäts-/Dauer-Intervalle) mit einer Auflösung von 10 Minuten oder höher (z.B. Kostra-DWD = KOordinierte STarkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes/eigene Regenschreiberdaten). Während Nie-

derschlagsdaten, digitale Landnutzungskarten sowie digitale Geländemodell in hinreichender Qualität verfügbar sind, ist die Bereitstellung der sehr detailliert benötigten Bodendaten oftmals ein Problem. So wird z.B. eine Korngrößenverteilung für 9 Kornfraktionen (Feinton bis Grobsand) benötigt. Bodenparameter, die nicht so detailliert vorliegen wie das Programm es benötigt, können zum Teil aus Tabellen und Diagrammen des Parameterkatalogs Sachsen (SCHMIDT, J et al., 1996, Band 2, S.13–99) entnommen werden. Insgesamt ist das Erstellen der Eingabedaten zeitaufwendiger als die anschließende Simulation (vgl. hierzu MICHAEL, 1999, S.9).

9.3.2 Eingabe- und Ausgabeparameter sowie Datenaufbereitung und -modifikation des Modells

Das Grundgerüst der Bodendaten für die spätere Simulation basiert auf dem Vektorgerüst des DLM25 (ATKIS). Um sämtliche Eingangsdaten für den späteren Simulationslauf bereit zu halten, muss die ATKIS-Struktur im ersten Schritt verändert (Straßen, Feldwege) und danach in einem weiteren Schritt alle benötigten Eingangsdaten für den Simulationslauf in die Attributtabelle integriert werden.

Im ersten Schritt wird das Wege- und Straßennetz (Geometriotyp: Linien) in die digitale Landnutzungskarte (Geometriotyp: Polygone) integriert. Da E-3D mit einem 12,5 Meter Raster arbeitet, sind Feldwege mit 6,5 Meter und Straßen mit 13,0 Metern (Radius) gepuffert worden. Somit haben Feldwege im später erzeugten Rastermodell eine Breite von einer und Straßen eine Breite von zwei Rasterzellen. Wird das Wegenetz nicht in die ATKIS-Struktur integriert, würden falsche erosive Hanglängen bei der Simulation der Partikelverlagerung zu Grunde gelegt werden. Test-Berechnungen unterstützen diese Annahme.

Da alle Bodenartenuntergruppen-Kürzel nach KA3 (ARBEITSGRUPPE BODEN, 1982) vorliegen, mussten alle Kürzel in eine KA4-Syntax (ARBEITSGRUPPE BODEN, 1994) konvertiert werden, da sonst der Parameterkatalog Sachsen (SCHMIDT, J. et al., 1996) nicht anwendbar ist.

Im nächsten Schritt müssen die Kornfraktionen der BÜK50, Bo5 sowie die neu geschaffenen Informationen der Disaggregierungsstufen 1 und 2 auf die Schlaggeometrie des DLM25 übertragen werden. Jeder Schlag erhält das flächenmäßig am häufigsten auftretende Bodenartenuntergruppenkürzel (Modalwerte) hinterlegt. Die Metrisierung bzw. Übersetzung der Kornfraktionen der Bodenartenuntergruppen geschieht anschließend durch Klassenmittelwerte (vgl. Kapitel 2). Die Übersetzung in die von E-3D geforderten neun Kornfraktionen (von Feinton bis Grobsand) konnte anhand eines seitens des NLFb gestellten Labordatensatzes (43 Profile, 308 Horizontinformationen) geschehen. Hierbei werden den einzelnen Bodenartenuntergruppen das Profil zugeordnet, was in der Summe der Abweichungen (Ton-, Schluff- und Sandgehalte) minimal ist. *NoData*-Bereiche (Bo5, Disag1, Disag2) liegen auf Ackerflächen nicht vor. Bei allen anderen Nutzungen, für die in den drei Kartengrundlagen *NoData*-Werte auftreten, sind Bodendaten der BÜK50 integriert worden. Aus Sicht der Modellierung ist dies kein Problem, da durch andere Steuerparameter (z.B. Bedeckungsgrad) die Erosion auf diesen Flächen (Wald, Straßen etc.) null beträgt (vgl. Karte 9.2.1–9.2.4).

Alle weiteren Bodenparameter sind gemäß den Arbeiten von STREUN (2004), von WERNER (2002), MICHAEL (1999) und WICKENKAMP (1995) aufbereitet. Somit liegen vier Eingangskarten für die Simulation vor. Diese unterscheiden sich lediglich in den unterschiedlichen Bodeninformationen, die aus den jeweiligen Maßstäben bzw. Informationsebenen (BÜK50, Bo5, DISAg1, DISAG2) in die Eingangskarten integriert wurde.

Das Programm benötigt folgende Eingangsdaten:

Eingangsdaten Boden

- Lagerungsdichte [kg/m^3]
- Organischer Kohlenstoffgehalt [%]
- Anfangswassergehalt [Vol.-%]
- Rauigkeit [$\text{s m}^{-1/3}$]
- Erosionswiderstand [N/m^2]
- Bodenbedeckungsgrad [%]
- Kornfraktionen [%]; 9 Klassen (Feinton [$<0,0002 \text{ mm}$] bis Grobsand [$<2 \text{ mm}$] gemäß DIN 4022-1, Ausgabe:1987-09)
- Korrekturfaktor [%]

Eingangsdaten Relief

- XYZ-Daten oder ArcGis ASCII-Schnittstelle

Eingangsdaten Niederschlag

- Niederschlagsdauer [min]
- Niederschlagsintensität [mm/min]

Ausgangsparameter:

Neben 15 Reliefparametern [vgl. VON WERNER 2002, S.14) werden vom Programm E-3D folgende Parameter berechnet:

- Erosion, Deposition [kg/m^2]
- Abflussvolumen [m^3]
- Spezifisches Abflussvolumen aus dem Einzugsgebiet des Vorfluternetzes [m^3/m]
- Spezifischer Sedimentzufluss in das Vorfluternetz [kg/m]
- Nettoerosion im Einzugsgebiet des Vorfluternetzes [t/ha]
- Ton- bzw. Schluffanteil des eingetragenen Sediments [Masse-%]
- Zufluss aus dem jeweiligen Einzugsgebiet [m^3/m]
- Sedimentzufluss aus dem jeweiligen Einzugsgebiet [kg/m]
- Sedimentkonzentration [kg/m^3]
- Ton.- bzw. Schluffanteil des transportierten Sediments [Masse-%]
- Gesamtaustrag aus dem Zelleinzugsgebiet, differenziert nach 9 Kornfraktionen [kg/m]
- Gesamtaustrag aus dem Zelleinzugsgebiet, Summe aller Kornfraktionen [kg/m]
- Relative Gesamterosion innerhalb des jeweiligen Zelleinzugsgebietes [t/ha]
- Relative Gesamtdeposition innerhalb des jeweiligen Zelleinzugsgebietes [t/ha]
- Relative Nettoerosion innerhalb des jeweiligen Zelleinzugsgebietes [t/ha]

Um den erheblichen Zeitaufwand, der zur Herstellung der Eingangsdaten benötigt wird, einzuschränken, wurden sämtliche Vektor-Raster Konvertierungen sowie die Umwandlungen aller Eingangsdaten in eine E-3D konforme Ascii-Struktur mit Hilfe einer eigens programmierten ArcInfo – AML (AML = Arc Macro Language) umgesetzt.

9.3.3 Untersuchte Szenarien

Die wichtigste Anbaukultur im Untersuchungsgebiet ist Winterweizen, gefolgt von Zuckerrübe und Raps. Es wurden folgende Nutzungs-Szenarien definiert:

- Szenario 1: Nutzung Winterweizen (konventionelle Pflugbearbeitung, Monat: Mai)
- Szenario 2: Saatbettzustand (gepflügt, Saatbettkombination) als situation extremer Gefährdung.

2-, 10- und 100-jährige Ereignisse mit einer Niederschlagsdauer von 10-, 30- und 60-Minuten simuliert (vgl. Tabelle 9.3) bilden das Niederschlagsszenario.

Da E-3D für die 30- und 60-minütigen Ereignisse eine Zeitintervallauflösung von jeweils 10 Minuten benötigt, wurde angenommen, dass sich ein Niederschlagsereignis bezüglich der Niederschlagshöhe in drei Phasen gliedert:

Erstes Drittel: 25 % der Gesamtniederschlagsmenge.

Zweites Drittel: 50 % der Gesamtniederschlagsmenge.

Drittes Drittel: 25 % der Gesamtniederschlagsmenge.

Niederschlagsdauer d [min]	Wiederkehrzeit T [a]					
	2		10		100	
	hN	rN	hN	rN	hN	rN
10	10,1	168,6	15,1	252,4	22,3	372,2
30	15,8	87,8	24,7	137,2	37,4	207,9
60	21,0	58,3	33,8	93,8	52,0	144,4

T: Wiederkehrzeit: mittlere Zeitspanne, in der ein Ereignis einen Wert einmal erreicht oder überschreitet [a]

d: Niederschlagsdauer einschließlich Unterbrechungen (in min, h)

hN: Niederschlagshöhe [mm]

rN: Niederschlagsspende [$l/(s \cdot ha)$]

Tabelle 9.3: Niederschlagssituation im Raum Ebergötzen.

(Quelle: Deutscher Wetterdienst, 1997)

9.3.4 Der Einfluss des Basisdatensatzes „Körnung“ auf die simulierte Erosion.

Da für alle Wiederkehrzeiten Berechnungen sowohl für Winterweizen als auch für die Saatbettkombination berechnet wurden, konnten insgesamt 4 Ausgabeparameter x 9 Niederschlagshöhen x 2 Nutzungsszenarien = 72 Rasterdateien verglichen werden. Weil die Erosion/Deposition pro Rasterzelle in der Ausgabedatei sowohl negative als auch positive Werte enthält, hat sich diese Ergebnisform für eine „cell by cell“-Rasterauswertung nicht bewährt. Daher bot es sich an, die Nettoerosion [Erosion minus Deposition] zur Bewertung der Ergebnisse auszuwerten. Da alle untersuchten Szenarien bezüglich der Ausgangsfragestellungen ein ähnliches Bild zeigten, werden die Ergebnisse an einzelnen Fallstudien diskutiert. Exemplarisch werden an dieser Stelle für die Fruchtfolge Winterweizen ein 10-Minuten-Ereignis mit einer Wiederkehrzeit von 2, 10 und 100 Jahren (Abbildungen 9.2.1–9.2.3) sowie als Extremereignis ein zweijähriges Ereignis für den Ackerzustand Saatbettkombination (Abbildung 9.2.4) analysiert. Darüber stellt Abbildung 9.3 die Simulationsergebnisse für ein 30-Minuten-Ereignis (Wiederkehrereignisse 2, 10, 100 Jahre) grafisch gegenüber.

Die Abbildungen 9.2.1 bis 9.2.4 zeigen im linken Bildabschnitt jeweils die simulierten Nettoerosionen [t/ha] für den Referenzdatensatz Bo5, der Bodenübersichtskarte 1:50.000 sowie als Maß für die maximale Optimierung von Bodeneingangsdaten die Disaggre-

als Maß für die maximale Optimierung von Bodeneingangsdaten die Disaggregierungsstufe 2. Die Kreisdiagramme erlauben hierbei einen Überblick über die Verteilung der einzelnen Nettoerosionsklassen in der jeweiligen Eingangsebene. Im mittleren Bildausschnitt werden die Unterschiede in der Prognose visualisiert, indem Differenzen (Beträge) zwischen den verschiedenen Ergebniskarten gebildet werden. In der rechten Bildhälfte erfolgt die Abbildung dieser Unterschiede durch Histogramme. Hierbei werden sowohl absolute Häufigkeiten als auch kumulierte Häufigkeiten visualisiert.

Zweijähriges Niederschlagsereignis

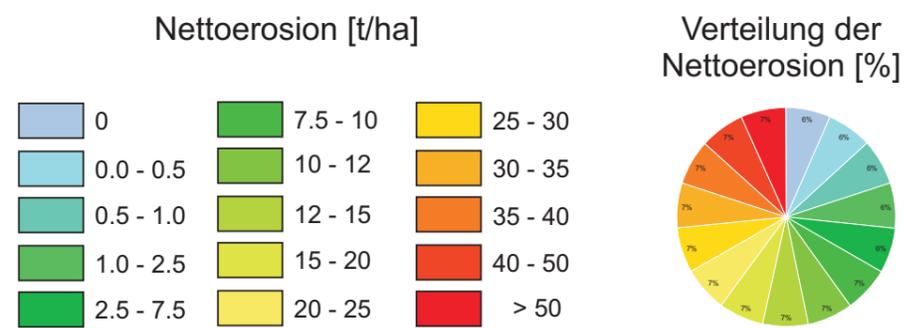
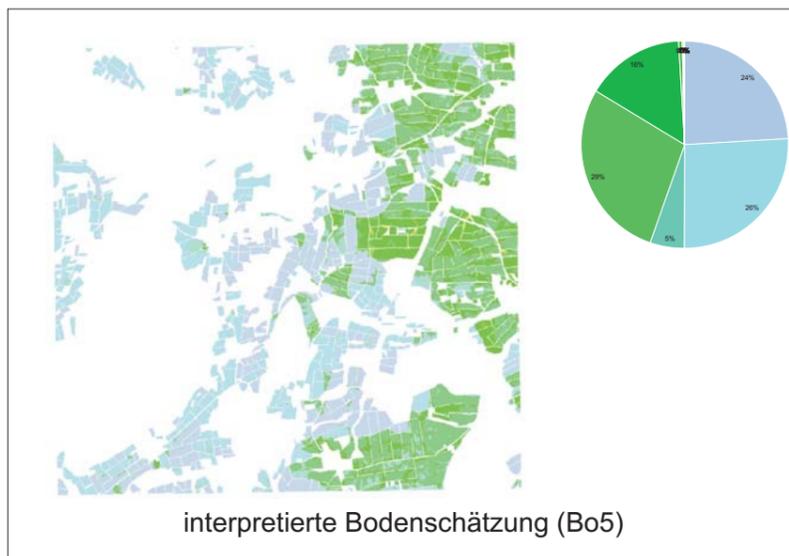
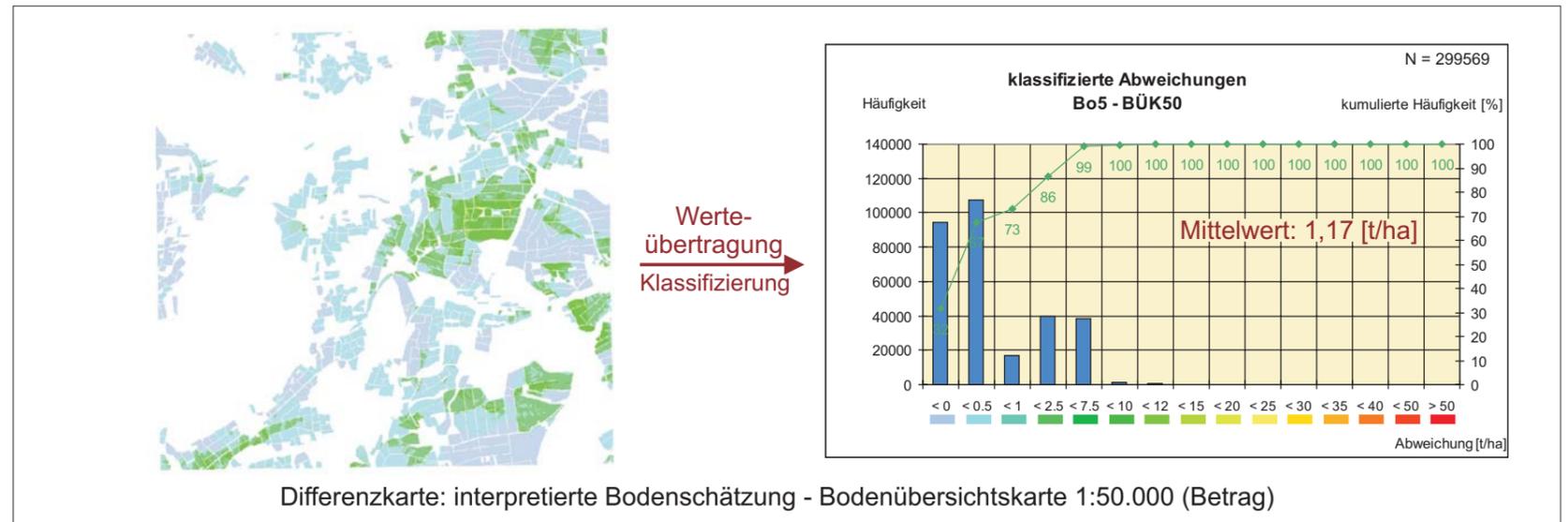
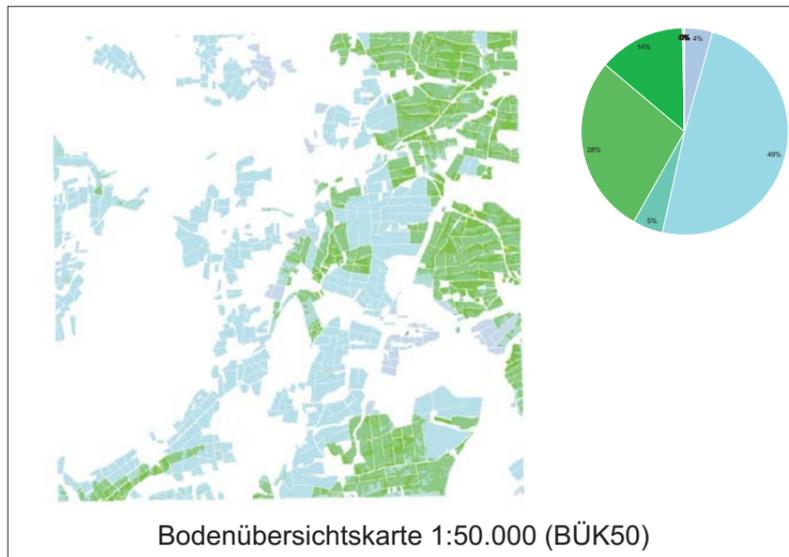
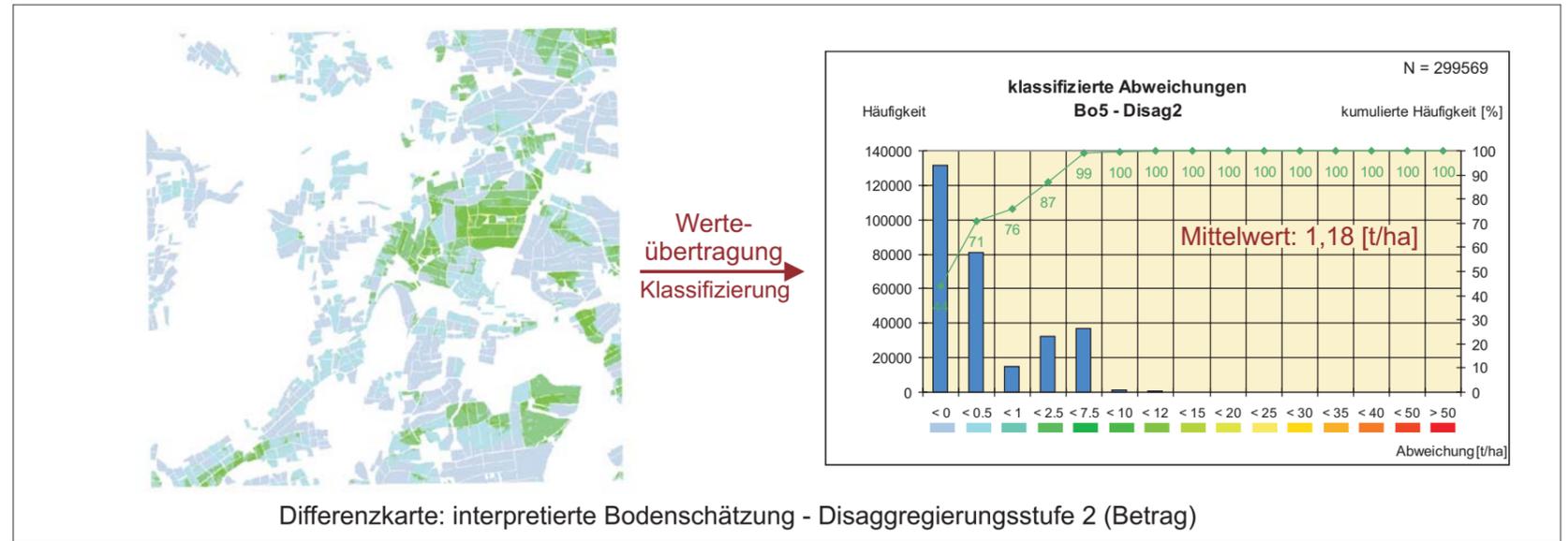
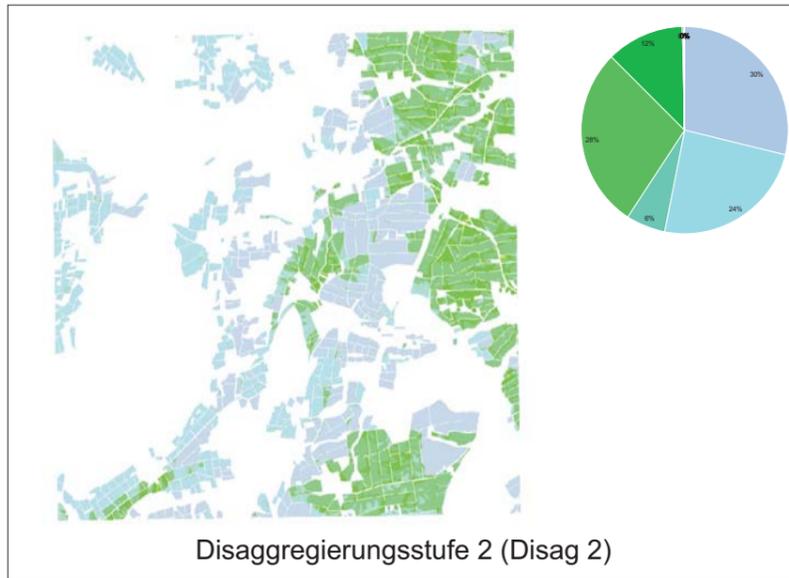
Abbildung 9.2.1 zeigt keine deutlichen Unterschiede bei der Simulation der Bodenabträge für ein zweijähriges Niederschlagsereignis. Die Ergebniskarten im linken Bildausschnitt weisen rein optisch eine fast identische Verteilung der Nettoerosionsklassen aus. Die Kreisdiagramme zeigen allerdings deutlich, dass in der Eingangsebenen BÜK50 die Klasse $<0,5$ [t/ha] mit etwa 50 % deutlich stärker ausgeprägt ist als in den Eingangsebenen Bo5 und Disaggregierungsstufe 2. Die berechnete Nettoerosion differiert im Zentrum des Untersuchungsgebiets (Dreieck Seeburg – Ebergötzen – Landolfshausen, zur Lokalisation vgl. Karte 3.3). Dies trifft besonders auf die Niederungen zwischen Klingsberg, Schmiedeberg, dem Kaland und dem Sandberg zu. Die berechneten mittleren Differenzen (Bo5-BÜK50 / Bo5-Disag2) unterscheiden sich allerdings kaum und liegen etwa bei 1,2 [t/ha]. Die Histogrammverläufe unterstützen diese Annahmen, da in beiden Differenzkarten größere Abweichungsklassen (>10 [t/ha]) mit einer Häufigkeit <1 % auftreten und mehr als 70 % aller Werte eine Abweichung kleiner 1 [t/ha] aufweisen. Darüber hinaus ist anzumerken, dass der Einsatz des Disaggregierungsmodells die Klassenbreite, bei der keine Differenz zwischen den Karten besteht, mit etwa 13 % deutlich zu steigern vermag.

Zehnjähriges Niederschlagsereignis

Abbildung 9.2.2 zeigt bereits deutlich höhere Abträge als das zweijährige Regenereignis. Die berechneten Abträge $>7,5$ [t/ha] nehmen in allen simulierten Ebenen eine Fläche >25 % ein. Die stärksten Unterschiede zwischen den einzelnen Maßstäben treten wiederum im Zentrum des Untersuchungsgebiets auf. Das Disaggregierungsmodell ist in der Lage, im Vergleich mit der Bo5 deutlich ähnlichere Ergebniskarten zu berechnen als die Eingangsebene BÜK50. Obwohl das Disaggregierungsmodell die Klassenunterschiede $>7,5$ [t/ha] nur leicht zu reduzieren vermag, ist die Fläche, auf der keinerlei Abweichungen berechnet wurden, um ca. 10 % gesteigert worden. Die berechneten mittleren Differenzen (Bo5-BÜK50 / Bo5-Disag2) bestätigen diese Angaben, da die Disaggregierungsstufe 2 etwa um 0,3 [t/ha] geringere Differenzen prognostiziert.

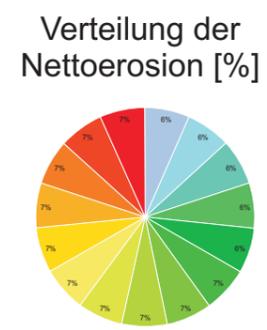
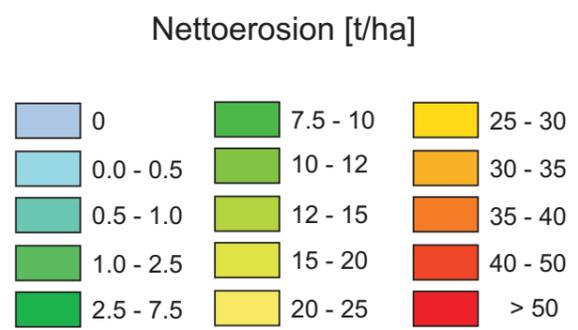
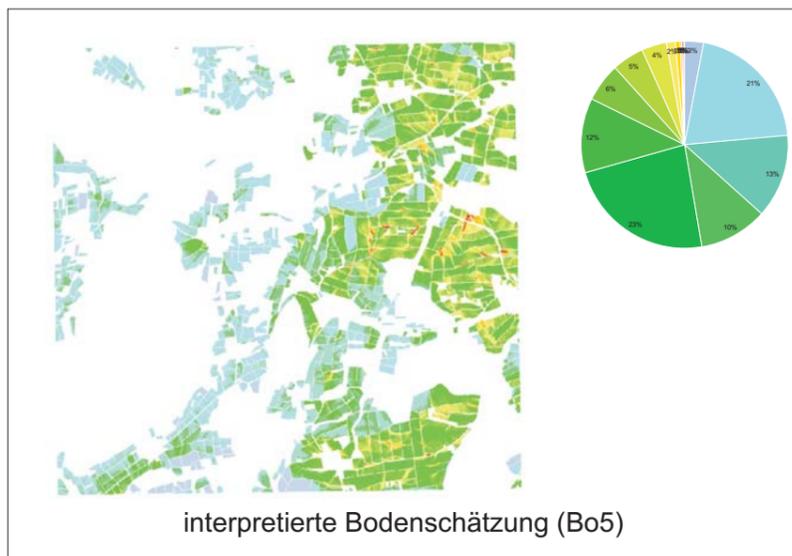
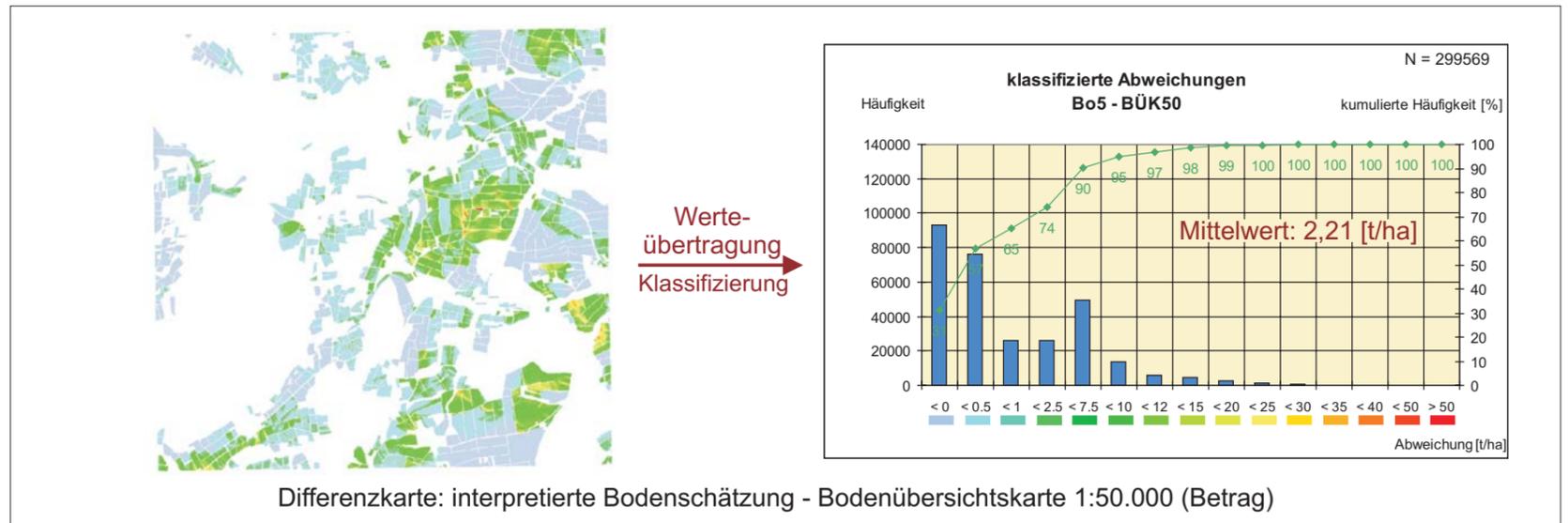
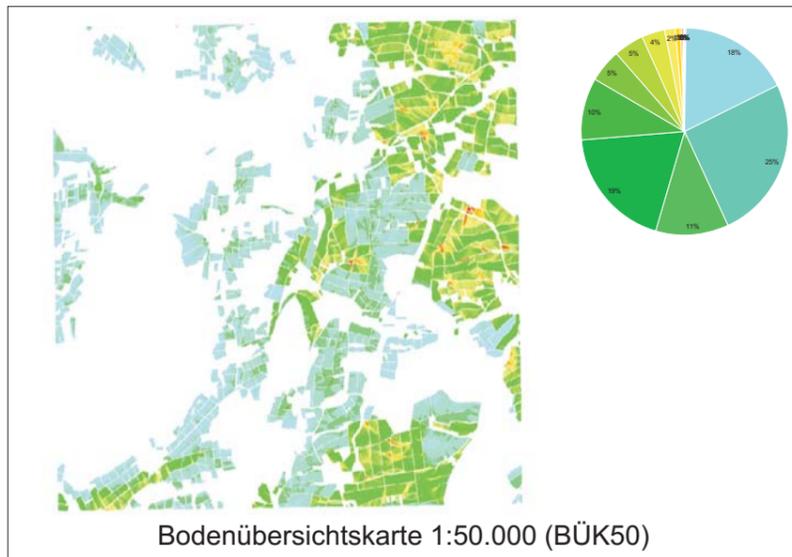
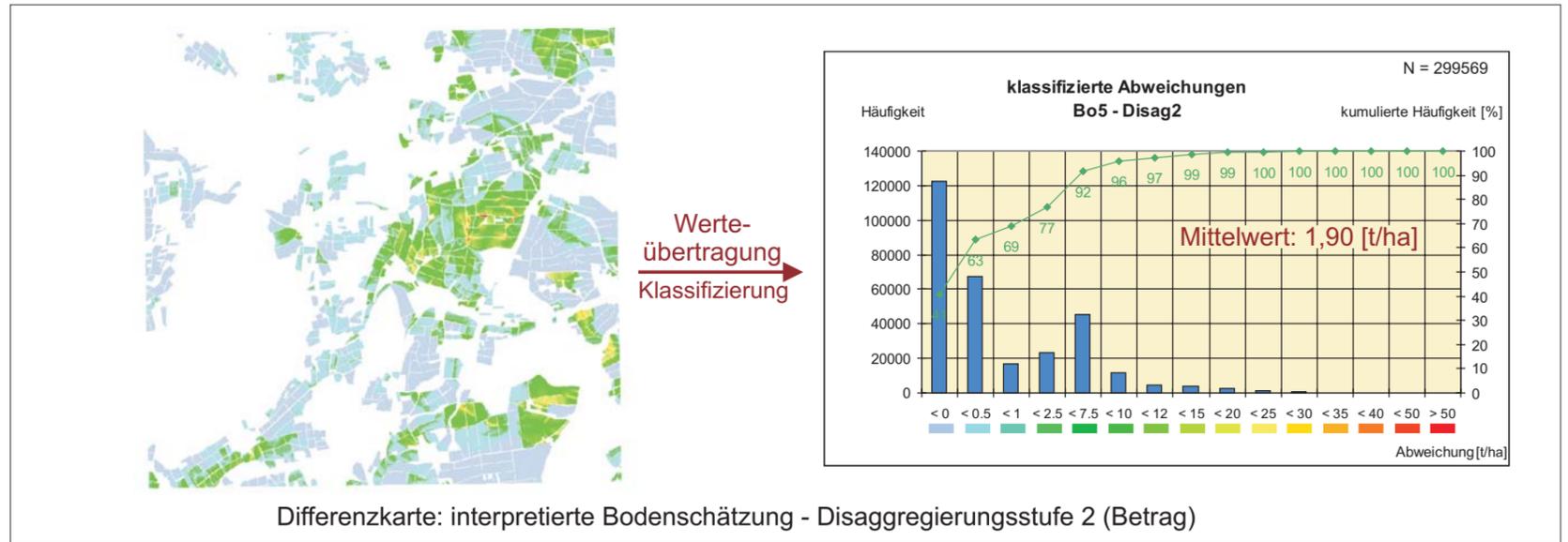
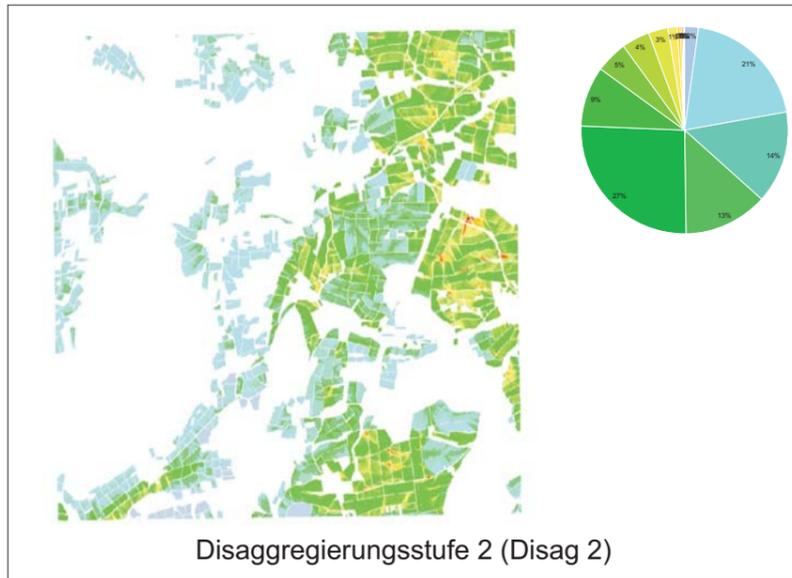
100-jähriges Niederschlagsereignis

Hier tritt die gesamte Klassenbreite der berechneten Abweichungen auf (vgl. hierzu Abbildung 9.2.3). Erneut scheinen rein optisch die größten Unterschiede im Zentrum des Untersuchungsgebiets aufzutreten. Dies wird im Hinblick auf die BÜK50 durch eine deutliche Überschätzung der Klasse $<2,5$ [t/ha] deutlich. Die Differenzkarten bzw. die mittleren Differenzen zeigen, dass die Disaggregierungsstufe 2 wiederum in der Lage ist, die Prognosen des Referenzdatensatzes ähnlicher abzubilden als die BÜK50-Eingangsebene: Die kumulier-



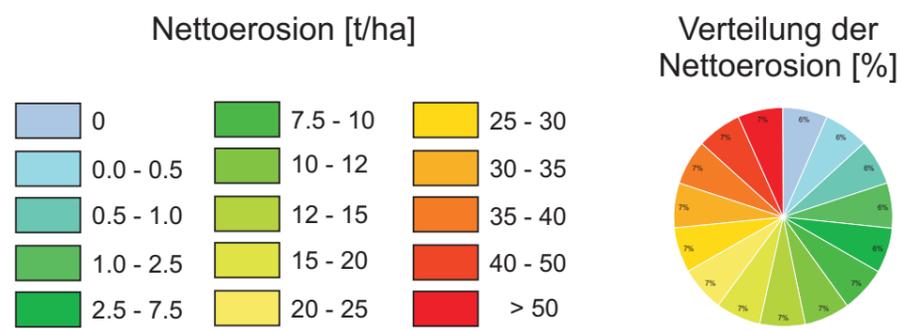
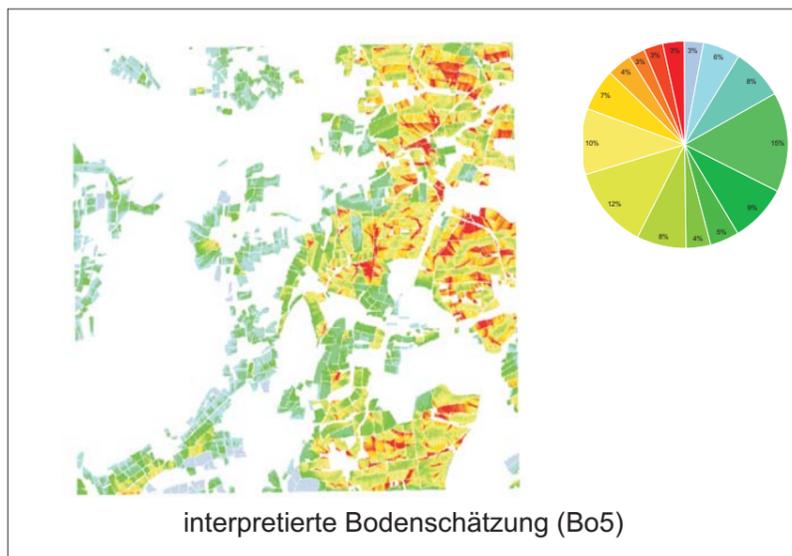
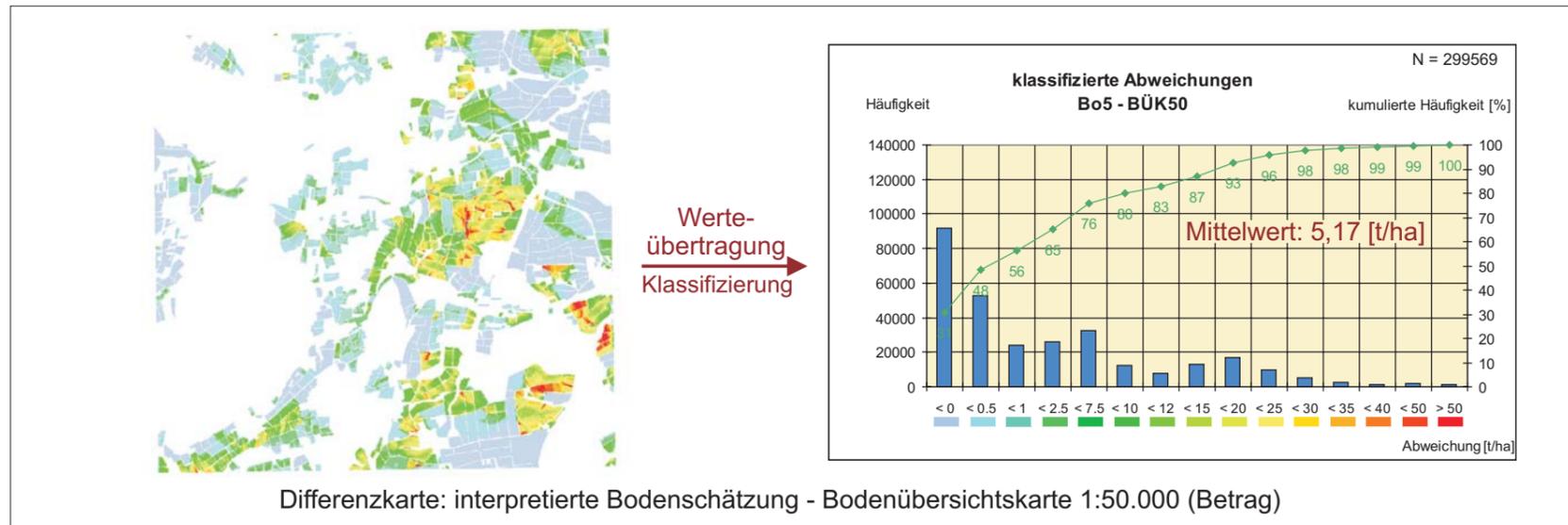
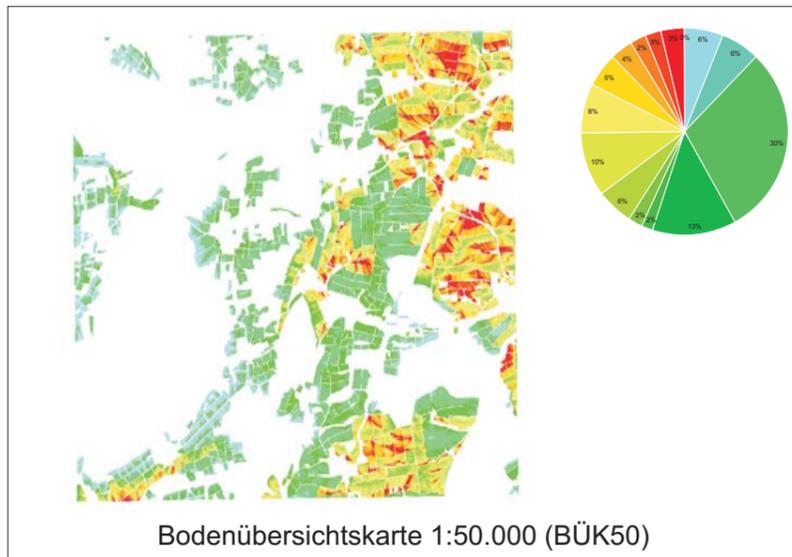
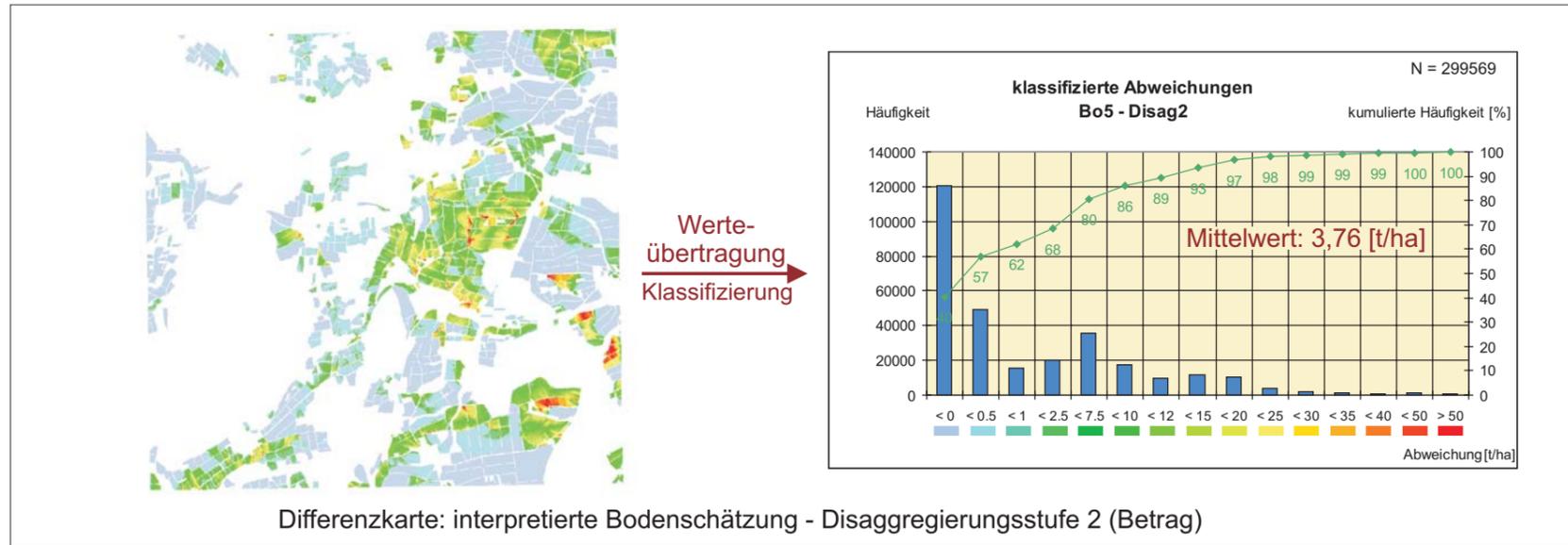
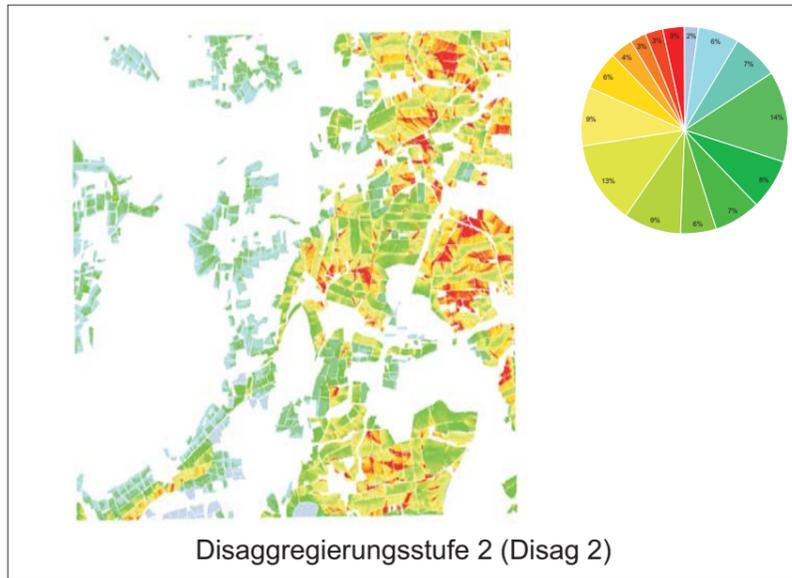
Szenario:
Nutzung: Winterweizen
Monat: Mai
Niederschlagshöhe: 10.1 [mm]
Niederschlagsdauer: 10 [min]
Wiederkehrzeit: 2 [a]

Abbildung 9.2.1: Maßstabsbedingter Einfluss von Bodendaten auf Simulationsergebnisse in E-3D. Beispiel: 2-jähriges Regenereignis von 10 Minuten Dauer bei der Nutzung Winterweizen im Monat Mai.



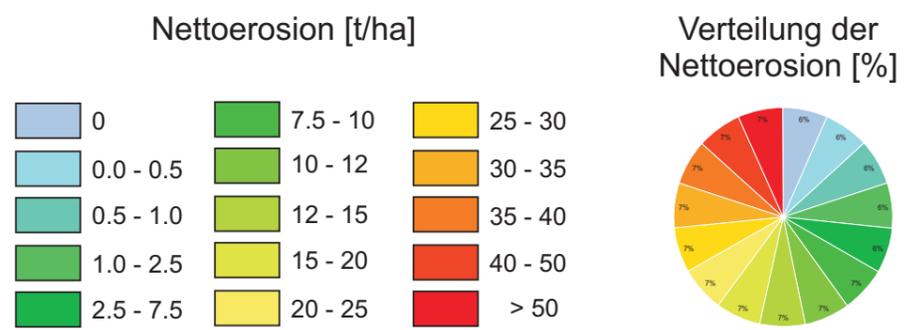
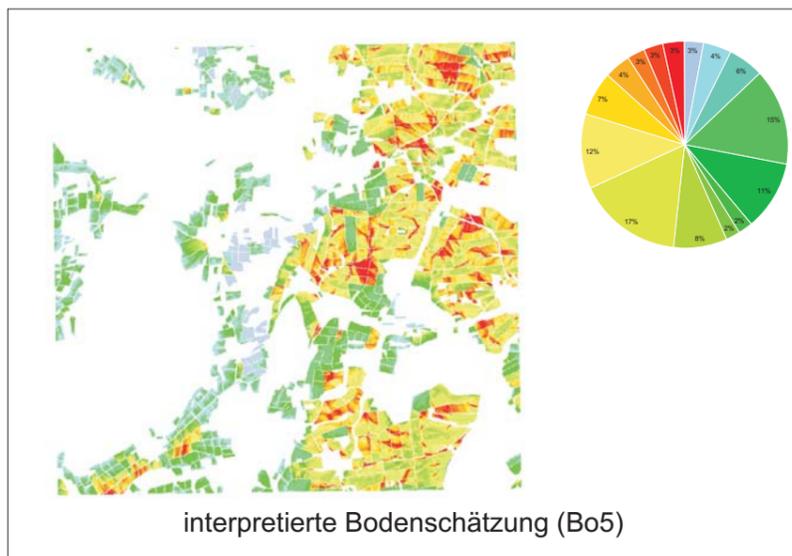
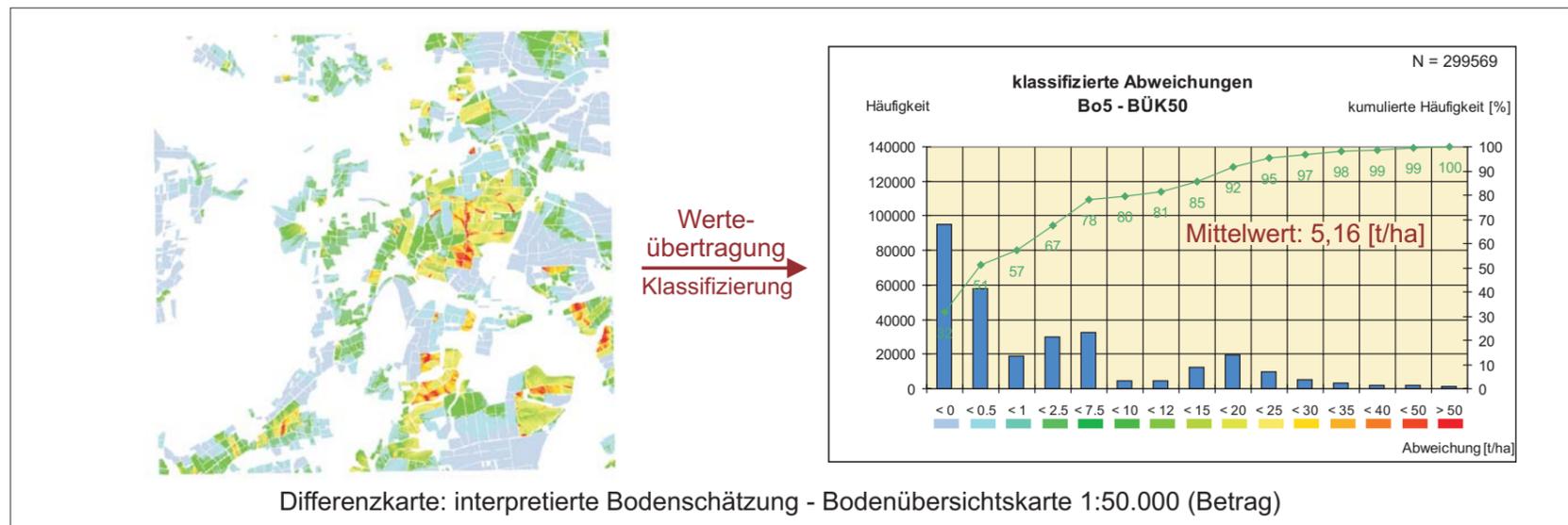
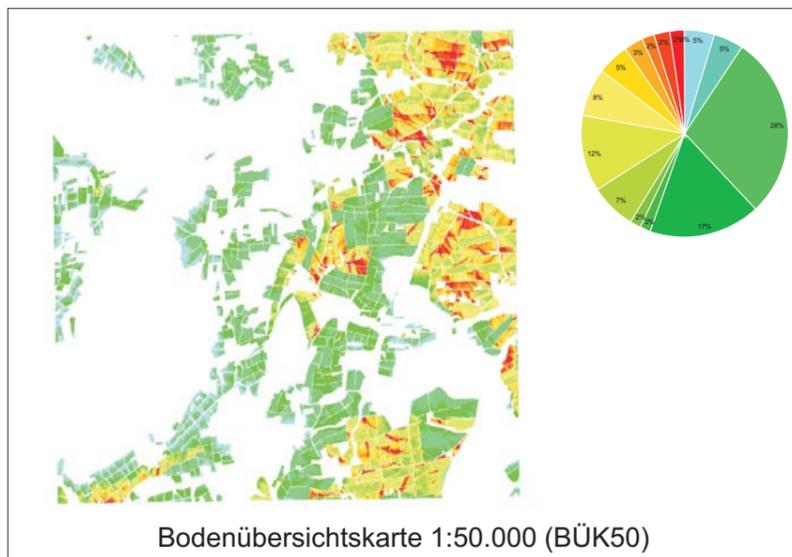
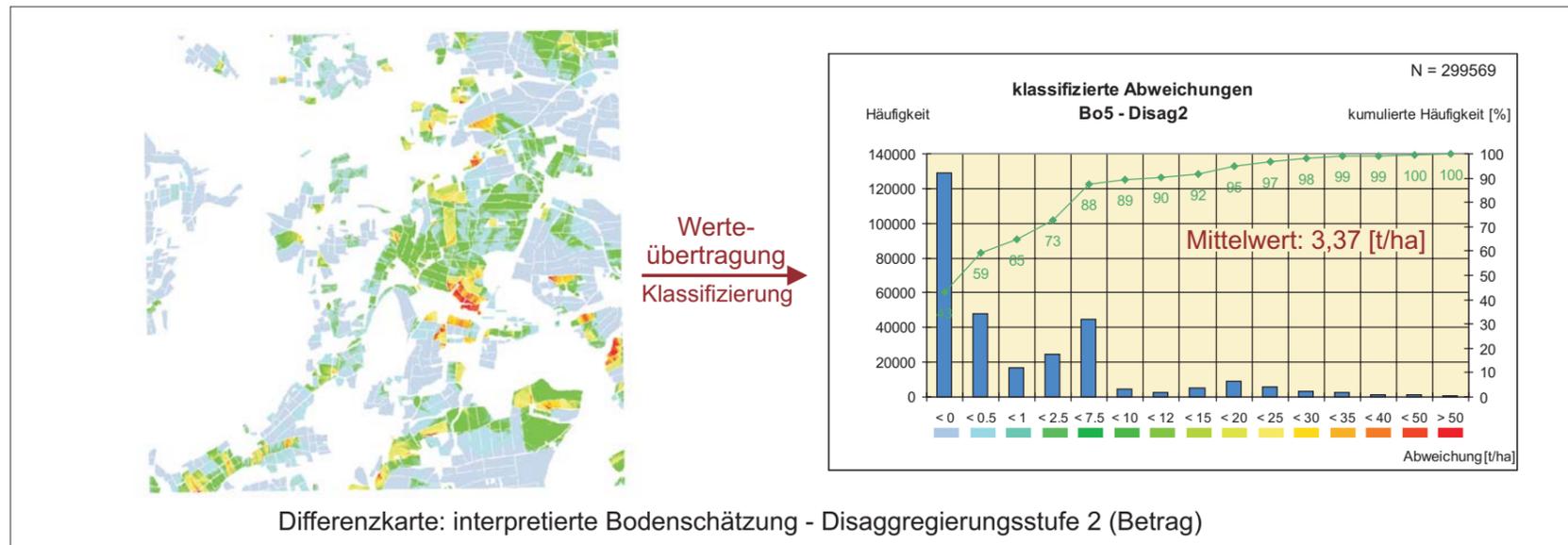
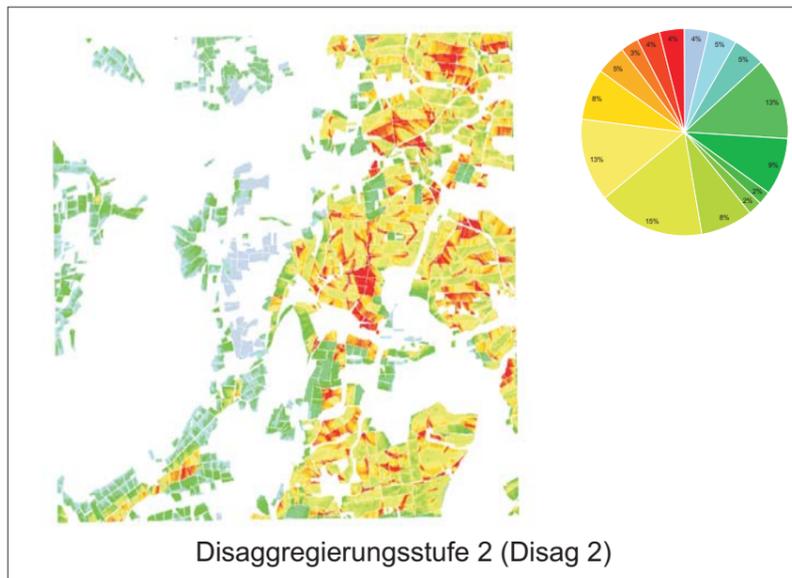
Szenario:
Nutzung: Winterweizen
Monat: Mai
Niederschlagshöhe: 15.1 [mm]
Niederschlagsdauer: 10 [min]
Wiederkehrzeit: 10 [a]

Abbildung 9.2.2: Maßstabsbedingter Einfluss von Bodendaten auf Simulationsergebnisse in E-3D. Beispiel: 10 jähriges Regenereignis von 10 Minuten Dauer bei der Nutzung Winterweizen im Monat Mai.



Szenario:
Nutzung: Winterweizen
Monat: Mai
Niederschlagshöhe: 22.3 [mm]
Niederschlagsdauer: 10 [min]
Wiederkehrzeit: 100 [a]

Abbildung 9.2.3: Maßstabsbedingter Einfluss von Bodendaten auf Simulationsergebnisse in E-3D. Beispiel: 100-jähriges Regenereignis von 10 Minuten Dauer bei der Nutzung Winterweizen im Monat Mai.



Szenario:
Nutzung: Saatbettkombination
Monat:
Feuchtesituation: Feldkapazität
Niederschlagshöhe: 10.1 [mm]
Niederschlagsdauer: 10 [min]
Wiederkehrzeit: 2 [a]

Abbildung 9.2.4: Maßstabsbedingter Einfluss von Bodendaten auf Simulationsergebnisse in E-3D. Beispiel: 2-jähriges Regenereignis von 10 Minuten Dauer bei Saatbettkombination.

te Häufigkeit der Abweichungen ist bei der Differenzkarte Bo5 – Disaggregierungsstufe 2 um etwa eine Klassenbreite zugunsten geringerer Differenzbeträge verschoben. Die mittleren Differenzen bestätigen dies. Aus der Disaggregierungsstufe 2 ergibt sich gegenüber der BÜK50 eine geringere Differenz zum Referenzdatensatz von etwa 1,4 [t/ha].

Zweijähriges Niederschlagsereignis für den Nutzungszustand „Saatbett“

Von der Höhe der simulierten Abträge (vgl. Abbildung 9.2.4) sind die berechneten Werte mit einem etwa 100-jährigen Ereignis bei der Nutzung Winterweizen (Simulationsmonat: Mai) vergleichbar. Dies gilt ebenfalls für die gebildeten Differenzkarten bzw. mittleren Differenzen.

Abbildung 9.3 vergleicht die simulierten Abträge von 30- Minuten Regenereignissen für eine Wiederkehrzeit von 2, 10 und 100 Jahren. Die mittleren Differenzen zwischen den Karten zeigen, dass die prognostizierten Werte zwischen der Disag2- und der Bo5-Simulation mit steigender Niederschlagshöhe stärker übereinstimmen als die Prognosen der BÜK50. Die Eingangsebene BÜK50 unterscheidet sich vor allem in der Ausweisung geringerer Erosionsklassen von anderen Berechnungsvarianten. Beim Vergleich der Flächenanteile der prognostizierten Erosionsklassen wird deutlich, dass die Disaggregierungsstufe 2 die Verhältnisse deutlich näher an der Bo5 darzustellen vermag als die BÜK50-Eingangsebene.

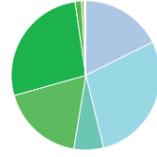
Die Differenzen bei der prognostizierten Nettoerosion sind im Vergleich Disaggregierungsstufe 2 / Referenzdatensatz Bo5 weitaus geringer als beim Vergleich BÜK50 / Referenzdatensatz Bo5 (vgl. Abbildung 9.4). Die Differenzen sind umso größer, je stärker und länger ein Regenereignis ist.

Alle Simulationen ergeben plausible Abtragsmengen. Dies äußert sich sowohl durch die Stärke der berechneten Abtragsmengen als auch durch den nachvollziehbaren Anstieg der Abtragsmengen bei der Variation der Niederschlagshöhen. Auffällig ist zudem, dass die Höhe der Abweichungen zwischen der Bo5 und der BÜK50 zunimmt, je extremer die simulierten Niederschlagshöhen sind. In allen Simulationsläufen zeigt sich, dass Unterschiede in der Prognose vor allem im Ostteil des Untersuchungsgebietes auftreten. Der Hauptgrund liegt in den Unterschieden der Substrate: Im vom Löss dominiertem Ostteil liegen erosionsanfällige Bodenarten vor. Die höchsten Abweichungen sind im Zentrum des Untersuchungsgebietes zu finden. Ursachen hierfür sind, dass bei der Erstellung der Bodenübersichtskarte (BÜK50) auf Grund des Einflusses von vereinzelt vorkommenden (lössfreien) Bausandsteinen die Bodenarten eher einem mesozoischen Ausgangsgestein angepasst wurden. Die kleinräumig sehr abwechslungsreichen Strukturen beinhalten allerdings mehrere Lössinseln. Diese Anordnung vermag nur die Bo5 so differenziert wiederzugeben.

Welche Faktoren beeinflussen die simulierten Bodenabträge?

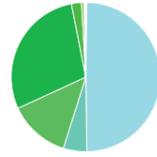
Abbildung 9.5 visualisiert die Unterschiede in der Prognose der Nettoerosion für die beiden Kartenmaßstäbe Bo5 und BÜK50 für 10minütige Niederschlagsereignisse mit einer Wiederkehrzeit von 2, 10 und 100 Jahren. Diese werden exemplarisch für drei Neigungsklassen (<5°, <10° und <15° Hangneigung) dargestellt. Auf der X-Achse sind die Unterschiede der Schluffgehalte der beiden Eingangskarten [Bo5-BÜK50] visualisiert. Aus Übersichtsgründen erfolgt eine klassifizierte Darstellung gemäß Tabelle 9.4. Auf der linken Y-Achse sind die Dif-

2-jähriges Ereignis



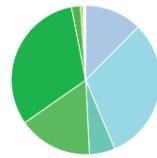
0,81

Disaggregierungsstufe 2



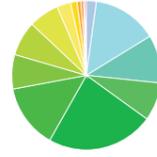
0,91

Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BÜK50)



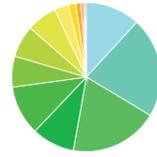
interpretierte Bodenschätzung (Bo5)

10-jähriges Ereignis



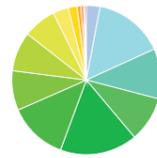
2,16

Disaggregierungsstufe 2



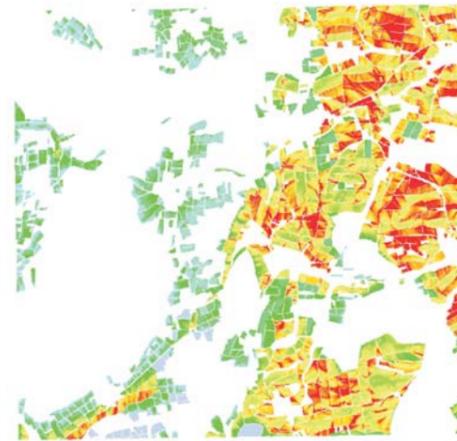
2,82

Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BÜK50)



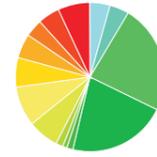
interpretierte Bodenschätzung (Bo5)

100-jähriges Ereignis



4,66

Disaggregierungsstufe 2



6,79

Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BÜK50)



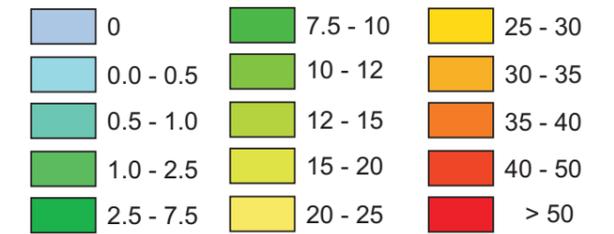
interpretierte Bodenschätzung (Bo5)

Abbildung 9.3: Maßstabsbedingter Einfluss von Boden-daten auf Simulationsergebnisse in E-3D. Beispiel: 2-, 10- und 100-jähriges Regenereignis von 30 Minuten Dauer bei der Nutzung Winterweizen im Monat Mai.



Verteilung der Nettoerosion [%]

Nettoerosion [t/ha]



4,66

Mittlere Differenz der Nettoerosion [t/ha] zwischen den Prognosen der Bodenschätzung Bo5 / Disaggregierungsstufe 2.

6,79

Mittlere Differenz der Nettoerosion [t/ha] zwischen den Prognosen der Bodenschätzung Bo5 / Bodenübersichtskarte (BÜK50).

Szenarien:

Nutzung: Winterweizen

Monat: Mai

Niederschlagsdauer: 30 [min]

2-jähriges Ereignis:

Niederschlagshöhe: 15.8 [mm]

10-jähriges Ereignis:

Niederschlagshöhe: 24.7 [mm]

100-jähriges Ereignis:

Niederschlagshöhe: 37.4 [mm]

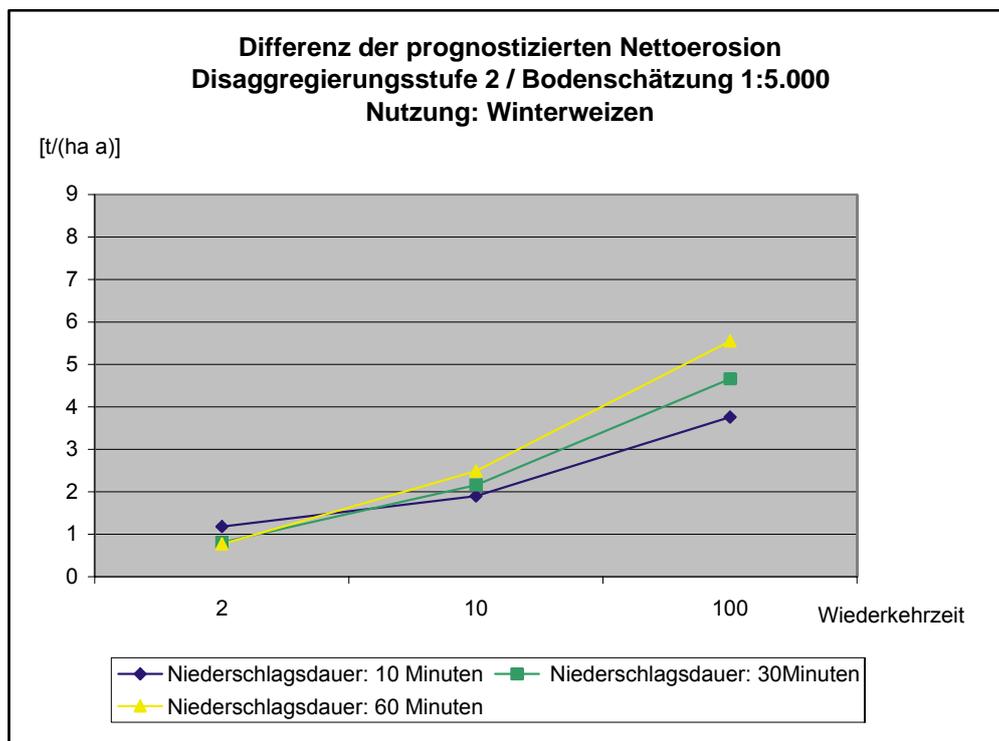
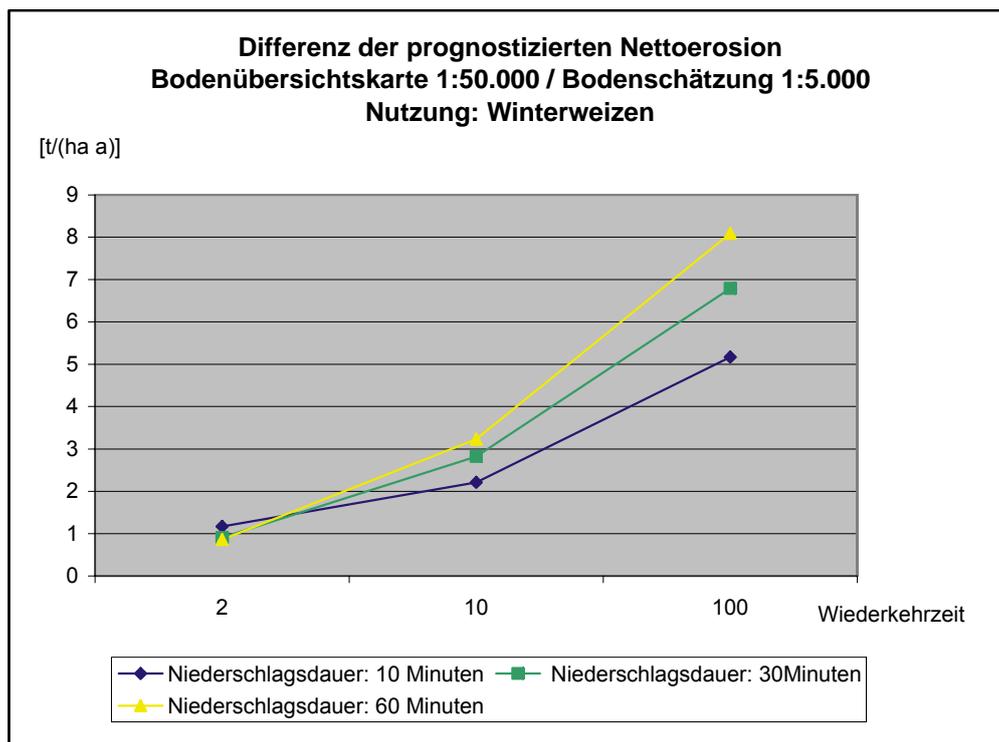
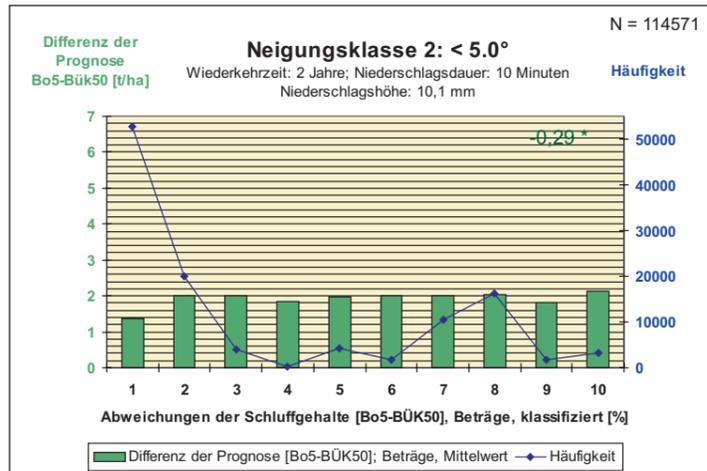
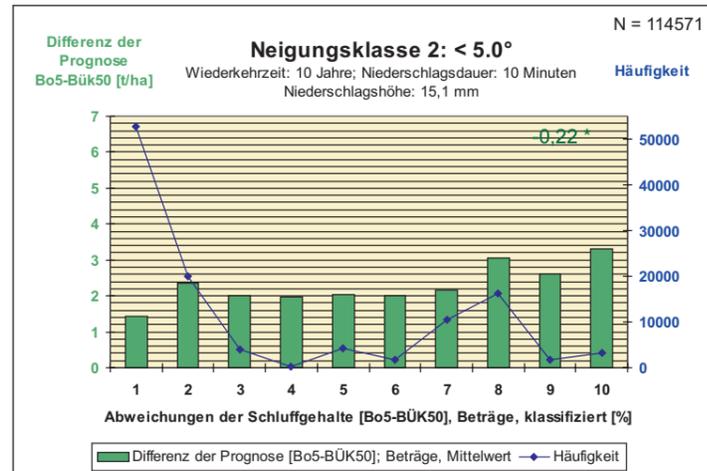


Abbildung 9.4: Differenzen zwischen den prognostizierten Nettoerosionen.

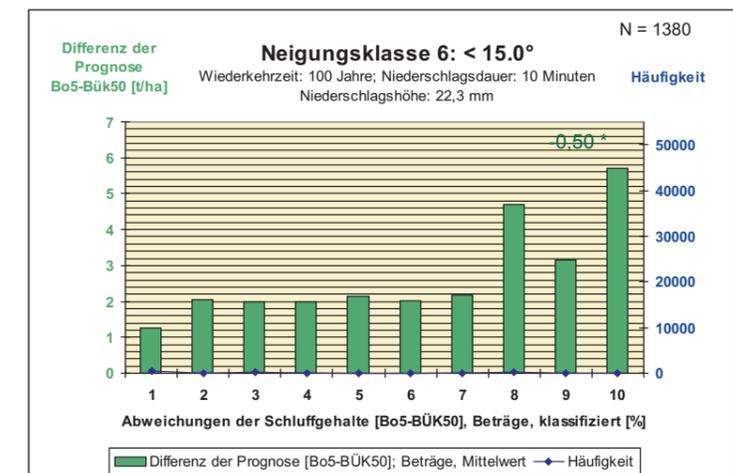
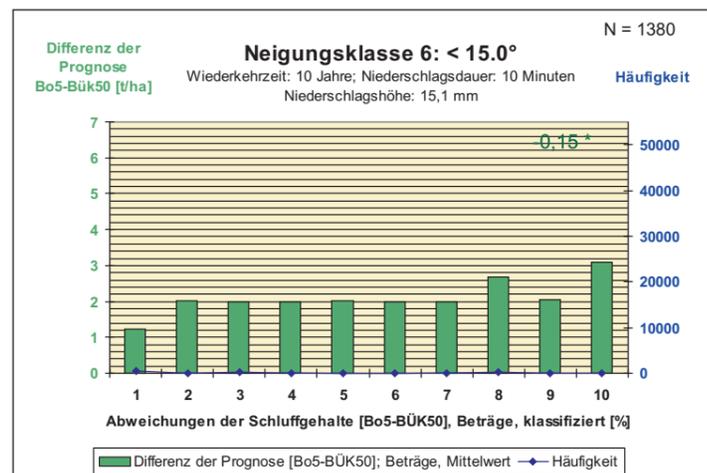
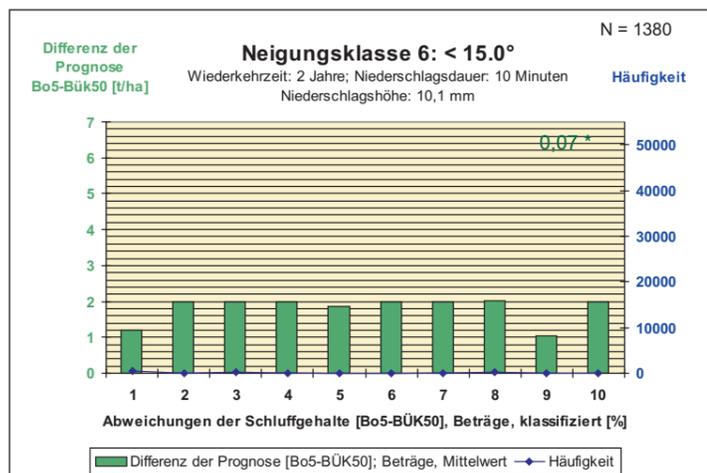
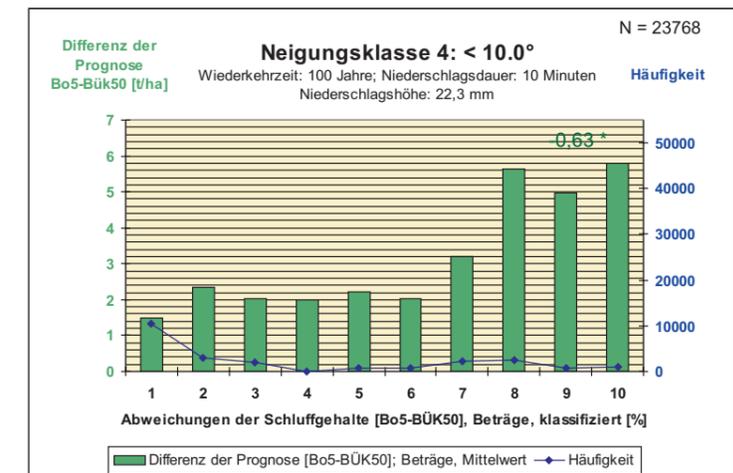
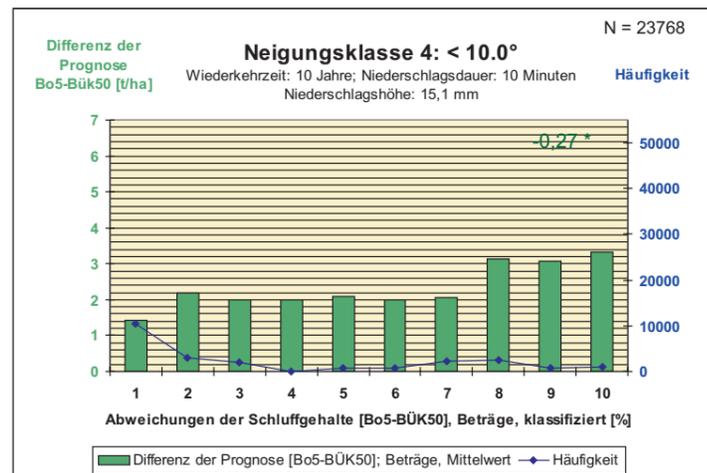
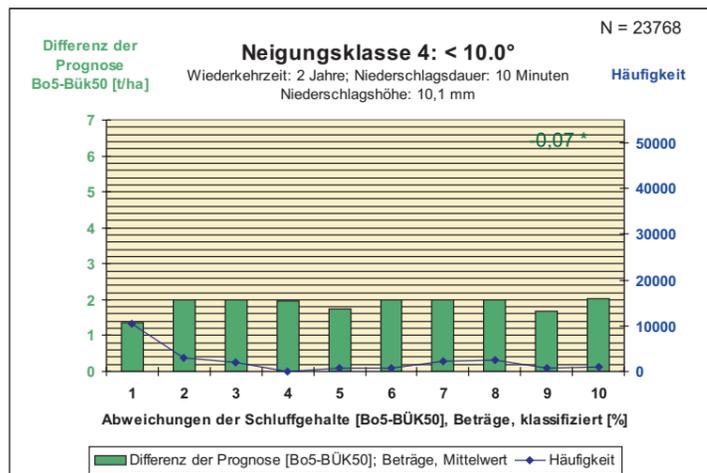
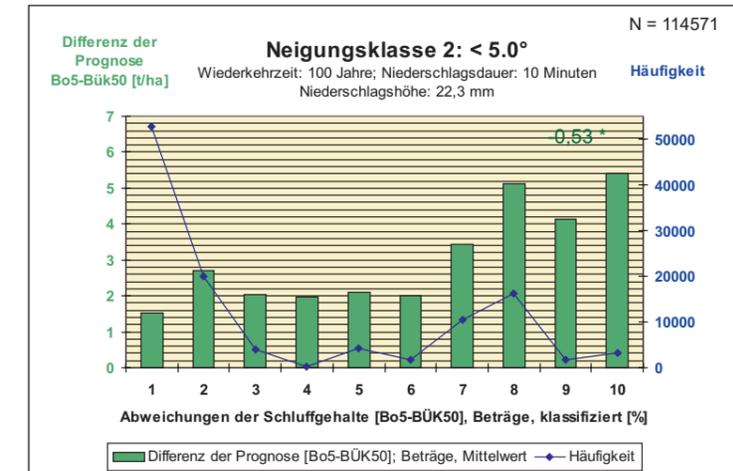
2 Jahre



10 Jahre



100 Jahre



* = Schiefe der Verteilung (Differenz der Prognose Bo5-Bük50 [t/ha])

* = Schiefe der Verteilung (Differenz der Prognose Bo5-Bük50 [t/ha])

* = Schiefe der Verteilung (Differenz der Prognose Bo5-Bük50 [t/ha])

Abbildung 9.5: Unterschiede zwischen Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BÜK50) und der interpretierten Bodenschätzung (Bo5) bei der Prognose der Nettoerosion [t/ha]. Darstellung in Abhängigkeit von Schluffgehaltsdifferenz und Hangneigungsklasse am Beispiel eines 2-, 10- und 100-jährigen Regenereignisses.

ferenzen der von E-3D prognostizierten Abträge abgebildet und auf der rechten Y-Achse die beobachtete Häufigkeit.

Differenzklasse	Abweichungen [%]	Differenzklasse	Abweichungen [%]
1	0	6	< 7.5
2	< 0.5	7	< 10.0
3	< 1.0	8	< 15.0
4	< 2.5	9	< 20.0
5	< 5.0	10	> 20.0

Tabelle 9.4: Klassifizierte Abweichungen der Schluffgehalte (BÜK50-Bo5).

Im Mittel differieren die berechneten Abweichungen in der Nettoerosion zwischen den Eingangskarten BÜK50 und Bo5 maximal um ca. 6 [t/ha]. Auch hier nehmen die Differenzen der Prognose bei extremen Niederschlagsereignissen zu. Die Ergebnisse im linken Abbildungsteil (2-jähriges Niederschlagsereignis) zeigen kaum Unterschiede bei den berechneten Abtragsmengen. Dies bedeutet, dass auch bei großen Hangneigungsklassen sowie hohen Abweichungen in den Schluffgehalten der Eingangskarten nur geringe Abweichungen im Simulationsergebnis auftreten, wenn die Wiederkehrzeit für das Niederschlagsereignis kleiner als 2 Jahre ist.

Kontrollvariablen		Abweichungen der Schluffgehalte (Bo5 - BÜK50) [%]
-keine-	Abweichungen der Schluffgehalte (Bo5 - BÜK50) [%]	1
	Abweichungen 2 jähriges Ereignis [t/ha]	0.493 **
	Abweichungen 10 jähriges Ereignis [t/ha]	0.571 **
	Abweichungen 100 jähriges Ereignis [t/ha]	0.671 **
	Neigungsklassen	0.085
Neigungsklasse	Abweichungen der Schluffgehalte (Bo5 - BÜK50) [%]	1
	Abweichungen 2 jähriges Ereignis [t/ha]	0.492 **
	Abweichungen 10 jähriges Ereignis [t/ha]	0.570 *
	Abweichungen 100 jähriges Ereignis [t/ha]	0.669 **

** Die Korrelation ist auf dem 0,01-Niveau signifikant

Tabelle 9.5: Partielle Korrelationskoeffizienten zwischen den Abweichungen in der Erosionsprognose sowie in den Unterschieden der Schluffgehalte der Bodeneingangskarten.

Die obigen Hypothesen können anhand der Schiefe (vgl. Abbildung 9.5) der Verteilungen auch statistisch untermauert werden: Mit zunehmender Extremität des Niederschlagsereignisses verringern sich die berechneten Schiefen der Verteilungen und liefern Belege für a) die immer weitere Entfernung von der Normalverteilung und b) die Zunahme der Linksschiefe bzw. Rechtssteilheit der Histogrammverläufe mit der Stärke des Regenereignisses. Um die Abhängigkeit zwischen der mittleren Differenz der Prognose und den Abweichungen der Schluffgehalte in den beiden Bodeneingangskarten für die Simulation noch deutlicher zu unterstreichen, wurden partielle Korrelationen berechnet. Partiiell (Kontrollvariable= Hangnei-

gungsklasse), da auf jeden Fall davon auszugehen ist, dass die Hangneigung die Stärke des linearen Zusammenhanges zwischen den beiden Variablen beeinflusst (Tabelle 9.5). Sämtliche Korrelationskoeffizienten untermauern die bereits diskutierten Ergebnisse. Es existiert ein signifikanter linearer Zusammenhang zwischen den Abweichungen der Schluffgehalte der beiden Bodeneingangskarten und der Höhe der Abweichungen bei der Prognose der Nettoerosionen. Die Zunahme der Koeffizienten unterstreicht zudem die Annahme, dass mit steigender Extremität des Regenereignisses auch die Höhe der Differenzen in den jeweiligen Nettoerosionsprognosen zunimmt. Ein linearer Zusammenhang (nicht visualisiert) zwischen der Hangneigungsklasse und der Höhe der Differenzen in der Prognose konnte nicht nachgewiesen werden. Allerdings kann auf Grund der Unterschiede in den berechneten partiellen Korrelationen (ohne/mit Kontrollvariable Hangneigungsklasse) ein leichter Einfluss auf den Zusammenhang zwischen Differenz der Erosionsprognose/Abweichung in den Schluffgehalten durch die Hangneigungsklasse nachgewiesen werden.

9.4 Fazit

Da für die vorliegende maßstabsübergreifende Modellierung keine Feldversuche zur Überprüfung der Modellergebnisse vorlagen, kann – nach vorhergehender Plausibilitätskontrolle – weder das eine noch das andere Ergebnis als „falsch“ oder „richtig“ bestätigt werden. Allerdings war dies auch nie das Ziel der Untersuchung. Vielmehr sollte gezeigt werden, welche Unterschiede durch Skaleneffekte auftreten bzw. ob die Höhe der Unterschiede mit bestimmten Substraten oder morphometrischen Begebenheiten einhergehen und welchen Einfluss das Disaggregierungsmodell auf modellierte Werte ausübt. Hierbei wird – wie im gesamten Verlauf der Arbeit – angenommen, dass der Referenzdatensatz der Bo5 auf Grund der höchsten Auflösung die wahrscheinlichste Ausprägung liefert. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die prognostizierten Nettoerosionen auf Basis der Bo5 bzw. BÜK50 unterscheiden sich zum Teil erheblich. Für ein 100-jähriges Regenereignis von 10 Minuten kann die Differenz im Mittel ca. 5,2 [t/(ha)] betragen. Hierbei bildete sich folgende Faustregel ab: Die Höhe der Unterschiede bei der Prognose stiegen bei der Nutzung Winterweizen mit zunehmender Extremität der Niederschlagsereignisse an.
- Das Disaggregierungsmodell ist in der Lage, die Abweichungen zur Bo5 gegenüber der BÜK50 deutlich zu reduzieren. Für ein Regenereignis von 10 Minuten Dauer z.B. kann die Verbesserung im Mittel 1,6 [t/(ha)] betragen.
- Unterschiede in den Kornfraktionen der Bodeneingangskarten zeigen erst ab einer Wiederkehrzeit des Regenereignisses von >10 Jahren einen deutlichen Einfluss auf die berechneten Nettoerosionsabträge.

10 Übertragung des Disaggregierungsmodells auf Gebiete ähnlicher räumlicher Ausstattung

Folgende Fragestellung steht im Mittelpunkt:

- Sind die berechneten Heterogenitätsmaße auf vergleichbare Kartiereinheiten in naturräumlich ähnlichen Gebieten übertragbar?

Die Fragestellungen werden auf der Basis der Disaggregierungsstufe 1 geprüft. Leider durften vom Projektpartner BGR aus rechtlichen Gründen keine digitalen Geländemodell-Daten für die Validierungsgebiete geliefert werden. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Beurteilung der Heterogenitäten der Kornfraktionen basierte, erfolgte die Validierung des Modells für die Ton-, Schluff- und Sandgehalte in 10 cm, 50 cm und 80 cm Profiltiefe.

10.1 Verwendete Kartenblätter zur Validierung des Verfahrens und Vorgehen

Wegen des großen Datenaufwandes musste sich die Untersuchung auf die drei größten lössfreien (Pronum 539, 540 und 555) und lössdominierten (Pronum 158, 164 und 184) Kartiereinheiten beschränken. Diese bilden im Untersuchungsgebiet Ebergötzen nach der Verschneidung mit der Informationsschicht Petrographie 43 unterschiedliche Kombinationen aus BÜK50-Einheit und Gesteinsuntergrund.

Im Niedersächsischen Bodeninformationssystem wurden nun alle Profilnummern der BÜK50 für Niedersachsen gesucht, welche a) die Profilnummern 158, 164, 184, 539, 540 oder 55 tragen und b) für die Bodenschätzungsdaten (Bo5) und geologische Karten 1:25.000 (GK25) digital im NIBIS vorliegen. Der Stichprobenumfang beruht auf 34 unterschiedlichen TK50-Blättern und hat einen Flächeninhalt von etwa 257.000 ha (1199 Polygone). Aus diesen Einheiten wurden fünf Validierungsgebiete ausgewählt, die jeweils den Ausdehnungen einer TK25 entsprachen (Blatt 4126, 4225, 4325, 4326, 4327). Von den 43 Kombinationen aus BÜK50 Einheit und Gesteinsuntergrund existieren 29 Einheiten auf den Validierungsblättern. Da Verschneidungseinheiten auf mehreren Validierungsblättern vorhanden sein können, ergibt sich ein Stichprobenumfang von 63 Einheiten. Tabelle 10.1 bietet einen Überblick über die auf den Validierungsblättern vorhandenen Kombinationen.

10.2 Übertragbarkeit des Modells

Für alle fünf Validierungsblätter wurden für die Verschneidungseinheiten BÜK50/Petrographie (Disaggregierungsstufe 1) Histogrammverläufe der Ton-, Schluff- und Sandgehalte anhand der Referenzdatensätze (Bo5) für alle drei ausgewählten Profiltiefen berechnet. Hiernach erfolgt blattweise der Vergleich mit dem Untersuchungsgebiet. Der erste Schritt prüft, ob die Kombinationen aus Profilnummer und Petrographie auch ähnliche oder gleiche Modalwerte hervorrufen, d.h. ob der Modalwert im Validierungsgebiet innerhalb einer Spanne von $\pm 10\%$ (entspricht der Spannweite des Homogenitätsindex) um den Modalwert im Untersuchungsgebiet Ebergötzen liegt. Tabelle 10.2 und 10.3 zeigen die Ergebnisse.

ID	PRONUM50	Petrographie*	Löss	Vorhanden?				
				Blatt4126	Blatt4225	Blatt4325	Blatt4326	Blatt4327
6	158	^fs-^ms	Ja		JA			
9	158	^t-^u	Ja				JA	
7	158	^gs-^fs	Ja				JA	JA
10	158	T-X	Ja				JA	JA
12	158	U-G	Ja				JA	JA
8	158	^t	Ja	JA	JA	JA		
11	158	U	Ja	JA	JA	JA	JA	JA
14	164	^fs-^ms	Ja		JA			
15	164	^gs-^fs	Ja					JA
19	164	W	Ja	JA			JA	JA
18	164	U	Ja	JA	JA	JA	JA	JA
30	184	U-G	Ja				JA	JA
29	184	U	Ja	JA	JA	JA	JA	JA
77	539	^fs-^ms	Nein		JA			
79	539	^t	Nein		JA			
80	539	^t-^u	Nein				JA	
78	539	^gs-^fs	Nein				JA	JA
81	539	T-X	Nein				JA	JA
82	539	U	Nein	JA	JA		JA	JA
86	540	T-G	Nein			JA		
87	540	T-X	Nein				JA	
89	540	U-G	Nein				JA	
85	540	^t	Nein			JA	JA	
88	540	U	Nein			JA	JA	JA
93	555	^t-^u	Nein				JA	
96	555	U-G	Nein				JA	
91	555	^gs-^fs	Nein				JA	JA
92	555	^t	Nein			JA	JA	
95	555	U	Nein	JA	JA	JA	JA	JA

*Zum Vergleich der Petrographiekürzel, siehe Tabelle 8.1.

Tabelle 10.1: Auf den Validierungsblättern und im Untersuchungsgebiet vorhandene Kombinationen aus BÜK50-Einheit und Gesteinsuntergrund.

lössdominiert	Blatt 4126		Blatt 4225		Blatt 4325		Blatt 4326		Blatt 4327	
	Anzahl	Flächenanteil [%]								
liegt innerhalb der Spannweite des H-Indexes	34	99.0	38	99.8	29	99.2	64	99.5	55	99.6
liegt außerhalb der Spannweite des H-Indexes	11	1.0	4	0.2	7	0.8	11	0.5	20	0.4
keine Aussage möglich [NoData]			12		0		6		6	
Anzahl der Kombinationen auf dem Blatt	5		6		4		9		9	
berücksichtigte Fläche [ha]	4870.73		4465.26		5728.45		3111.28		3094.37	

Tabelle 10.2: Prüfung der Übertragbarkeit von Modellergebnissen für lössdominierte Einheiten.

lössfrei	Blatt 4126		Blatt 4225		Blatt 4325		Blatt 4326		Blatt 4327	
	Anzahl	Flächenanteil [%]								
liegt innerhalb der Spannweite des H-Indexes	18	100.0	15	83.1	9	29.5	56	74.1	16	69.9
liegt außerhalb der Spannweite des H-Indexes	0	0.0	15	16.9	30	70.5	46	25.9	29	30.1
keine Aussage möglich [NoData]			6		6		15		9	
Anzahl der Kombinationen auf dem Blatt	2		4		5		13		6	
berücksichtigte Fläche [ha]	17.95		245.80		146.22		805.37		1119.86	

Tabelle 10.3: Prüfung der Übertragbarkeit von Modellergebnissen für lössfreie Einheiten.

In Tabelle 10.2 werden in den unteren beiden Zeilen die Anzahl der Verschneidungskombinationen (BÜK50/Gesteinsuntergrund) sowie der Flächeninhalt dieser Areale für die einzelnen Validierungsblätter abgebildet. Die Angabe „Anzahl“ gibt an, wie oft die Bedingung zutrifft, dass der Modalwert im Validierungsgebiet innerhalb der Spannweite des H-Indexes im Untersuchungsgebiet liegt. Sind z.B. wie Blatt 4126 insgesamt zwei lössfrei Einheiten auf dem Kartenblatt, so ergeben sich hierdurch 2 x 3 Kornfraktionen x 3 Tiefen = 18 Prüfungsmöglichkeiten. Die Spalte Flächeninhalt [%] gibt an, welchen Flächeninhalt [%] die einzelnen Trefferquoten (Übereinstimmung/keine Übereinstimmung) besitzen.

Aus Tabelle 10.2 wird deutlich, dass in den laut BÜK50 lössdominierten Einheiten ähnliche Modalwerte vorliegen. Wenn der Modalwert in den Verschneidungseinheiten auf den Validierungsblättern nicht innerhalb der berücksichtigten Spannweite im Untersuchungsgebiet liegt, so handelt es sich um sehr kleine Verschneidungseinheiten. Die berechneten Werte zeigen, dass unabhängig von der Blattwahl der Verteilungsschwerpunkt für lössdominierte Areale abgeschätzt werden kann. Zudem bestätigt es, dass nicht nur auf dem Blatt Ebergötzen sondern auch auf den Validierungsblättern eine Lössinformation aus einer mittelmaßstäbigen Bodenkarte sich weitgehend mit den Angaben der Bo5 deckt.

Bei den lössfreien Arealen ist die Übereinstimmung weniger deutlich. Vier der fünf Validierungsblätter zeigen Übereinstimmungen auf 70 % bis 100 % der Flächen. Bei der Berücksichtigung der Trefferquoten wird deutlich, dass es vor allem kleine Verschneidungseinheiten sind, welche nicht übereinstimmen. Die Ausnahme bildet das Blatt 4325. Hier stimmen die Werte lediglich auf etwa 30 % der Fläche überein. Gründe für diese schwache Deckung der Angaben sind vornehmlich in der Geologischen Karte des Blattes zu suchen. Die berechneten Histogrammverläufe für die Verschneidungseinheiten aus BÜK50-Einheit und Petrographie zeigen nicht nur Unterschiede zum Untersuchungsgebiet, sondern unterscheiden sich auch für vergleichbare Einheiten der anderen Validierungsblätter. Somit wird an dieser Stelle deutlich, dass die Qualität der GK25 von entscheidender Bedeutung bei der Umsetzung des Disaggregierungsansatzes ist.

Vergleich anhand der Homogenitätsindizes

Tabelle 10.4 visualisiert die mittleren flächengewichteten Abweichungen der H-Indizes zwischen dem Blatt Ebergötzen und den Validierungsgebieten. Die Flächengewichtung besteht darin, dass die Differenzen zwischen den H-Indizes mit der Summe der beiden Differenzflächen multipliziert wird. Anschließend wird die Summe dieser Produkte durch die Summe aller berücksichtigten Flächen geteilt. Die Gewichtung verhindert einen zu starken Einfluss kleiner Verschneidungseinheiten auf die mittleren Indizes.

$$H\text{-Index}_m = \frac{\sum [H\text{-Index}_{ValG} - H\text{-Index}_{UG}] * (Area_{ValG} - Area_{UG})}{\sum (Area_{ValG} + Area_{UG})}$$

H-Index	Homogenitätsindex
Area	Flächeninhalt
m	mittlerer
ValG	Validierungsgebiet
UG	Untersuchungsgebiet (Ebergötzen)

	Mittlere Flächen gewichtete Abweichungen								
	Ton 10cm	Ton 50 cm	Ton 80cm	Schluff 10cm	Schluff 50 cm	Schluff 80cm	Sand 10cm	Sand 50 cm	Sand 80cm
lössfrei	10.8	9.0	8.5	18.4	17.6	19.5	12.8	13.6	16.6
lössdominiert	4.4	5.6	8.2	7.2	5.1	6.6	5.4	4.1	4.7
Gesamt	5.5	6.1	8.3	9.2	7.0	8.7	6.7	5.6	6.1

Tabelle 10.4: Mittlere Flächen gewichtete Unterschiede zwischen dem Untersuchungsgebiet und den Validierungsblättern

Die lössdominierten Einheiten zeigen auf den unterschiedlichen Kartenblättern etwa gleich hohe H-Indizes. In den lössfreien Arealen treten Unterschiede in den H-Indizes von maximal 20 % bei den Schluff-, von 17 % bei den Sand- und 11 % bei den Tongehalten auf. Diese mittleren Werte scheinen in Anbetracht der Höhe der Indizes zwischen 70 %–90 % in der ersten Disaggregierungsstufe (vgl. Abbildung 8.4) niedrig. Tabelle 10.5 zeigt die maximalen Abweichungen der H-Indizes zwischen dem Blatt Ebergötzen und den Validierungsblättern. Die Maxima liegen bei günstigen Werten von 40 %. Diese treten allerdings nur auf, wenn die zu vergleichenden Arealgrößen entweder beide sehr klein oder sehr unterschiedlich groß sind. In Anbetracht der Schwankungsbreiten kann an dieser Stelle nicht gesagt werden, dass die berechneten H-Indizes für lössfreie Einheiten des Untersuchungsgebiets auf identische Verschneidungseinheiten der Validierungsblätter übertragen werden können. Die Arealgrößen spielen eine zu entscheidende Rolle. Sind die beiden zu vergleichenden Einheiten ähnlich groß, so sind auch die H-Indizes übertragbar.

	Ton 10cm	Ton 50 cm	Ton 80cm	Schluff 10cm	Schluff 50 cm	Schluff 80cm	Sand 10cm	Sand 50 cm	Sand 80cm
Maximale Abweichung	41.5	62.5	72.6	62.2	65.0	79.1	59.5	60.6	66.2
Untersuchungsgebiet [ha]	0.4	0.0	40.8	10.4	10.2	10.4	38.5	0.0	38.5
Validierungsgebiete [ha]	3.2	3.6	0.2	109.4	103.2	97.6	0.2	3.6	0.2

Tabelle 10.5: Maximale Abweichungen der H-Indizes für Verschneidungseinheiten der ersten Disaggregierungsstufe im Untersuchungsgebiet und auf den Validierungsblättern.

Die bisherigen Ergebnisse können wie folgt zusammenfasst werden:

In den lössdominierten Verschneidungseinheiten lassen sich vom Blatt Ebergötzen sowohl die berechneten Modalwerte als auch die H-Indizes auf vergleichbare Einheiten anderer Kartenblätter im Niedersächsischen Berg- und Hügelland übertragen.

In den lössfreien Arealen ist dies nicht ohne Weiteres möglich. Für große Verschneidungseinheiten liefert das Disaggregierungsmodell übertragbare Ergebnisse. Für sehr kleine Areale ist dies nicht möglich. Die Problematik ergibt sich aus der vektorbasierten Vorgehensweise, da hierdurch unter Umständen sehr kleine Areale erzeugt werden. Eine Überprüfung für alle im NIBIS vorliegenden Karteneinheiten des Niedersächsischen Berg- und Hügellandes könnte mehr Klarheit schaffen, da die Stichprobe aus dem Untersuchungsgebiet, für den gesamten Naturraum gesehen, noch zu klein ist.

11 Fazit und Ausblick

Die in der Literatur gebräuchlichen Maße sind für die Beurteilung der Heterogenität von Bodenbasisdaten mittelmaßstäbiger Kartenwerke nur bedingt geeignet. Ursache hierfür ist die meist polymodale Verteilung der Werte innerhalb diskreter Kartiereinheiten. Die eigens entwickelten Indizes (H-Index, Interdezil₈₀-Bereich und 2V_{max}) hingegen erlauben dem Kartenutzer auch bei mehrgipfeligen Verteilungen eine adäquate Abschätzung des Histogrammverlaufs. Die Variabilität ausgewiesener Kartiereinheiten lässt sich schnell abschätzen, da alle Maße auf Prozentangaben basieren. Dadurch ist eine Verwendung der Indizes auch für taxonomische Informationen auf der Nominalskala (z.B. Bodentypen) möglich. Somit könnten heutige Kartenwerke, deren Grenzziehungen auf Grund bodengenetischer Faktoren vorgenommen wurde, mit derartigen Heterogenitätsmaßen ausgestattet werden.

Die Heterogenität originärer Bodenkarten ist sehr unterschiedlich. In lössdominierten Kartiereinheiten ist die Variabilität der Kornfraktionen mit H-Indizes zwischen 75 %–95 % sehr gering. Die z.T. vorkommende leichte Erhöhung der Varianz mit steigender Profiltiefe kann durch eine neue Attributierung der hinterlegten Karteninhalte verringert werden.

Lössfreie Kartiereinheiten mittelmaßstäbiger Bodenkarten sind z.T. sehr heterogen. Die Homogenitätsindizes liegen im Mittel in den Oberböden für die Schluff- und Tongehalte bei etwa 50 % und für die Tongehalte bei 75 %. Minimale Indizes erreichen etwa 30 %. Ursache für die starken Varianzen ist die Generalisierung einer mittelmaßstäbigen Bodenkarte. Daher kann keine Reduzierung der Varianzen durch eine neue Attributierung der Karteninhalte erfolgen. Die Minimierung der Heterogenität lössfreier Kartiereinheiten ist nur durch eine Disaggregation der Areale zu erreichen.

Die Heterogenität der Kalkgehalte mittelmaßstäbiger Bodenkarten kann innerhalb dieser Arbeit nur eingeschränkt beurteilt werden, da der Stichprobenumfang für kalkhaltige Areale im Referenzdatensatz sehr gering ist. Die geprüften Kartiereinheiten sind auf der Basis des Referenzdatensatzes als sehr heterogen einzustufen. Ursache für diese erhöhte Varianz ist sowohl der Generalisierungsgrad der Karte als auch die Grenzlinienziehung einzelner Kartiereinheiten.

Das entwickelte Disaggregierungsmodell liefert sehr gute Ergebnisse bei der Reduzierung der Heterogenität in lössfreien Arealen. In der ersten Stufe (Informationsschicht Petrographie) erreicht das Modell stärkere Varianzminimierungen als in der zweiten (Informationsschicht Relief). Die Homogenitätsindizes der Kornfraktionen liegen nach dem Durchlaufen beider Disaggregierungsstufen zwischen 70 %–90 %. Minimale Indizes betragen etwa 50 %. Das Modell ist in der Lage, die Homogenität der Kornfraktionen im Mittel um 20 %–25 % zu steigern.

Der verwendete Modellalgorithmus ist für vektorbasierte Ansätze entwickelt, da seitens der Behörden fast ausnahmslos diese Karteninformation zur Verfügung gestellt wird. Das Modell sieht die Verschneidung diskreter Karteninformationen vor. Hier liegt auch ein Schwachpunkt des Ansatzes: Durch die Überlagerung unterschiedlicher Vektorinformationen werden auch sehr kleine Areale erzeugt. Die Entfernung der Kleinstgeometrien erfolgt in einem zweiten Schritt. Dies ist z.T. sehr zeit- und rechenintensiv, da neben Expertenwissen auch ein erweitertes GIS-Fachwissen nötig ist. In der neuen BK50 des Landes Niedersachsen (vgl. BENNE et al. 2003, CAPELLE et al. 2003, GEHRT et al. 2003, LANGNER et al. 2003, SPONAGEL et al. 2003) erfolgt die Grenzziehung der Kartiereinheiten anhand der geologi-

schen Karte 1:50.000. Übereinstimmende Grenzziehungen verhindern bei der vektorbasierten Erstellung der „Rohkarten“ eine zu starke Erzeugung von Kleinstgeometrien.

Die Effektivität des entwickelten Disaggregierungsmodells ist in der ersten Stufe (Petrographie) sehr stark vom Gütezustand der verwendeten geologischen Karte abhängig. Dies zeigte sich sehr deutlich bei der Validierung des Modells. In der zweiten Disaggregierungsstufe bereitete vor allem die sehr geringe Korrelation der Reliefparameter mit den Bodenbasisdaten erhebliche Probleme. Ein weiteres Problem ist die Festlegung von Klassengrenzen, da Reliefparameter durch erneute Klassifizierung in eine Vektorkarte überführt werden müssen. Die verwendete Informationsschicht SARA1 hat den Vorteil, dass bereits programmintern eine Vektorkarte erzeugt wird. Außerdem kann die Berechnung auch auf einem weniger hoch aufgelösten Geländemodell erfolgen. In der neuen BK50 wird zur Konzeptkartenerstellung ebenfalls ein differenzierteres, aber durchaus mit SARA1 vergleichbares, Reliefgliederungsverfahren zur Grenzziehungsfindung verwendet.

Eine Modellübertragung auf andere Gebiete im Niedersächsischen Berg- und Hügelland ist nach ersten Berechnungen für große Kartiereinheiten möglich. Hier werden ähnliche Modalwerte für die einzelnen Faktorkombinationen aus BÜK50-Kartiereinheit, Petrographie und SARA1 erzeugt. Die Abschätzung eines allgemein gültigen Heterogenitätsmaßes für originäre BÜK50-Profileinheiten ist auf Basis der für diese Untersuchung vorhandenen Daten nicht möglich. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Flächeninhalte der Kartiereinheiten ist ein Vergleich nicht ohne Erweiterung des Datenumfanges durchführbar.

Bodendaten zeigen einen erheblichen Skaleneffekt auf Modelleingangsdaten bzw. modellierte Größen. In lössfreien Arealen unterscheiden sich die K-Faktoren im Mittel um 0,21. Die vom Disaggregierungsmodell erzeugten Bodendaten reduzieren diesen Faktor auf 0,16. Der Skaleneffekt der Bodendaten (Maßstäbe 1:50.000 / 1:5.000) hat auch einen deutlichen Einfluss auf die Prognoseergebnisse physikalischer Erosionsprognosemodelle (Bsp. Erosion-3D). Die Unterschiede in der Prognose bei der Verwendung unterschiedlicher Kartenmaßstäbe als Eingangsdaten für die Modellierung steigen mit der Dauer und der Höhe eines Regenereignisses stark an. Bei einem 2-jährigen Regenereignis von 10 Minuten Dauer (Anbaufrucht Winterweizen) unterscheiden sich die Prognoseergebnisse im Mittel um 1,2 [t/(ha)]. Diese Werte erhöhen sich auf 2,2 [t/(ha)] bzw. 5,2 [t/(ha)], wenn es sich um ein 10- bzw. 100-jähriges Ereignis handelt. Die mit dem Disaggregierungsmodell erzeugten Bodendaten sind in der Lage diese Differenz für ein 10-jähriges Ereignis um 25 % und für ein 100-jähriges Ereignis um etwa 30 % zu reduzieren.

Ob in der Zukunft für Bodenkarten primär Raster- oder Vektoransätze zum Einsatz kommen werden, lässt sich an dieser Stelle nur schwer prognostizieren. Rasterbasierte Ansätze haben z.T. spezifische Vorteile, sind aber im Praxiseinsatz kaum verbreitet. Da in der Bundesrepublik Deutschland bereits für fast alle Bundesländer (vgl. hierzu LÖSEL, 2005) sehr hoch aufgelöste Vektorkarten vorhanden sind, wird höchstwahrscheinlich auf der Basis dieser Datengrundlage weiter gearbeitet werden. Die digitale Bereitstellung der Bodenschätzungsdaten, an denen fast alle Bundesländer z.Zt. arbeiten, unterstreicht diese Vermutung. Neue rasterbasierte Ansätze wie z.B. neuronale Netzwerke (vgl. hierzu BEHRENS et al., 2005) werden eher zur Grenzlinienziehung eingesetzt. Nach dem Einsatz rasterbasierter Methoden erfolgt zumindest für deutsche Kartengrundlagen häufig eine erneute Vektorisierung, da der Endnutzer von Bodenkarten Vektorkarten von den Landesämtern erwartet.

Falls die Landesämter weiterhin Vektorkarten bereitstellen, ist eine Kennzeichnung der Karteninhalte durch Heterogenitätsmaße erforderlich. Aktuell arbeiten verschiedene boden-

kundliche und landeskundliche Dienste an der Entwicklung von Indizes für Bodenkarten. So hat A. BAURIEGEL (vgl. Bauriegel, 2004) für das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe auf der diesjährigen Jahrestagung (2005) der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft ein Konzept für das Land Brandenburg vorgestellt, in dem Kennwerte mit Heterogenitätsmaßen versehen werden. Im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung werden z.Zt. Qualitätsstandards für Bodenkartenkonzepte erarbeitet, in denen Heterogenitätsmaße eine bedeutende Rolle spielen.

12 Literaturverzeichnis

ALTMANN, R. & HAASE, G. (1984): Merkmalsvariabilität, Kontrast und Arealsheterogenität als Eigenschaft der Landschaftsstruktur. In: Wiss. Mitt. Inst. f. Geogr. u. Geoökol. Adw d. DDR, Band 11, 121–136.

AMOS, D. F. & WHITESIDE, E. P. (1975): Mapping accuracy of a contemporary soil survey in an urbanizing area. In: Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39: 973–942.

ARBEITSGRUPPE BODEN (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. 3. Auflage.

ARBEITSGRUPPE BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Auflage.

AVISSAR, R. (1995): Scaling of Land-Atmosphere Interactions: An Atmospheric Modelling Perspective. In: Hydrological Processes, 9:679–695.

BARETH, G. (2001): Disaggregation der Bodenübersichtskarte 1:200.000 anhand einer Reliefanalyse des DHM50. In: GIS, Zschr. f. raumbezogene Informationen und Entscheidungen, Wichmann Verlag: Heidelberg, Heft 12, 2001, 33–40.

BAUMANN, R. (2001): Indikation der Selbstorganisationsfähigkeit terrestrischer Ökosysteme. Dissertation. Christian-Albrechts-Universität, Kiel.

Bauriegel, A. (2004): Methoden zur Ableitung und Parametrisierung von flächenbezogenen Profil- und Horizontdaten - Am Beispiel der Bodenübersichtskarte des Landes Brandenburg im Maßstab 1:300 000. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin.

BECKER, A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: KLEEGERG, H.-B. [Hrsg.] (1992): Regionalisierung in der Hydrologie. Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung. VCH, Weinheim, 16–43.

BECKER, A. & LAHMER, W. (1997): Disaggregation und Skalierung bei der Parameterermittlung für die hydrologische Modellierung und Regionalisierung. In: G. H. SCHMIDT (Hrsg.), Modellierung in der Hydrologie. Symposium aus Anlass des 30-jährigen Bestehens der Dresdener Schule der Hydrologie. 22–24. Sept. 1997. TU Dresden, Dresden.

BECKETT, P. H. T. & WEBSTER, R. (1971): Soil variability: a review. Soils and Fertilizers, 34, 1–15.

BEHRENS, T.; FÖRSTER, H.; SCHOLTEN, T.; STEINRÜCKEN, U.; SPIES, E.-D.; GOLDSCHMITT, M. (2005): Digital Soil Mapping using Artificial Neural Networks. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science. J. Plant Nutr. Soil Sci. 2005, 168, 21–33.

BENNE, I.; BOESS, J.; CAPELLE, A.; GEHRT, E.; LANGNER, S.; SPONAGEL, H. (2003): Die BK50 im NIBIS®: Ein neuer Standard. Die Standards bei der Erstellung von Bodenkarten. In: Mitt. Dt. Bodenkdl. GeS.102, 429–430. Oldenburg.

BIERKENS, M. F. P.; FINKE, P. A.; DE WILLIGEN, P. (2000): Upscaling and downscaling methods for environmental research. Kluwer Academic Publishers.

BIRKELAND, P. W (1999): Soils and Geomorphology. Third Edition.

BISHOP, T. F. A.; MC BRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. (2001): Measuring the quality of digital maps using information criteria. *GEODERMA* 103, 95–111.

BLÖSCHL, G. & SIVAPALAN, M. (1995): Scale issues in hydrological modelling. A review. In: *Hydrological Processes*, Vol. 9, 251–290.

BLÖSCHL, G. (2004): (Scale and scaling in hydrology. Habilitationsschrift. Technische Universität Wien.

BOCK, M. & KÖTHE, R. (2005): Regionalisierung von Bodenkennwerten zur Ableitung von Funktionalen Bodenkonzeptkarten. In: MÖLLER, M. & HELBIG, H. (2005): GIS-gestützte Bewertung von Bodenfunktionen. *Datengrundlagen und Lösungsansätze*. 35–44.

BÖHNER, J. & KÖTHE, R. (2003): Bodenregionalisierung und Prozessmodellierung: Instrumente für den Bodenschutz. In *Petermanns Geographische Mitteilungen* 2003/3, 72–82.

BOESS, J.; MÜLLER, U.; SBRESNY, J. (1999): Erläuterungen zur digitalen bodenkundlichen Übersichtskarte 1:50.000 (Bük50) von Niedersachsen. In: *Arbeitshefte Boden*, 3–60.

BORK, H. R. (1982): Die holozäne Relief- und Bodenentwicklung im Untereichsfeld und im südwestlichen Harzvorland. Dissertation. Universität Braunschweig.

BOSSEL, H. (1994): Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Braunschweig – Wiesbaden.

BRILLOUIN, L. (1962): *Science and Information Theory*.

BRINKMANN, J. (2002): Räumliche Variabilität von Böden und Bodeneigenschaften aus dem Landwirtschaftlichen Versuchsgut Frankenforst im Pleiser Hügelland. Dissertation. Rheinische Friedrich Wilhelms-Universität Bonn.

BRUNOTTE, E. & GARLEFF, K. (1979): Geomorphologische Gefügemuster des niedersächsischen Berglandes in Abhängigkeit von Tektonik und Halokinese, Resistenzverhalten und Abflusssystemen. *Festschrift zum 42. Deutschen Geographentag*, 21–42.

BURROUGH, P. A. (1993): Soil variability: a late 20th century view. *Soils and fertilizers*, 56, 529–562.

CAPELLE, A.; BENNE, I.; BOESS, J.; GEHRT, E.; LANGNER, S.; SPONAGEL, H. (2003): Die BK50 im NIBIS®: Ein neuer Standard. Standardisierte Auswertungen der Bodenschätzung für die GK50. In: *Mitt. Dt. Bodenkdl. GeS.102*, 439–440. Oldenburg.

CONRAD, O. (1998): Die Ableitung hydrologisch relevanter Reliefparameter aus Digitalen Geländemodellen. Diplomarbeit. Physische Geographie der Georg-August-Universität Göttingen.

gen. Veröffentlicht im Internet: <http://www.geogr.uni-goettingen.de/pg/saga/digem/>; (16.02.2000).

DAMMERS, E. (1993): Measurements in the ex post evaluation of forecasts. In: Quality and Quantity, Vol. 27, P. 31–45.

DEINLEIN, R. & BÖHM, A. (2000): Modeling Overland Flow and soil Erosion for a Military training area in Southern Germany. In: SCHMIDT, J. (2000): Soil erosion. Application of physically based models, p. 163–178.

DE ROO, A.P.J. (1993): Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using Geographical Information Systems. Dissertation. Universität Utrecht.

DEUTSCHER WETTERDIENST (1964): Klima-Atlas von Niedersachsen. Selbstverlag Deutscher Wetterdienst, Offenbach.

DEUTSCHER WETTERDIENST (1997): KOordinierte STarkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen, Version 1.0. Vertrieb: itwh Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Hannover.

DIJKERMAN, J. C. (1974): Pedology as a science: the role of data, models and theories in the study of natural soil systems. In: Geoderma, 11, 73–93.

DIKAU, R. (1986): Experimentelle Untersuchungen zu Oberflächenabfluß und Bodenabtrag von Meßparzellen und landwirtschaftlichen Nutzflächen. Heidelberger Geographische Arbeiten, Vol. 81. Geographisches Institut Universität Heidelberg.

DIKAU, R., FRIEDRICH, K.; LESER, H. (1999): Die Aufnahme und Erfassung landschaftsökologischer Daten. In: ZEPP, H. & MÜLLER, M. J. (1999): Landschaftsökologische Erfassungsstandards, Forschungen zur deutschen Landeskunde Bd. 244, Flensburg, S.29–328.

DIN 4022-1 (Ausgabe:1987-09): Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels. Deutsches Institut für Normung.

DREYHAUPT, J. (2002): Die Bedeutung der Heterogenität von Boden, Klima und Landnutzung für die Regionalisierung von Modellzustandsgrößen. Dissertation. Universität Bayreuth.

DUTTMANN, R. (1999): Partikuläre Stoffverlagerungen in Landschaften. Ansätze zur flächenhaften Vorhersage von Transportpfaden und Stoffumlagerungen auf verschiedenen Maßstabsebenen unter besonderer Berücksichtigung räumlich-zeitlicher Änderungen der Bodenfeuchte. Hannover.

ELBRACHT, J. (2000): Bericht zur Revisionskartierung der geologischen Karte von Niedersachsen 1:25.000, Blatt Nr. 4426 Ebergötzen. NLFb, Hannover, 20 S., (unveröff.)

ELBRACHT, J. (2001): Geologische Karte von Niedersachsen 1:25.000, Blatt Nr. 4426 Ebergötzen: NLFb, Hannover.

FINKE, P. A. (2000): Updating the (1:50.000) Dutch groundwater table class map by statistical methods: an analysis of quality versus cost. – *Geoderma*, 97, 329–350.

FUCHS, M. (2002): Methoden zur objektiven Ableitung von Bodenkarten im Folgemaßstab. Unterstützung der geometrisch-begrifflichen Generalisierung von Bodenkarten durch erweiterte Werkzeuge in einem Geo-Informationssystem.

GEHRT, E. & BOESS, J. (1996): Ergebnisse der bodenkundlichen Kartierung der Testgebiete im DFG-Forschungsvorhaben „Digi-Relief“. [unveröff., NLFb, Hannover (= Anlage B zu HAGEDORN & KÖTHE (1996))].

GEHRT, E.; BENNE, I.; BOESS, J.; CAPELLE, A.; LANGNER, S.; SPONAGEL, H. (2003): Die BK50 im NIBIS®: Ein neuer Standard. Die Standards im Produkt. In: *Mitt. Dt. Bodenkdl. GeS.* 102, 475–476. Oldenburg.

GREEN, W. H. & AMPT, G. A. (1911): Studies on soil physics. I: The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4, 1–24.

HAASE, G. (1973): Zur Ausgliederung von Raumeinheiten der chorischen und der regionischen Dimension – dargestellt am Beispiel der Bodengeographie. In: *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 117/2, 80–90.

Hagedorn, J. (1999): Fachwissenschaftliche Expertise: Weiterentwicklung von Verfahren zur Reliefanalyse, Klimaregionalisierung, Prozeßparametrisierung und Regionalisierung von Bodenmerkmalen. Bearbeitet von: BÖHNER, J.; CONRAD, O.; KÖTHE, R. U. RINGELER, A.

HARD, G. (1970): Exzessive Bodenerosion um und nach 1800. In: *Erdkunde* 24: 290–308.

HENGL, T. (2003): Visualisation of uncertainty using the HSI colour model: computations with colours. 7th International Conference on Geo Computation (CD-ROM), pp. 8.

HENGL T.; WALVOORT D. J. J.; BROWN A. (2004): A double continuous approach to visualisation and analysis of categorical maps. In: *Int. Jou. of Geographical Information Science*, Vol. 18(2): p. 183–202.

HENNINGS, V. (1991): Die Bedeutung der räumlichen Variabilität bodenkundlicher Basisdaten für aktuelle und zukünftige Kartiertechniken, dargestellt an einem Beispielgebiet im nördlichen Harzvorland. In: *Geol. Jahrbuch, Reihe F (Bodenkunde)* 28.

HERRMANN, A. (1957): Bericht über die Kartierung Ebergötzen (Meßtischblatt Waake 4426). *Ber. Arch. nieders. L.-A. Bodenforschung*. Hannover [unveröff.].

HERRMANN, A. (1961): Der mittlere Buntsandstein im nordwestlichen Eichsfeld und im Ahls- hausener Buntsandsteinsattel bei Salzderhelden. *Geol. Jb.*, 78, 347–386.

HEUVELINK, G. B. M. (1998): Uncertainty analysis in environmental modelling under a change of spatial scale. In: FINKE, P. A., BOUMA, J., HOOSBECK, M. R. (1998): Soil and water quality at different scales, 255–264.

- HEUVELINK, G. B. M. & WEBSTER, R. (1998): Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma*, 100, 269–301.
- HINZE, C. (1967): Der obere Buntsandstein (Röt) im südniedersächsischen Bergland. *Geol. Jb.*, 84, S.637–716.
- HOOSBEEK, M. R; BRYANT, R. B. (1992): Towards the quantitative modelling of pedogenesis – a review. In: *Geoderma*, 55, 183–210.
- HOOSBEEK, M. R & Bouma, J. (1998): Some considerations on methods for spatially aggregating and disaggregating soil information. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 50, 51–62.
- HURLBERT, S. H. (1971): The nonconcept of species diversity: a critique and alternative parameter. In: *Ecology*, Vol. 52, p. 577–585.
- JENNY, H. (1941): *Factors of soil formation. A system of quantitative pedology.* New York.
- JUST, R. & POPE, R. (1999): The agricultural producer: theory and statistical measurement. In: GARDNER, B. & RAUSSER, C. (eds); *Handbook of Agricultural Economics.* P. 631–741.
- KEYFITZ, N. (1972): On future population. In: *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 67, No. 338, 347–363.
- KLAUSING, C. & OSTMANN, I. (1993): Bodenübersichtskarte von Niedersachsen 1:50.000 (BÜK50). In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Band 72, 971–972.
- KLEEBOURG, H.-B. [HRSG.] (1992): *Regionalisierung in der Hydrologie. Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung.* VCH, Weinheim.
- KLEEBOURG, H.- B. & CEMUS, J. (1992): Regionalisierung hydrologischer Daten – Definitionen. – In: KLEEBOURG, H.-B. [Hrsg.] (1992): *Regionalisierung in der Hydrologie. Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung.* VCH, Weinheim, 1–15.
- KLEEBOURG, H.- B. (1999): Zum Problem der Regionalisierung in der Hydrologie. In: KLEEBOURG, H.-B.; MAUSER, W.; PESCHKE, G.; STREIT, U. (Hrsg.), *Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 bis 1998)*, 3–12. Wiley-VCH, Weinheim, New York.
- KNISEL, W. G. [ED]. 1980: *CREAMS: A Field-Scale Model for Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems.* Conservation Research Report 26, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- KÖTHE, R. & LEHMEIER, F. (1994): *SARA-Benutzerhandbuch. Morphometrie Programm.* Göttingen.
- LANE, L. J. & NEARING, M. A. (1989): *USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile model documentation.* USDA-ARS, National Soil Erosion Lab., West-Lafayette.

LANG, S. (1999): Aspekte und Spezifika der nordamerikanischen landscape metrics innerhalb der Landschaftsökologie und experimentelle Untersuchungen zum Proximity Index. Diplomarbeit am Institut für Geographie und angewandte Geoinformatik der Universität Salzburg. Quelle: Internet www.geo.sbg.ac.at/staff/lang/dip.pdf; (16.04.2002).

LANGNER, S.; BENNE, I.; BOESS, J.; CAPELLE, A.; GEHRT, E.; SPONAGEL, H. (2003): Die BK50 im NIBIS®: Ein neuer Standard. Die Standards bei der Erstellung der Konzeptkarten. In: Mitt. Dt. Bodenkdl. GeS.102, S.519–520. Oldenburg.

LESER, H. (1997): Landschaftsökologie. Ansatz, Modell, Methodik, Anwendung. Mit einem Beitrag zum Prozess-Korrelations-Systemmodell von Thomas Mosimann. 3. Auflage.

LIENERT, G. A. & RAATZ, U. (1994): Testaufbau und Testanalyse. Weinheim. Psychologie Verlags Union.

LOEVINGER, J. (1947): A systematic approach to the construction and evaluation of tests of ability.

LÖSEL, G. & HENNINGS, V. (2003): Legendenerweiterung kleinmaßstäbiger Bodenkarten durch Heterogenitätsmaße – Notwendigkeit und Möglichkeiten. – Vortrag; Tagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft in Frankfurt/Oder.

LÖSEL, G. (2005): Informationsgüte kleinmasstäbiger Bodenkarten : Probleme und Entwicklungsmöglichkeiten. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften und Geographie der Universität Hannover.

MACMILLAN, R.; JONES, R.; MCNABB, D. (2004): Defining a hierarchy of spatial entities for environmental analysis and modelling using digital elevation models (DEMs). In: Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 28,175–200.

MARGALEF, R. (1958): Information theory in ecology. In General Systems, V. 3, 36–71.

MCBRATNEY, A. B.; MENDONCA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. (2003): On digital soil mapping. Geoderma 117, 3–52.

MCBRATNEY, A. B. (1998): Some considerations on methods for spatially aggregating and disaggregating soil information. In: Nutrient Cycling in Agroecosystems, 50, 51–62.

MCINTOSH, R. P. (1967): An index of diversity and the relation of certain concepts to diversity. In: Ecology, Vol. 48, p. 392–404.

MENHINICK, E. F. (1964): A comparison of some species individuals diversity indices applied to samples of field insects. In: Ecology, Vol. 45, p. 859–861.

MICHAEL, A. (1999): Anwendung des physikalisch begründeten Erosionsprognosemodells EROSION 2D/3D : empirische Ansätze zur Ableitung der Modellparameter. Dissertation. Freiberg.

MILNE, G. (1935): Composite units for the mapping of complex soil associations. Transactions of the 3rd International Congress of Soil Science, Vol. 1, p.345–347;

MILNE, G. (1947): A Soil Reconnaissance Journey through parts of Tanganyika Territory, Dec. 1935 to Feb. 1936. In: *Journal of Ecology*, Vol. 35, p.192–265.

MÖLLER, M. (2005): DISAGGREGIERUNG VON BODENINFORMATIONEN AUF DER GRUNDLAGE DIGITALER RELIEFDATEN. IN: MÖLLER, M. & HELBIG, H. (2005): GIS-gestützte Bewertung von Bodenfunktionen. Datengrundlagen und Lösungsansätze. S.67–89.

MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. (1993): Soil attribute prediction using terrain analysis. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 57, p.443–452.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. (1994): Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications. In: BEVEN, K. J. & MOORE, I. D. [EDS.] (1994): *Terrain analysis and distributed modelling in hydrology. Advances in Hydrological Processes*, p. 7-34.

MOSIMANN, TH. & SANDERS, S. (2004): Bodenerosion selber abschätzen. Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater in Niedersachsen. Hrsg: Landwirtschaftskammer Hannover, Hannover, Hannover, 27 S. (je ein Schlüssel für das südliche und nördliche Niedersachsen).

MURSCHEL, B & LIEBEMANN, K. -H. (1995): Automatische Reliefanalyse zur Ableitung räumlicher Bodeninformationen aus der Bodenübersichtskarte. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Vol. 76, 1153–1156.

NAGEL, U. & WUNDERLICH, H. G. (1976): Geologisches Blockbild der Umgebung von Göttingen. Veröffentlichungen des Niedersächsischen Instituts für Landeskunde und Landesentwicklung an der Universität Göttingen : Reihe A, Forschungen zur Landes- und Volkskunde ; 91

NEUMAIER, A. (1990): *Interval Methods for Systems of Equations*. Cambridge University Press.

NEUMEISTER, H. (1999): Heterogenität – Grundeigenschaft der räumlichen Differenzierung in der Landschaft. In: Ernst Neefs *Landschaftslehre heute*. Petermanns Geographische Mitteilungen, Ergänzungsheft 294.

NICOLIS, G. & PRIGOGINE I. (1989): *Exploring complexity*. W. H. Freeman, New York, 313 p.

NEEF, E. (1963): Dimensionen Geographischer Betrachtungen. In: *Forschungen und Fortschritte* 37, 361–363.

ODEH, I. A. O & MCBRATNEY, A. B. (2001): Estimating uncertainty in soil models (Pedometrics '99). *Geoderma*, 103, p. 1.

OELKERS, K. – H. (1984): *Datenschlüssel Bodenkunde-Symbole für die automatische Datenverarbeitung bodenkundlicher Geländedaten*.

OTTE, F. (1988): Über die quantitative Erfassung der Bodenvariabilität und Gütemaße für großmaßstäbige Karten. *Schriftenreihe d. Inst. f. Pflanzenernähr. u. Bodenk. d. Uni. Kiel*, 2.

- PARK, S.J.; MCSWEENEY, K.; LOWERY, B. (2001): Identification of the spatial distribution of soils using a process-based terrain characterization. In: *Geoderma*, Vol. 103, p. 249–272.
- PARK, S. & VLEK, P. (2002): Environmental correlation of three-dimensional soil spatial variability: a comparison of three adaptive techniques. In: *Geoderma*, Vol. 103, p. 117–140.
- PENLAP, E.K.; C. MATULLA, H. VON STORCH AND F. K. MKANKAM (2003): Empirical downscaling in the tropics – possible changes of the little rainy season (March-June) in Cameroon. In: *GKSS Report 2003/11*
- PENNOCK, D.J.; ZEBARTH, B. J.; DE JONG, E. (1987): Landform Classification and Soil Distribution in Hummocky Terrain, Saskatchewan, Canada. In: *Geoderma*, 40, pp. 297–315.
- PENNOCK, D. J.; ANDERSON, D. W.; DE JONG, E.(1994). Landscape-scale changes in indicators of soil quality due to cultivation in Saskatchewan, Canada. In: *Geoderma*, 64, pp. 1–19.
- PERRIER, E. R. & WILDING, L. P. (1986): An evaluation of computational methods for field uniformity studies. In: *Advances in agronomy*, 39, 265–312.
- PHILLIPS, J. D. (1993): Stability implications of the state factor model of soils as a nonlinear dynamical system. *Geoderma*, 58, ISSUES 1–2, 1–15
- PLATE, E. J. (1992): Skalen in der Hydrologie: Zur Definition von Begriffen. In: Kleeberg, H.- B. [HRSG.] (1992): Regionalisierung in der Hydrologie. Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung. VCH, Weinheim, 33–43.
- POESEN, J.; BOARDMAN, J.; WILCOX, B.; VALENTIN, C. (1996): Water erosion monitoring and experimentation for global change studies. In: *J. Soil & Wat. Conserv.* 51, 386–390.
- RAUPACH, M. R. & FINNIGAN, J. J. (1995): Scale Issues in Boundary-Layer Meteorology: Surface Energy Balances in Heterogeneous Terrain. In: *Hydrological Processes*, 9:589-612.
- REUTER, I. H. (2004): Spatial crop and soil landscape processes under special consideration of relief information in a loess landscape. Dissertation.
- RICHARDSON, J. L. & EDMONDS, W. J. (1987): Linear regression estimations of JENNY's relative effectiveness of state factors equation. In: *J. Soil Sci.*, 144, 203–208.
- RICHTER, G. (1965): Bodenerosion – Schäden und gefährdete Gebiete in der Bundesrepublik Deutschland. – *Forschungen zur deutschen Landeskunde* 152.
- RICHTER, G. (1998): Bodenerosion – Analyse und Bilanz eines Umweltproblems. Wiss. Buchgesellschaft Darmstadt.
- ROHDE, P. (1979): Der Stand der geologischen Landesaufnahme in Niedersachsen. In: *N. Arch. Nds.*, Band 28, 241–244.

- ROSSITER, D. G. (2000): Methodology for Soil Resource Inventories. 2nd Revised Version. Soil Science Division. International Institute for Aerospace Survey & Earth Sciences (ITC). March 2000.
- SACHS, L. (1999): Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden. 9. Auflage.
- SBRESNY, J. (1997): Fehlerquellen in raumbezogenen Informationssystemen.
- SCHMIDT, R. (1987): Bodenprozesse und Struktur der Bodendecke. In: Wiss. Abh. Geogr. Ges. DDR, Bd. 19, 199–203.
- SCHMIDT, J. (1991): A mathematical model to simulate rainfall erosion. In: Catena Suppl., 19: 101–109.
- SCHMIDT, J.; von WERNER, M.; MICHAEL, A. (1996): Erosion 2D. Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser.
- SCHMIDT, J. (1998): Modellbildung und Prognose zur Wassererosion. In: RICHTER, G. (1998): Bodenerosion – Analyse und Bilanz eines Umweltproblems. S.137–151.
- SCHMIDT, R. (1997): Grundsätze der Bodenvergesellschaftung. In: Handbuch der Bodenkunde, Ecomed.
- SCHOLTEN, T. (2003): Beitrag zur flächendeckenden Ableitung der Verbreitungssystematik und Eigenschaften periglaziärer Lagen in deutschen Mittelgebirgen. Relief Boden Paläoklima, 19.
- SCHUNKE, E. (1979): Geomorphologische Erläuterungen zum Orohydrographischen Blockbild der Umgebung von Göttingen. In: Neues Archiv für Niedersachsen, Band 28/2, S.200–222.
- SCHWERTMANN, U.; VOGL, W.; KAINZ, M. (1990): Bodenerosion durch Wasser. 2. Auflage, Stuttgart, Ulmer Verlag.
- SIMPSON, E. H. (1949): Measurement of diversity. In: Nature, Vol. 163, 688.
- SINOWSKI, W. (1995): Die dreidimensionale Variabilität von Bodeneigenschaften-Ausmaß, Ursachen und Interpolation. In: FAM-Berichte (FORSCHUNGSVERBUND AGRARÖKOSYSTEME), 7.
- SHANNON, C. E. & WEAVER, W. (1949): The mathematical theory of communication.
- SMITH, B. & WILSON, J. B. (1996): A consumer's guide to evenness indices. In: Oikos – a journal of ecology, V. 76, p.70–82.
- SPONAGEL, H.; BENNE, I.; BOESS, J.; CAPELLE, A.; GEHRT, E.; LANGNER, S. (2003): Die BK50 im NIBIS®: Ein neuer Standard. In: Mitt. Dt. Bodenkdl. GeS.102, S.585–586. Oldenburg.
- STREUN, M. (2004): Einsatz von Grünbrachen zum Erosionsschutz. Diplomarbeit. Geographisches Institut der Universität Hannover. Unveröffentlicht.

- Syrbe, R. -U (1999) : RAUMGLIEDERUNGEN IM MITTLEREN MAßSTAB. IN: Zepp, H. & Müller, M. J. (1999): Landschaftsökologische ERFASSUNGSSTANDARDS, FORSCHUNGEN ZUR DEUTSCHEN LANDESKUNDE BD. 244, FLENSBURG, S.463–489.
- THÖLE, R. & MEYER, B. (1979): Bodengenetische und -ökologische Analyse eines Repräsentativ- Areal der Göttinger Muschelkalk-Scholle als landschaftsökologische Planungsgrundlage. Göttinger bodenkundliche Berichte ; 59. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. (1985): Applications of geostatistical to spatial studies of soil properties. In: Advances in agronomy, 38, 45–94.
- VINK, A. P. A. (1975): Land use in advancing agriculture.
- VON WERNER, M. (1995): GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten. Dissertation. Freie Universität Berlin.
- VON WERNER, M. (2002): Erosion – 3D. Version 3.0. Benutzerhandbuch.
- WAGENET, R. J. (1998): Scale issues in agroecological research chains. In: Nutrient Cycling in Agroecosystems, 50, 23–34.
- WEBER, R. (1995): Vergleich von Prognosen von künstlichen neuronalen Netzen von Arima-Modellen und der Spektralanalyse mit unterschiedlichen Gütemaßen. Quelle: Internet: <http://www.dr-ReneWeber.de/files/vergleich.Prognosen.PDF.;>(12.01.2003).
- WEBSTER, R. (2000): Is soil variation random? In: Geoderma, 97, 149–163.
- WENKEL, K. -O.; SCHULTZ, A. (1999): Vom Punkt zur Fläche – das Skalierungs- bzw. Regionalisierungsproblem aus der Sicht der Landschaftsmodellierung. In: Regionalisierung in der Landschaftsökologie. Fachtagung vom 31. März bis 2. April 1998, Zusammenfassung der Tagungsbeiträge. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH.
- WICKENKAMP, V. (1995): Flächendifferenzierte Erosions-Akkumulationsmodellierung im Gebiet Mehle (Niedersachsen) unter Einsatz des Geoökologischen Informationssystems GEO-KIS – Konzeption von Datenstrukturen und Datenausgabe, Anwendung des Modells Erosion-3D. Diplomarbeit. Geographisches Institut der Universität Hannover. Unveröffentlicht.
- WICKENKAMP, V.; DUTTMANN, R.; MOSIMANN, TH. (2000): A multiscale approach to predict soil erosion on cropland using empirical and physically based soil erosion models in a geographic information system. In: SCHMIDT, J. (2000): Soil erosion. Application of physically based models. Environmental science, Springer Berlin, Heidelberg, New York.
- WIENER, N. (1948): Cybernetics. MIT Press.
- WILDING, L. P. (1985): Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys. In: NIELSEN, D.R.; BOURMA, J. (Hrsg.): Soil spatial variability, 166–194.
- WILDING, L. P. & DREES, L. R. (1983): Spatial variability and pedology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E. & HALL, G. F. (1983): Pedogenesis and soil taxonomy. Elsevier, Amsterdam.

WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1965): Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocky-Mountains. Agriculture Handbook 282.

WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1978): Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook 537.

YAALON, D. H. (1975): Conceptual models in pedogenesis: can soil-forming functions be solved? *Geoderma*, 14, 189–205.

YOUNG, A. (1976): Tropical Soils and Soil Survey. Cambridge Geographical Studies, 9, Cambridge University Press.

YOUNG, R. A.; ONSTAD, C. A.; BOSCH, D. D.; ANDERSON, W. P. (1989): AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. – *Journal of soil and water conservation*, 44, 2, 168–173.

ZHU, A. & MACKAY, D. (2001): Effects of spatial detail of soil information on watershed modeling. *Journal of hydrology*, Vol. 248, 54–77.

ZORITA, E. & VON STORCH, H. (1997): A survey of statistical downscaling techniques. GKSS Report No 97/E/20.

13 Anhang

Bodenarten- untergruppe Kurzzeichen	Bodenarten- Untergruppe	Anteil der Hauptkornfraktionen [Masse-%]					
		Ton		Schluff		Sand	
		Gehalts- spanne	Metrisierte Klassenmitte	Gehalts- spanne	Metrisierte Klassenmitte	Gehalts- spanne	Metrisierte Klassenmitte
S		0-5	2	0-10	5	85-100	93
Su2	schwach schluffiger Sand	0-5	2	10-25	18	70-90	80
Sl2	schwach lehmiger Sand	5-8	7	5-25	15	67-90	78
Sl3	mittel lehmiger sand	8-12	10	7-40	24	48-85	66
Sl4	stark lehmiger Sand	12-17	14	13-40	27	45-75	59
Ul3	mittel lehmiger Schluff	12-17	15	50-60	55	23-38	30
Ul4	stark lehmiger Schluff	17-25	21	50-60	55	15-33	24
Ut2	schwach toniger Schluff	8-12	10	60-92	76	0-32	14
Ut3	mittel toniger Schluff	12-17	15	60-88	74	0-28	11
Ut4	stark toniger Schluff	17-25	21	60-83	71	0-23	8
Lsu	schluffig-sandiger Lehm	15-25	20	40-50	45	25-45	35
Ls3	mittel sandiger Lehm	15-25	20	28-40	34	35-55	46
Ls4	stark sandiger Lehm	17-25	21	15-28	21	47-68	58
Lt2	schwach toniger Lehm	25-35	30	34-45	40	20-40	30
Lt3	mittel toniger Lehm	35-45	40	30-40	35	15-35	25
Lts	sandig-toniger- Lehm	25-45	35	18-35	28	25-57	37
Tu2	schwach schluffiger Ton	45-65	55	30-55	43	0-37	2
Tu3	mittel schluffiger Ton	35-45	40	40-65	52	0-35	8
Tu4	stark schluffiger Ton	25-35	30	45-75	60	0-40	10

Tabelle A1: Übersetzung der vorhandenen Bodenartenuntergruppen nach KA3 in metrische Gewichtsprozentangaben der drei Hauptkorngrößen.

Kurzzeichen	Bezeichnung	Klasse [Masse-%]	Übersetzung [Masse-%]
c0	carbonatfrei	0	0
c1	sehr carbonatarm	0–0,5	0,25
c2	carbonatarm	0,5–2	1,25
c3*	carbonathaltig	2–10	6
c4	carbonatreich	10–25	17,5
c5	sehr carbonatreich	25–50	37,5
c6	extrem carbonatreich	>50	50

Tabelle A2: Übersetzung der Carbonatgehalte nach KA3 in metrische Klassenmittelwerte.

Kurzzeichen	Bezeichnung	Klasse [Masse.-.%]	Übersetzung [Masse.-.%]
h0	nur stellenweise humos	0	0
h1	sehr schwach humos	<1	0,5
h2	schwach humos	1–2	1,5
h3	(mittel) humos	2–4	3
h4	stark humos	4–8	6
h5	sehr stark humos	8–15	11,5
h5	extrem humos	15–30	22,5

Tabelle A3: Übersetzung der Humusgehalte nach KA3 in metrische Klassenmittelwerte.

Petrographische Information	Kürzel
Feinsandstein- Mittelsandstein	[^] fs- [^] ms
Grobsandstein - Feinsandstein	[^] gs- [^] fs
Kalkstein	[^] k
Schaumkalk	[^] kp
Mergelstein	[^] m
Tonstein	[^] t
Tonstein - Schluffstein	[^] t- [^] u
Torf-Kies	T-G
Ton-Stein	T-X
Schluff	U
Schluff-Kies	U-G
Wechsellagernd (Feinsandstein-Mittelsandstein, Sapropel-Gesteine, Schluffstein)	wl([^] fs- [^] ms, [^] f, [^] u)
Torf	H
Wasser (z. B. Seeburger See)	W
Mudde	F

Tabelle A4: Übersetzung der verwendeten petrographischen Kürzel.